

ББК 34.43я2
 К65
 УДК 669.018-419.8 (035)

Авторы: Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше, Ю. А. Быков, А. Г. Васильева, Г. П. Гардымов, И. С. Гершман, Э. Ч. Гини, М. Е. Дриц, А. А. Зябрев, И. В. Кириллов, С. И. Кишкина, Е. А. Курочкин, В. И. Кучерявый, В. И. Макарова, Т. А. Папайоти, Ж. П. Пастухова, М. Д. Перкас, А. Г. Рахштадт, А. П. Семенов, В. И. Силаева, В. Н. Симонов, Л. М. Соколенко, Т. В. Соловьева, В. И. Солонин, Г. Б. Строганов, В. И. Третьяков, Е. А. Ульянин, И. Н. Фридляндер, О. М. Ховова, К. П. Яценко

Рецензенты: В. В. Крымов, В. С. Фролов

Конструкционные материалы: Справочник/Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше и др.; Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1990. — 688 с.; ил. — (Основы проектирования машин).

ISBN 5-217-01112-2

Приведены сведения о составе, свойствах и назначении современных конструкционных материалов. Впервые классификация материалов и их описание представлены по основным эксплуатационным (служебным) требованиям, предъявляемым к деталям машин. Согласно этим требованиям материалы распределены по группам, каждая из которых определяется комплексом стандартных и нестандартных свойств, от которых зависит реализация эксплуатационных характеристик. Нетрадиционная классификация справочного материала поможет конструкторам и технологам на научно-технической основе выбирать материалы для деталей машин, приборов и приспособлений, а также назначать рациональные технологические процессы их обработки.

Для широкого круга инженерно-технических работников машиностроительной и приборостроительной промышленности; может быть полезен студентам вузов.

К 2703000000—215
 038 (01)—90 215—90

ББК 34.43я2

ISBN 5-217-01112-2

© Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше и др., 1990

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | | | |
|--|-----|--|-----|
| Предисловие (Б. Н. Арзамасов) | 7 | 4. Материалы, устойчивые к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок (Н. А. Буше) | 163 |
| Принятые условные обозначения | 10 | 5. Кавитационно-стойкие материалы (Н. А. Буше) | 167 |
| Глава I. Материалы с повышенной и высокой прочностью | 12 | 6. Антифрикционные материалы (Н. А. Буше, А. П. Семенов) | 171 |
| 1. Углеродистые и низколегированные конструкционные стали (А. Г. Васильева) | 12 | 7. Фрикционные материалы (Н. А. Буше, А. П. Семенов) | 189 |
| 2. Высокопрочные среднелегированные стали (С. И. Кишкина) | 23 | Глава IV. Материалы с высокими упругими свойствами (А. Г. Рахштадт, Ж. П. Пастухова) | 204 |
| 3. Высокопрочные высоколегированные (мартенситно-старующие) стали (О. М. Ховова, А. Г. Рахштадт, М. Д. Перкас) | 30 | 1. Классификация пружинных сплавов по основным способам упрочнения | 204 |
| Глава II. Материалы с повышенными технологическими свойствами | 49 | 2. Классификация пружинных сплавов по назначению | 205 |
| 1. Классификация чугунов для отливок (Э. Ч. Гини) | 49 | Глава V. Материалы малой плотности и высокой удельной прочности | 234 |
| 2. Физические и химические свойства чугуна (Э. Ч. Гини) | 57 | 1. Алюминиевые сплавы (Г. Б. Строганов) | 234 |
| 3. Механические и технологические свойства чугуна (Э. Ч. Гини) | 69 | 2. Магнелиевые сплавы (М. Е. Дриц) | 272 |
| 4. Легированный чугун со специальными свойствами (Э. Ч. Гини) | 82 | 3. Титановые сплавы (В. И. Силаева, Т. В. Соловьева) | 291 |
| 5. Латунни (И. С. Гершман) | 84 | 4. Бериллиевые сплавы (И. Н. Фридляндер, К. П. Яценко) | 321 |
| 6. Бронзы (И. С. Гершман) | 104 | 5. Полимерные материалы (А. А. Зябрев) | 338 |
| 7. Медно-никелевые сплавы (И. С. Гершман) | 114 | 6. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (А. А. Зябрев) | 341 |
| Глава III. Материалы триботехнического назначения | 131 | 7. Волокнистые металлические композиционные материалы (Г. П. Гардымов) | 349 |
| 1. Процесс изнашивания и методы повышения износостойкости (Н. А. Буше, А. П. Семенов) | 131 | 8. Эвтектические композиционные материалы (А. А. Зябрев) | 359 |
| 2. Износостойкие материалы высокой твердости (А. П. Семенов) | 135 | | |
| 3. Износостойкие покрытия и модифицированные слои (А. П. Семенов) | 152 | | |

| | | | |
|--|------------|---|------------|
| 9. Волокнистые композиционные материалы с неметаллической матрицей (Е. А. Курочкин) | 365 | 2. Сверхпроводники (И. В. Кириллов) | 520 |
| Глава VI. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и внешней рабочей среды | 379 | 3. Резистивные материалы (Л. М. Соколенко) | 526 |
| 1. Коррозионно-стойкие материалы (Е. А. Ульяник) | 379 | 4. Магнитотвердые материалы (Л. М. Соколенко) | 536 |
| 2. Теплостойкие материалы (Т. А. Панайоти) | 395 | 5. Магнитомягкие материалы (Л. М. Соколенко) | 544 |
| 3. Жаростойкие материалы (Т. А. Панайоти) | 406 | 6. Материалы с особыми тепловыми свойствами (Ю. А. Быков) | 564 |
| 4. Жаропрочные материалы (В. И. Третьяков, И. С. Гершман) | 423 | 7. Полупроводниковые материалы (И. В. Кириллов) | 568 |
| 5. Радиационно-стойкие материалы (В. И. Солонин) | 445 | 8. Аморфные металлические сплавы (Ю. А. Быков) | 581 |
| 6. Материалы с малым газовыделением в вакууме (В. И. Макарова) | 462 | 9. Диэлектрические материалы (И. В. Кириллов) | 585 |
| 7. Коррозионно-стойкие и жаростойкие покрытия (Б. Н. Арзамасов, В. Н. Симонов) | 474 | 10. Лазерные материалы (И. В. Кириллов) | 589 |
| 8. Материалы для криогенной техники (Е. А. Ульяник) | 498 | Глава VIII. Инструментальные материалы | 596 |
| Глава VII. Материалы с особыми физическими свойствами | 514 | 1. Материалы для обработки резанием (В. А. Брострем) | 596 |
| 1. Материалы высокой проводимости (Л. М. Соколенко) | 514 | 2. Штамповые стали для холодного деформирования (В. И. Кучерявый) | 631 |
| | | 3. Штамповые стали для горячего деформирования (В. И. Кучерявый) | 655 |
| | | Предметный указатель | 683 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Научно-технический прогресс в машиностроении неразрывно связан с созданием новых конструкционных материалов. Революционную роль в электронике сыграли полупроводниковые материалы и жидкие кристаллы, в авиации и ракетостроении — композиционные материалы, в радиотехнике — сверхпроводники и аморфные сплавы. Для повышения качества, надежности и экономичности изделий машиностроения при снижении их материалоемкости разрабатываются высокоэффективные методы повышения прочностных свойств, коррозионной стойкости, тепло- и хладостойкости сплавов; расширяется производство новых полимерных и композиционных материалов с заданным комплексом свойств; используются эффективные методы обработки материалов и изделий с целью существенного улучшения их свойств.

Возникает задача создания экономилегированных сплавов, композиционных материалов и методов поверхностного упрочнения деталей машин. Поверхностные слои во многом определяют работоспособность деталей машин, поэтому износостойкость и коррозионная стойкость деталей полностью зависят от состояния их поверхности. Применением износостойких покрытий стремятся решить проблему экономии вольфрама в инструментальных сталях, а также повысить работоспособность деталей из конструкционных сталей. Ионная имплантация снижает точечную коррозию и повышает износостойкость подшипников качения. Задача создания высокожаростойких и жаропрочных сплавов для новой техники неразрывно связана с разработкой надежных защитных покрытий. Поверхностное легирование приводит к экономии дефицитных металлов, так как в этом случае их требуется меньше, чем при объемном легировании

сплавов, с целью получения указанных специфических свойств.

Важнейшей характеристикой материалов, применяемых для изделий авиационной и космической техники, а также для изделий других отраслей машиностроения, является удельная прочность, т. е. отношение временного сопротивления к произведению плотности на ускорение свободного падения. Если для улучшенной стали 40Х удельная прочность равна 13 км, то для титанового сплава после термической обработки она увеличивается до 31 км, а для алюминия, армированного борным волокном, — до 43 км. Таким образом, повышение удельной прочности приводит к значительному сокращению материалоемкости изделий.

Порошковая металлургия иногда позволяет уменьшить потери металла при изготовлении деталей в 10 раз. Кроме того, возможность широкого варьирования состава порошковых сплавов позволяет получать специфические свойства, которые недостижимы при использовании традиционных способов изготовления изделий.

Порошковые быстрорежущие стали — однородный мелкозернистый материал без карбидной ликвиации. По сравнению со сталями обычного передела порошковые быстрорежущие имеют более высокие твердость и теплоустойчивость. Металлорежущий инструмент, изготовленный из этих сталей, имеет в 1,5—2 раза большую стойкость. Порошковый бериллий после прокатки в листы находит применение в авиации и ракетостроении. Использование бериллия для обшивки сверхскоростных самолетов решает проблему жесткости конструкции и уменьшения массы. Бериллий является также перспективным материалом для ракетных двигателей с небольшой тягой. Благодаря сочетанию высоких

теплоемкости и теплопроводности бериллиевого сопла не разрушается при рабочей температуре 3000 °С в течение 60—80 с.

Объемное или поверхностное упрочнение сталей является обязательной технологической операцией в современном машиностроении, которая приводит к значительному улучшению комплекса свойств. Применение термического упрочнения проката из низколегированных сталей или контролируемой прокатки на металлургических заводах способствует значительному сокращению последующего расхода стали (примерно на 30 %) на предприятиях машиностроительного комплекса и в строительстве.

Рассмотренные в справочнике конструкционные материалы предназначены для изготовления деталей машин и приборов, инженерных сооружений и изделий, которые в основном несут механические нагрузки, а в некоторых случаях находятся под воздействием агрессивной окружающей среды и температуры.

Выбор материалов для деталей машин и приборов определяется эксплуатационными, технологическими и экономическими требованиями. Имея первостепенное значение, эксплуатационные требования к свойствам материалов часто играют определяющую роль, хотя технологические и экономические требования тоже важны, приобретая особое значение в условиях массового производства.

Отличительной особенностью справочника является классификация материалов по основным эксплуатационным (служебным) характеристикам с учетом назначения. Принятая классификация поможет конструкторам и технологам лучше ориентироваться в выборе материалов для деталей машин, приборов и приспособлений. Вспомогательным пособием к справочнику может служить учебник «Материаловедение»¹, составленный по тому же классификационному признаку. Ряд материалов, обладая универсаль-

¹ Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Б. Н. Арамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Колосов и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 384 с.

ностью применения, относится к нескольким классификационным группам, поэтому в справочнике сделаны ссылки на соответствующие группы.

В гл. I справочника кратко рассмотрены конструкционные углеродистые и легированные стали. Краткость связана с тем, что в 1981 г. вышло третье, значительно дополненное издание справочника «Машиностроительные стали»¹, в котором стали систематизированы не по химическому составу, а по назначению и эксплуатационным свойствам. Поэтому при выборе сталей для деталей машин рекомендуется пользоваться также указанным справочником.

В гл. II представлены традиционные материалы с повышенными технологическими свойствами — это чугуны и сплавы на основе меди.

Материалы триботехнического назначения приведены в гл. III. От правильного выбора и качества этих материалов во многом зависит надежность деталей машин.

Материалы с высокими упругими свойствами (гл. IV) необходимы для многих отраслей современного машиностроения и приборостроения.

В гл. V рассмотрены материалы малой плотности и высокой удельной прочности, которые применяются в основном для изделий авиационной и ракетной техники. Это сплавы на основе алюминия, магния, титана, а также композиционные и неметаллические материалы.

В гл. VI приведены материалы специального назначения, стойкие к воздействию температуры и внешней рабочей среды. Коррозионно-стойкие и жаростойкие материалы и покрытия необходимы для ответственных деталей новой техники. Свойства теплостойких и жаропрочных материалов во многом определяют ресурс и параметры современных энергетических установок и двигателей. Радиационно-стойкие материалы необходимы для атомного машиностроения.

В гл. VII рассмотрены материалы с особыми физическими свойствами,

¹ Журавлев В. Н., Николаева О. И. Машиностроительные стали: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.

которые имеют важное значение для электромашиностроения, электронной техники и современного приборостроения. Это сверхпроводники и полупроводники, аморфные, лазерные и другие материалы.

Инструментальные материалы (гл. VIII) играют решающую роль при разработке прогрессивных технологических процессов и повышении производительности труда.

В справочнике приведены основные группы материалов (как стандарт-

ных, так и нестандартных) с указанием их свойств, что позволит конструкторам и технологам на научно-технической, а не эмпирической основе выбирать материалы и назначать рациональные технологические процессы их обработки.

Справочник будет полезен для ИТР предприятий машиностроительного и приборостроительного комплекса, а также для научных работников НИИ и КБ, аспирантов и студентов старших курсов вузов.

ПРИНЯТЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- σ — напряжение
 σ_0 — начальное напряжение при испытаниях на релаксационную стойкость
 σ_{Σ} — остаточные напряжения
 $\dot{\epsilon}_n$ — скорость ползучести
 $\dot{\epsilon}_{p, n}$ — скорость радиационной ползучести
 σ_B — временное сопротивление при растяжении
 $\sigma_{0,2}$ — предел текучести условный
 σ_T — предел текучести физический
 σ_{-1} — предел выносливости при изгибе с симметричным циклом нагружения
 $\sigma_{0,002; 0,005}$ — условный предел упругости с допуском на остаточную деформацию соответственно 0,002 и 0,005 %
 $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии
 σ_H — предел прочности при изгибе
 $\sigma_{пц}$ — предел пропорциональности
 $\sigma_1; 10; 100; 1000; 10\ 000$ — длительная прочность
 $\sigma_B/(\rho g)$ — удельная прочность
 ρ — плотность
 g — ускорение свободного падения
 δ — относительное удлинение при разрыве
 ψ — относительное сужение при разрыве
 $E_{сж}$ — модуль упругости при сжатии
 E — модуль продольной упругости
 $E/(\rho g)$ — удельный модуль упругости
 G — модуль сдвига
 K_{1c} — напряжение вблизи вершины трещины в момент разрушения
- a_n — ударная вязкость материала
 KCU — ударная вязкость (U-образный надрез)
 KCV — ударная вязкость (V-образный надрез)
 KCT — ударная вязкость (с трещиной)
 τ_B — предел прочности при срезе
 τ_{-1} — предел выносливости при кручении и изгибе
 Rz — высота неровностей профиля по десяти точкам
 Ra — среднее арифметическое отклонение профиля
 HRC — твердость по Роквеллу (шкала C)
 $HВ$ — твердость по Бринеллю
 H — микротвердость
 α — температурный коэффициент линейного расширения
 λ — теплопроводность
 c — удельная теплоемкость
 Q_v — удельная молярная теплота плавления
 ΔG_{293}^0 — термодинамический потенциал (стандартная энергия Гиббса)
 T_{50} — температура полухрупкости
 $T_{пл}$ — температура плавления
 θ — точка Кюри
 R — электрическое сопротивление
 ρ_1 — удельное электрическое сопротивление
 μ_n — относительная начальная магнитная проницаемость
 μ_{max} — абсолютная максимальная магнитная проницаемость
 B — магнитная индукция
 B_r — остаточная магнитная индукция
 B_s — магнитная индукция насыщения

- B_m — максимальная магнитная индукция
 H_c — коэрцитивная сила
 $H_{св}$ — коэрцитивная сила по индукции
 H — напряженность магнитного поля
 $H_{сJ}$ — коэрцитивная сила по намагниченности
 $tg \delta$ — тангенс угла магнитных потерь
 $tg \delta/\mu_n$ — относительный тангенс угла магнитных потерь
 $f_{кр}$ — критическая частота
 $TK\mu$ — температурный коэффициент магнитной проницаемости
 $TK\rho$ — температурный коэффициент электрического сопротивления
 $\mu_{эф}$ — эффективная магнитная проницаемость
 δ_r — угол потерь на гистерезисе
 δ_B — угол потерь на вихревых токи
- δ_n — угол потерь на последствии
 ρ — удельные объемные магнитные потери
 W — удельная магнитная энергия
 $W_{упр}$ — часть энергии, превращенная в упругую
 W_{max} — максимальная магнитная энергия
 K_1 — константа кристаллографической анизотропии
 μ_B — магнитная проницаемость возврата
 H_T — напряженность поля трогания
 ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость
 ΔH — ширина резонансной кривой
 α_T — коэффициент термо-ЭДС
 Φ — работа выхода электрона
 γ — удельная электрическая проводимость

1. УГЛЕРОДИСТЫЕ
И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ
КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Углеродистые стали представляют значительную группу конструкционных материалов; они составляют 80 % общего объема продукции черной металлургии и применяются для изготовления различных металлоконструкций и изделий машиностроения. Стали обыкновенного качества (ГОСТ 380—88) и качественные (ГОСТ 1050—74, ГОСТ 4543—71) дешевы, имеют удовлетворительные механические свойства в сочетании с хорошей обрабатываемостью резанием и давлением [11, 15, 16, 17, 32].

В зависимости от условий работы и содержания углерода углеродистые стали подвергаются термической [40] и химико-термической обработке [16, 17].

Содержание углерода определяет основные характеристики физических, механических и технологических свойств. По мере увеличения его количества возрастает доля цементита в структуре, что обуславливает затруднение перемещения дислокаций и соответственно — развитие сдвиговых процессов. В результате этого повышается прочность, но снижается пластичность, а иногда и вязкость.

Углеродистые стали с пониженным содержанием углерода (до 0,3 %) имеют высокую вязкость разрушения ($K_{Ic} = 100 \div 120 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ при $\sigma_{0,2} = 500 \text{ МПа}$) [29]. При этом существенного прироста вязкости разрушения у высокоотпущенных сталей по сравнению с низкоотпущенными не наблюдается. Определение критерия K_{Ic} пластичных низкоуглеродистых сталей сопряжено со значительными трудностями, так как эти стали особенно широко применяются для изделий тонкого сечения, а существующие

методики определения K_{Ic} основаны на испытании образцов большой толщины, при которой соблюдается условие плоской деформации, т. е. отсутствует остаточная деформация.

Максимально высокая трещиностойкость закаленных углеродистых сталей достигается при разных температурах отпуска, определяемых содержанием углерода. С увеличением содержания углерода, в связи с уменьшением запаса пластичности стали, оптимальная температура отпуска повышается. У стали 45 максимальная трещиностойкость соответствует отпуску при 400—500 °С, что обусловлено получением хорошего сочетания прочностных и пластических свойств при таком режиме термической обработки. При переходе к более высокоуглеродистым сталям температура отпуска, при которой достигается максимальный уровень трещиностойкости, сдвигается в область более высоких температур.

Повышение температуры отпуска выше оптимальной приводит к такому разупрочнению сталей, когда эффекты, связанные с увеличением трещиностойкости в результате роста пластичности, уже подавляются значительным падением прочности.

Низколегированные конструкционные стали содержат до 0,2 % С и до 2—3 % в основном недефицитных легирующих элементов. Их упрочнение основано на легировании феррита марганцем и (или) кремнием. Это марганцовистые стали 14Г, 19Г, 09Г2 и др., марганцовокремнистые 12ГС, 09ГС, 10Г2С1 и др. Марганцовокремнистые стали имеют более высокую прочность, чем марганцовистые, но их пластичность и вязкость заметно ниже.

Низколегированная сталь поставляется по ГОСТ 5520—79, 5521—86, ГОСТ 19282—73 тонко- и толстолистовой, широкополосной; в зависимости от нормируемых механических

свойств — без термической обработки, с термической обработкой или в том и другом состоянии. Эти стали применяются в судостроении, химической промышленности, вагоностроении, мостостроении [11]. Низколегированные стали применяются, как правило, в нормализованном, реже — в горячекатаном состоянии. Их механические свойства можно улучшить с помощью термической обработки, которую целесообразно проводить после нагрева под прокатку. После закалки и отпуска упрочнение сочетается с малой чувствительностью к надрезу.

Низколегированные стали ненамного дороже углеродистых, но по сравнению с ними имеют лучший комплекс механических свойств, повышенную хладостойкость, пониженную склонность к механическому старению, лучшую свариваемость, повышенную износостойкость и коррозионную стойкость в различных средах.

Большой экономический эффект достигается при использовании в металлоконструкциях сталей с карбонитридным упрочнением.

Низколегированные стали с карбонитридным упрочнением. Легирование низкоуглеродистых (0,10—0,20 % С), марганцовистых (1,3—1,7 % Мп) сталей (0,015—0,025 % N, 0,10—0,20 % V, около 0,1 % Ti, а также ~0,05 % Al) создает предпосылки для выделения дисперсных карбонитридов ванадия и титана или нитридов алюминия. Дисперсные карбиды способствуют измельчению аустенитного (до № 10—12) и действительного зерна стали, тормозят движение дислокаций. В совокупности эти факторы благоприятно влияют на прочность, вязкость и хладостойкость [18].

Доля собственно карбонитридного упрочнения в общем упрочнении составляет около 15—25 %, а доля упрочнения в результате измельчения зерна — 30—40 %. Максимальная ударная вязкость при отрицательных температурах достигается в стали с 0,10—0,15 % V. Наиболее рациональным является совместное легирование несколькими карбидо- и нитридообразующими элементами, например 0,08V + 0,03Nb, а в сталях, содержащих азот, 0,10V + 0,04 % Al.

С учетом этого положения разработаны основные марки стали с карбонитридным упрочнением трех категорий прочности: 14Г2АФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ (ГОСТ 19282—73). После нормализации эти стали имеют предел текучести соответственно 400, 450, 500 МПа. Стали 15ГФ и 15Г2СФ, не легированные азотом и содержащие только ванадий, имеют предел текучести в горячекатаном состоянии соответственно 360 и 400 МПа.

Дополнительное легирование стали никелем до 2 % способствует сохранению высоких характеристик пластичности и вязкости.

Легирование алюминием позволяет регулировать размер зерна в горячекатаных, нормализованных и улучшенных сталях.

Добавка 0,15—0,30 % Si способствует повышению стойкости против атмосферной коррозии.

К термически улучшаемым высокопрочным относятся стали 12Г2СМФ ($\sigma_{0,2} = 600 \text{ МПа}$) и 12ГН2МФАУ ($\sigma_{0,2} = 750 \text{ МПа}$).

Из низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением изготавливают металлоконструкции промышленных зданий, ответственные сварные конструкции, в том числе северного исполнения, пролетные строения железнодорожных и крупных автодорожных мостов, платформы автомобилей большой грузоподъемности (до 120 т) и др.

Стали 14Г2АФ и 16Г2АФ применяют, как правило, в нормализованном состоянии. При нормализации листы из этих сталей нагревают до 900—960 °С со скоростью 2 мин/мм, охлаждают на спокойном воздухе или в струе увлажненного воздуха под вентилятором в зависимости от химического состава стали.

Высокопрочные стали 12Г2СМФ и 12ГН2МФАУ подвергают закалке с высоким отпуском. Закалку проводят в закалочных прессах. Температуру высокого отпуска назначают с учетом легирования в интервале 640—690 °С при выдержке 3—4 мин/мм.

Свойства сталей после нормализации определяются степенью растворения упрочняющих фаз при нагреве, величиной зерна и процессами выделения

1. Механические свойства сталей с карбонитридным упрочнением [11]

| Сталь | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | КСУ, МДж/м ² , при температуре, °С | |
|---------------------------------------|------------|----------------|----------|---|-----|
| | МПа | | % | -40 | -70 |
| | не менее | | | | |
| 15Г2СФ | 560 | 400 | 18 | — | — |
| 15Г2СФД | 560 | 400 | 18 | 0,3 | — |
| 14Г2АФД | 550 | 400 | 20 | 0,4 | 0,3 |
| 16Г2АФД | 580 | 420 | 20 | 0,4 | 0,3 |
| 18Г2АФДпс | 600 | 450 | 19 | 0,4 | 0,3 |
| 12ХГН2МФБАЮ (после закалки и отпуска) | 850—930 | 750—870 | 12 | — | 0,3 |

упрочняющих фаз в дисперсной форме при охлаждении.

В связи с тем, что дисперсные частицы повышают не только прочность, но и вязкость (ограничивая рост зерна), нормализованный прокат разной толщины мало различается по ударной вязкости и хладостойкости. Между тем свойства стали в горячекатаном

2. Критические температуры хрупкости стали с карбонитридным упрочнением [18]

| Сталь | Тип образца | Порог хладноломкости, °С *2 |
|------------|-------------|-----------------------------|
| 14Г2АФ | I *2 | -90 ÷ -100 |
| | IV *2 | -30 ÷ -40 |
| 16Г2АФ | I | -90 ÷ -100 |
| | IV | -10 ÷ -30 |
| 12Г2СМФ | I | -70 ÷ -100 |
| | IV | -30 |
| 12ХГН2МФАЮ | I | -100 ÷ -110 |
| | IV | -70 |

*1 Условный порог хладноломкости при ударной вязкости не менее КСУ = 0,3 МДж/м² для листовой стали толщиной 12—40 мм.

*2 Типы образцов I и IV — для испытаний на ударный изгиб (с полукруглым и острым надрезом) по ГОСТ 9454—78.

состоянии сильно зависят от толщины листов.

Механические свойства сталей с карбонитридным упрочнением приведены в табл. 1. При поставке таких сталей нормируемой характеристикой является ударная вязкость. Ее значения сохраняются на удовлетворительном уровне до весьма низких температур.

Данные стали имеют низкие критические температуры хрупкости (табл. 2). Повышенной хладостойкостью (от -90 до -100 °С) обладает сталь 14Г2АФ в виде относительно тонких листов. Высокой хладостойкостью (от -100 до -110 °С) характеризуется высокопрочная сталь 12ХГН2МФАЮ в виде листов толщиной до 40 мм.

Обработка стали с нитридами ванадия жидким синтетическим шлаком (СШ) или электрошлаковым переплавом (ЭШП) способствуют резкому уменьшению содержания серы (до 0,03—0,005 %) и обеспечивают еще большее повышение характеристик вязкости при отрицательных температурах. Например, низкотемпературная ударная вязкость стали 16Г2АФ возрастает в 2,5 раза (табл. 3). Одновременно повышается относительное сужение.

Хорошей свариваемости низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением способствует низкое содержание углерода и легирующих элементов, ограниченная склонность к росту зерна. Пониженная закали-

ваемость в околшовной зоне определяет меньшую склонность к образованию трещин в сварных соединениях.

Стали типа 14—16Г2АФ свариваются без ограничений при условии практически мгновенного охлаждения (со скоростью 5—30 °С/с) при 600 °С. При сварке сталей 12Г2СМФ и 12ХГН2МФАЮ скорость охлаждения составляет 7—30 °С/с. При меньших скоростях охлаждения снижается ударная вязкость и повышается порог хладноломкости в околшовной зоне [18].

Применяют ручную, автоматическую и полуавтоматическую сварку, в том числе в атмосфере защитных газов. Лучшей свариваемостью и хладостойкостью характеризуются стали 15Г2АФДпс и 18Г2АФпс. Усталостная трещина в них не переходит в крупную в условиях низких температур.

Стали с карбонитридным упрочнением легко подвергаются механической обработке и холодной обработке давлением, что определяется их высоким запасом пластичности.

Применение новых сталей дает большую экономию металла: 14—30 % — по сравнению с его расходом на конструкции из обычных низколегированных сталей 10Г2С1 и 14Г2; около 30—50 % — по сравнению с конструкциями из углеродистой стали Ст3 [18].

Особенно перспективны стали 14Г2АФ и 16Г2АФ, широко используемые в виде относительно тонкостенных электросварных труб \varnothing 152—420 мм для промышленных строительных сооружений и изделий машиностроения [18].

Низколегированные малоперлитные стали — это низколегированные стали с низким содержанием углерода. Они содержат до 0,1 % С, до 2 % Мп и дополнительно в разных сочетаниях ванадий (~0,1 %), ниобий (~0,06 %), а иногда и молибден (~0,15—0,3 %). В этих сталях может также присутствовать алюминий (до 0,05 %). Благоприятное сочетание свойств получается при содержании легирующих элементов в стали не более 2—3 % [13, 31]. Ванадий, ниобий, алюминий и частично молибден участвуют в образовании упрочняющей фазы на

3. Влияние специальных способов обработки стали 16Г2АФ на ударную вязкость при отрицательных температурах [18]

| Способ обработки | КСУ, МДж/м ² , при температуре, °С | | |
|------------------|---|------|------|
| | -40 | -60 | -80 |
| СШ | 1,62 | 1,45 | 1,40 |
| ЭШП | 2,87 | — | 1,83 |

основе углерода и азота (~0,005 %). Азот не вводят в сталь специально; он в таком количестве обычно присутствует в ней. Поставляются малоперлитные стали по техническим условиям.

Эти стали используют для конструкций различного назначения. Их применяют взамен низколегированных нормализованных и термически упрочненных сталей для изготовления сварных конструкций в судостроении, транспортном и химическом машиностроении, строительстве и трубопроводном транспорте для передачи нефти и газа. Высокий комплекс механических свойств, хорошие свариваемость и формовость позволяют использовать малоперлитные стали для изготовления таких ответственных конструкций, как магистральные газопроводы, эксплуатируемые в районах Севера.

Влияние микролегирования наиболее эффективно реализуется в малоперлитных сталях при контролируемой прокатке [13, 31]. В результате такой обработки высокая прочность сочетается с высоким сопротивлением вязкому и хрупкому разрушению. Контролируемая прокатка — это высокотемпературная обработка низколегированной стали, технология которой основана на определенном сочетании основных параметров горячей деформации: температуры нагрева и ковка прокатки; суммарной степени, кратности деформации и ее величины при различных температурах, скорости охлаждения между проходами и т. д. В процессе прокатки с контролируемым режимом деформации структурные изменения в деформируемом

металле протекают в три стадии. На первой стадии ($>950^\circ\text{C}$) в процессе деформации происходит рекристаллизация; на второй стадии ($<950^\circ\text{C}$) сталь упрочняется вследствие измельчения структуры и повышения плотности дислокаций; на третьей стадии ($800-700^\circ\text{C}$) происходит выделение дисперсных избыточных фаз, обусловленное легированием стали карбидо- и нитридообразующими элементами (Mo, Nb, V, Ti).

Режим нагрева слоев перед прокаткой назначают с учетом химического состава стали и требований к свойствам. Условия нагрева должны обеспечивать максимальное растворение компонентов, вызывающих образование в дальнейшем дисперсных частиц избыточной фазы. Для получения хладостойкого проката из микролегированных марганцовистых сталей температура начала прокатки должна быть $1150-1200^\circ\text{C}$. На завершающем этапе обработки деформация проводится в диапазоне температур $A_{r3}-A_{r1}$ при суммарной деформации $\geq 66\%$.

При контролируемой прокатке листов наиболее значительные степени деформации назначают при относительно невысоких температурах: ниже 800°C . Заканчивают прокатку при температурах $\leq 750-700^\circ\text{C}$. На широком полосном стане контролирующую прокатку проводят в области высоких температур, при которых происходит интенсивная рекристаллизация аустенита. При такой обработке важную роль играет скорость охлаждения полосы до температуры превращения аустенита, а также температура смотки полосы в рулон.

Для контролируемой прокатки разработана сталь, содержащая $0,14\%$ С; $1,4\%$ Mn; $0,2\%$ Mo; $0,5\%$ Cr. После контролируемой прокатки листы толщиной $12-32$ мм имеют следующие механические свойства: $\sigma_{0,2} = 490$ МПа; $\sigma_B = 560-600$ МПа; $\delta = 24\%$; $KCU = 0,9-1,0$ МДж/м² при 100% волокна в изломе ударных образцов при 0°C [13].

Эффективность комплексного микролегирования установлена на малоуглеродистых сталях, химический состав которых приведен в табл. 4 [15, 19]. Совместное влияние комплексного ми-

кролегирования и контролируемой прокатки превосходит сумму отдельных влияний этих факторов на прочностные свойства. Изменение механических свойств микролегированной стали 09Г2ФБ в результате контролируемой прокатки можно видеть в табл. 5.

Свойства малоуглеродистой стали зависят от ее состава и условий контролируемой прокатки (рис. 1).

Механические свойства листов, полученных контролируемой прокаткой, в значительной степени определяются их толщиной. С увеличением толщины листа прочностные свойства снижаются, причем более интенсивно снижается предел текучести (табл. 6). Повышенная хладостойкость сохраняется в листах толщиной до 32 мм [13].

Влияние режима контролируемой прокатки на механические свойства листовой стали 16Г2АФ толщиной 18 мм показано в табл. 7. Все варианты контролируемой прокатки обеспечили практически одинаковые прочностные свойства, которые несколько превышают эти же показатели для нормализованной стали. Пластические свойства стали после контролируемой прокатки находятся на достаточно высоком уровне ($\delta = 20\%$). Ударная вязкость повышается примерно в 2 раза по сравнению с ее значением после обычной прокатки и приближается к значению, соответствующему ударной вязкости нормализованной стали.

Применение термического упрочнения при изготовлении листового проката из малоуглеродистых сталей способствует повышению их прочностных свойств, что обеспечивает более экономное расходование проката. Например, упрочнение стали 09Г2ФБ по режиму: контролируемая прокатка с деформацией $\epsilon = 40\%$ + закалка в воде от температуры конца прокатки 900°C + отпуск при 670°C 1 ч позволяет значительно улучшить ее механические свойства (табл. 8) [26]. Такая технология повышает сопротивление стали хрупкому и усталостному разрушению. Предел выносливости сталей возрастает от 300 до 380 МПа. Повышение предела выносливости пропорционально повышению прочностных свойств объясняется созданием

4. Химический состав малоуглеродистых сталей [15]

| Сталь | Содержание элементов, % | | | | | | | | | |
|---------|-------------------------|------|------|--------|-------|---------------|-----------------|------------|------------|------------|
| | C | Mn | Si | S | P | Al | N | U | Nb | Ti |
| 09Г2Ф | 0,09 | 1,5 | 0,15 | 0,004 | 0,010 | 0,04 | 0,011 | 0— 0,20 | — | — |
| 09Г2БФ | 0,09 | 1,5 | 0,22 | 0,004 | 0,010 | 0,04 | 0,011 | 0— 0,17 | 0,036 | — |
| 09Г2ТФ | 0,10 | 1,22 | 0,13 | 0,002 | 0,009 | 0,05 | 0,011 | 0— 0,17 | — | 0,035 |
| 09Г2Б | 0,09 | 1,4 | 0,15 | 0,0045 | 0,010 | 0,03 | 0,010— 0,013 | — | 0— 0,1 | — |
| 09Г2ФБ | 0,05 | 1,5 | 0,2 | 0,0037 | 0,010 | 0,04 | 0,010— 0,013 | 0,085 | 0— 0,07 | — |
| 09Г2ТБ | 0,08 | 1,17 | 0,14 | 0,003 | 0,009 | 0,045 | 0,010— 0,013 | — | 0— 0,07 | 0,035 |
| 09Г2Т | 0,065 | 1,6 | 0,11 | 0,004 | 0,010 | 0,04 | 0,011 | — | — | 0— 0,18 |
| 09Г2ФТ | 0,085 | 1,45 | 0,2 | 0,004 | 0,010 | 0,045 | 0,011 | 0,085 | — | 0— 0,08 |
| 09Г2БТ | 0,09 | 1,4 | 0,16 | 0,0035 | 0,010 | 0,045 | 0,011 | — | 0,02 | 0— 0,10 |
| 09Г2ФБТ | 0,09 | 1,47 | 0,20 | 0,005 | 0,009 | 0,04 | 0,012 | 0,08 | 0,03 | 0— 0,11 |
| 09Г2Ю | 0,10 | 1,56 | 0,35 | 0,005 | 0,012 | 0,01— 0,10 | 0,012 | — | — | — |
| 09Г2ФЮ | 0,11 | 1,52 | 0,31 | 0,006 | 0,009 | 0,01— 0,12 | 0,011 | 0,11 | — | — |
| 09Г2БЮ | 0,10 | 1,49 | 0,28 | 0,007 | 0,010 | 0,01— 0,12 | 0,013 | — | 0,05 | — |

5. Влияние контролируемой прокатки на свойства стали 09Г2ФБ [15]

| Обработка | σ_B | σ_T | $\delta_5, \%$ | KCU, МДж/м ² , при -40°C | $T_{50}, ^\circ\text{C}^{*1}$ |
|--|------------|------------|----------------|---|-------------------------------|
| | МПа | | | | |
| Прокатка; температура окончания деформации, $^\circ\text{C}$: | | | | | |
| 810 | 560 | 475 | 30 | 0,80 | -70 |
| 750 | 590 | 510 | 27 | 0,11 | -95 |
| 725 | 625 | 540 | 29 | 0,10 | -95 |
| 700 | 680 | 600 | 22 | 0,60 | -90 |
| Нормализация от 930°C , 30 мин | 520 | 400 | 30 | 0,75 | -15 |

*1 Температура перехода из вязкого состояния в хрупкое, при котором в изломе доли вязкой и хрупкой составляющих равны между собой.

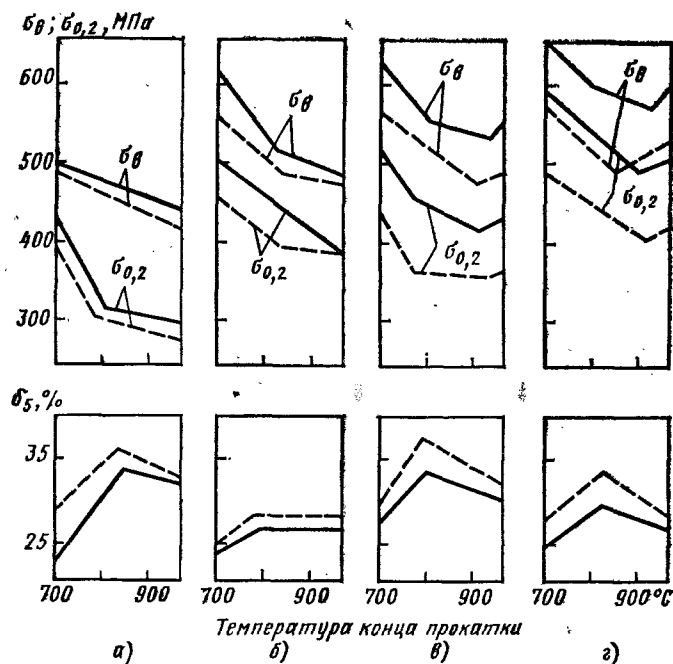


Рис. 1. Зависимость механических свойств малоперлитной стали от температуры нагрева и температуры конца деформации при контролируемой прокатке: а — сталь с 0,8 % Si и 1,4 % Mn; б — то же с 0,6 % V; в — то же с 0,04 % Nb; г — та же сталь с 0,04 % Nb и 0,08 % V [16]; сплошные линии — температура нагрева под прокатку 1200 °С; штриховые линии — 1050 °С

6. Механические свойства стали после контролируемой прокатки в зависимости от толщины листа [13]

| Сталь | Толщина листа, мм | Температура конца прокатки, °С | σ, МПа | | δ, % | T _{кв} , °С |
|--|-------------------|--------------------------------|----------------|----------------|------|----------------------|
| | | | σ _T | σ _B | | |
| 0,14 % C; 1,4 % Mn; 0,25 % Mo; 0,5 % Cr | 12,7 | 815 | 490 | 582 | 18 | -30 |
| | 25,4 | 835 | 456 | 590 | 22 | -20 |
| | 31,8 | 860 | 425 | 575 | 22 | -25 |
| 0,075 % C; 0,19 % Si; 2,25 % Mn; 0,08 % Nb; 0,027 % P; 0,02 % S | 12,5 | 850 | 460 | 560 | 27 | — |
| | 25,5 | 850 | 380 | 500 | 26 | — |
| | 38 | 850 | 360 | 490 | 24 | — |

7. Влияние режима контролируемой прокатки на свойства листовой стали 16Г2АФ [0,17 % C; 1,52 % Mn; 0,48 % Si; 0,10 % V; 0,019 % N; 0,031 % S; 0,018 % P (толщина листа 18 мм)] [13]

| T _{сл} | T _ч | T _{зч} | σ _T | σ _B | δ ₅ , % | KCU, МДж/м ² при температуре, °С | |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|---|------|
| | | | | | | °С | |
| | | | МПа | | | -40 | -60 |
| 2180 | 1075 | 1060 | 550 | 710 | 14 | 0,23 | 0,15 |
| 1200 | 990 | 970 | 490 | 660 | 22 | 0,35 | 0,17 |
| 1280 | 1025 (940) | 920 | 530 | 670 | 20 | 0,47 | 0,37 |
| 1280 | 1025 | 910 | 540 | 680 | 20 | 0,44 | 0,39 |

Примечание. Температура металла: T_{сл} — сляба; T_ч — перед чистой прокаткой; T_{зч} — перед тремя последними проходами (общее обжатие 40 %); в скобках — после подстуживания.

8. Влияние контролируемой прокатки с термическим упрочнением на механические свойства малоперлитной стали 09Г2ФБ [26]

| Температура прокатки, °С | | Степень деформации, % | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ | KCV, МДж/м ² при температуре, °С | |
|--------------------------|--------|-----------------------|----------------|------------------|--------|--------|---|----------|
| начала | конца | | | | | | °С | |
| | | | МПа | | % | | +20 | -70 |
| 1150 *1 | 740 *1 | 70 *1 | 600/—*1 | 500/—*1 | 23/—*1 | 70/—*1 | 0,8 *1 | 0,03 *1 |
| 920 | 900 | 20 | 570/730 | 400/650 | 30/23 | 71/68 | 1,3/1,4 | 0,14/0,4 |
| 920 | 900 | 40 | 530/700 | 400/620 | 29/21 | 75/68 | 1,3/1,2 | 0,16/0,3 |
| 920 | 900 | 60 | 520/680 | 380/560 | 34/24 | 74/68 | 1,4/1,1 | 0,14/0,2 |

*1 Данные завода «Азовсталь».

Примечание. В числителе дроби приведены свойства стали после контролируемой прокатки с охлаждением на воздухе, в знаменателе — после контролируемой прокатки с последующим охлаждением в воде от температуры конца прокатки и отпуска при 670 °С, 1 ч.

устойчивой дислокационной структуры по типу полигонизации.

В результате упрочнения листов толщиной 16—17,5 мм из стали 12Г2ФР (0,11 % C; 1,37 % Mn; 0,44 % Si; 0,009 % S; 0,011 % P; 0,082 % V; 0,005 % B) по режиму: охлаждение от температуры конца контролируемой прокатки 720—740 °С до 600—640 °С со скоростью около 20 °С/с, а затем на воздухе, временное сопротивление разрыву повысилось от 540—560 до 620—630 МПа при высокой пластич-

ности (δ₅ = 20—26 %) [27]. Легирование стали бором в количестве до 0,005 % повышает устойчивость аустенита и обеспечивает более высокую прокаливаемость. Листы из стали 12Г2ФР можно охлаждать при закалке с меньшей скоростью, чем листы из стали 09Г2ФБ, что облегчает реализацию термического упрочнения.

Малоперлитные стали с карбонитридным упрочнением (типа 09Г2ФБ) после контролируемой прокатки среди углеродистых и низколегированных

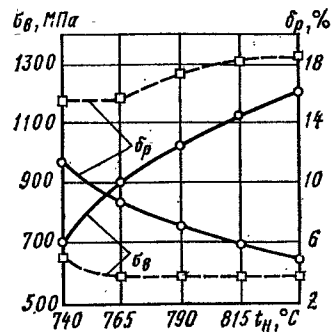


Рис. 2. Влияние температуры нагрева в МКИ на механические свойства ДФМС, полученных при закалке в воде (сплошные линии) и при охлаждении со скоростью около 30 °C/с (штриховые линии). Сталь типа 08Г2СФ [6]

строительных сталей имеют максимальную конструктивную прочность и наиболее низкую температуру ползучести ($T_{50} = -50 \div -70$ °C). Получение такого комплекса свойств этих сталей обусловлено их мелкозернистой структурой (зерно 10—12) и наличием дисперсных карбонитридов V (С, N); Nb (С, N); AlN.

Двухфазные ферритно-мартенситные стали (ДФМС) — это низкоуглеродистые низколегированные стали, структура которых представляет собой мелкозернистую ферритную матрицу с 15—25 % мартенсита в виде отдельных островков [6, 41]. В структуре также может присутствовать небольшое количество остаточного аустенита, бейнита и дисперсных карбидов.

Существует широкий набор ДФМС, различающихся по структуре и свойствам. Базовыми ДФМС являются стали типа 06ХГСЮ (0,05—0,08 % С; 1,1—1,4 % Мп; 0,4—0,7 % Сг; 0,3—0,5 % Si) и 06Г2СЮ (0,05—0,08 % С; 1,4—1,7 % Мп; 0,4—0,6 % Si). Листовые ДФМС с высокой штампуемостью по составу близки к широко распространенным сталям типа 09Г2С; 09Г2; 09Г2Д; 10Г2С1 и т. п. (ГОСТ 19282—73).

Основной вариант термической обработки для получения ферритно-мартенситной структуры — неполная закалка: нагрев до температур межкри-

стического интервала (МКИ) $A_{c1}—A_{c3}$ с последующим охлаждением. Получение необходимого соотношения структурных составляющих ДФМС при термической обработке обеспечивается путем снижения (до 0,08—0,09 %) содержания углерода в стали, что позволяет уменьшить зависимость количества аустенита от температуры нагрева.

Конкретный режим термической обработки для получения ДФМС с требуемыми свойствами назначается в зависимости от состава стали с учетом параметров термического оборудования (скорости и продолжительности нагрева, средств охлаждения нагретой полосы, возможности проведения отпуска и т. д.). В общем случае температура нагрева должна соответствовать $A_{c1} + (60 \div 90$ °C); охлаждение от температур МКИ предпочтительно проводить с умеренными скоростями (5—30 °C/с) до 400—500 °C, что обеспечивает стабильность получения 15—25 % мартенсита и лучшую пластичность и вязкость (рис. 2). При этом существует достаточно широкий интервал температур нагрева (40—80 °C), которые, в свою очередь, обеспечивают примерное постоянство структуры и прочностных свойств. Отпуск при 200—250 °C способствует улучшению комплекса механических свойств (табл. 9) [41].

Двухфазные ферритно-мартенситные стали предназначены для изготовления деталей холодной пластической деформацией (штамповкой, высадкой, вытяжкой, гибкой). Их окончательные прочностные характеристики формируются в процессе изготовления деталей — в результате упрочнения при деформации и последующего старения уже готовых деталей, например во время сушки лакокрасочного покрытия при 170—200 °C. Повышение прочности ДФМС в процессе деформации составляет в среднем 10 МПа на 1 % обжатия поперечного сечения. В критическом сечении суммарная (на всех операциях) деформация при изготовлении деталей методами холодной объемной штамповки для гарантированного обеспечения $\sigma_b \geq 800$ МПа должна быть порядка 20—25 %. Механические свойства ДФМС после закалки

9. Влияние режима термической обработки на механические свойства двухфазной ферритно-мартенситной стали 10Х1МФ [41]

| Структура | Термическая обработка | σ _{0,2} | σ _в | KCV, МДж/м ² | T ₅₀ , °C |
|--------------------|--------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|----------------------|
| | | МПа | | | |
| Мартенсит | Нагрев + охлаждение в воде | 1640 | 1900 | 0,1 | -15 |
| | То же + отпуск | 1580 | 1850 | 0,1 | -30 |
| Феррит + мартенсит | Нагрев + охлаждение на воздухе | 285 | 630 | 2,15 | -15 |
| | Нагрев + охлаждение в воде | 305 | 680 | 2,0 | +20 |
| | То же + отпуск | 390 | 640 | 2,6 | -20 |

Примечание. Температура нагрева стали 730 °C; отпуск при 250 °C, 1 ч.

и деформационного старения приведены в табл. 10.

Поскольку предел выносливости определяется прочностными характеристиками, то ДФМС имеют определенные преимущества и при циклических испытаниях [6].

Сталь 09Г2 (рис. 3) после обработки на двухфазную структуру имеет повышенный предел выносливости; одновременно примерно в 3—3,5 раза увеличивается число циклов до разрушения в области малоциклового усталости. Соответствующие механические свойства при растяжении приведены в табл. 11.

Упрочнение ДФМС создают участки мартенсита: каждый 1 % мартенситной составляющей в структуре повышает временное сопротивление разрыву примерно на 10 МПа независимо от прочности и геометрии мартенситной фазы. Разобширенность мелких участков мартенсита и высокая пластичность феррита значительно облегчают начальную пластическую деформацию. Характерный признак ферритно-мартенситных сталей — отсутствие на диаграмме растяжения площадки, текучести. При одинаковом значении обжатия ($\delta_{обж}$) и равномерного (δ_r) удлинения ДФМС обладают большей прочностью и более низким отношением $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ (0,4—0,6), чем обычные низко-

легированные стали. При этом сопротивление малым пластическим деформациям ($\sigma_{0,2}$) у ДФМС ниже, чем у сталей с ферритно-перлитной структурой [41].

При всех уровнях прочности все показатели технологической пластичности ДФМС ($\sigma_{0,2}/\sigma_b$, δ_r , $\delta_{обж}$, вытяжка по Эриксену, прогиб, высота стаканчика и т. д.), кроме раздачи отверстия, превосходят аналогичные показатели обычных сталей [6].

Повышенная технологическая пластичность ДФМС позволяет применять

10. Механические свойства (в МПа) двухфазных ферритно-мартенситных сталей (ДФМС) [6]

| Сталь | σ _{0,2} | σ _в |
|--------|------------------|----------------|
| 06ХГСЮ | 250/560 | 620/650 |
| 06Г2СЮ | 310/610 | 650/700 |

Примечание. В числителе дроби приведены механические свойства сталей после закалки из межкритического интервала температур, в знаменателе — после деформации на 5 % и старения при 200 °C.

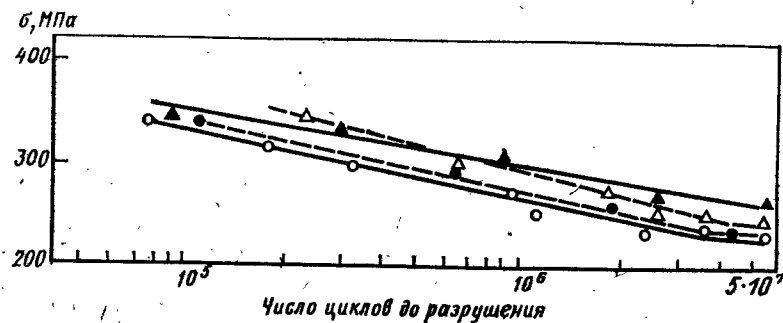


Рис. 3. Кривые усталости горячекатаной (O, ●) и термически обработанной на двухфазную структуру (Δ, ▲) стали 09Г2. Штриховые линии — в состоянии поставки; сплошные линии — после деформации на 5 % и отпуска на 200 °С, 1 ч. Лист толщиной 4 мм [6]

их для листовой штамповки деталей достаточно сложной конфигурации, что является преимуществом этих сталей перед другими высокопрочными сталями [4].

Сопротивление коррозии ДФМС находится на уровне сопротивления коррозии сталей для глубокой вытяжки [6].

ДФМС удовлетворительно свариваются методом точечной сварки. Предел выносливости при знакопеременном изгибе составляет для сварного шва и основного металла ($\sigma_B \approx 550$ МПа) соответственно 317 и 350 МПа, т. е. 50 и 60 % σ_B основного металла [6].

В случае применения ДФМС для деталей массивных сечений, когда необходимо обеспечить достаточную про-

каливаемость, целесообразно использовать составы с повышенным содержанием марганца или с добавками хрома, бора и т. д. [41].

Экономическая эффективность применения ДФМС, которые дороже низкоуглеродистых сталей, определяется экономией массы деталей (на 20—25 %). Применение ДФМС в некоторых случаях позволяет исключить упрочняющую термическую обработку деталей, например высокопрочных крепежных изделий, получаемых методом холодной высадки.

Среднеуглеродистые низколегированные стали содержат 0,25—0,50 % С и, кроме того, до 1,8 % Mn (стали 30Г, 40Г, 30Г2, 40Г2) и до 1,1 % Si (стали 30Х, 40Х и др.). Эти стали (ГОСТ 4543—71) используются как

11. Механические свойства стали 09Г2 (0,10 % С; 1,65 % Mn; 0,32 % Si; 0,017 % S; 0,019 % P) [6]

| Обработка | Структура | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B}$ | $\delta_5, \%$ | $\sigma_{0,2}^{*1}$, МПа |
|--|-----------------------|----------------|------------|---------------------------------|----------------|---------------------------|
| | | МПа | | | | |
| Горячая прокатка Термическая обработка из ($\alpha + \gamma$)-области | Ферритно-перлитная | 410 | 500 | 0,82 | 25 | 490 |
| | Ферритно-мартенситная | 280 | 580 | 0,48 | 27 | 570 |

*1 После деформации на 5 % и нагрева при 200 °С, 1 ч.

конструкционные материалы в машиностроении, а также для металлоконструкций и крепежных деталей. Конкретное назначение, физические, механические и технологические свойства названных сталей подробно рассмотрены в справочной литературе [11, 16, 17, 32].

2. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Общая характеристика сталей. К группе среднелегированных высокопрочных сталей относятся стали 30ХГСН2А, 40ХСН2МА, 25Х2ГНТА. Поставляемые полуфабрикаты, рекомендуемые области применения и основные физические свойства этих сталей приведены в табл. 12—14.

Эти стали выплавляются в электродуговых печах с последующим вакуумно-дуговым переплавом. Стали хорошо деформируются в горячем состоянии, свариваются дуговой ручной и авто-

матической сваркой в среде защитных газов или под флюсом. Сталь 30ХГСН2А сваривается также электронно-лучевой сваркой.

Основной тип сварного соединения — сварка встык. Тавровые соединения допускаются, однако при этом обязательно должно быть утолщение металла обоих «полок» таврового соединения. Утолщение металла в зоне шва рекомендуется и для стыковых соединений. Сварные швы размещаются вне зоны действия концентраторов напряжения, предусмотренных в чертежах. Сварка проводится до закалки и отпуска на заданный уровень прочности. Перед сваркой детали следует нагревать до температуры 200—300 °С; сразу же после сварки необходим отпуск при 200—250 °С в течение 3 ч во избежание появления трещин.

Среднелегированные высокопрочные стали подвергают механической обработке до закалки. Наилучшая обрабатываемость резанием достигается в состоянии низкотемпературного отжи-

12. Полуфабрикаты, выпускаемые из высокопрочных среднелегированных сталей

| Сталь | Полуфабрикаты |
|----------------------------|---|
| 30ХГСН2А (ГОСТ 4543—71) | Поковки, штамповки, листы, трубы, прутки Поковки, штамповки, прутки, трубы Прутки, листы, трубы, профили, штамповки |
| 40ХСН2МА (ТУ 14-1-1885—85) | |
| 25Х2ГНТА (ТУ 14-1-3238—81) | |

13. Рекомендуемая область применения и температура эксплуатации сталей

| Сталь | Область применения | Температура эксплуатации, °С |
|----------|---|------------------------------|
| 30ХГСН2А | Высоконагруженные детали (цилиндры, балки, работающие на срез шпильки и осн, групповые болты, нагруженные осевой силой) | —70 ÷ +250 |
| 40ХСН2МА | Высоконагруженные детали, не имеющие значительных концентраторов напряжения | —70 ÷ +250 |
| 25Х2ГНТА | Балки, болты, осн, нагруженные внутренним давлением сосуды | — |

14. Физические свойства среднелегированных высокопрочных сталей при нормальной и повышенной температуре

| Сталь | ρ_s , г/см ³ | ρ_s , мкОм·м | λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С | | | | c , кДж/(кг·°С), при температуре, °С | | | | $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ , в интервале температур, °С | | | | | |
|----------|------------------------------|-------------------|--|------|------|------|--|-------|--------|---------|---|---------|---------|--|---------|--|
| | | | 25 | | 100 | | 200 | | 300 | | 100—200 | | 200—300 | | 300—400 | |
| | | | 100 | 200 | 300 | 100 | 200 | 300 | 20—100 | 100—200 | 200—300 | 300—400 | | | | |
| 30ХГСН2А | 7,77 | 0,44 | 28,5 | 29,4 | 30,6 | 31,4 | 0,503 | 0,545 | 0,587 | 10,6 | 11,2 | 13,0 | 14,9 | | | |
| 40ХСН2МА | 7,81 | 0,42—0,44 | 28,1 | 28,9 | 30,2 | 31,4 | 0,503 | 0,545 | 0,587 | 11,2 | 12,7 | 13,5 | 14,2 | | | |
| 25Х2ГНТА | 7,80 | — | — | 41,9 | 41,1 | 40,7 | — | — | — | 12,0 | 13,0 | 13,7 | — | | | |

га с быстрым охлаждением на воздухе от 680—700 °С. Чистовую обработку проводят после полной термической обработки. При финишной обработке шлифованием должны строго соблюдаться режимы, гарантирующие отсутствие прижога. После шлифования проводят отпуск при 200—300 °С. После сверления отверстий в отожженной стали необходимо удалять заусенцы и осуществлять развертывание или растачивание отверстий после полной термической обработки, снимая при этом поверхностный слой, окисленный при нагреве под закалку. Толщина окисленного слоя может достигать 20—50 мкм. Значительно более толстый окисленный и обезуглерожженный слой (до 300—500 мкм) остается после штамповки. Некоторые поверхности деталей сложной формы после штамповки не подвергаются механической обработке. В этом случае для обеспечения высокой усталостной прочности хорошие результаты дает интенсивное поверхностное пластическое деформирование (ППД), например дробеструйное. Перед ППД на штампованных поверхностях должны быть устранены грубые дефекты в виде запрессованной окалины, заковов и др. Резьбовые участки болтов или шпилек после термической обработки следует подвергать пескоструйной очистке.

В зонах концентрации напряжения параметр шероховатости поверхности должен быть не более $Ra = 1,6$ мкм, вне зоны действия концентраторов $Ra = 3,2$ мкм — для растянутых элементов или $Ra = 6,3$ мкм — для элементов, работающих на сдвиг.

Рекомендуемые режимы упрочняющей термической обработки и свойства сталей. Для достижения высокой прочности среднелегированные стали подвергают обычной закалке на мартенсит и низкому отпуску при 220—250 °С, который улучшает пластичность, вязкость и особенно сопротивление разрушению при сохранении высокого уровня прочности.

Во многих случаях еще более высокий комплекс этих свойств, определяющих конструкционную прочность стали, достигается в результате изотермической заковки на нижней бейнит или низкой изотермической за-

15. Рекомендуемые режимы упрочняющей термической обработки среднелегированных сталей

| Сталь | σ_B , МПа | Режим термической обработки |
|-------------|------------------|--|
| 30ХГСН2А | 1600—1800 | Закалка при 900 °С, масло; отпуск при 290 °С, 1 ч |
| | 1500—1700 | Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 270—300 °С; отпуск при 200—300 °С, 1 ч |
| | 1400—1600 | Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 280—330 °С |
| 40ХСН2МА *1 | 1800—2000 | Закалка при 900 °С, масло; отпуск при 200—260 °С |
| | 1800—2000 | Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 240—280 °С, 2—3 ч; отпуск при 240—260 °С, 2—3 ч |
| 25Х2ГНТА | 1500—1650 | Закалка при 860 °С, масло; отпуск при 200—230 °С, 2—3 ч |
| | 1500—1650 | Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 200—250 °С, 1 ч; отпуск при 200—230 °С |

*1 Применение изотермической заковки предпочтительнее.

ковки, после которой структура стали состоит из нижнего бейнита и мартенсита. В ряде случаев после изотермической заковки проводят низкий отпуск, что улучшает сопротивление разрушению.

В табл. 15 приведены рекомендуемые режимы упрочняющей термической обработки среднелегированных сталей. Стали имеют повышенную прокаливаемость: сталь 25Х2ГНТА — до 30 мм; сталь 30ХГСН2А — до 80 мм; для стали 40ХСН2МА размеры сечения не регламентируются.

Механические свойства сталей после различных вариантов упрочняющей обработки для различных температур испытаний приведены в табл. 16—18. На рис. 4 представлена диаграмма растяжения одной из сталей, а на рис. 5—8 — их характеристики сопротивления усталостному разрушению в зависимости от вида используемой упрочняющей обработки. Показатели вязкости и трещиностойкости сталей приведены в табл. 19, 20.

Прочность среднелегированных сталей тем выше, чем больше в них содержание углерода, но при этом будет более низким показатель тре-

щиностойкости K_{Ic} , в том числе сопротивление коррозии под напряжением. Поверхностное пластическое деформирование затрудняет образование трещины усталости, замедляет скорость роста малых трещин и значительно повышает сопротивление малоциклового усталости как на воздухе, так и в коррозионной среде. Для защиты от общей коррозии деталей из этих сталей применяют кадмирование, оксидное фосфатирование. Сопротивление коррозии под напряжением можно существенно повысить, применяя в качестве финишной операции поверхностное пластическое деформирование: дробеструйное, пневмодинамическое, вибронаклеп и др. В ряде случаев эффект ППД тем выше, чем выше уровень достигаемых при этом остаточных напряжений и больше глубина наклепанного слоя. С этих позиций особенно эффективно обкатка, раскатка и алмазное выглаживание. Алмазное выглаживание успешно применяется как операция, предшествующая хромированию поверхностей, от которых требуется высокая износостойкость (например, в паре шток—цилиндр). Малоцикловая усталость ушковых соеди-

16. Механические свойства среднелегированных высокопрочных сталей при нормальной температуре

| Сталь | Термическая обработка | E | | G | | μ | | | Растяжение | | | Кручение | | | Сжатие | | Срез |
|----------|---|-----|-----|------|------|------|----------------|------------------|-----------------|--------------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|--------|------|------|
| | | ГПа | | ГПа | | μ | σ _B | σ _{0,2} | σ _{пл} | δ ₅ , % | τ _B | τ _{0,3} | σ _{0,2} | τ _{ср} | | | |
| | | ГПа | ГПа | МПа | МПа | | | | | | | | | | МПа | | |
| 30XГСН2А | Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 290 °С, 1 ч | 195 | 77 | 0,26 | 1750 | 1400 | 1100 | 1150 | 8 | 1550 | 900 | 1500 | 1150 | 1500 | 1150 | 1500 | 1150 |
| 40XСН2МА | Изоотермическая закалка с выдержкой при 330 °С | 195 | 77 | 0,26 | 1600 | 1170 | 900 | 1000 | 10 | 1400 | 870 | — | 1000 | — | 1000 | — | 1000 |
| | Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 220 °С | 195 | 77 | 0,26 | 2000 | 1500 | 1250 | 1200 | 8 | 1700 | — | 1570 | 1200 | — | 1200 | — | 1200 |
| 25X2ГНТА | Изоотермическая закалка с выдержкой при 240—260 °С, отпуск при 240—260 °С | 195 | 77 | 0,26 | 1900 | 1440 | 1180 | 1200 | 8 | 1600 | 850 | 1500 | 1200 | — | 1200 | — | 1200 |
| | Закалка при 860 °С, отпуск при 200—250 °С | 195 | 76 | 0,28 | 1500 | 1200 | 1050 | 950 | 8 | 1350 | 950 | 1400 | 950 | — | 950 | — | 950 |

17. Механические свойства среднелегированных высокопрочных сталей при повышенных температурах

| Сталь | Термическая обработка | Температура испытания, °С | E | | G | | μ | Растяжение | | | Кручение | | |
|----------|---|---------------------------|-----|-----|------|------|------|----------------|------------------|-----------------|--------------------|----------------|------------------|
| | | | ГПа | | ГПа | | | σ _B | σ _{0,2} | σ _{пл} | δ ₅ , % | τ _B | τ _{0,3} |
| | | | ГПа | ГПа | МПа | МПа | МПа | | | | | | |
| 30XГСН2А | Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 290 °С, 1 ч | 200 | 185 | 70 | 0,26 | 1750 | 1200 | 850 | 10 | — | — | — | — |
| | | 300 | 180 | 70 | 0,28 | 1700 | — | 800 | 11 | — | — | — | — |
| 40XСН2МА | Изоотермическая закалка с выдержкой при 330 °С | 300 | 180 | 65 | 0,28 | 1500 | 960 | 800 | 7 | — | — | — | — |
| | | 400 | 163 | 65 | 0,29 | 1330 | 930 | 760 | — | — | — | — | — |
| 25X2ГНТА | Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 220 °С | 300 | 180 | — | — | 1700 | 1300 | — | — | — | — | — | — |
| | | 400 | 185 | — | — | 1450 | 1100 | — | — | — | — | — | — |
| | | 200 | 185 | — | — | 1850 | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 300 | 180 | — | — | 1750 | — | — | — | — | — | — | — |
| 25X2ГНТА | Закалка при 860 °С, отпуск при 200—250 °С | 250 | — | — | — | 1550 | 1100 | — | — | — | — | — | — |
| | | 300 | — | — | — | 1300 | — | — | — | — | — | — | — |

18. Механические свойства среднелегированных высокопрочных сталей при температуре -70 °С

| Сталь | Термическая обработка | E | | G | μ | Растяжение | | | |
|----------|---|-----|-----|------|------|----------------|------------------|-----------------|--------------------|
| | | ГПа | | | | σ _B | σ _{0,2} | σ _{пл} | δ ₅ , % |
| | | ГПа | ГПа | МПа | МПа | | | | |
| 30XГСН2А | Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 290 °С, 1 ч | 195 | 77 | 0,26 | 1750 | 1500 | — | — | 7 |
| | | 195 | 77 | 0,26 | 1700 | 1250 | — | — | 10 |
| 25X2ГНТА | Изоотермическая закалка с выдержкой при 330 °С | — | — | — | 1700 | 1450 | — | — | — |
| 25X2ГНТА | Закалка при 860 °С, отпуск при 200—250 °С | — | — | — | 1700 | 1450 | — | — | — |
| | | — | — | — | 1700 | 1450 | — | — | — |

нений может быть значительно (в 1,5—2 раза по числу циклов) улучшена путем раскатки поверхности отверстия проушины. Значительнее (до 5—10 раз) увеличивается долговечность в результате запрессовки стальной втулки с наитгом 0,4—1,2 %.

Разрабатывается принципиально новый метод повышения усталостной

прочности высокопрочных сталей, заключающийся в имплантации генерируемых источником высокой энергии ионов азота, бора и других в поверхностные слои стальной детали.

При применении среднелегированных сталей высокой прочности следует учитывать их повышенную чувствительность к концентрации напряже-

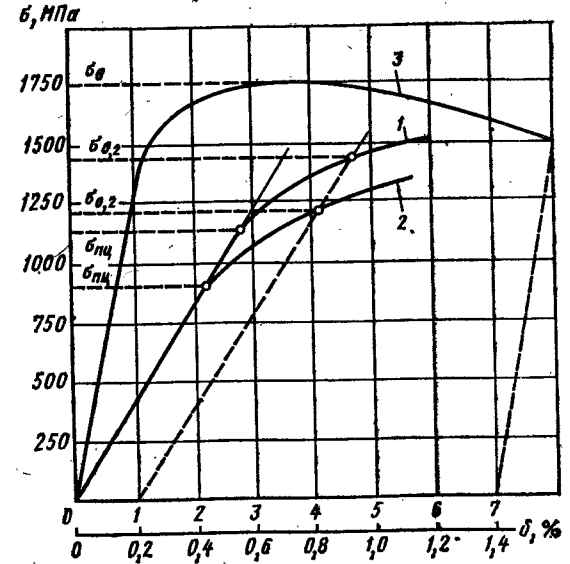


Рис. 4. Диаграммы деформации в упругоэластической области (δ ≤ 1 %; 1 и 2) и полная диаграмма растяжения (3) стали 30XГСН2А: 1, 3 — закалка в масле с отпуском при 200 °С, σ_B = 1750 МПа; 2 — изотермическая закалка в селитру при 300 °С, σ_B = 1600 МПа

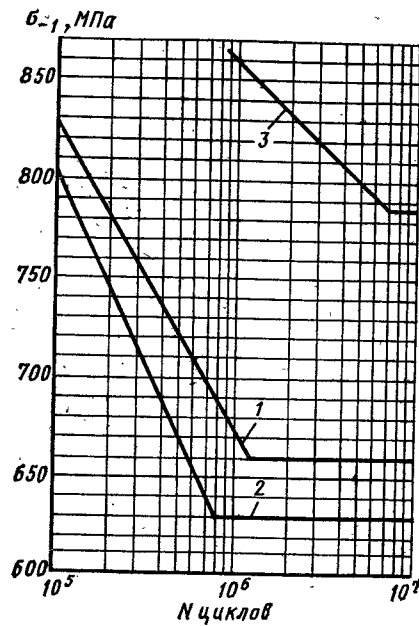


Рис. 5. Кривые усталости стали 30ХГСН2А при знакопеременном изгибе гладких образцов: 1, 2 — шлифованные образцы; 3 — обкатка роликом после шлифования; 1, 3 — закалка в масле с отпуском при 200 °С, $\sigma_B = 1720$ МПа; 2 — изотермическая закалка в селитре при 300 °С, $\sigma_B = 1600$ МПа

ний, особенно при циклических нагрузках и высоких значениях коэффициента формы.

19. Ударная вязкость сталей (KCU, МДж/м²) при различной температуре испытаний

| Сталь | Режим обработки | Температура испытаний, °С | | | | |
|----------|---|---------------------------|-----|-----|------|------|
| | | +20 | -40 | -70 | -130 | -196 |
| 30ХГСН2А | Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 280—330 °С | 0,9 | — | 0,7 | 0,25 | 0,13 |
| 25Х2ГНТА | Закалка при 860 °С, отпуск при 200—250 °С | 0,7 | 0,6 | 0,6 | — | 0,2 |

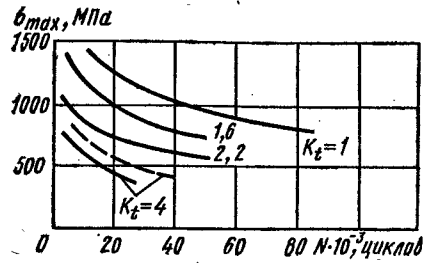


Рис. 6. Влияние концентрации напряжений на малоцикловую усталость при растяжении ($R = 0,1$; $\nu = 2$ Гц) образцов с круговой выточкой из стали 30ХГСН2А, $\sigma_B = 1700$ МПа: сплошные линии — закалка в масле; штриховая линия — изотермическая закалка

Рекомендации конструктору и технологу. Для деталей из стали 30ХГСН2А необходимы возможно более плавные переходы в местах изменения сечения, отсутствие перекосов при монтаже и сборке. Параметр шероховатости поверхности в зонах концентрации напряжений должен быть не более $Ra = 1,6$ мкм. В отверстиях проушин требуемое качество поверхности достигается развертыванием или чистовым растачиванием. Нарезание резьбы в деталях из стали 30ХГСН2А рекомендуется проводить до термической обработки; после термической обработки резьбу следует подвергать пескоструйной обработке. При осевой нагрузке усиле затяжки болтов должно вызывать напряжение не выше 450 МПа. Прочность сварных соединений, термически обработанных после

Рис. 7. Кривые усталости стали 40ХСН2МА ($\sigma_B = 1850$ МПа) при знакопеременном изгибе гладких образцов: 1 — шлифование; 2 — шлифование и обкатка роликом

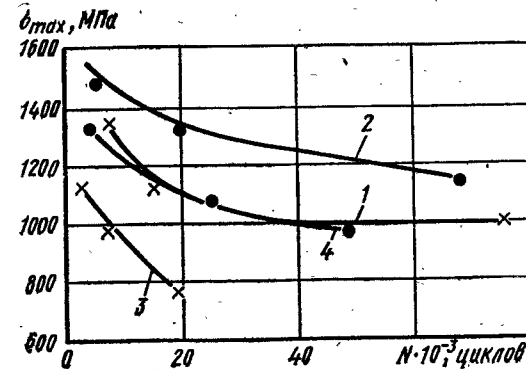
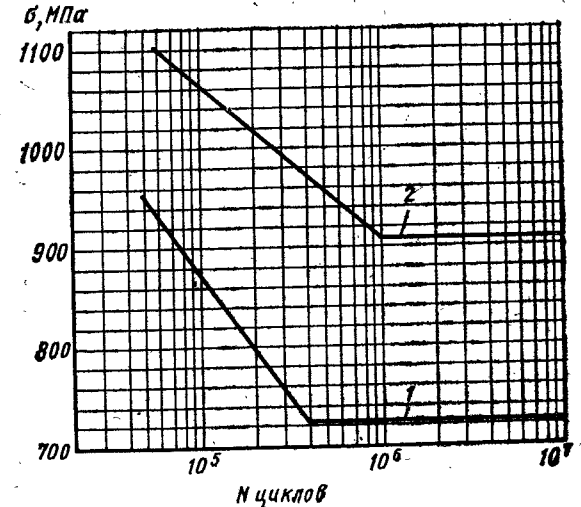


Рис. 8. Малоцикловая усталость стали 40ХСН2МА; $\sigma_B = 1850$ МПа при пульсирующем растяжении ($\nu = 0,2$ Гц): 1, 2 — воздух; 3, 4 — вода; X — шлифование; ● — наклеп дробью

20. Показатели вязкости и трещиностойкости сталей

| Сталь | Термическая обработка | σ_B , МПа | KCU, КСТ | | K_{Ic} , МПа·м ^{1/2} |
|----------|--|------------------|----------|------|---------------------------------|
| | | | МДж/м² | | |
| 30ХГСН2А | Закалка при 900 °С, масло; отпуск при 290 °С; 1 ч | 1750 | 0,6 | — | 250—280 *2 |
| | | 1600 | 0,85 | 0,12 | 250—300 *1 |
| 40ХСН2МА | Изотермическая закалка с выдержкой при 300 °С | 1900 | 0,5 | — | 180—210 |
| | Изотермическая закалка с выдержкой при 240—260 °С; отпуск при 240—260 °С | | | | |

*1 Внецентренное растяжение компактного образца ($t = 25$ мм).

сварки, составляет 0,6—0,7 σ_b основного материала.

Поверхностное упрочнение (дробеструйное, вибронаклеп и др.) увеличивает в 2—3 раза ресурс детали при малоцикловом нагружении; повышает предел выносливости при испытании на знакопеременный изгиб в лабораторной атмосфере на 15—20 %, в коррозионной среде — до 1,5—2 раз, увеличивает сопротивление коррозии под напряжением. В ушковых соединениях наибольший эффект достигается путем зааресовки втулки с натягом.

Для деталей, от которых требуется повышенная износостойкость, применяют хромовое покрытие, наносимое на предварительно упрочненную ППД поверхность; для устранения течи и гидросистемах хромированная поверхность подвергается алмазному выглаживанию. Для восстановления изношенного хромового покрытия допускается повторное хромирование (до 5 раз) после зачистки. Защита деталей от коррозии — фосфатирование с последующим нанесением лакокрасочных покрытий.

Более высокая прочность стали 40XCH2MA по сравнению со сталью 30XCH2A обусловлена повышенным (0,37—0,43 %) содержанием углерода, что делает ее более чувствительной к концентрации напряжений и поверхностным дефектам. По этой причине сталь 40XCH2MA целесообразно применять для деталей простой формы, не имеющих значительных перепадов жесткости и других концентраторов напряжений. Следует предъявлять повышенные требования в отношении параметров шероховатости поверхности, отсутствия рисок от механической обработки, недопустимости монтажных перекосов. В зонах концентрации напряжений рекомендуемый параметр шероховатости поверхности не более $R_a = 0,8$ мкм. Напряжения при затяжке болтов из стали 40XCH2MA не должны превышать 300 МПа. При изготовлении деталей из стали 40XCH2MA, испытывающих при эксплуатации повторные нагрузки, необходимо применять поверхностное пластическое деформирование, которое повышает служебные

свойства еще в большей мере, чем у деталей стали 30XCH2A. Защита стали от коррозии такая же, как и стали 30XCH2A. Требования в отношении концентраторов напряжения, параметров шероховатости поверхности для стали 25X2ГНТА такие же, как и для стали 30XCH2A. При меньшей статической прочности сталь 25X2ГНТА практически не уступает по пределу выносливости стали 30XCH2A. Прочность сварного соединения (встык) 0,5—0,65 σ_b основного металла. Для выравнивания несущей способности рекомендуется местное усиление сварных швов с плавным переходом. После шлифования требуется отпуск при 200—230 °С в течение 3 ч. Так же как и для других высокопрочных сталей, притупление в отверстиях после термической обработки следует удалять чистовым растачиванием или развертыванием; кромки отверстий должны быть скруглены или иметь фаски. Сварные швы следует располагать вне зоны концентрации напряжений. Сталь 25X2ГНТА можно применять для цементуемых деталей.

3. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫЕ (МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИЕ) СТАЛИ

Стали этого класса обладают уникальным комплексом механических свойств: высокой прочностью при достаточной пластичности и вязкости, высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, хрупкому и усталостному разрушению, что в сочетании с хладостойкостью, теплостойкостью, коррозионной стойкостью и размерной стабильностью определяет такую эксплуатационную надежность изделий из мартенситно-старееющих сталей, которая не достигается при использовании сталей других классов [24].

Мартенситно-старееющие стали — это безуглеродистые комплексно легированные сплавы на железной основе, у которых определенное сочетание легирующих элементов обеспечивает формирование в процессе соответствующей

термической обработки пластичной матричной фазы — мартенсита замещения, армированной дисперсными высокопрочными, равномерно распределенными частицами интерметаллидных фаз.

Основу мартенситно-старееющих сталей составляет безуглеродистый железоникелевый мартенсит (8—20 % Ni). Высокая концентрация никеля обеспечивает устойчивость переохлажденного аустенита сталей этого класса, способствует формированию в них при закалке мартенситной структуры, в том числе и при условии замедленного охлаждения. Никель повышает растворимость многих элементов замещения в аустените и уменьшает их растворимость в мартенсите, благодаря чему закалкой можно зафиксировать сильно пересыщенный α -твердый раствор (мартенсит замещения), способный к интенсивному дисперсионному твердению при старении.

Дисперсионное твердение железоникелевого мартенсита вызывают титан, бериллий, алюминий, марганец, ванадий, молибден, вольфрам, ниобий, тантал, кремний и другие элементы, характеризующиеся ограниченной растворимостью в α -Fe (рис. 9), причем наибольшее упрочнение при старении (в условиях равной атомной концентрации) обеспечивают те из них (титан, алюминий, бериллий), равновесная концентрация которых в мартенсите минимальна.

Никель (а в некоторых сталях и кобальт) способствуют увеличению объемной доли выделяющихся при старении упрочняющих фаз и тем самым повышают эффективность процесса дисперсионного твердения (рис. 10 и 11). Положительное влияние кобальта в мартенситно-старееющих сталях обусловлено также формированием в мартенситной матричной фазе при старении упорядоченных областей, являющихся дополнительным фактором упрочнения. Хром в мартенситно-старееющих сталях способствует повышению их коррозионной стойкости и одновременно вызывает дополнительное упрочнение при старении (рис. 12).

Подробно основные системы легирования мартенситно-старееющих сталей, особенности их фазового состава

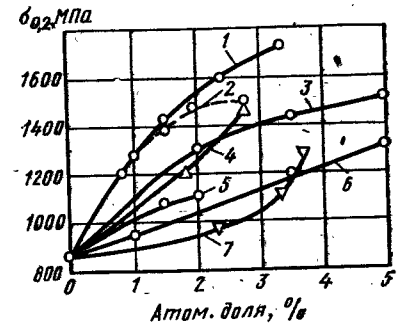


Рис. 9. Влияние концентрации легирующих элементов на упрочнение железоникелевого мартенсита (18 % Ni) при старении [24]: 1 — Ti; 2 — V; 3 — Nb; 4 — Al; 5 — Mn; 6 — Si; 7 — Mo

и структурного состояния, а также представления о природе высокой прочности сталей этого класса рассмотрены в монографиях [5, 25]. Эти стали содержат, как правило, значительное количество различных легирующих элементов. При их выборе основываются на требованиях строгого баланса компонентов, поскольку при этом необходимо обеспечить не только эффективное дисперсионное твердение мартенсита при старении, но и гдет-

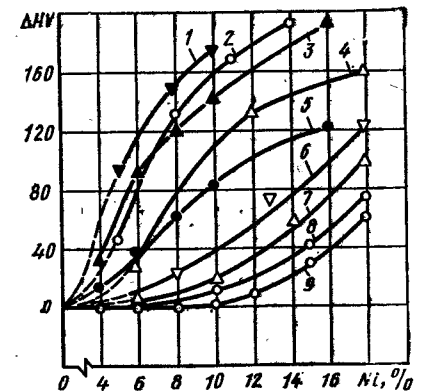


Рис. 10. Влияние содержания никеля на повышение твердости (ΔHV) при старении мартенсита сталей на основе Fe с различным дополнительным легированием [24]: 1 — 5 % Mn; 2 — 4 % Nb; 3 — 1,5 % Ti; 4 — 6 % Ta; 5 — 1,5 % Al; 6 — 3 % Si; 7 — 7 % V; 8 — 10 % W; 9 — 5 % Mo

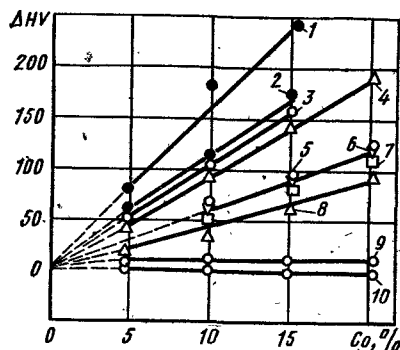


Рис. 11. Влияние содержания кобальта на повышение твердости (ΔHV) при старении железоникелевого мартенсита (14—18 % Ni), содержащего различные элементы замещения [20]:
1 — H18Ф7; 2 — H18В10; 3 — H16М5;
4 — H16С3; 5 — H14В4; 6 — H18Та6;
7 — H16Г5; 8 — H16; 9 — H16Т; 10 — H16Ю

вратить появление в структуре стали большого количества остаточного аустенита, снижающего прочность, или δ -феррита, уменьшающего пластичность сталей.

Мартенситно-старяющие стали характеризуются высокой технологичностью [11, 24]. Их упрочняющая термическая обработка, заключающаяся в закалке и старении, сравнительно

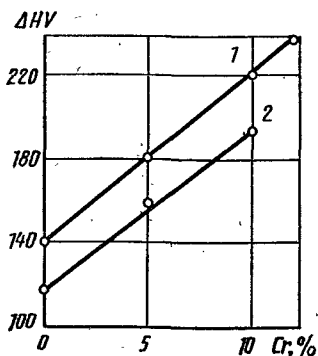


Рис. 12. Влияние содержания хрома на повышение твердости (ΔHV) при старении сталей [24]:
1 — Fe + 11 % Ni + 1,1 % Ti; 2 — Fe + 11 % Ni + 1,1 % Al

проста. Сталь имеют глубокую прокаливаемость, закаливаются на мартенсит практически при любой скорости охлаждения. Изменения размеров при термической обработке этих сталей минимальны, поэтому практически исключены поводки и коробления изделий самой сложной формы. Сталь этого класса, как правило, не содержат углерода, поэтому неопасности их обезуглероживания при термической обработке в обычной среде. Указанные преимущества мартенситно-старяющих сталей позволяют подвергать термической обработке готовые детали и изделия.

В закаленном состоянии указанные стали характеризуются высокой пластичностью и вязкостью, малым коэффициентом деформационного упрочнения; потому при изготовлении проволоки, ленты, труб и других полуфабрикатов эти стали можно деформировать с высокими степенями обжатия (до 90 %), не прибегая к промежуточным разупрочняющим обработкам. Сталь хорошо свариваются, а также штампуются в горячем и холодном состоянии; обработка резанием закаленных сталей не вызывает трудностей.

Закаленные мартенситно-старяющие стали имеют структуру мартенсита замещения. Легирующие элементы, вызывающие старение, значительно влияют на свойства несостаренного мартенсита, поэтому прочность, пластичность и вязкость закаленных сталей разных составов весьма близки и находятся, как правило, в следующих пределах [24]: $\sigma_B = 900 \div 1200$ МПа; $\sigma_{0,2} = 800 \div 1100$ МПа; $\delta = 15 \div 20$ %; $\psi = 50 \div 80$ %; $KCV = 1,5 \div 3$ МДж/м².

Старение мартенситно-старяющих сталей приводит к повышению их прочности, но одновременно снижает вязкость и пластичность. Наиболее высокое упрочнение достигается для всех сталей при старении в интервале температур 480—520 °С (рис. 13); при этом в зависимости от состава сталей временное сопротивление может повышаться на 300—1800 МПа [24]. При более высокой температуре старения развиваются процессы, ведущие к разупрочнению: коагуляция частиц упрочняющих фаз и образова-

ние устойчивого аустенита вследствие обратного $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения.

Учитывая диапазон упрочнения, реализуемого в мартенситно-старяющих сталях ($\sigma_B = 1500 \div 3500$ МПа), диапазон размеров изделий (от проволоки до многотонных поковок), комплекс ценных физико-химических свойств и высокую технологичность — область применения этих сталей как конструкционного материала практически не ограничена и непрерывно расширяется. Наиболее целесообразно использовать их прежде всего для изделий, от которых требуется высокая удельная прочность в сочетании с высокой эксплуатационной надежностью.

Разработаны составы мартенситно-старяющих сталей, удовлетворяющие различным требованиям по уровню прочности, пластичности, коррозионной стойкости, по температурной области применения. Большинство сталей создано на базе систем Fe—Ni—Mo, Fe—Ni—Co—Mo, Fe—Cr—Ni—Mo, Fe—Cr—Ni—Co—Mo.

Мартенситно-старяющие стали общего назначения. Составы и свойства. Наиболее распространенные составы мартенситно-старяющих сталей и их свойства (по литературным данным) приведены в табл. 21 в соответствии с принятой классификацией по уровню прочности.

Как конструкционный материал общего назначения наилучшее сочетание прочности, пластичности и вязкости имеют стали, содержащие 17—19 % Ni, 7—12 % Co, 3—5 % Mo, 0,2—1,6 % Ti. Изменением содержания титана в этой системе можно варьировать прочность сталей в широких пределах (1400—2500 МПа) [24]. Наибольшее распространение в технике получила сталь типа H18K9M5T (ЭП-637).

Сталь H18K9M5T (ТУ 14-1-1531—75) содержит $\leq 0,03$ % С, 16,7—19,0 % Ni, 8,5—9,5 % Co, 4,6—5,5 % Mo, 0,5—0,8 % Ti, $\leq 0,15$ % Al. В закаленном состоянии (закалка при 820 °С, охлаждение на воздухе) сталь имеет следующие свойства: $\sigma_B = 1000 \div 1100$ МПа, $\sigma_{0,2} = 900 \div 1000$ МПа; $\delta \geq 15$ %. После закалки и старения при 480—500 °С (3 ч) сталь имеет в среднем следующие механические свойства: $\sigma_B = 1900 \div 2100$ МПа; $\sigma_{0,2} =$

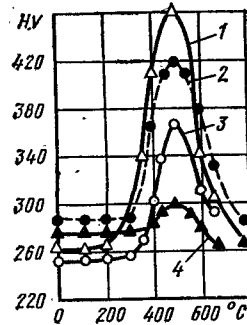


Рис. 13. Влияние легирующих элементов на упрочнение железоникелевого мартенсита при старении [24]:
1 — 17,5 % Ni + 1,2 % Ti; 2 — 17,5 % Ni + 1,1 % Al; 3 — 18 % Ni + 1,5 % Nb; 4 — 16,5 % Ni + 2,1 % Mo

$= 1800 \div 2000$ МПа; $\delta = 8 \div 10$ %; $\psi = 45 \div 55$ %; $KCV = 0,5 \div 0,7$ МДж/м².

В связи с широким и разнообразным промышленным применением было детально изучено влияние режимов термической обработки на комплекс основных свойств сталей H18K9M5T.

Перегрев стали H18K9M5T при горячей пластической деформации или термической обработке повышает ее чувствительность к трещине (табл. 22). Для измельчения зерна перегретой стали рекомендовано применение перед основной закалкой (820 °С) трехкратной закалки на воздухе или в воде от 900—950 °С с выдержкой 1 ч.

Оценивая возможность использования стали в виде крупных поковок, прутков и листов толщиной более 25 мм, установили ее склонность к тепловому охрупчиванию при замедленном охлаждении от 1150—1200 °С или при ступенчатом охлаждении в интервале 900—700 °С, связанную с разнородностью, но главным образом с образованием зернограничных выделений карбидов и карбонитридов титана. Для устранения явления теплового охрупчивания предложен режим термической обработки, включающий закалку от 1150—1200 °С с охлаждением в воде (для растворения

21. Содержание основных легирующих элементов и механические свойства¹ (средние) мартенситно-стареющих сталей общего назначения²

| Обозначение стали | Средняя концентрация легирующих элементов (по массе), % | Механические свойства | | | | | К _{CU} , МДж/м ² | Источник |
|---------------------------------|---|-----------------------|----------------|----------|--------|--------------------------|--------------------------------------|----------|
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | $\sigma_B \geq 2500$ МПа | | |
| | | МПа | | % | | | | |
| $\sigma_B = 1500 \div 2000$ МПа | | | | | | | | |
| H18K3M4T | 18 Ni; 3,2 Co; 4,2 Mo; 0,26 Ti | 1550 | 1500 | 9 | 49 | 0,46 | [22] | |
| H18K7M5T | 18 Ni; 7 Co; 5,5 Mo; 0,5 Ti | 1800 | 1700 | 8 | 50 | 0,5 | [23] | |
| H18K8M3T | 18 Ni; 8 Co; 3 Mo; 0,2 Ti | 1450 | 1400 | 15 | 65 | 0,8 | [22] | |
| H18K8M5T | 18 Ni; 8 Co; 5 Mo; 0,5 Ti | 1850 | 1800 | 12 | 60 | 0,5 | [22] | |
| H18K9M5T | 18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,5 Ti | 1900 | 1830 | 8 | 50 | 0,6 | [24] | |
| H18K9M5T | 18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,8 Ti | 2100 | 1900 | 8 | 50 | 0,5 | [22] | |
| H18K9M5T | 18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 1,2 Ti | 2180 | 1960 | 8 | 45 | 0,6 | [10] | |
| H15K9M5TЮ | 15 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,7 Ti; 0,9 Al | 1960 | — | 6 | 23 | — | [22] | |
| H16K4M5T2Ю | 16 Ni; 4,5 Co; 4,5 Mo; 2 Ti; 0,3 Al | 2050 | 1980 | 7,5 | 40 | 0,2 | [8] | |
| H12K8M3Г2 | 12 Ni; 8 Co; 3 Mo; 2 Мп | 1500 | 1480 | 9,6 | 57 | 0,6 | [22] | |
| H12K8M4Г2 | 12 Ni; 8 Co; 4 Mo; 2,3 Мп | 1700 | 1680 | 7 | 50 | 0,4 | [22] | |
| H18Ф6М3 | 18 Ni; 6 V; 3 Mo | 1650 | 1600 | 10 | 60 | 0,7 | [34] | |
| H18Ф6М6 | 18 Ni; 6 V; 6 Mo | 1940 | 1880 | 10 | 53 | 0,45 | [34] | |
| $\sigma_B = 2000 \div 2500$ МПа | | | | | | | | |
| H16K11M3T2 | 16 Ni; 11 Co; 3 Mo; 1,6 Ti | 2136 | 2070 | 11 | 64 | — | [10] | |
| H16K11M3T2 | 16 Ni; 11 Co; 3 Mo; 1,9 Ti | 2250 | 2220 | 12 | 60 | — | [10] | |
| H17K11M4T2Ю | 17 Ni; 11 Co; 4,5 Mo; 1,8 Ti; 1 Al | 2570 | 2550 | 8 | 46 | 0,25 | [10] | |
| H18K12M3T2 | 18 Ni; 12 Co; 3 Mo; 1,4 Ti | 2400 | 2350 | 9 | 50 | 0,2 | [24] | |
| H17K12M5T | 17 Ni; 12 Co; 5 Mo; 1 Ti | 2050 | 2000 | 8 | 45 | 0,3 | [8] | |
| H18K12M4T2 | 18 Ni; 12 Co; 4 Mo; 2 Ti | 2450 | 2350 | 7 | 35 | — | [8] | |
| H18K14M5T | 18 Ni; 14 Co; 5 Mo; 1,5 Ti | 2400 | — | 9 | 35 | — | [8] | |
| H18K4M7TC | 18 Ni; 4,5 Co; 7,7 Mo; 0,6 Ti; 0,7 Si | 2180 | 2060 | 7 | 34 | 0,35 | [22] | |
| H17K10M2B10T | 17 Ni; 10 Co; 1,5 Mo; 10 W; 0,7 Ti | 2350 | 2300 | 8,5 | 48 | 0,3 | [24] | |

Продолжение табл. 21

| Обозначение стали | Средняя концентрация легирующих элементов (по массе), % | Механические свойства | | | | | К _{CU} , МДж/м ² | Источник |
|--------------------------|---|-----------------------|----------------|----------|--------|--------------------------|--------------------------------------|----------|
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | $\sigma_B \geq 2500$ МПа | | |
| | | МПа | | % | | | | |
| $\sigma_B \geq 2500$ МПа | | | | | | | | |
| H12K12M10TЮ | 12 Ni; 12 Co; 10 Mo; 0,8 Ti; 1 Al | 3000 | 2950 | 2 | 4 | — | [10] | |
| H12K15M10 | 12 Ni; 15 Co; 10 Mo | 2500 | 2400 | 6 | 30 | 0,2 | [22] | |
| H13K15M10 | 13 Ni; 15 Co; 10 Mo | 2600 | 2500 | 6 | 30 | 0,2 | [24] | |
| H13K16M10 | 13 Ni; 16 Co; 11 Mo | 2800 | 2740 | 8 | 42 | — | [22] | |
| H12K16M12 | 12 Ni; 16 Co; 12 Mo | 2800 | 2740 | 5 | 40 | 0,2 | [24] | |
| H8K18M14 | 8 Ni; 18 Co; 14 Mo | 3500 | 3400 | 1 | 3 | — | [22] | |
| H12K12M7B7 | 12 Ni; 12 Co; 7,8 Mo; 6,7 W | 2600 | — | 6 | 30 | 0,25 | [10] | |
| H16K15B9M2 | 16 Ni; 15 Co; 9 W; 2 Mo | 2600 | 2400 | 6 | 30 | 0,2 | [1] | |

¹ Свойства сталей после старения при температурах 480—520 °С.² Основные промышленностью марки мартенситно-стареющих сталей поставляются по техническим условиям.

22. Чувствительность образцов стали 00H18K9M5T к поверхностной усталостной трещине [37]

| Заготовка для изготовления образца | Термическая обработка | Номер зерна | σ_B образцов, МПа | |
|--|--|-------------|--------------------------|------------|
| | | | гладких | с трещиной |
| Горячекатаный лист (толщиной 2,5 мм) | Закалка при 820 °С, 1 ч + старение при 450 °С, 3 ч | 8 | 1940 | 1940 |
| | | 1—3 | 1860—1950 | 1500—1720 |
| Перегретый пруток (1100 °С, 2 ч), $\varnothing 130$ мм | Закалка 3 раза при 920 °С, 1 ч, +820 °С, 1 ч, +450 °С, 3 ч | 5—6 | 1930 | 1900—1990 |
| | | | | |

пограничных выделений) и последующую трехкратную закалку при 900—950 °С (для измельчения зерна) (табл. 23).

Применительно к стали H18K9M5T были опробованы различные комбинированные способы термической обработки, в том числе и термоциклирова-

ние, для получения двухфазной ($\alpha + \gamma$)-структуры. Путем стабилизации 18—30 % аустенита (особенно если аустенит получен в результате применения термоциклической обработки) могут быть существенно повышены пластичность, ударная вязкость и вязкость разрушения, сопротивление

23. Влияние режима термической обработки крупных поковок из стали Н18К9М5Т на ее свойства [36]

| Термическая обработка | Направление волокна | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ_5 | ψ | KCU , МДж/м ² |
|---|---------------------|------------|----------------|------------|--------|----------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Закалка 820 °С, 1 ч + старение 480 °С, 3 ч | Продольное | 1850—2200 | 1800—2100 | 6—8 | 25—50 | — |
| | Поперечное | 1850—2200 | 1800—2100 | 2—4 | 5—30 | |
| 1200 °С, 2 ч, вода + 3 раза 970 °С, 1 ч, вода + 520 °С, 3 ч | Продольное | 1950—2100 | 1850—2050 | 6—10 | 40—58 | — |
| | Поперечное | 1950—2100 | 1850—2050 | 5—8 | 25—50 | |

ударно-циклическому нагружению при незначительном снижении прочности стали (табл. 24).

Значительно влияет на свойства стали Н18К9М5Т и режим старения. Длительное (до 40—50 ч) старение при 425—450 °С обеспечивает более высокие прочностные свойства стали, чем старение при 480—500 °С при практически одинаковых показателях пластичности. С помощью комбинированного старения (500 °С, 3 ч + 425 °С), сократив время выдержки вдвое, можно получить ту же прочность стали, что и при длительном низкотемпературном старении. Отличительной особенностью стали Н18К9М5Т является то, что пластичность, вязкость разрушения, работа ударного изгиба образцов с трещиной изменяются при возрастании упрочнения практически независимо от режима старения.

Проведена оценка работоспособности сталей в различных условиях эксплуатации. Параметры, характеризующие конструктивную прочность сталей Н18К9М5Т, свидетельствуют о высоком сопротивлении развитию трещины. После полного цикла упрочняющей обработки отношение временного сопротивления образцов с надрезом к временному сопротивлению гладких образцов (σ_B^H/σ_B) существенно больше 1 (1,4—1,6); ударная вязкость образ-

цов с заранее нанесенной трещиной также весьма высока (0,15—0,25 МДж/м²). Вязкость разрушения K_{Ic} , хотя и снижается по мере роста предела текучести, однако во всех случаях превышает уровень, достигаемый в углеродсодержащих легированных сталях эквивалентной прочности (табл. 25).

Меньшая чувствительность стали Н18К9М5Т к надрезу проявляется и в условиях усталостного нагружения. По сопротивлению усталости сталь соответствует углеродсодержащим конструкционным сталям равной прочности (рис. 14), а при ударно-усталостном нагружении ее стойкость в 2—4 раза выше [24].

Как и многим другим мартенситно-старующим сталям, стали Н18К9М5Т свойственно высокое сопротивление развитию малой пластической деформации. Для достижения максимального предела упругости ($\sigma_{0,002} = 1275 \div 1370$ МПа) рекомендуют старение при 450 °С, 4 ч [28]. Ступенчатое старение по режиму 480 °С, 30 мин + 425 °С, 8 ч позволяет повысить предел упругости $\sigma_{0,002}$ до 1575 МПа.

При определенных режимах термической обработки благодаря стабилизации некоторого количества аустенита наряду с высокими упругими характеристиками сталь Н18К9М5Т обладает также и эливарными свой-

24. Механические свойства (средние значения) стали Н18К9М5Т при различных способах получения остаточного аустенита [24]

| Вариант | Термическая обработка | Количество аустенита, % | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU , МДж/м ² | K_{Ic} , МПа·м ^{1/2} | Число циклов до разрушения при напряжении σ_{max} , МПа | | |
|-------------------------------|--|-------------------------|------------|----------------|----------|--------|----------------------------|---------------------------------|--|--------|------|
| | | | | | | | | | 1100 | 1650 | 2600 |
| Обычная термическая обработка | Закалка 820 °С, старение 490 °С, 3 ч | 0 | 2100 | 2050 | 8 | 57 | 0,4 | 97 | 48 000 | 20 000 | 4600 |
| | 820 °С, 5 мин (дважды), старение 490 °С, 3 ч | 18 | 1950 | 1930 | 10,8 | 63 | 0,9 | 143 | 60 000 | 23 000 | 4400 |
| Нагрев в двухфазной области | Закалка 820 °С, старение 550 °С, 3 ч | 28 | 1800 | 1750 | 8,7 | 60 | 0,4 | 115 | 33 000 | 13 000 | 3740 |
| | Закалка 820 °С, старение 600 °С, 30 мин | 19 | 1790 | 1730 | 10,7 | 58 | 0,6 | 128 | 38 000 | 13 600 | 3700 |
| Тепловая стабилизация | Вакалка 820 °С, старение 650 °С, 5 мин | 18 | 1810 | 1750 | 10 | 63 | 0,7 | 137 | 43 000 | 17 600 | 4100 |
| | Нагрев при 820 °С, изотермическая выдержка при 110 °С, 5 мин, старение при 490 °С, 3 ч | 30 | 1860 | 1800 | 10 | 60 | 0,6 | 113 | 50 000 | 12 000 | 250 |

25. Вязкость разрушения стали Н18К9М5Т с различным содержанием титана [24]

| Ti, % | $\sigma_{0,2}$, МПа | K_{Ic} , МПа·м ^{1/2} |
|-------|----------------------|---------------------------------|
| 0,2 | 1400 | 115—180 |
| 0,4 | 1700 | 103—170 |
| 0,8 | 1950 | 93—155 |

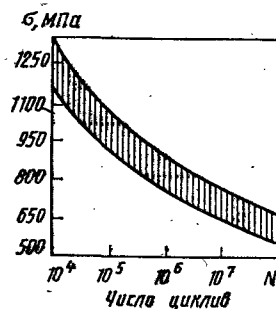


Рис. 14. Кривая усталости образцов из стали Н18К9М5Т [24]

ствами, т. е. малым изменением модуля упругости в климатическом интервале температур (табл. 26).

Оптимальное сочетание элннварных и механических свойств получено на стали Н21К9М5Т с повышенным со-

26. Физико-механические свойства стали Н18К9М5Т после старения при разных температурах [12]

| Температура старения, °С | ТКМУ × 10 ⁻⁴ , 1/°С | ТКЧ | γ-фаза, % | σ, МПа | | | δ, % | ψ, % |
|--------------------------|-----------------------------------|------|--------------|--------------------|------------------|----------------|---------|---------|
| | | | | σ _{0,005} | σ _{0,2} | σ _B | | |
| 450 | — | —175 | 0 | 1600 | 1800 | 1900 | 10 | 62 |
| 480 | —250 | —160 | 0 | 1700 | 2100 | 2200 | 8 | 58 |
| 530 | —225 | —140 | 15 | 1300 | 2000 | 2080 | 10 | 57 |
| 600 | — | —38 | 40 | 980 | 1750 | 1850 | 12 | 55 |
| 630 | —65 | —30 | 50 | 850 | 1650 | 1750 | 14 | 64 |
| 650 | — | —80 | 40 | — | — | — | — | — |

Примечание. ТКМУ — температурный коэффициент модуля упругости; ТКЧ — температурный коэффициент частоты.

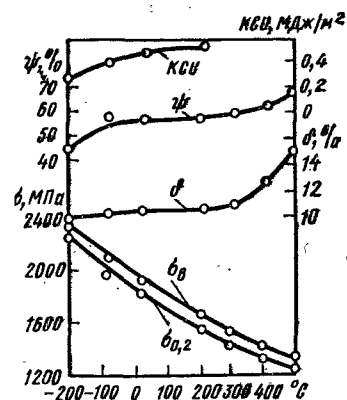


Рис. 15. Зависимость механических свойств стали Н18К9М5Т от температуры испытаний [24]

держанием никеля (после закалки от 850—900 °С и старения при 575 °С, 3 ч ТКЧ = $-30 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, $\sigma_{0,005} = 1100 \div 1150$ МПа).

Сталь Н18К9М5Т сохраняет свою работоспособность в широком интервале температур: от криогенных до +400 °С (рис. 15). Пониженные температуры испытания до -196 °С увеличивает временное сопротивление от 2000 до 2400 МПа при незначительном уменьшении пластичности и вязкости ($KCU = 0,3 \div 0,4$ МДж/м², $\delta = 7 \div$

27. Физико-механические свойства стали Н18К9М5Т [24]

| Свойства | Значения |
|---|----------------------|
| Удельное электрическое сопротивление ρ_1 , мкОм·м: после закалки; после старения при 480 °С, 3 ч | 0,60—0,51; 0,38—0,39 |
| Коэффициентная сила, А/м: после закалки; после старения при 480 °С, 3 ч | 1750—1910; 2150 |
| Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$ при 20 °С, МПа | 19 |
| Модуль сдвига $G \cdot 10^{-4}$, МПа | 7—7,2 |
| Коэффициент Пуассона μ | 0,3 |
| Плотность, т/м ³ | 8 |
| Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С (20—480 °С) | 11,2 |
| Изменение длины $\Delta L/L \cdot 100$ после старения при 480—500 °С, % | -0,08 |
| Теплопроводность λ , Вт/(м·°С) (100—400 °С) | 25,5 |
| Удельная теплоемкость c , кДж/(кг·°С) (100—400 °С) | 0,480 |

9 %, $\psi = 40 \div 45$ %) [24]. При нагреве пропорционально уменьшаются прочностные характеристики, снижается предел упругости $\sigma_{0,002}$ [28] (от 1450 МПа при 20 °С до 1210, 930 и 755 МПа соответственно при 200, 300, 400 °С); тем не менее и при 300 °С сталь отличают достаточно высокие свойства и хорошее сопротивление ползучести.

В табл. 27 приведены некоторые физико-механические свойства стали Н18К9М5Т, среди которых особо важное значение имеет малое изменение размеров при полном цикле упрочняющей термической обработки (рис. 16).

Коррозионно-стойкие мартенситно-старенные стали. Составы и свойства. Вследствие высокого содержания ни-

келя мартенситно-старенные стали общего назначения превосходят по кор-

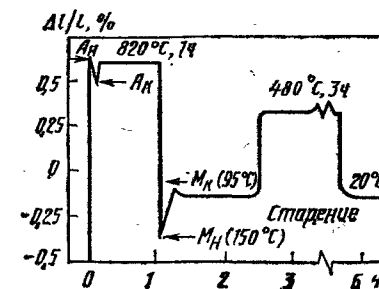


Рис. 16. Относительное изменение длины образцов при отдельных операциях упрочняющей термической обработки стали Н18К9М5Т [24]

розионной стойкости (без нагрузок) стойкость высокопрочных конструкционных низколегированных сталей, а по сопротивлению коррозии под напряжением уступают им [5]. Коррозионная стойкость сталей этого класса повышается при введении уже 5 % Cr; однако достаточную работоспособность сталей как в атмосферных условиях, так и в некоторых агрессивных средах обеспечивает введение не менее 10—12 % Cr.

Легирование хромом вносит существенные изменения в фазовый состав мартенситно-старяющихся сталей, способствует сохранению в стали значительного количества остаточного аустенита, в связи с чем коррозионно-стойкие мартенситно-старяющиеся стали фактически принадлежат к переходному (мартенситно-аустенитному) классу и в цикле их упрочняющей обработки рекомендуют перед старением проводить обработку холодом или холодную пластическую деформацию. Для мартенситно-старяющихся сталей, содержащих хром, характерным является рост коэффициента деформационного упрочнения, что позволяет использовать для них холодную пластическую деформацию перед старением как эффективный дополнительный фактор упрочнения [24].

Коррозионно-стойкие мартенситно-старяющиеся стали, содержащие кобальт, отличаются существенно более высокой теплостойкостью, сохраняя работоспособность до 550 °С.

Наиболее распространенные составы коррозионно-стойких мартенситно-старяющихся сталей и их свойства после полного цикла упрочняющей обработки (по литературным данным) приведены в табл. 28. Отдельно выделены стали, предназначенные для эксплуатации при повышенной температуре.

Стали, нашедшие широкое промышленное применение, условно могут быть разбиты на две группы: низкоуглеродистые слабостаряющиеся (типа 08X15H5D2T) и безуглеродистые интенсивно старяющиеся (типа 03X12H10D2TB и 03X11H10M2T).

Сталь 08X15H5D2T (ВНС-2) [5] в закаленном состоянии кроме мартенсита содержит около 10 % остаточного аустенита. Температура за-

калки составляет 950—1000 °С. Охлаждение при закалке должно быть ускоренным во избежание образования сетки зернограницных карбидных выделений. Закалка может одновременно сочетаться с обработкой давлением; при этом сталь ведет себя как аустенитная, если деформация заканчивается при температуре выше начала мартенситного превращения. В большинстве случаев после такой термомеханической обработки нет необходимости выполнять обработку холодом.

В закаленном состоянии сталь характеризуется повышенным временным сопротивлением (1150—1220 МПа) при очень высоком сопротивлении удару: $KCU = 1,5-2$ МДж/м². Старение при 450 °С способствует достижению более высокого упрочнения ($\sigma_B = 1350-1450$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1150-1250$ МПа). Прочность стали может достигать ~1600 МПа, если перед старением ее подвергнуть холодной пластической деформации.

Сочетание высоких механических свойств (в том числе и при криогенных температурах) с отличной свариваемостью делает сталь 08X15H5D2T перспективным материалом для многих отраслей современной техники.

Сталь 03X12H10D2TB [5, 28]. Закалка стали проводится с температур 870—1150 °С (в зависимости от содержания титана соответственно 0,4—1,2 %) и сочетается с обработкой холодом при -70 °С, 2 ч. Преимущество безуглеродистых сталей (по сравнению с низкоуглеродистыми) — меньшая чувствительность к охрупчиванию при замедленном охлаждении.

Оптимальный режим старения стали 03X12H10D2TB — нагрев при 450 °С, выдержка 6 ч. При этом достигаются следующие свойства: $\sigma_B = 1800$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1700$ МПа, $\sigma_{0,002} = 1260$ МПа, $\delta = 10$ %, HV 460. Проведение ступенчатого старения по схеме 450 °С + 400 °С позволяет повысить предел упругости ($\sigma_{0,002} = 1300$ МПа) и особенно релаксационную стойкость стали. Также весьма эффективным является применение перед старением холодной пластической деформации (при $\epsilon = 80$ % σ_B повышается до 2500 МПа).

28. Содержание основных легирующих элементов и механические свойства (средние) коррозионно-стойких мартенситно-старяющихся сталей¹

| Обозначение стали | Средняя концентрация легирующих элементов (по массе), % | Механические свойства | | | | | Источники |
|---------------------------------|---|-----------------------|----------------|----------|--------|----------------------------|-----------|
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU , МДж/м ² | |
| | | МПа | | % | | | |
| Стали для нормальных температур | | | | | | | |
| X5H12M3T | 5 Cr; 12 Ni; 3 Mo; 0,4 Ti | 1550 | 1450 | 15 | 61 | 0,6 | [22] |
| X11H10M2T | 11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 0,6 Ti | 1500 | 1400 | 8 | 50 | 0,5 | [22] |
| X11H10M2T | 11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 0,9 Ti | 1550 | 1480 | 12 | 58 | 0,5 | [24] |
| X11H10M2T | 11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 1,2 Ti | 1750 | 1700 | 12 | 50 | 0,37 | [23] |
| X12H8Л | 12 Cr; 8 Ni; 0,9 Be | 1860 | 1720 | 16 | 6 | — | [24] |
| X12H9D2TB | 12 Cr; 9 Ni; 2 Cu; 1 Ti; 0,4 Nb | 1800 | 1700 | 10 | — | — | [22] |
| X12H9MD2T | 12,5 Cr; 8,5 Ni; 2,2 Cu; 0,7 Mo; 0,8 Ti | 1550 | 1500 | 10 | 50 | 0,5 | [23] |
| X12H10D2T | 12 Cr; 9 Ni; 2 Cu; 1,2 Ti | 1720 | 1650 | 10 | 45 | — | [24] |
| X14H5MГ2ТЮ | 15 Cr; 5,5 Ni; 2 Mn; 1 Mo; 0,3 Ti; 0,3 Al | 1350 | 1280 | 16 | 50 | 0,45 | [33] |
| X14H5D2MB | 14,5 Cr; 5 Ni; 2,2 Cu; 1,5 Mo; 0,25 Nb | 1500 | 1270 | 15 | 63 | 0,9 | [30] |
| X15H5D2T | 14,5 Cr; 5 Ni; 2 Cu; 0,2 Ti | 1450 | 1350 | 11 | 50 | 0,8 | [8] |
| Теплостойкие стали | | | | | | | |
| X5H12K3M7T | 5 Cr; 12 Ni; 3 Co; 7 Mo; 1,1 Ti | 2000 | 1900 | 8 | 45 | 0,45 | [22] |
| X9H6K14M4Д | 9 Cr; 6 Ni; 14 Co; 4 Mo; 2 Cu | 1700 | 1600 | — | — | 0,4 | [2] |
| X11H4K7Г3M5T | 11 Cr; 4 Ni; 7 Co; 3 Mn; 5 Mo; 0,3 Ti | 1700 | 1450 | 15 | 50 | 0,2 | [3] |
| X12H8K5M2T | 12,5 Cr; 8 Ni; 5,2 Co; 2 Mo; 0,9 Ti | 1800 | 1700 | 9 | 40 | — | [24] |
| X12H7K7M4 | 12 Cr; 7 Ni; 7 Co; 4 Mo | 1600 | 1500 | 16 | 46 | 0,5 | [14] |
| X12H5K14M5T | 12 Cr; 5 Ni; 14 Co; 5 Mo; 0,3 Ti | 1700 | 1650 | — | — | 0,4 | [38] |
| X12H2K16M4 | 12 Cr; 2 Ni; 16 Co; 4 Mo | 1600 | 1550 | 12 | 55 | — | [8] |
| X13K13M5 | 13 Cr; 13 Co; 5,5 Mo | 1590 | 1340 | 15 | 50 | — | [35] |
| X13K16M5 | 13 Cr; 16,4 Co; 8 Mo | 1700 | 1550 | 14 | 48 | — | [35] |
| X14H6K9M5 | 14 Cr; 5,5 Ni; 9 Co; 5 Mo | 1550 | 1350 | 15 | 55 | 0,4 | [39] |
| X14H4K14M3T | 14,5 Cr; 4 Ni; 14,6 Co; 2,9 Mo; 0,2 Ti | 1650 | 1500 | 20 | 62 | 0,78 | [24] |

¹ Освоенные промышленностью марки коррозионно-стойких мартенситно-старяющихся сталей поставляются по техническим условиям.

29. Физические свойства стали 03X11N10M2T

| Параметр | Температура, °C | | | | | |
|--|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
| | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| $\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ | 10,4 (20—100) | 11,1 (100—200) | 11,7 (200—300) | 12,2 (300—400) | 12,8 (400—500) | — |
| $\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{ }^\circ\text{C)}$ | 17,7 | 18 | 19,3 | 20,1 | 20,9 | 21,3 |
| $c, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{ }^\circ\text{C)}$ | — | 0,460 | 0,502 | 0,544 | 0,628 | 0,712 |

Особенностью стали является высокий предел упругости ($\sigma_{0,002}$) при нагреве: 1100 МПа при 200 °C; 930 МПа при 300 °C; 830 МПа при 400 °C. Упругие элементы из этой стали могут длительно работать при температуре 300—350 °C, а кратковременно — при 400 °C.

Сталь 03X12N10D2TB обладает высокой коррозионной стойкостью не только в условиях обычных статических испытаний на коррозию, но и при непосредственном нагружении в таких коррозионно-активных средах, как 60 %-ная HNO_3 и 3 %-ная NaCl . В процессе этих испытаний не наблюдали изменений в значении предела упругости, упругого последования, упругого гистерезиса. Благодаря ценному сочетанию технологичности и высоких механических свойств, в первую очередь высокого сопротивления развитию малых пластических деформаций, сталь рекомендуется главным образом для изготовления пружин и других упругих элементов ответственного назначения.

Сталь 03X11N10M2T применяется для изготовления элементов обшивки, емкостей, нагруженных внутренним давлением, пружин. Температура эксплуатации — от криогенных температур до 500 °C. Рекомендуемый режим термической обработки: закалка при 900 °C, охлаждение на воздухе, старение при 500—525 °C, 2 ч. Некоторые физико-механические свойства стали приведены в табл. 29—31*.

Определенные преимущества имеет аустенитизация стали X11N10M2T при

* По данным С. И. Кишкиной.

пониженной температуре (800—850 °C), особенно при минимальном содержании в ней углерода. В этом случае при равной прочности (при других температурах закалки) сталь имеет существенно более высокую вязкость и одновременно наиболее высокую стойкость против коррозионного растрескивания под напряжением.

В качестве эффективной меры по предотвращению теплового охрупчивания рекомендуется там, где это возможно, вообще отказаться от проведения закалки. При условии завершения горячей пластической деформации изделий при температурах не выше 800—850 °C и ускоренного охлаждения обеспечивается наследование эффекта высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), нет опасности выделения в аустените охрупчивающих фаз и потому оказывается возможным одновременно повысить как прочностные характеристики, так и показатели пластичности и вязкости стали.

Пути совершенствования свойств мартенситно-старееющих сталей. Практика широкого промышленного применения мартенситно-старееющих сталей наряду с преимуществами сталей этого класса по реализуемым механическим и физико-химическим свойствам, по критериям технологичности показала, что ряд явлений, таких, как тепловое охрупчивание, задержанное разрушение, ликвационная неоднородность, трудности исправления перегретой структуры, которые наблюдаются в отдельных сталях, затрудняют и ограничивают их использование. По-

30. Показатели прочности и пластичности листов стали 03X11N10M2T толщиной 2—3 мм

| Обработка | Температура испытания, °C | E | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_{пц}$ | $\delta_{5,65} \sqrt{F}, \%$ |
|--|---------------------------|---------|------------|----------------|---------------|------------------------------|
| | | МПа | | | | |
| Закалка с 860 °C, старение при 500 °C, 2 ч | 20 | 196 000 | 1500 | 1430 | 1300 | 8 |
| | 300 | 165 000 | 1400 | 1320 | — | 5 |
| | 400 | 156 000 | 1350 | 1280 | — | 6 |
| | 500 | 145 000 | 1100 | 980 | — | 10 |
| Закалка с 860 °C на воздухе | 20 | — | 1000 | 900 | — | 15 |
| | — | — | 1250 | 1180 | — | 7 |
| Нагартовка, 50 %-ное обжатие | — | — | 1800 | 1650 | — | — |
| Нагартовка, 50 %-ное обжатие, старение 500 °C, 2 ч | — | — | — | — | — | — |

31. Влияние низкой температуры на свойства стали 03X11N10M2T

| Термическая обработка | Температура испытания, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | KCU, МДж/м ² |
|---------------------------------|---------------------------|------------|----------------|--------------|-------------------------|
| | | МПа | | | |
| Закалка с 860 °C на воздухе | 20 | 1000 | 900 | 15 | 2,2 |
| | —70 | 1150 | 1050 | 13 | 2,0 |
| | —196 | 1450 | 1300 | 13 | 1,0 |
| То же, старение при 500 °C, 2 ч | 20 | 1550 | 1470 | 10 | 0,7 |
| | —70 | 1700 | 1600 | 7 | 0,5 |

этому при разработке новых эффективных способов улучшения свойств мартенситно-старееющих сталей главное внимание уделяется изысканию возможностей устранения или предотвращения перечисленных явлений. Работы ведутся по двум основным направлениям: по пути совершенствования составов сталей и методов их выплавки, а также по пути изыскания оптимальных условий их термической и термомеханической обработки.

Первое направление включает разработку новых перспективных систем легирования мартенситно-старееющих сталей [9, 20, 33, 34], однако особое внимание уделяется получению точного химического состава сталей по углероду и легирующим элементам, способам выплавки с целью достиже-

ния максимальной однородности слитков и минимального содержания неметаллических включений [9]. Увеличение на 1 % содержания молибдена и кобальта в стали типа H18K9M5T повышает упрочнение соответственно на 140 и 60 МПа. Аналогичный эффект (60—70 МПа) наблюдается при повышении концентрации титана и алюминия всего на 0,1 % [9]. На пластичность и вязкость влияют даже незначительные колебания содержания примесных атомов (табл. 32), поэтому для выплавки мартенситно-старееющих сталей рекомендуется применять вакуумно-дуговой переплав и использовать шихту повышенной чистоты [9].

В зарубежной периодике имеются данные о применении методов порошковой металлургии для изготовления

32. Механические свойства стали типа Н18К9М5Т, выплавленной из шихты обычной (плавка 1) и повышенной (плавка 2) чистоты [9]

| Свойства стали после закалки и старения | Плавка 1 (0,009 % S, 0,003 % P) | Плавка 2 (0,0015 % S, 0,001 % P) |
|---|---------------------------------------|--|
| | σ_B , МПа | 1596 |
| $\sigma_{0,2}$, МПа | 1533 | 1526 |
| δ , % | 11 | 14 |
| ψ , % | 46,9 | 68,4 |
| Работа разрушения при ударном изгибе, Дж: | | |
| | при -70°C | 20,7 |
| при $+40^\circ\text{C}$ | 27,6 | 128,5 |

изделий из мартенситно-старееющих сталей разного состава. Порошковые материалы, в том числе и подвергавшиеся горячей экструзии, уступают литым кованым и литым экструдированным как по уровню упрочнения, так и по показателям пластичности [9]. В лучшем случае их пластичность составляла 90 % пластичности литого кованого материала.

Второе направление, связанное с оптимизацией условий термической и термомеханической обработки мартенситно-старееющих сталей, учитывает и использует особенности развития фазовых и структурных превращений в сталях этого класса. Разработаны рекомендации по совершенствованию проведения основных операций упрочняющей термической обработки — закалки и старения, по использованию различных вариантов пластической деформации в общем цикле обработки.

Комбинированная закалка. Эффективным средством воздействия на структурное состояние и свойства мартенситно-старееющих сталей является применение различных комбинированных вариантов закалки. Многократная закалка обеспечивает измельчение зерна и исправляет структуру перегретой стали [37]. В соче-

тании с предварительной высокотемпературной закалкой такая обработка рекомендована для предотвращения теплового охрупчивания сталей при их замедленном охлаждении (для крупных поковок и полуфабрикатов крупного сечения) [36]. В коррозионно-стойких мартенситно-старееющих сталях для измельчения зерна и рафинирования структуры чаще применяют сочетание двух последовательных закалок при различных температурах. Двойная закалка (750°C , 4 ч + 850°C , 2 ч) обеспечивает измельчение зерна в сталях типа 03X11H10M2T от 0 до 8 балла.

Важным результатом применения термоциклической обработки и других видов комбинированной закалки является сохранение в закаленных сталях некоторого количества остаточного аустенита [24], благодаря чему удается повысить пластичность и вязкость сталей, особенно при криогенных температурах [38], увеличить сопротивление ударно-циклическому нагружению [24].

Термомеханическая обработка. Практически всегда в процессе изготовления либо самих изделий, либо полуфабрикатов мартенситно-старееющих сталей подвергаются горячей пластической деформации. Для того чтобы обеспечить формирование мелкозернистой структуры, сохранить развитую полигонизованно-рекристаллизованную субструктуру рекомендуют понижать температуру окончания пластической деформации, соблюдать наиболее оптимальные условия деформирования (степень, скорость, число проходов), использовать ускоренное охлаждение. Наследование эффекта ВТМО позволяет обеспечить достаточную пластичность сталей, характеризующихся особо высокой прочностью, ослабляет зернограничную хрупкость коррозионно-стойких сталей и проявление теплового охрупчивания.

Высокая пластичность закаленных мартенситно-старееющих сталей позволяет применять холодную пластическую деформацию, в том числе и со значительными степенями обжатия, при производстве широкой номенклатуры полуфабрикатов (листов, ленты,

33. Влияние холодной пластической деформации на свойства стали Н18К9М5Т [28]

| Режим обработки | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ , % | K_{CSU} , МДж/м ² | σ_{TP} , МПа | | K_{IC} , МПа·м ^{3/2} | $\sigma_{хр}$, МПа |
|--|------------|----------------|--------------|--------------------------------|---------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------|
| | МПа | | | | $l_{TP} = 2,5$ мм | $l_{TP} = 6$ мм | | |
| | | | | | | | | |
| Закалка при 820°C , старение при 480°C | 1900 | 1800 | 5 | 0,62 | 1950 | 1740 | 132 | 600 |
| Двойная закалка (750°C , 4 ч + 850°C , 2 ч) обезпечивает измельчение зерна в сталях типа 03X11H10M2T от 0 до 8 балла. | 2100 | 1970 | 6 | 0,56 | 2120 | 1720 | 128 | 800 |

проволоки, труб и т. д.). Использование эффекта низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО) в цикле упрочняющей обработки сталей этого класса обеспечивает существенное повышение прочностных свойств, в том числе предела прочности образцов с поверхностной трещиной усталости (σ_B^{TP}), увеличивает напряжение, при котором еще не происходит коррозионное растрескивание в 3 %-ном растворе NaCl (σ_{RP}) (табл. 33) [28]. Положительное влияние НТМО усиливается при снижении температуры закалки, если в стали нет труднорастворимых частиц упрочняющих фаз. В отдельных случаях хорошие результаты дает применение холодной пластической деформации частично состаренного мартенсита [5, 28].

Для коррозионно-стойких мартенситно-старееющих сталей характерен более высокий коэффициент деформационного упрочнения [15], что повышает эффективность НТМО, особенно если деформирование проводить методом гидропрессования.

Комбинированное старение. Многочисленными исследованиями доказана эффективность применения для мартенситно-старееющих сталей комбинированных схем старения. В том случае, когда при старении выделяется одна упрочняющая фаза или несколько, но имеющих близкий интервал температур образования, целесообразнее использовать ступенчатое старение по схеме (В + Н), когда

последовательно выполняют сначала высокотемпературное старение, а затем при более низкой температуре. В результате увеличения объемной доли выделяющейся фазы, более высокой дисперсности частиц уровень упрочнения сталей может быть повышен при общем сокращении длительности старения. Для гетерофазных коррозионно-стойких мартенситно-старееющих сталей рекомендуется иная схема ступенчатого старения (Н + В), при которой вначале выполняют низкотемпературное, а затем высокотемпературное старение: на первом этапе старения (480°C) формируются области α -фазы, обогащенные хромом; на втором (500 — 550°C) происходит выделение R-фазы [39]. В результате такой обработки достигается более высокий комплекс свойств, в том числе и более высокая теплостойкость.

Применительно к мартенситно-старееющим сталям опробованы различные варианты динамического старения. В частности, достаривание под напряжением (температура 300°C , напряжение, равное $0,7\sigma_{0,2}$) после основного старения при пониженной температуре (при 400°C) приводит к релаксации микронапряжений и тем самым устраняет опасность задержанного разрушения, проявляющегося в снижении пластичности сталей при малых скоростях нагружения [24]. Важным следствием динамического достаривания является значительное (в 1,5—2 раза) увеличение предела упру-

гости ($\sigma_{0.002}$) мартенситно-старееющей стали (сталь 04X14K13H4M3ТВ) и релаксационной стойкости при практически неизменных значениях временного сопротивления и относительного удлинения [21]. Эффективность динамического достаривания существенно возрастает в том случае, если сталь перед основным старением подвергается НТМО [21]. Динамическое достаривание может быть реализовано различными способами [21], например путем заневоливания винтовых пружин, и использоваться для улучшения эксплуатационных характеристик различных видов упругих элементов.

Для отдельных видов изделий разрабатываются специальные варианты старения. Применяющиеся при изготовлении волокнистых композиционных материалов армирующую проволоку, которая подвергается холодной пластической деформации с предельными обжатиями (96—99%), нагревают при высокотемпературном старении 800 °С в течение 1—1,5 с. Такое скоростное старение позволяет реализовать очень высокий предел прочности (4200 МПа при диаметре проволоки 40 мкм) и избежать охрупчивания ($\delta = 4\%$), которое имеет место при обычном старении такой проволоки. Совмещение старения мартенситно-старееющих сталей с процессом азотирования наряду с объемным упрочнением обеспечивает формирование износостойкого поверхностного слоя [24].

Применение мартенситно-старееющих сталей. Стоимость мартенситно-старееющих сталей выше, чем низко- и среднелегированных углеродистых сталей, однако более простая упрочняющая термическая обработка сталей этого класса, их технологичность, высокая конструктивная прочность, надежность и ряд других преимуществ не только компенсируют высокую стоимость, но делают экономически более выгодным их использование в различных отраслях машиностроения, в приборостроении и инструментальной промышленности.

Машиностроение [5, 9, 24]. Как конструкционный материал, отличающийся высокой удельной прочностью и сопротивлением хрупкому разрушению, мартенситно-старееющие

стали используют для изготовления конструктивных элементов космической и ракетной техники, в криогенной машиностроении, в авиастроении. Благодаря хорошей свариваемости их применяют также для топливных баков ракетных двигателей, резервуаров высокой точности. Хорошая коррозионная стойкость позволяет использовать стали для корпусов подводных лодок, ответственных шестерен, гребных винтов, деталей компрессоров и силовых установок, сосудов высокого давления, рабочих колес и валов насосов. Высокая износостойкость в сочетании с размерной стабильностью сталей этого класса определяют их применение для деталей высокоточных металлорежущих станков. Более высокая (чем у сталей перлитного класса) радиационная стойкость позволяет использовать безкобальтовые стали в реакторостроении, а также для узлов урановых центрифуг.

Приборостроение [12, 21, 28]. Высокое сопротивление малым пластическим деформациям, значительно более высокий уровень максимальной упругой деформации, определяемой отношением $\sigma_{0.002}/E$, чем у сталей других классов, повышенная малоцикловая выносливость в сочетании с возможностями широкого применения холодной пластической деформации, хорошей свариваемостью и коррозионной стойкостью определяют преимущества мартенситно-старееющих сталей как пружинного материала. При формировании двухфазной структуры ($\alpha + \gamma$) эти стали могут обладать эливарными свойствами в диапазоне климатических температур, что существенно расширяет диапазон использования упругих элементов из этих сталей.

Изготовление инструментов [5, 24]. Преимущества в технологичности, отсутствие поводки при термической обработке, высокая прочность и износостойкость в сочетании с размерной стабильностью и коррозионной стойкостью обеспечивают возможность применения мартенситно-старееющих сталей для различных инструментов, в том числе для медицинских микроинструментов, Бла-

годаря теплостойкости стали нашли применение при изготовлении прессформ для обработки резины, пластмасс, для высокоточного латунного и алюминиевого литья под давлением. Сталь можно применять для изготовления штампов горячего и холодного деформирования, лезвий и ножей.

Список литературы

1. А. с. 423875 СССР, МКИ С 22 С 38/12. Мартенситно-старееющая сталь/В. М. Кардонский, О. П. Жуков, М. Д. Перкас и др.; Оpubл. 15.04.74. Бюл. № 14—1974.
2. А. с. 559996 СССР, МКИ С 22 С 38/52. Нержавеющая сталь/Н. А. Сорочкина, А. П. Гуляев, Е. А. Ульянии и др.; Оpubл. 30.05.76. Бюл. № 20—1977.
3. А. с. 1047990 СССР, МКИ С 22 С 38/52. Мартенситно-старееющая сталь/Л. Г. Цветкова; Оpubл. 15.10.83. Бюл. № 38—1983.
4. Белосевич В. К., Дробинский М. Л., Якубовский О. Н. Штамповка кузовных деталей автомобиля из новой листовой стали повышенной прочности//Автомобильная промышленность. 1983. № 4. С. 24—25.
5. Бодяко М. Н., Астапчук С. А., Ярошевич Г. Б. Мартенситно-старееющие стали. Минск: Наука и техника, 1976. 246 с.
6. Голованенко С. А., Фонштейн Н. М. Двухфазные низколегированные стали. М.: Металлургия, 1986. 206 с.
7. Гольдштейн М. И. Пути повышения прочности и хладостойкости конструкционных сталей//Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 11. С. 6—11.
8. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
9. Гузовская М. А., Островская Т. В. Основные направления развития мартенситно-старееющих сталей за рубежом//Черная металлургия: Бюллетень научно-технической информации. М.: 1982. Вып. 23 (931). С. 17—33.
10. Еднерал А. Ф., Жуков О. П., Перкас М. Д. Мартенситно-старееющие стали с прочностью более 200 кг/мм²//

Металловедение и термическая обработка металлов. 1971. № 4. С. 9—14.

11. Журавлев В. Н., Николаева О. И. Машиностроительные стали: Справочник. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.

12. Исследование эливарных и механических свойств мартенситно-старееющих сталей с двухфазной ($\alpha + \gamma$) структурой/М. Д. Перкас, Е. М. Струг, В. В. Русаненко и др.//Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 63. Вып. 2. С. 371—380.

13. Контролируемая прокатка В. И. Погорельский, Д. А. Литвиненко, Ю. И. Матросов, А. В. Иванчик. М.: Металлургия, 1979. 184 с.

14. Кучерявый В. И., Ульянова Н. В. Нержавеющие мартенситно-старееющие Со—Мо и Со—Мо—Тi стали//Металловедение и термическая обработка металлов. 1971. № 4. С. 14—18.

15. Матросов Ю. И. Комплексное микрولةгирование малоперлитных сталей, подвергаемых контролируемой прокатке//Металловедение и термическая обработка металлов. 1986. № 3. С. 10—17.

16. Металловедение и термическая обработка стали: В 3 т. Справочник: 3-е изд. Т. II. Основы термической обработки/Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1983. 368 с.

17. Металловедение и термическая обработка стали: В 3 т. Справочник: 3-е изд. Т. III. Термическая обработка металлопродукции/Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1983. 216 с.

18. Низколегированные строительные стали массового назначения с карбонитридным упрочнением/А. В. Рудченко, Л. И. Гладштейн, С. А. Голованенко и др.//Сталь. 1977. № 10. С. 948—952.

19. Новая малоперлитная сталь 09Г2ФБ для магистральных газопроводов диаметром 1420 мм/Н. П. Лякишев, С. А. Голованенко, Ю. И. Матросов и др.//Сталь. 1980. № 4. С. 327—330.

20. О роли кобальта в упрочнении мартенситно-старееющих сталей/М. Д. Перкас, А. Ф. Еднерал, О. П. Жуков и др.//Физика металлов и металловедение. 1984. Т. 57, № 2. С. 310—318.

21. Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г., Капун Ю. А. Динамическое старение сплавов. М.: Металлургия, 1985. 222 с.
22. Перкас М. Д. Структура и свойства высокопрочных сталей со стареющим мартенситом//Металловедение и термическая обработка металлов. 1970. № 7. С. 12—24.
23. Перкас М. Д. Структура, свойства и области применения высокопрочных мартенситно-старееющих сталей//Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 5. С. 23—33.
24. Перкас М. Д. Структура, свойства и области применения высокопрочных мартенситно-старееющих сталей. М.: Машиностроение, 1986. 70 с.
25. Перкас М. Д., Кардонский В. М. Высокопрочные мартенситно-старееющие стали. М.: Металлургия, 1970. 224 с.
26. Повышение качества и надежности строительных сталей в результате субструктурного упрочнения/В. И. Большаков, И. А. Монгайт, Л. И. Котова, Н. Э. Погребная//Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 8. С. 42—46.
27. Поздняков Л. Г., Евсюков М. Ф., Чехраиов С. В. Исследование закономерностей распада аустенита малоуглеродистых сталей при непрерывном охлаждении//Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 9. С. 32—35.
28. Рахштадт А. Г. Пружинные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1982. 400 с.
29. Романив О. Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. М.: Металлургия, 1979. 176 с.
30. Свойства мартенситно-старееющих сталей ВНС-2 и ЭП17 после старения/О. Л. Бендрисhev, В. В. Алексеев, В. И. Силина и др.//Металловедение и термическая обработка металлов. 1983. № 4. С. 49—51.
31. Сорокин А. Н., Голованенко С. А., Матросов Ю. И. Влияние микроразрывов на механические свойства низкоуглеродистых сталей разных систем легирования//Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1982. С. 5—8.
32. Справочник металлста. В 5 т. 3-е изд. Т. 2/Под ред. А. Г. Рахштадта, В. А. Брострема. М.: Машиностроение, 1976. 720 с.
33. Стоналова И. А. Механические свойства и микроструктура мартенситно-старееющей Cr—Ni—Mn стали при совместном легировании титаном и алюминием//Металловедение и термическая обработка конструкционных сталей: Труды ЦНИИМАШ. М.: 1981. № 189. С. 77—80.
34. Структура и свойства ванадиевых мартенситно-старееющих сталей/И. В. Пестов, А. Я. Малолетнев, М. Д. Перкас и др.//Металловедение и термическая обработка металлов. 1983. № 4. С. 38—40.
35. Структура и свойства теплостойких мартенситно-старееющих сталей/С. М. Битюков, С. В. Грачев, Н. В. Звигинцев и др.//Известия вузов. Черная металлургия. 1982. № 6. С. 85—89.
36. Термическая обработка крупных штамповок и прутков из стали Н18К9М5Т/О. К. Ревакина, Л. Н. Беляков, В. Л. Никольская и др.//Металловедение и термическая обработка металлов. 1971. № 4. С. 23—30.
37. Термическая обработка мартенситно-старееющей стали 00Н18К9М5Т/С. С. Рыжак, О. К. Ревакина, В. В. Сачков, Я. М. Потак//Металловедение и термическая обработка металлов. 1968. № 6. С. 20—22.
38. Тихонов Г. В., Шахназаров Ю. В. Механические свойства нержавеющей мартенситно-старееющей стали 05Х12К14Н5М5Т-ВД//Металловедение и термическая обработка металлов. 1981. № 9. С. 49—51.
39. Фазовый состав, структура и свойства мартенситно-старееющей стали Х14К9Н6М5/Н. Ф. Лашко, Л. В. Заславская, В. Л. Никольская, Г. Г. Соловьева//Металловедение и термическая обработка металлов. 1974. № 10. С. 39—42.
40. Федюкин В. К. Метод термодинамической обработки металлов. Изд-во Ленинградского государственного университета. 1984. 189 с.
41. Фонштейн Н. М. Факторы, определяющие сопротивление разрушению двухфазных ферритно-мартенситных сталей//Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 10. С. 10—17.

Глава II МАТЕРИАЛЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЧУГУНОВ ДЛЯ ОТЛИВОК

Чугуны для отливок различаются по структуре, химическому составу, назначению и технологии получения.

В зависимости от того, в каком виде формируется высокоуглеродистая фаза при кристаллизации или термической обработке по структуре, различают отливки: 1) из графитизированного чугуна, характеризуемого наличием в структуре свободного графита различной формы; 2) из белого чугуна (БЧ), характеризуемого отсутствием в структуре свободного графита (высокоуглеродистая фаза находится в виде цемента); 3) из половинчатого, отбеленного чугуна (ОЧ). В последнем случае поверхностный слой отливки имеет структуру белого чугуна, а в центре — графитизированного серого чугуна.

Форма графита в графитизированных чугунах разнообразна: пластинчатая (ПГ), вермикулярная — червеобразная (ВГ), хлопьевидная (ХГ) и шаровидная (ШГ). Эти формы графита определяют основные типы чугунов: серый чугун (СЧ), чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), ковкий чугун (КЧ), высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ). При этом структура металлической основы может быть от ферритной до аустенитной. Государственными стандартами регламентировано около 100 марок чугуна.

По химическому составу различают нелегированный и легированный чугун.

По назначению чугуны могут быть разделены на несколько укрупненных групп в зависимости от предъявляемых к отливке требований.

К укрупненным группам относятся отливки:

а) машиностроительные из серого чугуна, у которого наблюдаются характерные механические свойства, хо-

рошая обрабатываемость, улучшенные литейные свойства, облегчающие получение отливок наиболее сложной конфигурации, и наибольшая дешевизна; в пределах данной группы могут быть выделены: отливки для станкостроения, для автомобилестроения, для тяжелого машиностроения, для электрической промышленности и т. д.;

б) с повышенной прочностью и вязкостью из высокопрочного или ковкого чугуна;

в) с повышенной поверхностной твердостью из отбеленного чугуна или подвергаемые поверхностной закалке;

г) с резко выраженными специальными свойствами из легированных чугунов.

По технологии получения различают отливки, получаемые в разовых песчаных формах, в оболочковых формах, в металлических формах (кокиль), в песчаных формах, изготовленных по газифицируемым моделям, в керамических формах, изготовленных по выплавляемым или выжигаемым моделям. Особенность технологического процесса в последних двух вариантах заключается в отсутствии разъемы формы и стержней. Модель из формы удаляется либо в процессе заливки формы металлом (газифицируемые модели), либо предварительно выплавляется или выжигается из керамической формы. Газифицируемые и выжигаемые модели изготавливают из полимеров (пенополистирол, полистирол), а выплавляемые — из легкоплавких составов на основе парафина, стеарина, церезина и др. Осваивается производство отливок из черных сплавов (в том числе из чугуна) литьем под давлением.

Целесообразный способ получения отливок зависит от типа производства, массы отливки, ее габаритных размеров и конструктивных особенностей.

Выбранный способ характеризуется определенными точностью и шерохова-

1. Точность и шероховатость поверхности чугунных отливок, получаемых различными способами [3]

| Литье | Нормальная точность ¹ | Достижимая точность | Rz, мкм |
|--|----------------------------------|------------------------|---------|
| | Класс по ГОСТ 26645—85 | Класс по ГОСТ 26645—85 | |
| В разовые песчаные формы: ручная формовка | 9—14 | 7—12 | 80—160 |
| | 8—13 | 6—11 | 80—160 |
| машинная встряхиванием с подпрессовкой | 7—12 | 5—9 | 40—80 |
| машинная прессованием под высоким давлением | 7—12 | 5—10 | 40—160 |
| в формы с газифицируемыми моделями | 5—11 | 4—9 | 20—80 |
| В оболочковые формы | 5—11 | 4—9 | 20—80 |
| В металлические формы | 4—9 | 3—8 | 10—40 |
| По выплавляемым моделям | | | |

¹ Приведена минимально допустимая точность.

тостью поверхности получаемых отливок.

Наиболее универсальным способом получения отливок, пригодным как для единичного, так и для массового производства отливок массой от десятков граммов до десятков тонн, является литье в разовые песчаные формы. В металлических формах получают разнообразные фасонные отливки массой от долей до 100 кг, хотя в отдельных случаях масса отливки составляет сотни килограммов (например, чугунные трубы, получаемые центробежным способом, и др.). При литье в металлические формы целесообразна серия для мелких отливок св. 400 шт., для крупных отливок св. 20 шт.

Литьем в оболочковые формы получают в основном коленчатые валы и ребристые цилиндры, станины электродвигателей, корпуса токарных патронов, нагревательные комфорки бытовых электроплит, детали различных двигателей, компрессоров, насосов, вентиляторов, текстильных машин, гидроаппаратуры, кондиционеров и т. д. Максимальные размеры отливок до 1000×1000 мм, масса отливок до 200 кг. Учитывая необходимость изго-

товления нагреваемой металлической оснастки, целесообразна серия не менее 300—500 шт.

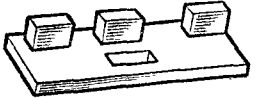
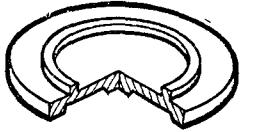
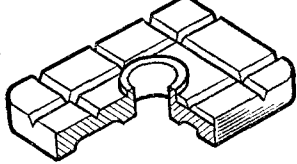
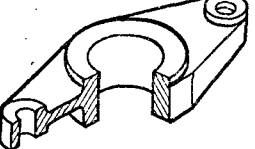
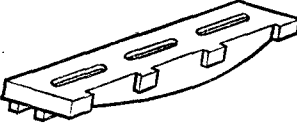
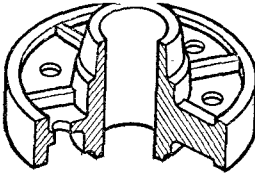
Литьем по выплавляемым моделям изготавливают мелкие отливки сложной конфигурации массой до 1,5—2 кг, реже до 5—6 кг, для которых требуются повышенная точность и малые параметры шероховатости поверхности. При данном способе имеется возможность максимально приблизить заготовку по размерам и конфигурации к готовой детали. При использовании деревянных пресс-форм для изготовления моделей целесообразна серия 50—100 шт., гипсовых — 200 шт., металлических — несколько тысяч.

Точность отливок, получаемых различными способами, приведена в табл. 1 [3].

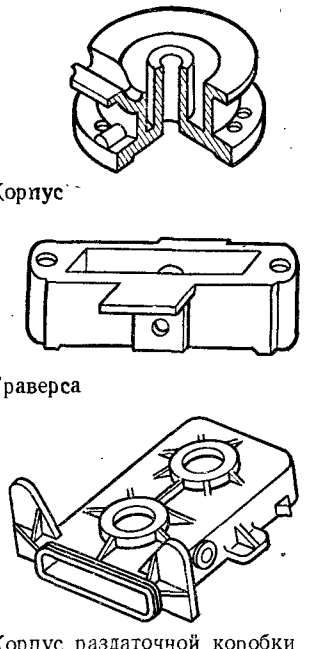
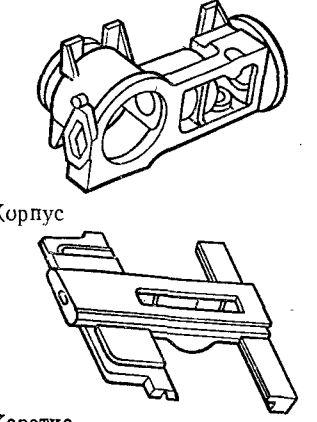
Данные относятся к отливкам II—III группы сложности на размеры до 500 мм включительно, расположенным в одной части формы. Точность размеров, оформляемых в двух и более частях формы, а также отливок повышенной сложности и больших габаритов может быть ниже.

На характеристики точности отливок влияет их сложность, вид модель-

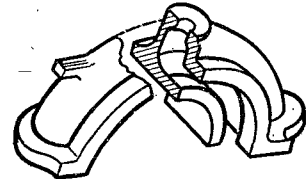
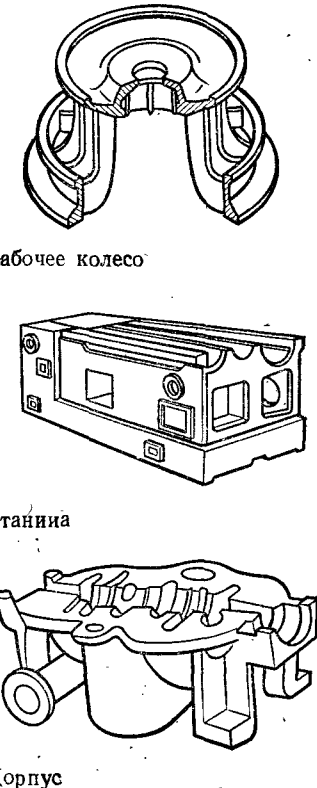
2. Группы сложности отливок, изготавливаемых в песчаных формах

| Группа сложности | Отливка | Характеристики группы сложности отливок |
|------------------|---|---|
| I |  Плита | <p>Отливки общего назначения. Плоские, цилиндрические, полусферические, без внутренних полостей. Наружные поверхности с наличием невысоких ребер-буртов, бобышек, фланцев и отверстий. Углублений и выступов ≤ 30 мм до 5 шт. Отливки без механической обработки или незначительная обработка с одной стороны, в основном сверление</p> |
| |  Глухая крышка | |
| |  Смотровая крышка | |
| II |  Траверса | <p>Отливки общего назначения. Плоские, цилиндрические, полусферические, открытой коробчатой формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные с ребрами, буртами, бобышками, отверстиями и углублениями. Углубления, выступы, отверстия высотой ≤ 75 мм до 5 шт. Внутренние полости с прямолинейными поверхностями со свободным широким выходом наружу. Применяется незначительная обработка с двух сторон, включая точеное, растачивание</p> |
| |  Колосник | |
| |  Ступица барабана | |

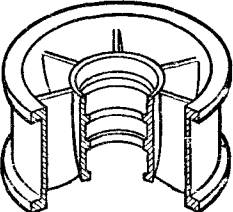
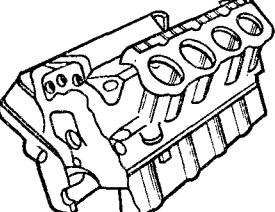
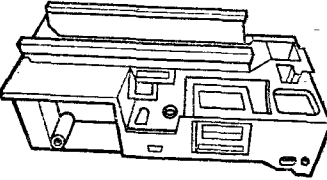
Продолжение табл. 2

| Группа сложности | Отливка | Характеристики группы сложности отливок |
|------------------|---|--|
| III |  <p>Корпус</p> <p>Траверса</p> <p>Корпус раздаточной коробки</p> | <p>Отливки ответственного назначения. Открытой коробчатой, сферической, цилиндрической формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные с ребрами, бобышками, выступами и углублениями. Углубления, выступы, ребра высотой более 75 мм до 5 шт. Внутренние полости в основном с прямолинейными поверхностями со свободным выходом наружу. Применяется механическая обработка с трех-четырех сторон, включая шлифование</p> |
| IV |  <p>Корпус</p> <p>Каретка</p> | <p>Отливки ответственного назначения. Открытой и закрытой коробчатой, цилиндрической и сферической формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные. Углубления, выступы, отверстия, ребра высотой более 75 мм до 10 шт. Внутренние полости средней сложности с прямолинейными и криволинейными поверхностями со свободным и затрудненным выходом наружу. Применяется механическая обработка с четырех-пяти сторон, включая шлифование, притирку, полирование. Предъявляются требования по химическому составу и механическим свойствам, герметичности при давлении $12 \cdot 10^5$ Па</p> |

Продолжение табл. 2

| Группа сложности | Отливка | Характеристики группы сложности отливок |
|------------------|---|---|
| IV |  <p>Корпус</p> | <p>То же</p> |
| V |  <p>Рабочее колесо</p> <p>Станция</p> <p>Корпус</p> | <p>Отливки особо ответственного назначения. Закрытой коробчатой, цилиндрической, сферической или комбинированной формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные с примыкающими патрубками, фланцами. Углубления, выступы, ребра, отверстия высотой до 75 мм до 15 шт. Внутренние полости сложной конфигурации с наличием ленточных и кольцевых каналов со свободным и затрудненным выходом наружу. Применяется механическая обработка с пяти-шести сторон, включая хонингование, полирование. Предъявляются требования по химическому составу, механическим свойствам, микроструктуре. Герметичность при давлении до $30 \cdot 10^5$ Па</p> |

Продолжение табл. 2

| Группа сложности | Отливка | Характеристики группы сложности отливок |
|------------------|--|---|
| VI |  | Отливки особо ответственного назначения. Закрытой коробчатой, цилиндрической или комбинированной формы. Наружные поверхности образуются сопряжением прямолинейных и криволинейных поверхностей. Углубления, выступы, отверстия ребра высотой св. 75 мм более 15 шт. Внутренние полости особо сложной конфигурации с наличием ленточных и кольцевых каналов, расположенных в два и больше яруса, с затрудненным выходом наружу. Применяется механическая обработка со всех сторон, включая доводку хонингованием. Предъявляются требования по химическому составу, механическим свойствам, микроструктуре, газонасыщенности. Герметичность при давлении св. $30 \cdot 10^5$ Па |
| |  | |
| |  | |

ной оснастки. Например, при ручной и машинной формовке с использованием встряхивания и подпрессовки при обычных давлениях можно применить деревянную модельную оснастку, тогда как при прессовании форм с высоким давлением используют металлическую модельную оснастку, что отражается на себестоимости отливок и становится целесообразным лишь при их определенной серии (обычно не меньше нескольких сот штук).

В основу классификации отливок по сложности положена классификация, установленная Прейскурантом опто-

вых цен № 25-01 [15]. Отливки, получаемые в песчаных формах, по выплавляемым моделям, под давлением делятся на шесть групп сложности, а отливки, получаемые в оболочковых формах, в кокиль или центробежным способом — на пять групп. Основными признаками при классификации являются геометрическая форма, конфигурация наружных поверхностей; конфигурация и характер расположения внутренних полостей отливок; технологические особенности изготовления. В табл. 2 в качестве примера приведены конструктивные

8. Точность чугунных отливок в зависимости от их сложности и наибольшего габаритного размера [3]

| Наибольший размер отливки, мм | Точность в условных баллах при группе сложности | | | Классы точности по ГОСТ 26645—85 при группе сложности | | |
|-------------------------------|---|---------|--------|---|--------|-------|
| | I—II | III—IV | V—VI | I—II | III—IV | V—VI |
| До 50 | 1,00 | 1,25 | 1,6 | 3—6 | 3т—6 | 3т—6 |
| 51—200 | 1,25 | 1,60 | 2,0 | 5т—7т | 5т—7т | 7т—9 |
| 201—500 | 1,60 | 2,00 | 2,5 | 7т—9т | 7т—9т | 7т—9т |
| 501—2000 | 2,00 | 2,50 | 3,15 | 7—9 | 7—9 | 9 |
| Св. 2000 | до 2,5 | до 3,15 | до 4,0 | 7—9 | до 10 | до 10 |

Примечание. При оценке точности в условных баллах за единицу принята достижимая точность отливок I—II групп сложности с наибольшим размером до 50 мм.

признаки отнесения отливок, получаемых в песчаных формах, к различным группам сложности.

В табл. 3 приведена ориентировочная точность чугунных отливок, изготовляемых в песчаных формах, в зависимости от группы сложности отливок и наибольшего габаритного размера [3].

Себестоимость отливок, кроме материала, их группы сложности и серии, определяется точностью, зависящей от применяемого способа изготовления, и в общем случае увеличивается с повышением точности отливок. Однако это увеличение может быть перекрыто экономией при дальнейшей механической обработке более точных литых заготовок, в результате уменьшения или ликвидации припусков на механическую обработку.

Изменение стоимости отливок в зависимости от марки чугуна приведено в табл. 4, а от применяемого технологического процесса — в табл. 5 [15]. Приведенный диапазон изменения от-

носительной стоимости охватывает отливки всей группы сложности.

За единицу в табл. 4 принята оптовая цена 1 т отливок массой 0,16—0,25 кг группы сложности I из чугуна СЧ10—СЧ18, изготовляемых в песчаных формах, а в табл. 5 — оптовая цена 1 т тех же отливок, изготовленных из высокопрочного чугуна ВЧ 35—ВЧ 50 в песчаных формах. Эти значения на базе оптовых цен 1979 г. равны соответственно 314 и 376 р.

Цена отливок, получаемых в кокиль, более низкая по сравнению с отливками, полученными в песчаных формах (табл. 5). Однако это зависит от серийности выпуска отливок. С уменьшением серийности цена будет снижаться для отливок, изготовляемых в песчаных формах, и при единичном и мелкосерийном производстве литье в кокиль становится нецелесообразным, даже с учетом возможной выгоды, получаемой при механической обработке вследствие повышения точности отливок.

4. Относительная стоимость 1 т отливок сопоставимой сложности, изготовленных из различных марок чугуна в песчаную форму

| Марка чугуна | Масса отливок, кг | | | | | |
|---|--|--|--|--|---|---|
| | Серия отливок, тыс. шт. | | | | | |
| | 0,16—0,25 | 1,0—1,6 | 6,3—10 | 63—100 | 630—10 000 | |
| | 100—200 | 20—75 | 12—30 | 4—7,5 | 1,5—3,5 | |
| ГОСТ 1412—85 СЧ10, СЧ15 СЧ20, СЧ30 СЧ35 | 1—1,83 1,05—1,91 1,08—1,94 | 0,81—1,6 0,86—1,67 0,88—1,7 | 0,67—1,39 0,71—1,45 0,74—1,48 | 0,55—1,19 0,58—1,24 0,62—1,27 | 0,48—1,03 0,51—1,08 0,54—1,11 | 0,44—0,9 0,47—0,95 0,5—0,98 |
| ГОСТ 7293—85 ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50 ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100 | 1,2—2,09 1,39—2,28 | 0,99—1,83 1,18—2,02 | 0,82—1,62 1—1,8 | 0,69—1,4 0,85—1,56 | 0,61—1,23 0,74—1,36 | 0,57—1,09 0,66—1,19 |
| ГОСТ 1215—79 КЧ 30—6—КЧ 65—3 | 1,1—2,01 | 0,91—1,77 | 0,76—1,6 | 0,64—1,33 | 0,57—1,17 | 0,52—1,04 |
| ГОСТ 1585—85 АЧС-1—АЧС-3 АЧС-4—АЧС-2 | 1,13—2,04 1,23—2,16 | 0,93—1,8 1,03—1,91 | 0,79—1,58 0,85—1,68 | 0,66—1,36 0,73—1,45 | 0,58—1,2 0,64—1,29 | 0,54—1,06 0,58—1,15 |
| ГОСТ 7769—82 ЧХ1, ЧХ2, ЧХ3 ЧС5, ЧС5Ш ЧС15, ЧС17 ЧНХТ | 1,12—2,02 1,15—2,07 1,08—1,99 1,16—2,07 | 0,92—1,78 0,96—1,83 0,89—1,75 1,03—1,88 | 0,78—1,56 0,81—1,61 0,75—1,47 0,92—1,59 | 0,65—1,35 0,68—1,39 0,62—1,31 0,78—1,43 | 0,58—1,18 0,61—1,23 0,54—1,15 0,7—1,24 | 0,53—1,05 0,56—1,05 0,5—1,02 (0,64—1,15)*1 |
| ЧХ28, ЧХ32 ЧЮ22Ш, ЧЮ30 | 1,59—2,72 1,8—2,93 | 1,35—2,39 1,56—2,6 | 1,17—2,13 1,38—2,34 | 1—1,86 1,22—2,08 | 0,89—1,65 1,10—1,83 | 0,81—1,47 1,03—1,69 |

*1 Для отливок массой св. 4000 кг.

Примечание. При увеличении производства отливок по сравнению с указанным в табл. 4 цены за 1 т уменьшаются, а при уменьшении — увеличиваются. Максимальное изменение цен при этом составляет ±25 %.

5. Относительная стоимость 1 т отливок из высокопрочного чугуна марок ВЧ 35—ВЧ 50, изготовленных по различным технологическим процессам

| Литье | Масса отливок, кг | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|--------------|---------------|
| | 0,16—0,25 | 1,0—1,6 | 6,3—10 | 63—100 | 630—1000 |
| | Серия отливок, тыс. шт. | | | | |
| | 100—200 | 20—75 | 12—30 | 4—7,5 | 1,5—3,5 |
| В песчаную форму | 1,0—1,75 | 0,82—1,53 | 0,69—1,35 | 0,58—1,17 | 0,51—1,03 |
| В оболочковую форму | 1,56—2,58 | 1,4—2,21 | 1,14—1,78 | 1,01—1,46 | (0,95—1,12)*1 |
| В металлургическую форму (кокиль) | 0,85—1,49 | 0,7—1,3 | 0,59—1,16 | 0,49—1 | 0,44—0,88 |
| В облицованный кокиль | 1,21—1,81 | 1,07—1,64 | 0,97—1,5 | 0,88—1,35 | 0,83—1,23 |
| По выплавляемым моделям | 4,28—6,09 | 2,82—4,17 | 1,96—2,93 | (1,7—2,39)*2 | — |

*1 Для отливок массой св. 250 кг.

*2 Для отливок массой св. 10 кг.

Примечание. При уменьшении серий отливок до пределов, целесообразных для сопоставления всех приведенных в табл. 5 способов получения отливок, цена на отливки, полученные в песчаную форму, возрастает на 10—12 %, литьем по выплавляемым моделям — на 15 %, литьем в кокиль — на 20 %, литьем в оболочковые формы — на 25 %.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧУГУНА

Физические свойства чугуна (плотность, теплофизические и электромагнитные свойства) зависят от состава и структуры, а следовательно, от вида и марки чугуна.

Плотность чугуна. Пренебрегая сравнительно малым влиянием ряда элементов в обычном чугуне, можно рассчитать плотность чугуна [2]

$$\rho = 100 : \left[\frac{100 - 15C_{св} - C_{г}}{7,87 - 0,05Si} - \frac{2,7S - 14,5 \times (P - 0,1) - P_0}{-0,065Al} \right] +$$

$$+ \frac{15C_{св}}{7,67} + \frac{C_{г}}{2,2} + \frac{2,7S}{4} + \frac{14,5(P - 0,1)}{7,32} \Bigg],$$

где С, S, P — массовые доли элементов, %; С_г — массовая доля графита, %; P₀ — пористость, %; 15 C_{св}; 2,7 S; 14,5 (P—0,1) — количество карбидов железа, сульфидов марганца и фосфидной эвтектики соответственно.

Приведенная формула дает вполне удовлетворительные совпадения с экспериментальными данными.

В табл. 6 приведена плотность различных групп чугунов [2, 20].

Наибольшей плотностью характеризуются белые чугуны, не содержащие свободных графитовых включений, и

| Группа чугуна | Марка чугуна | Структура | Плотность, т/м ³ |
|---|---|---|--|
| Белый | — | Перлит, карбиды | 7,4—7,75 |
| С пластинчатым графитом | СЧ15, СЧ18, СЧ20—СЧ25 СЧ30, СЧ35 | Ферритная, ферритно-перлитная Перлитная Перлитная | 6,8—7,2 7,0—7,3 7,2—7,4 |
| Высокопрочный с вермикулярным или шаровидным графитом | ВЧ 35—ВЧ 45 ВЧ 60—ВЧ 80 ВЧ 100 | Ферритная Перлитная Бейнитная | 7,1—7,2 7,2—7,3 7,2—7,35 |
| Ковкий | КЧ 30—6—КЧ 37—12 КЧ 45—7—КЧ 65—3 | Ферритная Перлитная | 7,2—7,24 7,3—7,5 |
| Легированный | Никелевый с 34—36 % Ni Никелевый с медью типа ЧН15Д7Х2 — нержавейст Хромовый типа ЧХ28, ЧХ32 Хромово-никелевый Хромистый типа С15, С17 Чугун с 12 % Mn Алюминиевый: с 5—8 % Al типа ЧЮ22Ш — чугаль | Аустенитная — — Ферритная — Ферритная | 7,5—7,7 7,4—7,6 7,3—7,6 7,6—7,8 6,7—7,0 7,1—7,3 6,4—6,7 5,6—6,0 |

При увеличении содержания алюминия до 30 % получается чугун под названием пирроферал; его плотность составляет 5,3 т/м³ [6].

некоторые легированные чугуны (хромовые, никелевые, хромоникелевые).
У серых чугунов плотность обычно тем больше, чем выше прочность чугуна.

Высокопрочный чугун при прочих равных условиях (одинаковом содержании кремния, перлита и графита) характеризуется большей плотностью, чем чугун с пластинчатым графитом. Однако во многих случаях эта плотность может оказаться на практике ниже, чем у серых чугунов, вследствие более высокого содержания углерода и кремния или большей ферритизации матрицы.

Большой плотностью также характеризуются аустенитные чугуны, вследствие более плотного строения, особенно при легировании никелем и медью, плотность которых больше, чем у железа.

При легировании марганцем плотность аустенита несколько понижается. Еще меньше плотность ферритных кремнистых и алюминиевых чугунов.

Во всех случаях на плотность отливки влияет пористость (газовая, усадочная), величина которой колеблется обычно от 0,5 до 1,2 % в зависимости от состава чугуна, характера кристаллизации и технологических факторов (эффективности питания, толщины стенки и т. п.), которые, в свою очередь, определяются технологичностью конструкции отливки. Наибольшее значение имеют условия питания, гидростатический напор, под которым происходит затвердевание отливки. Поэтому плотность в верхних частях крупных отливок может быть на 5 % меньше, чем в нижних частях, а в центре — на 10 % меньше, чем на периферии.

Плотность графитизированного чугуна уменьшается также с увеличением толщины стенки отливки вследствие увеличения степени графитизации и укрупнения графита [6]:

| | | | | |
|--|------|------|------|------|
| Толщина стенки, мм. | 10 | 12,5 | 25 | 37 |
| Плотность, т/м ³ | 7,23 | 7,14 | 7,08 | 7,02 |

С увеличением жесткости формы уменьшается предусадочное расширение

7. Теплофизические свойства серого чугуна в зависимости от температуры

| Температура, °С | $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С | c , Дж/(кг × °С) | λ , Вт/(м × °С) |
|-----------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 60 | 10,0 | 502 | 54,4 |
| 160 | 11,0 | 523 | 50,2 |
| 260 | 13,1 | 553 | 48,1 |
| 360 | 13,7 | 586 | 46,0 |
| 510 | 15,9 | 620 | — |

ние, а следовательно, и усадочная пористость. Поэтому отливки, полученные в металлические формы, при прочих равных условиях более плотные, чем отливки, изготовленные в песчаных формах.

Теплофизические свойства. Коэффициент линейного расширения α , удельная теплоемкость c и теплопроводность λ зависят от состава и структуры чугуна, а также от температуры. Поэтому значения их приводят в соответствующем интервале температур. С повышением температуры значения α и c обычно увеличиваются, а λ уменьшается (табл. 7) [20].

Коэффициент линейного расширения α и удельная теплоемкость c реальных неоднородных структур, в том числе чугуна, может быть определена по правилу смешения:

$$\alpha \text{ или } c = \frac{a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n}{a_1 + a_2 + \dots + a_n},$$

где x_1, x_2, \dots, x_n — α или c структурных составляющих (табл. 8); a_1, a_2, \dots, a_n — количественное содержание их.

Теплопроводность сплавов и смесей в отличие от коэффициента α и теплоемкости c не может быть определена по правилу смешения. Влияние отдельных элементов на теплопроводность расчетным путем можно установить лишь приближенно [6].

На коэффициент α и удельную теплоемкость c влияет главным образом состав чугуна, а на теплопроводность λ — степень графитизации, дисперсность структуры, неметаллические включения и т. п.

Коэффициент линейного расширения определяет не только изменения раз-

8. Теплофизические свойства структурных составляющих чугуна

| Структурная составляющая | α_{200}^{100} , 1/°C | λ_{100}^{100} , Дж/(кг·°C) | λ_{200}^{100} , Вт/(м·°C) |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Феррит | 12,0—12,6 | 460—470 | 72,8—75,5 |
| Аустенит | 18—19 | 502 | 41,8 |
| Цементит | 6,0—6,5 | 615 | 49,0 |
| Перлит | 10,0—11,6 | 486 | 50,3—51,9 |
| Графит | 1,4—3,7 | 795 | 355,8 |

меров в зависимости от температуры, но и напряжения, образующиеся в отливках. Уменьшение α является полезным с этих позиций и облегчает условия получения качественных отливок. Но в случае совместной работы чугунных деталей с деталями из цветных сплавов или других материалов, имеющих больший коэффициент линейного расширения, приходится стремиться к увеличению значения α для чугуна.

Теплоемкость и теплопроводность имеют большое значение для таких отливок, как отопительные трубы, изложницы, детали холодильных установок и двигателей внутреннего сгорания и т. д., так как определяют равномерность распределения температуры в отливках и интенсивность отвода теплоты.

В табл. 9 приведены теплофизические свойства чугунов различных групп [6, 9, 20].

Коэффициент линейного расширения α . Наибольшее влияние на коэффициент α оказывает углерод, в особенности в связанном состоянии. Одному проценту углерода соответствует примерно в 5 раз большее количество цементита, чем графита. Поэтому графитизирующие элементы (Si, Al, Ti, Ni, Cu и др.) повышают, а антиграфитизирующие (Cr, V, W, Mo, Mn и др.) уменьшают коэффициент линейного расширения.

Наибольшим значением α отличаются аустенитные никелевые чугуны, а также ферритные алюминиевые чугуны типа чугуль и пиррофераль. Поэтому при достаточно высоком содержании Ni, Cu, Mn значение α резко увеличивается. Однако при содержании Ni $\geq 20\%$ α понижается и достигает минимума при 35—37% Ni. Форма графита существенно влияет на коэффициент линейного расширения лишь при низких температурах; α высокопрочного чугуна с шаровидным графитом несколько выше, чем α чугуна с пластинчатым графитом.

Удельная теплоемкость c чугуна, как и железа, увеличивается с повышением температуры (см. табл. 7) и характеризуется скачкообразным повышением при фазовом превращении $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$; затем удельная теплоемкость чугуна резко падает, но с дальнейшим повышением температуры вновь увеличивается [14].

Графитизация понижает удельную теплоемкость чугуна; отсюда с белого чугуна несколько выше, чем серого и высокопрочного (см. табл. 9).

Теплопроводность чугуна в большей мере, чем другие физические свойства, зависит от структуры, ее дисперсности и мельчайших загрязнений, т. е. является структурно-чувствительным свойством.

Графитизация повышает теплопроводность; следовательно, элементы, увеличивающие степень графитизации и размер графита, повышают, а элементы, препятствующие графитизации и увеличивающие дисперсность структурных составляющих, понижают λ [6]. Указанное влияние графитизации меньше для шаровидного графита (см. табл. 9).

Форма графита, его выделение и распределение также влияют на теплопроводность. Например, высокопрочный чугун имеет более низкую теплопроводность, чем серый чугун. Теплопроводность чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) выше, чем у ЧШГ, и близка к λ серого чугуна с пластинчатым графитом [9].

Высоколегированные чугуны характеризуются, как правило, более низкой теплопроводностью, чем обычные.

9. Теплофизические свойства чугуна

| Чугун | α_{20}^{100} , 1/°C | c_{20}^{100} , Дж/(кг·°C) | c_{100}^{100} , Дж/(кг·°C) | λ_{20}^{100} , Вт/(м·°C) |
|--|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Серый с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412—85): | | | | |
| СЧ10—СЧ18 | 10—11 | 502—544 | 586—628 | 46,0—54,4 |
| СЧ20—СЧ30 | 10—11 | 502—544 | 586—628 | 41,8—50,2 |
| СЧ35 | 11,5—12,0 | 502—544 | 628—670 | 37,6—46,0 |
| Высокопрочный (ГОСТ 7293—85): | | | | |
| ВЧ 35—ВЧ 45 | 11,5—12,5 | 460—502 | 586—628 | 37,6—46,0 |
| ВЧ 60—ВЧ 80 | 10—11 | 502—523 | 628—670 | 33,5—41,9 |
| ВЧ 100 | 9—10 | 523—565 | 628—670 | 29,3—37,6 |
| Ковкий (ГОСТ 1215—79): | | | | |
| КЧ 30—6÷ КЧ 37—12 | 10,5—11,0 | 460—511 | 586—628 | 54,4—62,8 |
| КЧ 45—5÷ КЧ 65—3 | 10,3—10,8 | 527—544 | 628—670 | 50,2—54,4 |
| Легированный (ГОСТ 7769—82): | | | | |
| никелевый ЧН20Д2Ш с 35—37% Ni | 17—19 | — | 460—502 | 17,4 |
| хромистый: | 1,5—2,5 | — | — | — |
| ЧХ16 | — | — | — | 32,5 *1 |
| ЧХ22 | — | — | — | 25,5 *1 |
| ЧХ28 | 9—10 | — | — | 17,4 *1 |
| ЧХ32 | 9—10 | — | — | 19,8 *1 |
| кремнистый: | | | | |
| ЧС5 | 14—17 *2 | — | — | 21,0 *3 |
| ЧС15, ЧС17 | 4,7 *1 | — | — | 10,5 |
| алюминиевый: | | | | |
| ЧЮ22Ш | 17,5 *1 | — | — | 15,1—28,0 *3 |
| ЧЮ30 | 22—23 *2 | — | — | — |

*1 В интервале 20—200 °C.

*2 В интервале 20—900 °C.

*3 В интервале 20—500 °C.

Электрические свойства. Удельное электрическое сопротивление ρ_T , максимальная магнитная проницаемость μ_{max} , остаточная индукция (намагничивание) B_r и коэрцитивная сила H_c чугуна также определяются его составом и структурой.

Указанные свойства чугуна зависят от температуры. В частности, повышение температуры приводит сначала к медленному, затем к более быстрому

понижению степени насыщения, коэрцитивной силы, остаточной индукции. Максимальная магнитная проницаемость при этом увеличивается [6].

Удельное электрическое сопротивление серого чугуна может быть приближенно оценено по уравнению [6]:

$$\rho_T = 10,4 + 14,4C_G + 3,2C_{св} + (10,3 \div 15,7) Si + (5 \div 7,2) Mn + 11 P.$$

10. Электромагнитные свойства чугуна [6, 9, 14, 20]

| Чугун | $\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м | $\mu_{\max} \cdot 10^6$, Гн/м | B _r , Тл | H _c , А/м |
|--|--|---|---|---|
| Белый | 45—70 | 226—289 | 0,65—0,75 | 398—875 |
| Серый с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412—85): СЧ10—СЧ18 СЧ20—СЧ30 СЧ35 | 45—85 65—105 80—120 | 565—1256 440—754 314—565 | 0,4—0,5 0,4—0,55 0,55—0,7 | 398—796 398—796 796—1034 |
| Высокопрочный (ГОСТ 7293—85): ВЧ 35—ВЧ 45 ВЧ 60—ВЧ 80 ВЧ 100 | 40—50 55—65 60—75 | 1256—2512 377—1256 377—754 | 0,35—0,50 0,55—0,70 0,55—0,75 | 119—278 318—796 796—875 |
| Ковкий (ГОСТ 1215—79): КЧ 35—6÷КЧ 37—12 КЧ 45—5÷КЧ 65—3 | 30—38 40—45 | 1874—2890 377—1005 | 0,55—0,70 0,60—0,75 | 127—278 318—796 |
| Легированный никелевый: ЧН1Г7Ш ЧН15Д7Х2 хромистый: ЧХ16 ЧХ22 ЧХ28 ЧХ32 кремнистый: ЧС5 ЧС15, ЧС17 алюминиевый: ЧЮ22Ш ЧЮ30 марганцевый ЧГ8Д3 | 100—110 140—170 62—73 72—83 87—99 80—94 100—200 60—70 130—140 150—240 *1 130—160 | 1,28—1,38 1,29—3,77 — — — — — — 1,26—1,27 1,26—1,27 1,38—3,77 | — 0,0145—0,0165 — — — — — — — — — | — — — — — — — — — — — |

*1 Чугун с пластинчатым графитом.

Электрическое сопротивление с повышением температуры возрастает. Средние значения удельного электрического сопротивления структурных составляющих ($\rho_1 \times 10^{-8}$, Ом·м): 10 феррита; 20 перлита; 140 цементита; 30 графита параллельно базису, 4200 перпендикулярно базису. Таким образом, максимальным удельным электрическим сопротивлением обладает графит и цементит. Поэтому

сопротивление ρ_1 чугуна увеличивается как при графитизации, особенно заметно для графита пластинчатой формы, так и при увеличении в структуре цементита. Существенно влияет также дисперсность структуры металлической матрицы чугуна. Удельное электрическое сопротивление увеличивается с переходом структуры от феррита к перлиту, сорбиту, трооститу и мартенситу (табл. 10). Высоким удельным

электрическим сопротивлением характеризуется и аустенитная структура.

Раковины, всякого рода включения, также повышают удельное электрическое сопротивление. Поэтому отливки имеют тем меньшее ρ_1 , чем больше их плотность. Высоколегированные чугуны также характеризуются большими ρ_1 , чем обычные.

Магнитные свойства. В соответствии с требованиями, предъявляемыми и деталям, чугун может применяться в качестве ферромагнитного (магнитно-мягкого) или парамагнитного материала.

Магнитные свойства в большей степени, чем какие-либо другие, зависят от структуры металла, что определяет разделение магнитных свойств на первичные и вторичные. К первичным относятся индукция, насыщение (4л), проницаемость в сильных полях и температура магнитного превращения. Эти свойства зависят от количества и состава ферромагнитных фаз и не зависят от их формы и распределения. К вторичным свойствам относятся гистерезисные характеристики: индукция, насыщение и проницаемость в слабых и средних полях, коэрцитивная сила, остаточный магнетизм. Вторичные свойства мало зависят от состава фаз и определяются главным образом формой и распределением структурных составляющих.

Основными ферромагнитными составляющими чугуна являются феррит и цементит, характеризующиеся следующими данными [6] (табл. 11).

Цементит является более жесткой магнитной составляющей, поэтому в качестве магнитно-мягкого материала всегда применяется серый, а не белый чугун. Графитизация приводит к резкому понижению H_c и инертному

повышению μ_{\max} , в особенности при распаде последних остатков карбидов. При этом влияние графита, как и других немагнитных фаз, зависит также от формы и величины включений. Наиболее благоприятной в этом отношении является глобулярная форма. Поэтому ковкий и высокопрочный чугун характеризуются большей индукцией и магнитной проницаемостью и меньшей коэрцитивной силой, чем серый чугун при той же матрице (см. табл. 10).

Таким же образом влияет укрупнение эвтектического и ферритного зерна и уменьшение количества перлита. Поэтому отпуск после закалки способствует улучшению магнитно-мягких свойств.

Немагнитные (парамагнитные) чугуны применяются в тех случаях, когда требуется свести к минимуму потери мощности (крышки масляных выключателей, концевые коробки трансформаторов, нажимные кольца на электромашинах и т. д.) или когда необходимо минимальное искажение магнитного поля (стойки для магнитов и т. п.). В первом случае, наряду с низкой магнитной проницаемостью, требуется высокое электрическое сопротивление; этому требованию чугуны удовлетворяют даже в большей степени, чем цветные сплавы. Во втором случае необходима особо низкая магнитная проницаемость. Поэтому в ряде случаев и не удается заменить цветные сплавы аустенитными чугунами для второй группы отливок [6].

В зависимости от состава различают аустенитные немагнитные чугуны: никелевые типа нирезист с тем или иным количеством хрома; никельмарганцевые типа номаг с тем или иным содержанием меди и алюминия, превосходящие чугуны первой

11. Характеристика структурных составляющих чугуна

| Структурные составляющие | T магнитного превращения, °С | B _r , Тл | H _c , А/м | $\mu_{\max} \cdot 10^6$, Гн/м |
|--------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------------|
| Феррит | 768 | 0,13 | 71,6—79,6 | 6283—12 566 |
| Цементит | 212 | | | |
| | | — | 4377 | — |

12. Классы стойкости металлов

| Класс | Характеристика стойкости металла | Уменьшение массы металла при коррозии | |
|-------|----------------------------------|---------------------------------------|----------|
| | | г/(м ² ·ч) | мм/год |
| 1 | Вполне стойкие | <0,1 | <0,12 |
| 2 | Достаточно стойкие | 0,1—1,0 | 0,12—1,2 |
| 3 | Относительно стойкие | 1,0—3,0 | 1,2—3,6 |
| 4 | Малостойкие | 3,0—10,0 | 3,6—12,0 |
| 5 | Нестойкие | >10,0 | >12,0 |

группы по немагнитности, но уступающие им по жаропрочности, жаростойкости и сопротивлению коррозии;

марганцевые с тем или иным содержанием меди и алюминия, являющиеся наиболее дешевыми, но обладающие более низкими прочностными и физическими свойствами.

Представляют интерес также ферритные высоколегированные алюминиевые чугуны, характеризующиеся особенно низкой магнитной проницаемостью (см. табл. 10).

Коррозионная стойкость чугуна. Коррозионное разрушение чугуна вызывается электрохимическими, реже, часто химическими процессами. Коррозия может быть равномерной, местной, межкристаллитной избирательной.

В общем случае коррозия оценивается обычно как скорость уменьшения массы материала и выражается в г/(м²·ч) или в мм/год. В зависимости от этих потерь различают классы стойкости при коррозии в сильно- и среднеагрессивных средах (табл. 12).

Сопротивление коррозии зависит как от особенностей металла, так и от внешних факторов — состава и температуры среды, доступа кислорода, движения раствора или газа относительно металла. В частности, повышение температуры и скорости движения среды увеличивает скорость коррозии.

К факторам, связанным с особенностями металла, относятся структура, химический состав, шлаковые и газовые включения, напряжения и состояние поверхности,

По сопротивлению коррозии серые чугуны с пластинчатым и шаровидным графитом в различных средах могут быть отнесены к различным классам стойкости (табл. 13). В сравнительно чистом и сухом воздухе эти чугуны весьма стойки благодаря образованию пассивирующей пленки (скорость коррозии ~0,025 мм/год). Коррозия начинает возрастать при загрязнении атмосферы, главным образом сернистыми газами. При этом состав и тип чугуна, в частности форма графита и характер матрицы, оказывают сравнительно небольшое влияние. Единственным элементом, полезным в этих условиях, является медь.

Роль состава и структуры чугуна также не очень велика при коррозии в природных, промышленных, лечебных и морских водах, хотя чугуны марок ВЧ, особенно перлитный, обладает более высокой коррозионной стойкостью в морской воде, чем чугуны марок СЧ. Главное влияние в этих условиях, как и при атмосферной коррозии, оказывают состав среды и плотность отливок. Растворы солей, гидраты которых придают воде кислотный характер, значительно ускоряют коррозию, а соли, дающие при гидролизе щелочные растворы, замедляют коррозионный процесс.

В условиях подземной коррозии существенное влияние оказывают такие факторы, как состав и электрическое сопротивление почвы, характер контакта, наличие блуждающих токов и др. В частности, с увеличением электрического сопротивления почвы с 100—200 до 20 000 Ом·см скорость коррозии

13. Коррозионная стойкость (скорость коррозии, мм/год) чугуна в различных условиях [4, 6, 12, 20]

| | Условия эксплуатации | | | | | | | |
|--|------------------------|--|--|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------|---------|
| | Промышленная атмосфера | Влажная камера с ежедневной добавкой 0,3 % SO ₂ | Проточная водопроводная вода при 25 °С | Морская вода #1 | 10 %-ный раствор соды при 50 °С | 3 %-ный раствор NaCl при 10—19 °С | 5 %-ная кислота | |
| | | | | | | серая | стальная | азотная |
| Чугун | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Белый | — | — | — | 0,045 | — | — | — | — |
| Серый | 0,141 | 0,242 | 0,267 | 0,03—0,09 | 0,0185 | 0,084 | 26,7 | 25,8 |
| Высокопрочный: ферритный | 0,181 | 0,285 | 0,216 | 0,025—0,105 | 0,01 | 0,077 | — | — |
| ферритно-перлитный | 0,151 | 0,235 | 0,257 | — | — | 0,083 | — | — |
| перлитный | 0,141 | 0,220 | 0,285 | 0,05—0,07 | 0,012 | 0,084 | — | — |
| Ковкий | — | — | — | 0,045—0,08 | — | — | — | — |
| Коррозионно-стойкий типа неризист 4Н15Д7 | — | — | 0,049 | 0,02 | — | — | 0,152 | 21,3 |
| Кремнистый типа ЧС15, ЧС15МЧ | — | — | — | — | — | — | 0,125 | 0,125 |

*1 При испытании в проточной морской воде скорость коррозии превышает аналогичные данные испытаний в проточной воде. Скорость коррозии 1 г/(м²·ч) = 1,2 мм/год.

уменьшается в 3 раза [6]. Несколько большее сопротивление коррозии в почве оказывают чугуны марок КЧ и ВЧ, особенно в агрессивной среде.

В общем случае для этих чугунов коррозионная стойкость повышается по мере измельчения графита и уменьшения его количества, при однофазной структуре матрицы, а также при уменьшении содержания Si, S, P. Повышают сопротивление коррозии модифицирование, а также легирование Cu (до 1,4%), Ni (до 3,0%), Cr (до 1,0%). Для работы в щелочной среде рекомендуются чугуны, содержащие 0,8—1,0% Ni и 0,6—0,8% Cr или 0,35—0,5% Ni и 0,4—0,6% Cr.

Однако при воздействии на металл сильных реагентов, кислот и щелочей следует применять высоколегированные чугуны. В этих случаях основное значение приобретает химический состав чугуна. Роль структуры, особенно формы выделения графита, значительно меньше. При прочих равных условиях наилучшими являются аустенитная или ферритная структура. Компактный или пластинчатый графит мало различаются по своему влиянию, если последний разобщен, сравнительно невелик и равномерно распределен.

Повышение сопротивления чугуна коррозии в агрессивных средах достигается легированием элементами, которые обладают высоким потенциалом (Cu, Ni, Mo) и являются более устойчивыми, либо способны образовывать защитные пассивирующие пленки (Cr, Si, Al) в той или иной среде, либо обладают обоими этими свойствами [6].

Химическая стойкость чугуна в кислотах резко увеличивается при содержании кремния ~1,5%. Сплавы ЧС15, ЧС17 стойки в азотной, фосфорной, уксусной и, что особенно важно, в серной кислоте при любых концентрациях и температуре и в смеси HNO₃ и H₂SO₄. Ферросилиды стойки также в растворах солей, но легко корродируют под воздействием соляной кислоты, крепких щелочей и фтористых соединений. Для повышения стойкости в кислоте HCl сплавы легируют до 4,0% Mo (ЧС15М4, ЧС17М3). Эти сплавы известны под названием антихлор. Антихлор устой-

чив в соляной кислоте любой концентрации при всех температурах, в азотной кислоте любой концентрации, в лимонной, пикриновой, серной и фосфорной кислотах, перекиси водорода, четыреххлористом углероде, железном купоросе. Недостатком этих сплавов является большая хрупкость, плохая обрабатываемость и низкие механические свойства. Поэтому применяют ферросилиды только в условиях, когда необходима низкая скорость коррозии, не выше 0,25 мм/год.

В условиях воздействия щелочей используют обычно чугуны, легированные никелем (хромом). Наилучшие результаты достигаются при использовании высоколегированных чугунов типа неризист (например, ЧН15Д7Х2). Эти чугуны стойки также в холодных разбавленных растворах серной кислоты. В соляной кислоте чугуны этого типа менее стойки, а в азотной — нестойки (см. табл. 13).

При большом содержании хрома (12—35%) чугун оказывается химически стойким во многих средах, кислотах, щелочах, солях и особенно в азотной кислоте благодаря образованию оксидной пассивирующей пленки. В соляной кислоте оксидная пленка на этих сплавах разрушается вследствие воздействия хлоридов.

Жаростойкость характеризует работоспособность чугуна при повышенных и высоких температурах в условиях действия малых нагрузок, когда главной причиной разрушения отливок является образование окалины или трещин. Наблюдается также обратимое изменение размеров отливки, которое принято называть ростом. Жаростойкость оценивается по окалинностойкости — увеличению массы отливки в г/(м²·ч) и ростоустойчивости — уменьшению плотности чугуна или увеличению длины образца за 150 ч выдержки при соответствующей температуре. Для жаростойких чугунов при соответствующей температуре увеличение массы образца не должно превосходить 0,5 г/м², а длины 0,2%. Рост чугуна возрастает с повышением температуры и продолжительности выдержки, увеличением числа циклов колебаний температуры (особенно при переходе через критический интервал),

скорости изменения температуры и агрессивности среды (рис. 1, а). Причиной, вызывающей рост чугуна, являются также графитизация и другие фазовые превращения, протекающие с увеличением объема фаз, окисление основного металла и легирования элементов, растворение графита и порообразование, релаксация напряжений.

В наиболее неблагоприятных условиях, например при циклическом изменении температуры в агрессивной среде, необратимое увеличение объема может достигать 20, а иногда 50—100%. Характерными признаками роста являются резкое понижение механических свойств и образование сетки разгара на поверхности отливок.

Измельчение и уменьшение количества графита и замена феррита зерна ферритом в структуре повышают окалинностойкость и ростоустойчивость чугунов марок СЧ. Этому способствуют уменьшение содержания С и Si, замена обычного чугуна модифицированным, низкое легирование Cr, Ni и другими элементами. Более высокой окалинностойкостью и ростоустойчивостью обладает высокопрочный чугун (рис. 1, б). Ковкий чугун с типичным для него выделением углерода отжига занимает при одной и той же матрице промежуточное положение между чугунами марок СЧ и ВЧ.

На воздухе чугун марки СЧ сохраняет повышенную стойкость при температурах до 450—500°C, а в атмосфере печных газов лишь до 350°C, в атмосфере водяного пара не выше 300°C. Явление роста в высокопрочном чугуне с шаровидным графитом (ВЧШГ) практически не наблюдается при температурах до 400—500°C.

При более высоких температурах следует применять специальные легированные чугуны. Наиболее часто для повышения жаростойкости используют легирование Si, Al и Cr.

Влияние Si и Al на окалинностойкость и ростоустойчивость чугуна не однозначно (рис. 2). При небольших добавках этих элементов в обычный чугун с пластинчатым графитом рассматриваемые свойства ухудшаются. Даже незначительное количество Si

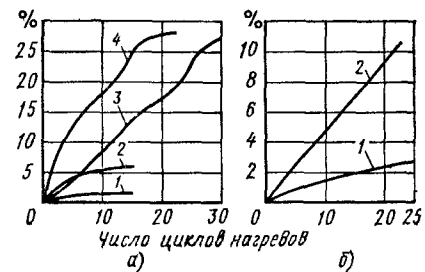


Рис. 1. Изменение объема (а) [8] и рост [7] чугуна (б) в зависимости от числа циклов нагрева до 900°C:

а — серый чугун с пластинчатым графитом; нагрев: 1 — в водороде; 2 — в вакууме; 3 — в атмосфере печных газов; 4 — в CO₂; б — чугуны с ферритной основой: 1 — марки СЧ состава 3,27—3,43% С; 2,19—2,23% Si; 0,47—0,68% Mn, 0,13—0,20% P, до 0,15% S; 2 — марки ВЧ того же состава, кроме того, до 0,01% S; 0,05—0,07% Mg; 1,5—1,95% Ni

в белых чугунах резко понижает их жаростойкость. Однако при достаточно высоком содержании Si и Al стойкость чугуна против окисления и роста резко повышается.

Благоприятные результаты действия высоких концентраций Si на окалинностойкость и ростоустойчивость связаны с получением стабильной структуры графит + кремнеферрит. По мере увеличения содержания Si критические точки располагаются при более высокой температуре. Так, при 6% Si точка A_{с1} располагается около 950°C, а при 7% Si — около 1000°C. Кремний, входя в твердый раствор, повышает температуру образования непрочной воститной фазы (Fe₃O₄), т. е. увеличивает стойкость металлической основы против окисления.

Влияние Al на жаростойкость чугуна проявляется прежде всего путем образования им защитных оксидных пленок [1]. Алюминий повышает температуру возникновения воститной фазы и способствует образованию оксидных пленок с шпинельным типом решетки (FeO·Al₂O₃).

На уменьшение роста и окисления отливок хром влияет уже при меньших количествах (0,5—1,5%; рис. 2, а). Ввод хрома в таких количествах тор-

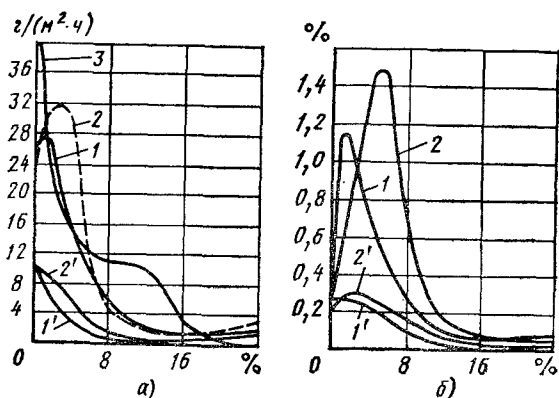


Рис. 2. Влияние содержания легирующих элементов на окисление (увеличение массы) (а) и линейный рост (б) чугуна при 1223—1273 К [26]:
1, 1' — увеличение содержания Si в обычном и высокопрочном чугуна соответственно;
2, 2' — увеличение содержания Al; 3 — увеличенное содержания Cr

14. Жаростойкость некоторых легированных чугунов (ГОСТ 7769—82) [20]

| Чугун | Характеристика условий | Чугун | Характеристика условий |
|-------------------------|---|---------------------------|--|
| Хромистые чугуны | | Кремнистые чугуны | |
| ЧХ1 | В воздушной среде до 500 °С | ЧС5 | В топочных и генераторных газах, в воздушной среде до 700 °С |
| ЧХ2 | То же, до 600 °С | ЧС5Ш | То же, до 800 °С |
| ЧХ3 | » до 650 °С | ЧС13 | В кислотах, кроме плавиковой и соляной, до 200 °С |
| ЧХ16 | » до 900 °С | ЧС15 | То же |
| ЧХ28 | В расплавах солей до 900 °С, в газовых средах до 1100—1150 °С | ЧС17 | » |
| ЧХ32 | То же | Алюминиевые чугуны | |
| ЧХ28П | В цинковых расплавах до 550 °С | ЧЮХШ | В атмосфере воздуха и печных газов до 650 °С |
| Никелевые чугуны | | ЧЮ7Х2 | То же, до 750 °С |
| ЧНМШ | Термостойкость до 500 °С | ЧЮ6С5 | » до 800 °С |
| ЧН19Х3Ш | Жаростойкость до 600 °С | ЧЮ22Ш | В воздушной среде до 1000—1100 °С, повышенная в газовой среде, содержащей S, пары воды |
| ЧН11Г7Ш | То же | ЧЮ30 | В воздушной среде до 1100 °С |

Примечание. Х — хром; Н — никель; М — молибден; Г — марганец; С — кремний; Ю — алюминий; П — фосфор; Ш — чугун с шаровидным графитом.

мозит графитизацию эвтектичного цемента, измельчает включения графита и повышает сопротивляемость окислению металлической основы вследствие повышения температуры образования вюститной фазы. Максимального уровня эти свойства достигают при Cr > 15%. Большинство жаропрочных хромистых чугунов (>10% Cr) относятся к типу белых чугунов.

Никель повышает жаростойкость даже при относительно небольших добавках (до 1,5—2,0). Однако это влияние ощутимо лишь в области относительно низких температур. Жаростойкость непрерывно повышается с ростом концентрации в них Ni. Жаростойкими при 1220 К являются чугуны, содержащие не менее 25% Ni. При таких концентрациях никеля чугуны имеют однофазную аустенитную структуру металлической основы.

Наиболее эффективно для повышения жаростойкости и сохранения других свойств комплексное легирование, например, Cr и Ni, Cr и Cu, Si и Al и др.

В табл. 14 приведены марки и области применения некоторых жаропрочных легированных чугунов.

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧУГУНА

Чугун является своеобразным композитным материалом, механические и эксплуатационные свойства которого зависят от характеристик металлической основы (прочность, пластичность, твердость и др.), а также формы, размеров, количества и распределения графитовых включений. При этом решающее значение в ряде случаев имеет либо графит, либо металлическая основа. Например, модуль упругости чугуна в решающей степени зависит от формы и величины графитовых включений, а твердость в основном определяется свойствами металлической основы. Такие свойства, как временное сопротивление разрыву, ударная вязкость, длительная прочность, зависят как от свойств металлической основы, так и от формы или

размеров и количества графитовых включений. Свойства структурных составляющих металлической основы чугуна приведены в табл. 15.

Получение той или иной структуры чугуна в отливках зависит от многих факторов: химического состава чугуна, вида шихтовых материалов, технологичности плавки и внепечной обработки металла, скорости кристаллизации и охлаждения расплава в форме, а следовательно, толщины стенки отливки, теплофизических свойств материала формы и др. Структуру металлической основы чугуна можно изменять также термической обработкой отливок, общие закономерности влияния которой аналогичны возникающим при термической обработке углеродистой стали, а особенности связаны с сопутствующими изменениями металлической основы процессами графитизации.

Среди элементов химического состава C и Si определяют формирование структуры чугуна, а при заданной технологии литья приведенный размер стенки отливки R_{np} характеризует скорость ее охлаждения (R_{np} — отношение площади сечения стенки к периметру). Тогда различная структура чугуна в отливках при литье в песчаную форму получается при [6, 20]

$$C(Si + lg R_{np}) = K,$$

где $K \leq 4,5$ — для перлитно-цементной структуры; $K = 4,5 \div 6,0$ для перлитно-графитной структуры; $K = 10 \div 14$ для перлитно-ферритно-графитной структуры; $K \geq 14$ для ферритно-графитной структуры.

Наряду с Si большое значение как графитизирующий элемент имеет Al, который иногда частично или полностью заменяет Si. Это улучшает свойства чугуна, особенно пластичность. Наиболее благоприятное сочетание характеристик прочности, вязкости и пластичности достигается в алюминиевых чугунах при содержании в них Si $\leq 1,0\%$.

По влиянию небольших добавок других элементов на структуру чугуна и, следовательно, свойства добавки можно разбить на три группы.

Первая группа элементов (Ni, Co, Cu) аналогично Si оказывает графитизирующее влияние, способствует раз-

15. Свойства основных структурных составляющих чугуна [2, 6, 8, 20]

| Структурные составляющие чугуна | σ_B , МПа | δ , % | НВ·10 ⁻¹ , МПа |
|---------------------------------|------------------|--------------|---------------------------|
| Феррит | 250—400 | 30—50 | 110—140 |
| Перлит | 800—1000 | 15—20 | 200—260 |
| Сорбит | 1200—1400 | 10—15 | 240—300 |
| Троостит | — | — | 280—320 |
| Бейнит | — | — | 300—350 |
| Мартенсит | 1400—1800 | — | 350—550 |
| Аустенит | 400—800 | 40—60 | 140—160 |
| Цементит | 30—50 | — | 750—800 |
| Фосфидная эвтектика | — | — | 300—400 |
| Графит | 17—35 | — | 130—180 |

Примечание. При легировании фаз металлической основы свойства их повышаются. Например феррит, легированный 2% Si, имеет $\sigma_B = 600$ МПа.

мельчению выделений графита. Одновременно эти элементы стимулируют получение более дисперсных перлитных игольчатых и мартенситных структур даже при сравнительно медленном охлаждении.

Вторая группа элементов (Cr, Mo, W, V и др.) в противоположность первой препятствует графитизации с интенсивностью, пропорциональной концентрации. При содержании, превышающем предел растворимости, их в цементите или феррите, они образуют специальные карбиды.

К третьей группе элементов можно отнести Ti, Zr, Ce, Ca, Mg, B и др. Эти элементы характеризуются высокой химической активностью, почти целиком расходуются на образование тугоплавких карбидов, сульфидов, оксидов, нитридов, которые могут служить зародышами в процессе последующей кристаллизации и повышать дисперсность металлической основы. Более того, элементы этой группы Mg, Ca, Ce и др. редкоземельные металлы (РЗМ) входят в состав лигатур для модифицирования чугуна с целью получения графита вермикулярной или шаровидной формы.

Влияние графитовых включений на различные эксплуатационные свойства чугуна также многообразно и не однозначно.

При нагружении чугуна графитовые включения, являясь «надрезами», снижают его прочность и пластичность. Это происходит, во-первых, вследствие некоторого уменьшения живого сечения металлической основы из-за полостей, занятых графитом, имеющим небольшую прочность на разрыв, и, во-вторых, что наиболее важно, из-за высокой концентрации напряжений, возникающей в местах графитовых включений, особенно при пластинчатой форме графита. Чем длиннее пластинки графита, тем больше коэффициент концентрации напряжений. Все это приводит к резкой локализации пластических деформаций в металлической основе, исчерпанию пластичности материала в этих местах, развитию трещин и в итоге — к хрупкому разрушению материала при средних напряжениях и показателях пластичности, более низких, чем прочность и пластичность металлической основы чугуна.

Кроме того, из-за разного коэффициента термического расширения графита и металлической основы (см. табл. 8) при охлаждении отливок в чугуне возникают структурные напряжения II рода, которые, постепенно возрастая, достигают предела упругости материала в местах концентрации напряжений (при пластинчатой

форме графита). Поэтому дополнительная внешняя нагрузка любой величины вызывает необратимые пластические деформации в материале, и чугун с пластинчатым графитом в литом состоянии, по существу, не имеет предела упругости [5]. Однако он может приобрести это свойство в результате «тренировки» различными нагрузками, приводящими к упрочнению металлической основы в местах концентрации напряжений. Этой же цели могут служить различные варианты термомеханической или термоциклической обработки [21, 22], что особенно важно для высокоточных деталей прецизионных станков и других подобных машин.

Упрочнение металлической основы в местах концентрации напряжений происходит при естественном старении отливок из чугуна с пластинчатым графитом (вылеживании) даже при отсутствии напряжений I рода, из-за протекания релаксационных процессов высоких напряжений II рода. В результате возрастает сопротивляемость образованию пластических деформаций при нагружении небольшими нагрузками. Указанный процесс интенсифицируется при вылеживании отливок на воздухе, когда добавляется термоциклическое воздействие изменений погодных условий.

16. Механические свойства и рекомендуемый состав серого чугуна (ГОСТ 1412—85)

| Чугун | σ_B , МПа | Твердость НВ·10 ⁻¹ , МПа | Мас. доля элементов, % | | | | |
|-------|------------------|-------------------------------------|------------------------|---------|---------|-----|------|
| | | | C | Si | Mn | P | S |
| СЧ10 | 98 | 143—229 | 3,5—3,7 | 2,2—2,6 | 0,5—0,8 | 0,3 | 0,15 |
| СЧ15 | 147 | 163—229 | 3,5—3,7 | 2,0—2,4 | 0,5—0,8 | 0,2 | 0,15 |
| СЧ18 | 176 | 170—241 | 3,4—3,6 | 1,9—2,3 | 0,5—0,7 | 0,2 | 0,15 |
| СЧ20 | 196 | 170—241 | 3,3—3,5 | 1,4—2,2 | 0,7—1,0 | 0,2 | 0,15 |
| СЧ21 | 206 | 170—241 | 3,3—3,5 | 1,4—2,2 | 0,7—1,0 | 0,2 | 0,15 |
| СЧ24 | 235 | 170—241 | 3,2—3,4 | 1,4—2,2 | 0,7—1,0 | 0,2 | 0,15 |
| СЧ25 | 245 | 180—250 | 3,2—3,4 | 1,4—2,2 | 0,7—1,0 | 0,2 | 0,15 |
| СЧ30 | 294 | 181—255 | 3,0—3,2 | 1,0—1,3 | 0,7—1,0 | 0,2 | 0,12 |
| СЧ35 | 343 | 197—269 | 2,9—3,0 | 1,0—1,1 | 0,7—1,1 | 0,2 | 0,12 |

Примечание. Чугуны марок СЧ25 и выше обычно модифицируют FeSi. Для них содержание Si в таблице дано после введения модификатора.

Модуль упругости чугуна E из-за графитовых включений ниже, чем у его металлической основы, так как образуются дополнительные обратимые деформации полостей, занятых графитом, особенно заметные при больших нагрузках. Поэтому значение E уменьшается с увеличением нагрузки.

Все отмеченные явления становятся менее заметными при увеличении дисперсности пластинчатого графита до 100—200 мкм и особенно при его компактных формах (вермикулярный, шаровидный графит). Поэтому ковкий и высокопрочный чугуны при одинаковой структуре металлической основы имеют более высокую прочность, модуль упругости, пластичность; у них появляется предел упругости.

Наличие графитовых включений делает чугун, особенно с пластинчатым графитом, практически не чувствительным к надрезам, что позволяет конкурировать ему с более прочной сталью по сопротивлению усталости и пределу выносливости. Включения графита обеспечивают высокую износостойкость чугуна в условиях трения скольжения со смазкой и т. д.

Серый чугун с пластинчатым графитом. В табл. 16 приведены механические свойства и рекомендуемый химический состав серого чугуна по ГОСТ 1412—85, а в табл. 17 — некото-

17. Механические свойства чугуна [20]

| Чугун | При растяжении | | | При сжатии | | | | При изгибе |
|-----------|-------------------------|--------------|----------------------|---------------------|-------------------------|-----------|------------|------------|
| | $E \cdot 10^{-3}$, МПа | δ , % | σ_{-1P} , МПа | $\sigma_{сж}$, МПа | $E \cdot 10^{-3}$, МПа | μ | ψ , % | |
| СЧ10—СЧ18 | 60—80 | 0,2—1,0 | 50—70 | 500—800 | 65—90 | 0,28—0,29 | 20—40 | 70—90 |
| СЧ20—СЧ30 | 85—125 | 0,4—0,65 | 90—115 | 850—1000 | 93—130 | 0,28—0,29 | 15—30 | 120—145 |
| СЧ30—СЧ35 | 125—145 | 0,65—0,9 | 115—140 | 1000—1200 | 130—155 | 0,28—0,29 | 15—20 | 145—170 |

| Чугун | При кручении | | При срезе | | $\sigma_{нж}$, кДж/м ² | $\sigma_{нж}$, МПа | $\sigma_{нж}$, МПа |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|
| | $\tau_{нж}$, МПа | τ_{-1} , МПа | $\tau_{сж}$, МПа | $G \cdot 10^{-3}$, МПа | | | |
| СЧ10—СЧ18 | 240—320 | 60—80 | 150—220 | 40—44 | 40—70 | 58—66 | 240—360 |
| СЧ20—СЧ30 | 280—360 | 100—120 | 250—355 | 45—54 | 80—100 | 67—133 | 400—500 |
| СЧ30—СЧ35 | 360—400 | 120—140 | 355—400 | 54—64 | 80—90 | 133—155 | 500—540 |

Примечание. ϕ — циклическая вязкость, характеризующая скорость затухания вибрации, а значит, чувствительность к надрезам.

рые, не предусмотренные этим стандартом свойства чугуна. В общем случае, чем меньше графита, мельче и благоприятнее по распределению его включения, дисперснее перлит, мельче эвтектическое зерно, тем выше указанные свойства. Однако если $\sigma_{нж}$, τ_{-1} , $\tau_{нж}$, ϕ зависят как от графита, так и металлической основы, то E — главным образом от графита, а $HВ$ — почти полностью от структуры металлической основы. Малая чувствительность серого чугуна к надрезам иллюстрируется следующими данными по сопротивлению усталости чугуна при вибрации [24]:

| | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\sigma_{нж}$, МПа | 140 | 175 | 210 | 255 | 300 |
| σ_{-1} , МПа: | | | | | |
| без над- | 65 | 84 | 105 | 140 | 163 |
| реза | | | | | |
| с надрезом | 65 | 80 | 95 | 120 | 130 |

Влияние легирующих элементов на механические свойства чугуна марок СЧ показано на рис. 3, а изменение прочности серого чугуна в зависимости от толщины стенки отливки, получаемой в песчаной форме, — на рис. 4.

Для различных групп отливок путем варьирования содержания химического состава основных элементов и легирования чугуна небольшими добавками обеспечивают комплекс оптимальных эксплуатационных свойств. Так, для блоков цилиндров карбюраторных двигателей чугун легируют Cr (0,2—0,5 %) и Ni (до 0,2 %), а для автомобильных дизелей дополнительно Cu (0,2—0,4 %). Необходимые свойства для тракторных двигателей обеспечивают повышенным (до 1,4 %) содержанием Mn.

Гильзы карбюраторных двигателей изготавливают из чугуна СЧ25 с обычным (0,14 %) и повышенным (0,17—0,22 %) содержанием фосфора. Для ребристых цилиндров двигателей воздушного охлаждения используют чугун, легированный Sb (0,5—0,08 %), Cr (0,4—0,6 %) и Ni (0,1—0,3 %) или Ni (0,65 %) и P (0,65—0,75 %).

В станкостроении для повышения твердости средних по развесу отливок наряду с модифицированием чугуна FeSi и SiCa применяют ковшевое легирование Cu (0,3—0,4 %) и Cr

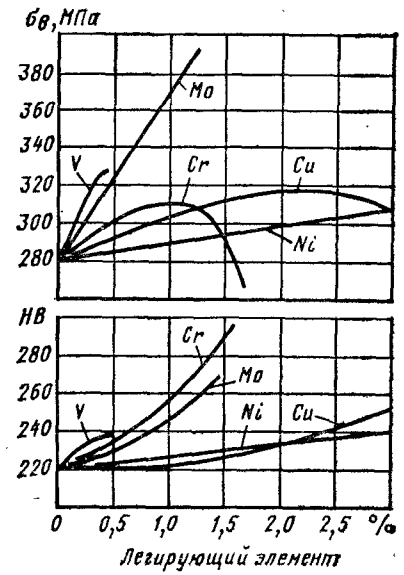


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на прочность и твердость чугуна с пластинчатым графитом состава: 3,2 % C; 1,85 % Si; 0,7 % Mn; 0,14 % P [6]

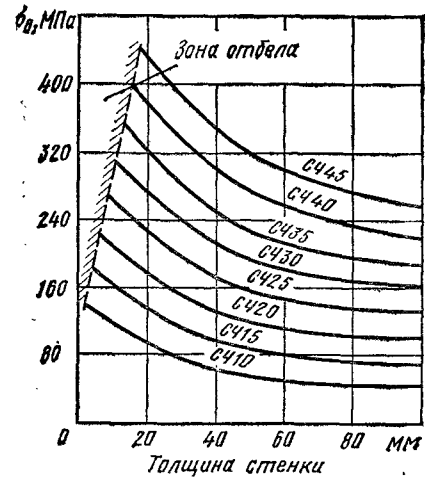


Рис. 4. Изменение прочности серого чугуна различных марок в зависимости от толщины стенки отливки

(0,2—0,3 %). При толщине стенки более 15—20 мм используют легирование Cu (0,8—1,0 %) и Cr (0,3—0,5 %). Для средних и тяжелых отливок, в которых допускается наличие в микроструктуре карбидных включений, применяют комплексное легирование чугуна Mo (0,3—0,8 %), Ni (0,7—1,2 %) и Cr (0,2—0,6 %). В отдельных случаях для повышения твердости применяют легирование В (0,04 %) совместно с Cu (0,4—0,6 %) или Ni (0,5—0,6 %).

Максимальная прочность чугуна при плавке в индукционных печах достигается при отношении $Si/C = 0,85 \pm 1,0$ (при постоянной степени эвтектичности). При получении чугунов СЧ30, СЧ35, в случае ваграночной плавки, более низкое отношение $Si/C = 0,6 \pm 0,7$ компенсируют повышенным содержанием Mn (1,0—1,5 %).

Герметичность отливок из чугуна зависит как от графитовой, так и от усадочной пористости; при этом, чем ниже эвтектичность серого чугуна, тем большее значение приобретают условия эффективного питания при затвердевании отливок (градиент температур, обеспечивающий направленное затвердевание, достаточный металлостатический напор).

Несмотря на наличие графита, герметичность чугуна достаточно велика, если в отливке отсутствуют литейные дефекты. Так, при испытании водой или керосином при давлении до 10—15 МПа втулки толщиной 2 мм имеют полную герметичность. Чугунные отливки с мелким графитом и низким содержанием P при отсутствии волосяных трещин могут противостоять давлению жидкости до 100 МПа и газов до 70 МПа.

Свариваемость серого чугуна значительно хуже, чем у углеродистой стали; поэтому газовая и дуговая сварка, как и заварка дефектов (особенно крупных) на отливках, проводится по особой технологии.

Обработываемость серого чугуна обратно пропорциональна его твердости. Она улучшается по мере увеличения количества феррита в структуре, а также по мере повышения однородности структуры, т. е. при отсутствии в ней включений фосфидной эвтектики, карбидов, обладающих

повышенной твердостью. Наличие графита полезно, так как стружка получается крошащейся и давление на инструмент уменьшается.

Высокопрочный чугун с шаровидным или вермикулярным графитом (ВЧШГ, ВЧВГ). Отличительной особенностью ВЧШГ являются его высокие механические свойства (табл. 18, 19), обусловленные шаровидной формой графита, который не оказывает сильного надрезающего воздействия на металлическую основу, вследствие чего вокруг сфероидов графита в меньшей степени возникает концентрация напряжений. При этом ВЧШГ, как и другие чугуны, можно получать со всеми известными структурами металлической основы, выбирая состав металла, в том числе его легирование, технологию производства и методы термической обработки (табл. 20).

Кроме того, ВЧШГ имеет хорошие коррозионную стойкость (не ниже, чем СЧ, см. табл. 13), жаростойкость (рис. 1, б), хладостойкость, антифрикционные свойства, обрабатываемость и может подвергаться сварке и автоматической резке.

ВЧШГ имеет хорошие литейные свойства: высокую жидкотекучесть, незначительную склонность к образованию горячих трещин. Вместе с тем его склонность к образованию усадочных раковин и литейных напряжений выше, чем у СЧ, и находится на уровне этих свойств для стали или ковкого чугуна.

Наиболее существенным для механических свойств ВЧШГ является получение графита правильно шаровидной формы. Шаровидная форма графита зависит от состава металла, условий модифицирования, шихтовых материалов и других условий плавки и от скорости охлаждения отливки. Чем больше скорость охлаждения, тем ближе к шаровидной форме и дисперсней включения графита. Для получения заданных свойств в отливках с большей толщиной стенки уменьшают содержание C и Si в чугуне с повышенным их соотношением (табл. 20). Для получения чугуна высоких марок используют легирование небольшим количеством Ni, Cr, Cu, Mo.

18. Механические свойства ВЧШГ (ГОСТ 7293—85)

| Чугун | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | НВ |
|--|------------------|----------------------|--------------|---------|
| | не менее | | | |
| Ферритный чугун | | | | |
| ВЧ 35 | 350 | 220 | 22 | 140—170 |
| ВЧ 40 | 400 | 250 | 15 | 140—202 |
| Перлитно-ферритный чугун | | | | |
| ВЧ 45 | 450 | 310 | 10 | 140—225 |
| ВЧ 50 | 500 | 320 | 7 | 153—245 |
| Перлитный чугун | | | | |
| ВЧ 60 | 600 | 370 | 3 | 192—277 |
| ВЧ 70 | 700 | 420 | 2 | 228—302 |
| ВЧ 80 | 800 | 480 | 2 | 248—351 |
| Бейнитный чугун | | | | |
| ВЧ 100 | 1000 | 700 | 2 | 270—360 |
| Чугун с вермикулярным графитом (не регламентирован ГОСТом) [9] | | | | |
| Ферритный | 330—380 | — | 3—8 | 135—170 |
| Перлитный | 500—600 | — | 2 | 190—250 |

19. Механические свойства высокопрочного чугуна, не предусмотренные ГОСТ 7293—85 [4, 20]

| Чугун | При растяжении | | При сжатии | | | При кручении | |
|---------------|-------------------------|---------------------|------------------|-----------|------------|----------------|-------------------|
| | $E \cdot 10^{-3}$, МПа | σ_{-1} , МПа | σ_c , МПа | μ | ψ , % | τ_B , МПа | τ_{-1} , МПа |
| Ферритный ЧШГ | 165—175 | 120—150 | 1000—1400 | 0,28—0,29 | 12—20 | 400—460 | 130—160 |
| Перлитный ЧШГ | 175—185 | 160—200 | 1500—2000 | 0,28—0,29 | 4—8 | 500—780 | 180—230 |
| Бейнитный ЧШГ | 180—190 | 240—400 | 1800—2200 | 0,28—0,29 | 2—4 | 700—900 | 220—300 |

| Чугун | При срезе | | ϕ , % при вибрации с нагрузкой, равной $1/3\sigma_{0,2}$ | $G_{нп}$, кДж/м ² | При изгибе | |
|---------------|----------------|----------------------|---|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| | τ_B , МПа | $G \cdot 10^3$, МПа | | | σ_{-1} , МПа | $\sigma_{нп}$, МПа |
| Ферритный ЧШГ | 320—400 | 65—75 | 10—14 | 150—200 | 235—258 | 750—900 |
| Перлитный ЧШГ | 400—550 | 75—80 | 8—10 | 80—200 | — | 850—1200 |
| Бейнитный ЧШГ | 550—700 | 80—85 | 7—10 | 50—150 | — | 1200—1400 |

20. Рекомендуемые химический состав и термическая обработка ВЧШГ [4, 20]

| Чугун | Мас. доли | | | | | |
|--------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | C | | | Si | | |
| | Толщина стенок, мм | | | | | |
| | до 50 | 50—100 | >100 | до 50 | 50—100 | >100 |
| ВЧ 35 | 3,3—3,8 | 3,0—3,5 | 2,7—3,2 | 1,9—2,9 | 1,3—1,7 | 0,8—1,5 |
| ВЧ 40 | 3,3—3,8 | 3,0—3,5 | 2,7—3,2 | 1,9—2,9 | 1,2—1,7 | 0,5—1,5 |
| ВЧ 45 | 3,3—3,8 | 3,0—3,5 | 2,7—3,2 | 1,9—2,9 | 1,3—1,7 | 0,5—1,5 |
| ВЧ 50 | 3,2—3,7 | 3,0—3,3 | 2,7—3,2 | 1,9—2,9 | 2,2—2,6 | 0,8—1,5 |
| ВЧ 60 | 3,2—3,6 | 3,0—3,3 | — | 2,4—2,6 | 2,4—2,8 | — |
| ВЧ 70 | 3,2—3,6 | 3,0—3,3 | — | 2,6—2,9 | 2,6—2,9 | — |
| ВЧ 80 | 3,2—3,6 | — | — | 2,6—2,9 | — | — |
| ВЧ 100 | 3,2—3,6 | — | — | 3,0—3,8 | — | — |

Некоторые примеси оказывают вредное влияние на процесс модифицирования, а следовательно, и на свойства ВЧШГ. Поэтому их содержание должно быть ограничено (0,009 % Pb; 0,13 % Sn; 0,026 % Sb; 0,04 % Ti; 0,08 % As; 0,3 % Al).

Получение ШГ в чугуне возможно при обработке расплава сфероидизирующими металлами (Mg, Ca, Ce и др.) и их смесями с другими металлами или неметаллами. Чаще всего применяют магниевые лигатуры на основе Ni, Cu, Si или Ca. Чтобы подавить демодифицирующие влияния примесей, всегда имеющихся в чугуне, в лигатуры к магнию дополнительно вводят один или несколько РЗМ.

Способы получения чугуна с вермикулярным графитом принципиально не отличаются от способов получения ВЧШГ, за исключением меньшего количества глобуляризирующих элементов, вводимых в расплав при модифицировании.

Механические свойства чугуна с вермикулярным графитом ближе к свойствам чугуна с шаровидным графитом, а литейные свойства — к чугуну с пластинчатым графитом. ВЧВГ обладает меньшей чувствительностью к изменению толщины стенки отливки, чем чугун с пластинчатым и шаровидным графитом [4, 19], и вследствие этого может более успешно использоваться в качестве конструкционного материала

для крупногабаритных массивных деталей.

Изменение механических свойств ВЧШГ и ВЧВГ при повышенных температурах приведено в табл. 21. Прочность до 400—450 °С изменяется незначительно, причем она сначала несколько снижается при 150—200 °С, как у многих железоуглеродистых сплавов, а затем снова возрастает при 350—400 °С.

Модуль упругости у всех типов чугуна монотонно снижается с повышением температуры.

По герметичности высокопрочный чугун значительно превосходит серый вследствие отсутствия графитовой пористости и пригоден для деталей, работающих под давлением до 40 МПа.

Хорошая износостойкость обуславливает частое использование его для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания и трения при высоких давлениях и затрудненной смазке. Наиболее благоприятной в этом случае металлической основой нелегированного ВЧШГ является перлитная, характеризующаяся меньшим коэффициентом трения f . У перлитного чугуна (НВ 270) $f = 0,63$ при давлении $p = 1,4$ МПа, $f = 0,52$ при $p = 2,5$ МПа, а при перлитно-ферритной основе (НВ 207) f соответственно 0,7 и 0,62.

Сила резания ВЧШГ на 50—60 % выше, чем у СЧ той же твердости, но

| элементов, % | элементов, % | | | | | Рекомендуемая термическая обработка | |
|--------------|--------------|----------|------|-----|-----|-------------------------------------|----|
| | Mn | P | S | Cr | Cu | | Ni |
| | | не более | | | | | |
| 0,2—0,6 | 0,1 | 0,02 | 0,05 | — | — | Отжиг | |
| 0,2—0,6 | 0,1 | 0,02 | 0,1 | — | — | » | |
| 0,3—0,7 | 0,1 | 0,02 | 0,1 | — | — | Без обработки | |
| 0,3—0,7 | 0,1 | 0,02 | 0,15 | — | — | » | |
| 0,4—0,7 | 0,1 | 0,02 | 0,15 | 0,3 | 0,4 | Нормализация | |
| 0,4—0,7 | 0,1 | 0,015 | 0,15 | 0,4 | 0,6 | » | |
| 0,4—0,7 | 0,1 | 0,01 | 0,15 | 0,6 | 0,6 | Двойная нормализация | |
| 0,4—0,7 | 0,1 | 0,01 | 0,15 | 0,6 | 0,8 | Закалка и отпуск | |

при эквивалентных значениях σ_B обрабатываемость ВЧШГ лучше, чем СЧ. Параметры шероховатости обработанной поверхности у ВЧШГ ниже, вследствие обособленности выделений графита в нем.

Ковкий чугун. Отливки из черносердечного ковкого чугуна получают путем графитизирующего отжига отливок из белого чугуна. Они характеризуются повышенными σ_B и δ вследствие образования при отжиге хлопьевидного графита, более компактного, чем в СЧ с пластинчатым графитом (табл. 22). Металлическая основа у КЧ, как и у других чугунов, может быть ферритной или перлитной в зависимости от его химического состава (табл. 23) и применяемого режима термической обработки.

Основные преимущества отливок из КЧ заключаются в однородности их свойств по сечению, практическом отсутствии напряжений. КЧ применяется преимущественно для отливок с толщиной стенок 3—50 мм, что связано со стремлением обеспечить безусловное получение структуры БЧ при литье и однородность строения и свойств во всех сечениях отливки. Наибольшую прочность можно получить при высокодисперсном перлите и малом количестве и наибольшей компактности графита, а наибольшую пластичность — при феррите и таком же графите (табл. 24).

Влияние температуры на химические свойства КЧ проявляется главным образом выше 400 °С (см. табл. 21) и выражается в понижении σ_B и $\sigma_{0,2}$ и повышении δ . Ферритный КЧ характеризуется более низким порогом хрупкости, чем перлитный КЧ (обычно при —80 °С); с возрастанием твердости перлитного КЧ порог хрупкости повышается.

Если отливки из КЧ не имеют литейных дефектов, они могут быть герметичны при давлениях 20 МПа и выше.

Перлитный КЧ обладает высокой износостойкостью в условиях работы со смазкой при давлении до 20 МПа и быстро изнашивается при трении без смазочного материала. Перлитно-ферритный КЧ имеет сравнительно низкие антифрикционные свойства в условиях работы со смазкой и весьма хорошие при работе без смазочного материала.

Обработываемость КЧ примерно такая же, как и высокопрочного чугуна.

Объемная и линейная усадка велики у белого чугуна как при кристаллизации, так и в твердом доперлитном состоянии при сравнительно небольшом предусадочном расширении. Вследствие этого в сложных отливках легко образуются горячие и холодные трещины. Поэтому сложные отливки практически невозможно получать в металлических формах, оказывающих существенное сопротивление усадке. Для

24. Механические свойства КЧ, не предусмотренные ГОСТ 1215—79 [9, 20]

| Чугун | При растяжении | | | При сжатии | | | При кручении | |
|-----------|-------------------------|----------------------|---------------------|------------------|-----------|------------|----------------|-------------------|
| | $E \cdot 10^{-3}$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_{-1} , МПа | σ_c , МПа | μ | ψ , % | τ_B , МПа | τ_{-1} , МПа |
| КЧ 30—6 | 155 | 190 | 70 | 90—120 | 0,23 | 10—18 | 340 | 110 |
| КЧ 33—8 | 160 | 210 | 80 | 90—120 | 0,25 | 10—18 | 345 | 120 |
| КЧ 35—10 | 166 | 220 | 80 | 90—120 | 0,27 | 10—18 | 350 | 130 |
| КЧ 37—12 | 170 | 230 | 85 | 90—120 | 0,29 | 10—18 | 370 | 130 |
| Перлитный | 176—185 | 300—500 | 110—140 | 140—180 | 0,28—0,29 | 3,5—6,0 | 460—720 | 180—210 |

| Чугун | При срезе | | ϕ , % при вибрации с нагрузкой, равной $1/3\sigma_{0,2}$ | a_H , кДж/м ² | При изгибе | |
|-----------|---------------------|-------------------------|---|----------------------------|---------------------|------------------|
| | $\tau_{в.ср}$, МПа | $G \cdot 10^{-3}$, МПа | | | σ_{-1} , МПа | σ_H , МПа |
| КЧ 30—6 | 270 | 63 | 13—15 | 120 | 120 | 310 |
| КЧ 33—8 | 290 | 64 | 13—15 | 130 | 130 | 330 |
| КЧ 35—10 | 300 | 65 | 13—15 | 140 | 140 | 340 |
| КЧ 37—12 | 300 | 70 | 13—15 | 160 | 140 | 350 |
| Перлитный | 360—500 | 68—75 | 10—13 | 50—160 | 180—220 | 900—1200 |

25. Структура и условия применения антифрикционного чугуна по ГОСТ 1585—85

| Чугун | НВ $\cdot 10^{-1}$, МПа | Микроструктура | | Предельные режимы работы | | | Термическая обработка вала |
|-------|--|----------------|----------------------|--------------------------|------------|------------------------|----------------------------|
| | | Графит | Металлическая основа | p , МПа | v , м/с | pv , МПа \cdot м/с | |
| АЧС-1 | 180—241 | Пластинчатый | Перлитная | 5,0 14,0 | 5 0,3 | 12,0 2,5 | Закалка, нормализация |
| АЧС-2 | 180—229 | То же | » | 10,0 0,1 | 0,3 3,0 | 2,5 0,3 | |
| АЧС-3 | 160—190 | » | Перлитно-ферритная | 6,0 | 1,0 | 5,0 | Без обработки |
| АЧС-4 | 180—229 | » | Перлитная | 15,0 | 5,0 | 40 | Закалка, нормализация |
| АЧС-5 | 180—290 (литой); 140—180 (закаленный) | » | Аустенитная | 20,0 30,0 | 1,0 0,4 | 20,0 12,5 | |
| АЧС-6 | 100—120 | » | Перлитная пористая | 9,0 | 4,0 | 9,0 | Без обработки |
| АЧВ-1 | 200—260 | Шаровидный | Перлитная | 1,5 20,0 | 10 1,0 | 12,0 20,0 | Закалка, нормализация |
| АЧВ-2 | 167—197 | То же | Перлитно-ферритная | 1,0 12,0 | 5,0 1,0 | 3,0 12,0 | Без обработки |
| АЧК-1 | 187—229 | Хлопьевидный | Перлитная | 20,0 | 2,0 | 20,0 | Закалка, нормализация |
| АЧК-2 | 167—197 | То же | Ферритно-перлитная | 0,5 12,0 | 5,0 1,0 | 2,5 12,0 | Без обработки |

Примечание. Для некоторых марок чугуна два предельных значения для p и соответственно для v указывают допустимые сочетания значений каждого из этих показателей.

каждая из трех разновидностей чугуна: серый с пластинчатым графитом, высокопрочный с шаровидным графитом и ковкий. Однако в данном случае ГОСТ регламентирует не механические свойства, а химический состав по легирующим элементам и микроструктуру: форму, размеры и распределение графитовых включений, тип структурных составляющих металлической основы, их количество и дисперсность.

4. ЛЕГИРОВАННЫЙ ЧУГУН СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

По химическому составу различают несколько групп легированных чугунов: хромистые, кремнистые, алюминиевые, марганцевые и никелевые (ГОСТ 7769—82), а по условиям эксплуатации: жаростойкие, жаропрочные, износостойкие, коррозионно-стойкие и немагнитные. При этом часто один и тот же легирующий элемент придает чугуну одновременно несколько специальных свойств. Жаростойкость, коррозионная стойкость и магнитные свойства легированных чугунов приведены в разделе физические и химические свойства чугуна (см. табл. 10, 13, 14; рис. 1, 2).

Механические свойства легированного чугуна приведены в табл. 26—29.

Хромистые чугуны применяются главным образом как жаростойкие, коррозионно-стойкие и износостойкие материалы. Износостойкость чугуна определяется структурой и твердостью. Большая часть высокохромистых чугунов успешно работают в условиях ударного абразивного изнашивания и истирания. Износостойкие чугуны при НВ 4000 МПа и более могут обрабатываться резами с пластинами ВК4, ВК6М.

С увеличением содержания Сг увеличивается склонность чугуна к образованию усадочных раковин и холодных трещин. Вследствие этого при высоком содержании Сг необходимо предусматривать установку приливов для питания отливок и обеспечивать равномерное охлаждение отливок в форме и при термической обработке.

Кремнистые чугуны применяют главным образом как окалино-, росто- и коррозионно-стойкие материалы. Механические свойства кремнистых чугунов относительно низкие как при нормальной, так и повышенных температурах (см. табл. 26, 27) и понижаются с увеличением содержания Si. Ударная вязкость не превышает 50 кДж/м² (для образцов без надреза). С целью повышения механических свойств кремнистые чугуны иногда легируют Си. Добавка 8—10 % Си в чугун ЧС15 повышает его σ_B до 200 МПа и a_H до 100 кДж/м², однако коррозионная стойкость при этом понижается.

Литейные свойства низкокремнистых чугунов мало отличаются от свойств СЧ или соответственно ВЧШГ.

Высококремнистые чугуны (>12,0 % Si) имеют повышенную усадку и склонны к образованию усадочных раковин. Для предупреждения образования горячих и холодных трещин в отливках из этих чугунов их удаляют из формы сразу после затвердевания и охлаждают в печи, нагретой до 760—800 °С, или обеспечивают медленное охлаждение в форме. Отливки хрупки и требуют осторожного обращения при механической обработке, транспортировке и монтаже.

Алюминиевые чугуны применяют главным образом как жаростойкие и износостойкие материалы. Увеличение содержания Al до 12 % приводит к непрерывному снижению прочности, которая в дальнейшем стабилизируется. Максимальную твердость имеют чугуны, содержащие 10—17 % Al и св. 26 % Al.

Из всех известных составов алюминиевого чугуна наиболее технологичным является чугун, содержащий 19—25 % Al (ЧЮ22), причем чугун с шаровидным графитом обладает повышенной прочностью и жаропрочностью (см. табл. 27, 28). Чугун с высоким содержанием Al обладает повышенной склонностью к образованию усадочных раковин.

Марганцевые чугуны применяют главным образом как немагнитные и износостойкие материалы. В марганцевых антифрикционных чугунах, как и в высоконикелевых, медленное охла-

26. Механические свойства легированного чугуна по ГОСТ 7769—82

| Чугун | Механические свойства | | | Чугун | Механические свойства | | |
|--------------------------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------|-----------------------|--------------|-----------|
| | σ_B , МПа | δ , % | НВ, МПа | | σ_B , МПа | δ , % | НВ, МПа |
| Хромистые чугуны | | | | Алюминиевые чугуны | | | |
| ЧХ1 | 170 | 2,5 | 2030—2080 | ЧЮХШ *1 | 390 | — | 1830—3560 |
| ЧХ2 | 150 | 2,5 | 2030—2080 | ЧЮ6С5 *1 | 120 | — | 2360—2940 |
| ЧХ3 | 150 | 3,0 | 2230—3560 | ЧЮ7Х2 *1 | 120 | — | 2540—2940 |
| ЧХЗТ *1 | 200 | — | 4400—5860 | ЧЮ22Ш | 290 | — | 2350—3560 |
| ЧХ9Н5 *1 | 350 | — | 4900—6070 | ЧЮ30 | 200 | — | 3560—5360 |
| ЧХ16 | 350 | 3,0 | 3900—4400 | Марганцевые чугуны | | | |
| ЧХ16М2 *1 | 170 | — | 4900—6070 | ЧГ6СЗШ *1 | 490 | — | 2150—2540 |
| ЧХ22 * | 290 | 3,0 | 3330—6070 | ЧГ7Х4 *1 | 150 | — | 4900—5860 |
| 4Х22С | 290 | — | 2150—3330 | ЧГ8ДЗ | 150 | — | 1760—2850 |
| 4Х28 | 370 | 6,0 | 2150—2640 | Никелевые чугуны | | | |
| 4Х28П | 200 | 1,5 | 2450—3900 | ЧНХТ | 280 | — | 1960—2800 |
| 4Х28Д2 *1 | 390 | — | 3900—6350 | ЧНХМД | 290 | — | 1960—2800 |
| ЧХ32 | 390 | — | 2450—3330 | ЧНМШ | 490 | 2 | 1830—2800 |
| Кремнистые чугуны | | | | ЧН2Х | 290 | — | 2150—2800 |
| ЧС5 | 150 | — | 1400—2940 | ЧН4Х2 *1 | 200 | 1,5 *2 | 4600—6450 |
| ЧС5Ш | 290 | — | 2230—2940 | ЧН11Г7Ш | 390 | 4 | 1200—2500 |
| ЧС13 | 100 | — | 2940—3900 | ЧН15ДЗШ | 340 | 4 | 1200—2500 |
| ЧС15 | 60 | — | 2940—3940 | ЧН15Д7 | 150 | — | 1200—2500 |
| ЧС17 | 40 | — | 3900—4500 | ЧН19ХЗШ | 340 | 4 | 1200—2500 |
| ЧС15М4 | 60 | — | 3900—4500 | ЧН20Д2Ш | 500 | 25 | 1200—2200 |
| ЧС15М3 | 60 | — | 3900—4500 | | | | |

*1 Износостойкий чугун.

*2 Стрела прогиба на базе 300 мм.

ждение и отпуск способствует выпадению большего количества карбидов и снижению степени легированности аустенита. В структуре антифрикционных марганцевых чугунов содержится 45—55 % аустенита и 10—30 % карбидов в литом состоянии и 80—90 % аустенита и 5—8 % карбидов после закалки. Именно поэтому твердость чугуна в незакаленном состоянии бывает выше, чем в закаленном (1800—2900 и 1400—1800 МПа соответственно).

Обработываемость марганцевых чугунов затруднена из-за наличия в структуре карбидов. Эти чугуны имеют повышенную склонность к образованию усадочных дефектов (раковины, трещины и т. п.).

27. Прочность легированных чугунов при различных температурах

| Чугун | σ_B , МПа, при температуре, °С | | | | |
|---------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 500 | 550 | 700 | 800 | 900 |
| ЧХ1 | 196 | 147 | 68 | 29 | — |
| ЧХ3 | 167 | 147 | 78 | 29 | — |
| ЧС5 | 118 | 98 | 49 | 19 | — |
| ЧЮХШ | 343 | 235 | 130 | 78 | — |
| ЧЮ6С5 | 118 | 98 | 49 | 19 | — |
| ЧЮ22Ш | 245 | 275 | 168 | 137 | 78 |
| ЧН19ХЗШ | — | 250 | 221 | — | — |
| ЧН11Г7Ш | — | 300 | 227 | — | — |

28. Механические свойства легированного чугуна с шаровидным графитом при 600 °С

| Чугун | Кратковременные испытания | | | Длительная прочность | | Скорость ползучести, %/ч, при $\sigma = 40$ МПа |
|---------|---------------------------|--------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|---|
| | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | α_H , кДж/м ² | σ , МПа | Время до разрушения, ч | |
| | не менее | | | | | |
| ЧН193Ш | 180 | 2,0 | 200 | 120 | 1000 | $1,0 \cdot 10^{-4}$ |
| ЧН11Г7Ш | 180 | 10,0 | 200 | 120 | 1000 | $1,8 \cdot 10^{-4}$ |
| ЧЮ22Ш | — | 0,5 | 50 | 100 | 100 | $4,0 \cdot 10^{-5}$ (700 °С) |

29. Изменение модуля упругости с повышением температуры некоторых легированных чугунов [20]

| Чугун | $E \cdot 10^{-3}$, МПа, при температуре, °С | | | | | | |
|---------|--|-----|-----|-------|-----|-------|-----|
| | 20 | 250 | 450 | 550 | 600 | 700 | 800 |
| ЧЮ22(П) | 97 | 93 | 79 | — | 73 | 69 | — |
| ЧЮ22Ш | 178 | 169 | 140 | — | 128 | 124 | 88 |
| ЧН19Х3Ш | 163,5 | — | — | 140 | — | 127 | 124 |
| ЧН11Г7Ш | 162,9 | — | — | 134,6 | — | 123,6 | 120 |

Примечание. (П) — чугун с пластинчатым графитом.

Никелевые чугуны применяют как немагнитные, коррозионно-стойкие, жаропрочные и хладостойкие материалы. Прочность и твердость никелевых чугунов возрастает с увеличением содержания Ni, Cr. При получении ШГ механические свойства, особенно пластичность чугуна, заметно возрастают (см. табл. 26). Аустенитный чугун с ШГ обладает высокой жаропрочностью (см. табл. 27, 28). Дополнительное легирование Mo повышает жаропрочность. С целью повышения сопротивления ползучести аустенитные чугуны обычно подвергают гомогенизирующему отжигу при 1020—1050 °С в течение 4 ч с последующим охлаждением на воздухе, а затем низкотемпературному отпуску. Двойная ТО необходима только для высоконикелевого ЧШГ, применяемого в качестве жаропрочного материала. Для других целей используют только низкотемпературный отжиг.

Чугун ЧН20Д2Г является жаропрочным и хладостойким материалом.

5. ЛАТУНИ

Латуни представляют собой двойные или многокомпонентные медные сплавы, в которых цинк является основным легирующим компонентом. По сравнению с медью они обладают более высокой прочностью (в том числе при повышенных температурах), коррозионной стойкостью, упругостью, технологичностью (литье, обработка давлением, резание), трибологическими характеристиками. Это наиболее дешевые и распространенные в машиностроении медные сплавы.

Двойные латуни, содержащие до 20 % Zn, называются томпаком (латуни, содержащие 14—20 % Zn — полутомпаком).

Диаграмма состояния Cu—Zn характеризуется пятью перитектическими реакциями. В результате из жидкого раствора кристаллизуется шесть различных фаз. Практическое значение имеют сплавы, содержащие до 50 % Zn; соответствующая этому содержанию

часть диаграммы состояния включает область α -твердого раствора цинка в меди. Граница растворимости цинка в меди при комнатной температуре равна 39 %; α -твердый раствор имеет градиентную кристаллическую решетку. Фаза β является твердым раствором на основе соединения CuZn с объемно центрированной кристаллической решеткой. Ширина области гомогенности β -фазы меняется в зависимости от температуры: от 37 до 57 % Zn при высоких температурах и от 45 до 49 % Zn при комнатной [7]. В соответствии с диаграммой состояния двойные латуни в зависимости от структуры подразделяются на α -латуни, ($\alpha + \beta$)-латуни и β -латуни.

При температуре 454—468 °С происходит упорядочение β -твердого раствора, т. е. ниже этих температур наблюдается определенный порядок в расположении атомов меди и цинка в кристаллической решетке β -фазы. Переход неупорядоченного твердого раствора в упорядоченное состояние сопровождается резким падением пластичности и повышением хрупкости сплавов, что затрудняет их обработку давлением в холодном состоянии.

Таким образом, латуни, содержащие более 39 % Zn, имеют двухфазную структуру $\alpha + \beta$ или однофазную β и обладают низкой пластичностью,

поэтому они хорошо обрабатываются давлением лишь в горячем состоянии, в отличие от α -латуни, которая хорошо обрабатывается в холодном состоянии.

В многокомпонентных (специальных) латунях добавки третьего, четвертого элемента и более могут повышать прочность, твердость, упругость, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства и технологические характеристики. В зависимости от дополнительных легирующих элементов латуни, содержащую Al, называют алюминидовой; Fe и Mn — железомарганцевой; Mn, Sn, Pb — марганцево-оловянно-свинцовой и т. д.

Двойные латуни маркируют буквой Л и числом, характеризующим среднее содержание меди в сплаве в %. В обозначении многокомпонентных латуней после буквы Л указывают легирующие элементы. Числа после букв означают содержание легирующих элементов.

По технологическому признаку латуни подразделяют на литейные и обрабатываемые давлением. Для изготовления литейных латуней могут применяться вторичные литейные латуни.

Двойные латуни, обрабатываемые давлением. Физические и механические свойства этих латуней (ГОСТ 15527—70) приведены соответственно в табл. 30 и 31.

30. Физические свойства двойных латуней, обрабатываемых давлением (твердых) [11, 18]

| Латуни | Температура начала плавления, °С | ρ , т/м ³ | $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ | | λ , Вт/(м·°С) | ϵ , Дж/(кг·°С) | $\rho_L \cdot 10^{-3}$, Ом·м | $T_{\text{кр}}$, 1/°С | E , МПа |
|--------|----------------------------------|---------------------------|--|-----------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------|
| | | | 20 °С | 20—300 °С | | | | | |
| Л96 | 1055 | 8,85 | 17 | 18 | 244,92 | 389,37 | 0,043 | 0,00231 | 111 700 |
| Л90 | 1025 | 8,78 | 17,1 | 18,4 | 180,03 | 397,75 | 0,045 | 0,00186 | 108 900 |
| Л85 | 990 | 8,75 | 18,7 | 18,7 | 152,40 | 397,75 | 0,047 | 0,0016 | 102 900 |
| Л80 | 965 | 8,66 | 18,8 | 19,1 | 142,35 | 399,37 | 0,054 | 0,0015 | 109 800 |
| Л70 | 915 | 8,61 | 18,9 | 19,9 | 121,42 | 376,81 | 0,069 | 0,00148 | 112 700 |
| Л68 | 909 | 8,6 | 19 | 20 | 113,04 | 376,81 | 0,072 | 0,0015 | 112 700 |
| Л63 | 900 | 8,44 | 20,5 | 20,6 | 108,86 | 376,81 | 0,074 | 0,0017 | 113 700 |
| Л60 | 895 | 8,4 | 20,7 | 21 | 104,67 | 376,81 | 0,075 | 0,0025 | 115 600 |
| Л75 | 980 | 8,63 | — | 19,6 | — | — | 0,057 | — | 102 900 |
| Л66 | (Лнквидус) 905 | 8,47 | — | 20,1 | 119,74 | 376,81 | 0,069 | — | 102 900 |

31. Механические свойства и температура обработки двойных латуней, обработанных

| Латунь | σ_B , МПа | δ , % | $\sigma_{уп}$, МПа | σ_T , МПа | σ_{-1} , МПа | ψ , % | $\sigma_{нп}$, кДж/м ² |
|----------------|------------------|--------------|---------------------|------------------|---------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Л96: мягкая | 216—255 | 45—55 | 159 | 62 | — | 82 | 215 |
| твердая | 392—470 | 1—3 | 343 | 380 | — | — | — |
| Л90: мягкая | 235—275 | 44—52 | 69 | 125 | При 50·10 ⁶ циклов 83 | 80 полу- твердая | 176 |
| твердая | 430—590 | 2—4 | 363 | 295 | 123 | 60 | — |
| Л85: мягкая | 235—295 | 43—55 | 55 | 98 | При 100·10 ⁶ циклов 104 | 80 | — |
| твердая | 510—570 | 2—5 | 412 | 495 | При 300·10 ⁶ циклов 137 | 80 | — |
| Л80: мягкая | 290—340 | 45—55 | 78 | 120 | При 90·10 ⁶ циклов 103 | 69,5 | 157 |
| твердая | 550—670 | 2—10 | 412 | 355 | При 50·10 ⁶ циклов 151 | 40 | — |
| Л70: мягкая | 290—340 | 50—60 | 98 | 130 | При 50·10 ⁶ циклов 155 | 77 | 167 |
| твердая | 615—690 | 3—6 | 490—590 | 440 | 151 | 57 | — |
| Л68: мягкая | 290—340 | 50—60 | 39 | 98 | При 100·10 ⁶ циклов 117 | 70 | 167 |
| твердая | 510—725 | 3—12 | 340—390 | 412 | 147 | 52 | — |
| Л63: мягкая | 350—440 | 40—50 | 78 | 108 | При 10·10 ⁶ циклов 118 | 66 | 137 |
| твердая | 665—735 | 2—4 | 412 | 470 | При 300·10 ⁶ циклов 151 | 60 | — |
| Л60: мягкая | 360—410 | 40—50 | 78 | 147 | При 400·10 ⁶ циклов 151 | 62 | 78 |
| твердая | 635—735 | 2—4 | 390 | 570 | При 500·10 ⁶ циклов 178 | 40 | — |

васмых давлением [13, 18, 24]

| HB, МПа | Обрабаты- ваемость резанием (по сравнению с латунью ЛС63—3), % | Температура, °С | | | | Коэффициент трения | |
|------------------------|---|--------------------------------|--------------|--|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| | | прокатки и прессо- ванки | отжига | низко- темпе- ратур- ного отжига | начала рекрио- талли- зации | со смаз- кой | без смаз- ки |
| 490—590 1270—1420 | 20 — | 750—850 — | 450—600 — | — — | 300 — | — — | — — |
| 490—590 1270—1420 | — 20 | 750—900 — | 650—720 — | 200 — | 335—370 — | 0,074 — | 0,44 — |
| 490—610 1180—1420 | 30 30 | — — | — — | 200 — | 350 — | — — | — — |
| 520—640 1370—1470 | 30 30 | 820—870 — | 650—720 — | 260 — | 320—360 — | 0,015 — | 0,71 — |
| 540—640 1420—1520 | — — | — — | — — | 200 200 | 320—360 320—360 | — — | — — |
| 540—640 1420—1520 | 30 — | 750—830 — | 520—650 — | 260—270 — | 300—370 — | — — | — — |
| 1370—1560 1370—1560 | 40 — | 650—850 — | 600—700 — | 300 — | 350—370 — | 0,012 — | 0,39 — |
| 390—490 1520—1620 | 45 — | 730—820 — | 600—770 — | — — | 350—370 — | 0,012 — | 0,45 — |

32. Физические свойства многокомпонентных латуней, обрабатываемых давлением [10, 17, 18]

| Латунь | Температура плавления, °С | ρ , г/см ³ | $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ | | λ , Вт/(м·°С) | σ , Дж/(кг·°С) | $\rho_{1 \cdot 10^6}$, Ом·м | E, МПа |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|--|--------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|---------|
| | | | 20—300 °С | | | | | |
| | | | 20 °С | 300 °С | | | | |
| ЛА85—0,5 | 1020 | 8,6 | 18,6 | — | 108,8 | 376,8 | — | — |
| ЛА77—2 | 930 | 8,6 | 18,3 | 18,5 | 113 | — | 0,075 | 99 960 |
| ЛАЖ60—1—1 | 904 | 8,2 | 21,6 | — | 75,3 | — | 0,09 | 102 900 |
| ЛАН59—3—2 | 892 | 8,4 | 19 | — | 83,7 | — | 0,0785 | 105 840 |
| ЛЖМц59—1—1 | 885 | 8,5 | 22 | — | 100,4 | — | 0,093 | 103 880 |
| ЛН65—5 | 960 | 8,6 | 18,2 | — | 58,6 | — | 0,14 | 109 760 |
| ЛМц58—2 | 865 | 8,4 | 21,2 | — | 71,2 | 372,6 | 0,108 | 102 900 |
| ЛМцА57—3—1 | 870 | 8,1 | 20,1 | — | 67 | — | 0,121 | 101 920 |
| ЛО90—1 | 995 | 8,75 | 18,4 | 18,4 | 125,6 | — | 0,054 | 102 900 |
| ЛО70—1 | 890 | 8,68 | 19,7 | — | 117 | — | 0,072 | 103 880 |
| ЛО62—1 | 885 | 8,5 | 19,3 | — | 108,9 | — | 0,078 | 102 900 |
| ЛО60—1 | 885 | 8,5 | 21,4 | 21,4 | 100,4 | 376,8 | 0,078 | 102 900 |
| ЛС63—3 | 885 | 8,5 | 20,5 | — | 117 | 376,8 | 0,069 | 96 040 |
| ЛС74—3 | 965 | 8,7 | 17,5 | 19,8 | 121,4 | — | 0,068 | 102 900 |
| ЛС64—2 | 910 | 8,5 | 20,3 | — | 117 | — | 0,070 | 102 900 |
| ЛС60—1 | 900 | 8,5 | 20,8 | 20,8 | 104,7 | 376,8 | 0,065 | 102 900 |
| ЛС59—1 | 900 | 8,5 | 20,6 | 18,25 | 104,7 | 376,8 | 0,066 | 102 900 |
| ЛС59—1В | 900 | 8,5 | 20,6 | 18,25 | 104,7 | 376,8 | 0,066 | 102 900 |
| ЛЖС58—1—1 | 895 | 8,4 | 20,4 | — | 108,9 | — | 0,07 | 103 880 |
| ЛК80—3 | 890 | 8,2 | 17,0 | 17,0 | 87,9 | 401,9 | 0,20 | 101 920 |
| ЛМц68—0,05 | 937 | 8,6 | 19,1 | 20 | 113 | — | 0,075 | 98 980 |
| ЛАМш77—2—0,05 | 985 | 8,7 | 19,2 | 18,5 | 134 | 376,8 | 0,068 | 99 960 |
| ЛОМш70—1—0,05 | 949 | 8,6 | 19,0 | — | 117 | — | 0,71 | 101 920 |
| ЛАНКМц75—2—2,5—0,5—0,5: | | | | | | | | |
| закалка | 940 | 8,6 | 18,3 | — | 92,1 | — | 0,137 | 112 700 |
| старение | — | — | — | — | 125,6 | — | 0,105 | — |

Полуфабрикаты латуней, обрабатываемых давлением, поставляются в виде горяче- и холоднокатаных, протянутых и пресованных изделий (проволока, полосы, листы, ленты, трубы и др.) в мягком (отожженном), полутвердом (степень обжатия 10—30%), твердом (30—50%) и особо твердом (более 60%) состоянии.

Многокомпонентные латуни, обрабатываемые давлением. Основными легирующими компонентами в многокомпонентных латунях (ГОСТ 15527—70) являются алюминий, железо, кремний, марганец, мышьяк, никель, олово и свинец. Алюминий,

никель, олово и кремний повышают прочность, коррозионную стойкость и улучшают антифрикционные характеристики. Железо, измельчая зерно, повышает температуру рекристаллизации и твердость латуни. Марганец повышает ее жаростойкость. Мышьяк предохраняет латуни от обезцинкования в агрессивных пресных водах. Добавки свинца в латуни улучшают ее обработку резанием.

Физические и механические свойства многокомпонентных латуней, обрабатываемых давлением, приведены в табл. 32, 33. Механические свойства латуни при низких температурах

представлены в табл. 34. Эти латуни упрочняются деформационным наклепом, за исключением латуни ЛАНКМц75—2—2,5—0,5—0,5. Эта латунь является дисперсионно-твердеющим сплавом, который упрочняется не только при деформационном наклепе, но и в результате закалки и старения. Она обладает высокой пластичностью в закаленном состоянии и высокими прочностными и упругими свойствами после старения. Упрочнение сплавов обеспечивается холодной деформацией после закалки.

Все двойные латуни обладают достаточной прочностью и отлично обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии (за исключением латуни Л60, которая хорошо обрабатывается в горячем состоянии).

Кроме высоких механических и литейных свойств латунь Л96 отличается высокой коррозионной стойкостью и не склонна к обезцинкованию и коррозионному растрескиванию. Ее применяют для изготовления радиаторных, конденсаторных и капиллярных трубок.

Латуни Л90, Л85, Л80 обладают хорошими механическими и коррозионными свойствами. Они применяются для изготовления змеевиков, сильфонов, деталей теплотехнической и химической аппаратуры.

Латунь Л90 хорошо сваривается со сталью при совместной прокатке, в связи с чем успешно применяется для плакировки и изготовления биметалла. Отличаясь красивым золотистым цветом, латунь Л90 применяется для изготовления фурнитуры и украшений. Из латуни Л85 изготавливают гибкие шланги, детали холодильного оборудования, конденсаторные трубки.

Латунь Л80 идет на изготовление проволочных сеток в целлюлозно-бумажной и шиферной промышленности.

Латунь Л70 в основном применяется для химической аппаратуры. Латунь Л68 применяется для изготовления деталей холодной штамповкой и глубокой вытяжкой. Из латуни Л68 и Л63 изготавливают полосы, листы, ленты, прутки, трубы, проволоку, фольгу и профили различных размеров. Латунь Л63 используется для изготовления крепежных изделий, де-

талей автомобилей и конденсаторных труб. Латунь Л60 устойчива к общей коррозии и применяется в основном для толстостенных патрубков, шайб, деталей машин.

Алюминиевые латуни обладают повышенными механическими свойствами и коррозионной стойкостью. Они хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии (за исключением латуни ЛАН59—3—2, которая обрабатывается давлением только в горячем состоянии). Латунь ЛА85—0,5 отличается высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и может обрабатываться волочением.

Она служит заменителем золота при изготовлении знаков отличия, фурнитуры и украшений. Латунь ЛА77—2 устойчива к ударной коррозии и применяется в морском судостроении для изготовления конденсаторных труб. Латунь ЛАН59—3—2 применяется в морском судостроении, в электрических машинах и в химическом машиностроении для высокопрочных и химически стойких изделий, работающих при комнатной температуре.

Из латуни ЛАНКМц75—2—2,5—0,5—0,5 изготавливают цельнотянутые круглые трубы для производства манометрических трубок и пружин в приборах повышенного класса точности. Из латуни ЛЖМц59—1—1, обладающей повышенной коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и в морской воде, а также хорошими антифрикционными свойствами, изготавливают детали авиации и морского флота и вкладыши для подшипников. Латунь ЛН65—5 обладает повышенными механическими и коррозионными свойствами, обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии. Кроме различных видов проката из нее изготавливают манометрические и конденсаторные трубки в морском судостроении, сетки для бумажной промышленности и другие детали.

Марганцевые латуни кроме хороших механических и технологических свойств (обрабатываются давлением в холодном и в горячем состоянии) обладают высокой коррозионной стойкостью в морской воде, хлоридах и перегретом паре. Латуни ЛМц58—2 и ЛМцА57—3—1 в основном приме-

33. Механические свойства и температуры обработки многокомпонентных лату

| Латушь | σ_B , МПа | δ , % | $\sigma_{уп}$ | σ_T | σ_{-1} | ψ , % |
|-----------------------|------------------|--------------|-------------------------|---------------|---|------------------------|
| | | | МПа | | | |
| ЛА85—0,5: мягкая | 295—390 | 60 | — | Литая 73,5 | — | 50 |
| твердая | 490—690 | 3—10 | — | — | — | — |
| ЛА77—2: мягкая | 340—440 | 45—52 | 7,5 | — | — | 58 |
| твердая | 550—650 | 7—11 | 54 | — | — | — |
| ЛАЖ60—1—1: мягкая | 390—440 | 45—55 | — | Литая 19,6 | — | Литая 30 |
| твердая | 690—745 | 7—10 | — | — | — | — |
| ЛАН59—3—2: мягкая | 440—540 | 40—50 | — | Литая | — | Полу- твердая 20 |
| твердая | 635—735 | 7—11 | — | 255—345 | — | — |
| ЛЖМц59—1—1: мягкая | 412—470 | 45—55 | — | 165 | — | 58 |
| твердая | 590—735 | 5—10 | — | Литая 175 | При $100 \cdot 10^6$ циклов 125 | 15 |
| ЛН65—5: мягкая | 370—440 | 45—65 | 10 | 137 | — | — |
| твердая | 655—785 | 3—6 | 52 | 637 | — | — |
| ЛМц58—2: мягкая | 370—440 | 36—45 | Литая 88 | Литая 153 | При 150 000 циклов 125 | 52,5 |
| твердая | 590—735 | 5—10 | — | — | — | — |
| ЛМцА37—3—1: мягкая | 390—490 | 40—50 | — | — | — | — |
| твердая | 685—735 | 4—8 | — | — | — | — |
| ЛО90—1: мягкая | 245—304 | 42—50 | — | 89 | При $60 \cdot 10^6$ циклов 110 При $300 \cdot 10^6$ циклов 206 | 55 |
| твердая | 470—550 | 3—6 | — | — | — | — |
| ЛО70—1: мягкая | 314—370 | 55—65 | Полу- твердая 186 | 159 | — | 70 |
| твердая | 568—735 | 3—10 | — | — | Литая при $10 \cdot 10^6$ циклов 104 | 28 |
| ЛО62—1: мягкая | 370—420 | 55—65 | 105 | 147 | — | 56 |
| твердая | 668—735 | 3—5 | 265 | 372 | Полутвер- дая при $100 \cdot 10^6$ циклов 142 | — |

ней, обрабатываемых давлением [17, 18, 24]

| σ_H , кДж/м ² | НВ, МПа | Обрабаты- ваемость резанием | Температура, °C | | | | Коэффициент трения | |
|------------------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------|---------|-----------------------|--------------------|
| | | | прокатки и прессо- вания | низко- темпера- турного отжига | начала рекрист- талли- зации | отжига | со смаз- кой | без смаз- ки |
| — | Литая 530 | — | 800—850 | — | 400 | 650—700 | — | — |
| — | 1470 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 440—540 | — | 720—770 | — | 400 | 600—650 | — | — |
| — | 1470—1570 | 30 | — | 300 | — | — | — | — |
| — | 440—785 | — | 600—800 | — | 400 | 600—650 | — | — |
| — | 1620—1720 | 25 | — | — | — | — | — | — |
| Полу- твердая 40,2 | 1080—1180 | 15 | 700—750 | 350 | 350—400 | 600—650 | 0,01 | 0,32 |
| — | 1720—1820 | — | — | — | — | — | — | — |
| 118 | 735—930 | 25 | 650—750 | — | 400 | 600—650 | 0,012 | 0,39 |
| — | 1520—1620 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 1570—1670 | — | 750—870 | 300—400 | 400 | 600—650 | 0,008 | 0,20 |
| — | 540—640 | — | — | — | — | — | — | — |
| Литая 1180 | 785—880 | — | 650—750 | — | 300—400 | 600—650 | 0,012 | 0,32 |
| — | 1180—1760 | 22,1 | — | — | — | — | — | — |
| — | 830—930 | 22 | 650—750 | — | 350 | 600—650 | — | — |
| — | 1710—1810 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 490—590 | 30 | 700—900 | — | 350—370 | 550—720 | 0,013 | 0,45 |
| 735 | 1370—1470 | — | — | — | — | — | — | — |
| 610 | 470—640 | — | 650—750 | — | 300 | 550—650 | 0,0082 | 0,3 |
| — | 1370—1520 | — | — | — | — | — | — | — |
| Полу- твердая 550 | 735—830 | 30 | 700—780 | — | 300—350 | 550—650 | — | — |
| — | 1370—1470 | 40 | — | — | — | — | — | — |

| Латуни | σ_B , МПа | δ , % | $\sigma_{уп}$ | σ_T | σ_{-1} | ψ , % |
|--|------------------|--------------|-------------------------|--------------|--|------------|
| | | | МПа | | | |
| ЛО60—1: мягкая | 353—390 | 38—44 | 137 | 176 | — | 46 |
| твердая | 558—610 | 3—10 | 353 | 412 | — | |
| ЛС63—3: мягкая | 295—390 | 40—50 | 78 | 89 | — | |
| твердая | 540—640 | 3—6 | 412 | 440 | — | |
| ЛС74—3: мягкая | 295—390 | 40—55 | 60—120 | 98 | При $50 \cdot 10^6$ циклов 118 | |
| твердая | 590—685 | 2—5 | 390—440 | 510—610 | 167 | |
| ЛС64—2: мягкая | 310—375 | 55—65 | 59—98 | 78—120 | — | |
| твердая | 570—660 | 4—6 | 390—460 | 440—490 | — | |
| ЛС60—1: мягкая | 340—390 | 45—55 | 103 | 120 | — | |
| твердая | 570—640 | 3—6 | 412 | 550 | — | |
| ЛС59—1: мягкая | 290—412 | 36—50 | 98 | 140 | — | 6 |
| твердая | 590—690 | 4—6 | 412 | 412 | При $50 \cdot 10^6$ циклов 159 | 5 |
| ЛЖС58—1—1: мягкая | 340—440 | 35—45 | — | — | — | |
| твердая | 640—735 | 2—5 | — | — | — | |
| ЛК80—3: мягкая | 275—335 | 53—60 | — | Литая 105 | — | |
| твердая | 570—640 | 3—5 | — | — | — | |
| ЛМш68—0,05: мягкая | 310—375 | 50—60 | 39 | 98 | При $100 \cdot 10^6$ циклов 120 | 70 |
| твердая | 660—735 | 3—5 | — | 412 | 147 | 52 |
| ЛАМш77—2—0,05: мягкая | 245—340 | 40—55 | 74 | — | — | 58 |
| твердая | 490—590 | 3—5 | 470—530 | — | — | |
| ЛОМш70—1—0,05: мягкая | 310—375 | 50—60 | Полу- твердая 190 | 160 | Литая при $10 \cdot 10^6$ циклов 104 | 70 |
| твердая | 670—690 | 2—4 | — | — | — | 28 |
| ЛАНКМц75—2—2,5— 0,5—0,5: закалка | 530 | 48,4 | — | 220 | — | 61,4 |
| старение | 690 | 25,5 | — | 456 | — | 41,4 |
| деформация 50 % | 865 | 8 | — | 835 | — | 38,5 |
| деформация 50 % + старение | 1010 | 3,5 | — | 990 | — | 10,9 |

Примечание. Режим термической обработки латуни ЛАНКМц75—2—ных образцов при 500 °С; старение закаленных и деформированных на 10% образцов

Продолжение табл. 33

| σ_H , кДж/м ² | НВ, МПа | Обработка «важность резаньем» | Температура, °С | | | | Коэффициент трения | |
|------------------------------------|-----------|-------------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------|---------|-----------------------|--------------------|
| | | | прокатки и прессо- ванья | низко- темпера- турного отжига | начала рекрист- талли- зации | отжига | со смаз- кой | без смаз- ки |
| Литая 760 | 705—805 | — | 700—800 | — | 350—400 | 550—650 | — | — |
| — | 1420—1520 | 40 | — | — | — | — | — | — |
| — | 390—490 | 100 | 760—820 | — | 300—370 | 600—650 | — | — |
| — | 1270—1370 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 390—490 | 80 | — | — | 400 | 600—650 | — | — |
| — | 1270—1370 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 490—590 | 90 | — | — | 300—350 | 620—670 | 0,1 | 0,22 |
| — | 1370—1470 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 590—680 | — | 780—820 | — | 350—400 | 600—650 | 0,1 | 0,22 |
| — | 1470—1570 | 75 | — | — | — | — | — | — |
| 490 | 680—785 | — | 640—820 | 285 | 360 | 600—650 | 0,0135 | 0,17 |
| 590 | 1470—1570 | 80 | — | — | — | — | — | — |
| — | 735—835 | 70 | — | — | — | 600—650 | — | — |
| — | 1570—1670 | — | — | — | — | — | — | — |
| Литая 390 | 930—1030 | 30 | 750—850 | — | 350 | 500—600 | 0,084 | 0,22 |
| — | 1670—1860 | — | — | — | — | — | — | — |
| 1670 | 490—590 | 30 | 700—850 | 260—270 | 300—370 | 550—650 | — | — |
| — | 1420—1520 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 590—680 | 25 | 720—770 | 300 | 350 | 600—700 | — | — |
| — | 1570—1670 | — | — | — | — | — | — | — |
| 610 | 490—590 | 30 | 700—850 | — | 300—350 | 550—650 | 0,0082 | 0,3 |
| — | 1370—1470 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 2840—2940 | 20 | 800—850 | — | — | — | — | — |

2,5—0,5—0,5: температура закалки 780 °С (выдержка 30 мин); старение закален-
ных образцов при 450 °С; старение закаленных и деформированных на 50 % образцов при 350 °С.

34. Изменение механических свойств латуней при низких температурах [17, 18]

| Латунь | Температура испытания, °С | σ_B | σ_T | δ | ψ |
|---------------------------------------|---------------------------|------------|------------|----------|--------|
| | | МПа | | % | |
| Л70 деформированная и отожженная | 20 | 351 | 194 | 49 | 77 |
| | -10 | 365 | 197 | 49 | 77 |
| | -40 | 375 | 185 | 58 | 77 |
| | -80 | 392 | 188 | 60 | 79 |
| | -120 | 420 | 192 | 55 | 78 |
| | -180 | 505 | 185 | 75 | 73 |
| Л72 деформированная и отожженная | 18 | 285 | 65,7 | 82,6 | 76,4 |
| | 0 | 294 | 67,6 | 79,7 | 78,7 |
| | -30 | 297 | 71,5 | 75,9 | 79,7 |
| | -80 | 334 | 78,4 | 74,5 | 80,0 |
| | | | | | |
| Л63: отожженная при 550 °С, 2 ч | 20 | 392 | 270 | 50,4 | 72 |
| | -78 | 420 | 300 | 49,8 | 76,0 |
| | -183 | 524 | 392 | 50,8 | 70,7 |
| деформированная на 40 % | 20 | 589 | 580 | 6,3 | 66,5 |
| | -78 | 635 | 630 | 7,8 | 71,5 |
| | -183 | 706 | 698 | 10,1 | 66,5 |
| Л59: деформированная на 25 % | 20 | 547 | 391 | 19,8 | 65,5 |
| | -78 | 569 | 412 | 21,0 | 67,7 |
| | -183 | 675 | 550 | 24,4 | 64,1 |
| отожженная при 550 °С, 2 ч | 20 | 376 | 137 | 51,3 | 75,5 |
| | -78 | 420 | 155 | 53,0 | 74,6 |
| | -183 | 520 | 196 | 55,3 | 71,0 |
| ЛС59-1: отожженная при 550 °С, 2 ч | 20 | 362 | 141 | 50,2 | 62,5 |
| | -78 | 374 | 169 | 49,8 | 64,0 |
| | -183 | 475 | 198 | 50,6 | 62 |
| колоднокатаная, 12 % | 22 | 437 | 314 | 28,2 | 57 |
| | -78 | 483 | 371 | 27,0 | 59 |
| | -183 | 594 | 480 | 30,8 | 57 |
| полосы | 17 | 431 | — | 37 | — |
| | -40 | 441 | 176 | 39 | 35 |
| | -196 | 578 | — | 34 | 38 |
| | -253 | 666 | — | 35 | 35 |
| ЛМц58-2 горячекатаная отожженная | 20 | 412 | 176 | 41 | — |
| | 0 | 431 | 147 | 38 | — |
| | -40 | 431 | 186 | 39 | — |

няют в судостроительной промышленности, а также для изготовления крепежных изделий и арматуры.

Оловянные латуни (кроме латуни ЛО62-1) хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии, обладают высокой коррозионной стойкостью в пресной и морской воде. Из латуней ЛО90-1, ЛО70-1, ЛО62-1, ЛО60-1, ЛОМш70-1-0,05 изготавливают конденсаторные трубки, теплотехническую аппаратуру и детали для морского судостроения.

Свинцовые латуни отлично обрабатываются резанием и обладают высокими антифрикционными свойствами. Латуни ЛС74-3, ЛС63-3, ЛС64-2 применяют в часовой и автотракторной промышленности, латунь ЛСС4-2 используют также в типографском деле. Латуни ЛС60-1, ЛС59-1, ЛС59-1В применяют для изготовления крепежных изделий, зубчатых колес, втулок.

Кремнистые латуни обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии (ЛК80-3) и применяются для коррозионно-стойких деталей машин.

Полуфабрикаты из латуней, обрабатываемых давлением, поставляются в виде круглого и плоского проката. Характеристики полуфабрикатов приведены в табл. 35 и 36.

Коррозионная стойкость латуни Л90 (снижение массы) под действием морской воды, влажного пара при 100 °С, морского тумана соответственно равна 0,50; 0,48; 0,24 г/(м²·сутки).

Предел выносливости латуни Л80 в холоднотянутом, отожженном состоянии равен соответственно 154 МПа при 100·10⁶ циклов; 117 МПа при 90·10⁶ циклов, а при испытаниях в растворах хлористого натрия и углекислых щелочей 96 МПа при 80 × 10⁶ циклов и 103 МПа при 60·10⁶ циклов соответственно.

Предел выносливости латуни Л70 после деформации и отжига при 220 и 230 °С, 3 ч равен соответственно 92 МПа при 30·10⁶ циклов и 96 МПа при 80·10⁶ циклов, а в соленой воде он равен соответственно 62 МПа при 50·10⁶ циклов и 85 МПа при 60·10⁶ циклов.

Коррозионная стойкость латуни Л63 под действием морской воды

0,61 г/(м²·сутки), под действием 10 %-ной H₂SO₄ — 1,46 г/(м²·сутки). Предел выносливости на воздухе и в морской воде составляет соответственно 168 и 113 МПа при 50·10⁶ циклов.

Отожженная при 650 °С латунь Л60 имеет временное сопротивление $\sigma_B = 370$ МПа, относительное удлинение и сужение соответственно $\delta = 56$ %; $\psi = 61$ %, предел выносливости $\sigma_{-1} = 151$ МПа при 400·10⁶ циклов. При испытании в растворе хлористого натрия $\sigma_B = 382$ МПа; $\delta = 48$ %; $\psi = 69$ %; $\sigma_{-1} = 172$ МПа при 10 × 10⁶ циклов.

Коррозионная стойкость латуни ЛАН59-32 в г/м² за 1000 ч составляет: 0,09 под действием щелочи (мягкая латунь); 0,04 под действием морской воды (мягкая латунь); 1,15 под действием 10 %-ной H₂SO₄ (полутвердая латунь).

Коррозионная стойкость латуни Л63, отожженной при 650 °С и холоднотянутой и отожженной при 200 °С, составляет: 0,476 и 0,532 г/(м²·сутки) в морской воде; 1,37 и 1,208 г/(м²·сутки) в 1 %-ном растворе H₂SO₄; 15,18 и 26,60 г/(м²·сутки) в 1 %-ном растворе HNO₃; 0,0682 и 0,0562 г/(м²·сутки) в дистиллированной воде; 0,0031 и 0,0031 г/(м²·сутки) в атмосфере (98 % влажности), 1,46 г/(м²·сутки) в 10 %-ной H₂SO₄.

Коррозионная стойкость латуни ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5, составленной после закалки и после холодной прокатки, составляет: 0,0758 и 0,0693 г/(м²·сутки) в морской воде соответственно; 0,768 и 1,174 г/(м²·сутки) в 1 %-ном растворе H₂SO₄; 7,43 и 7,60 г/(м²·сутки) в 1 %-ном растворе HNO₃; 0,0206 и 0,0206 г/(м²·сутки) в дистиллированной воде; 0,00169 и 0,00113 г/(м²·сутки) в атмосфере (98 % влажности).

Коррозионная стойкость мягкой латуни ЛЖМц59-1-1 составляет: 0,22 г/(м²·сутки) под действием морской воды; 1,77 г/(м²·сутки) в 10 %-ном растворе H₂SO₄; 0,58 г/(м²·сутки) в 2 %-ном растворе щелочи.

Коррозионная стойкость латуни ЛМц58-2 составляет 0,40 г/(м²·сутки) в морской воде; 0,70 г/(м²·сутки) в сухом паре при 250 °С; 1,59 г/(м²·сутки) в 10 %-ном растворе H₂SO₄;

35. Плоский прокат из латуни [11, 17, 18, 23]

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % |
|--|------------------|--------------|
| | не менее | |
| Полосы прямоугольные латунные (ГОСТ 6688—75) | | |
| <i>Прессованные (5×20÷25×60):</i> | | |
| Л63 | 294 | 30 |
| ЛЖМц59—1—1 | 431 | 31 |
| ЛМц58—2 | 421 | 25 |
| ЛО62—1 | 343 | 25 |
| ЛС59—1 | 372 | 21 |
| <i>Тянутые (3×6÷10×18)</i> | | |
| ЛС59—1 | — | — |
| Листы и полосы латунные (ГОСТ 931—78) | | |
| <i>Горячекатаные листы (при толщине 5,6÷21, 22, 25: 600×1500 и 1000×2000):</i> | | |
| Л63 | 294 | 30 |
| ЛО62—1 | 343 | 20 |
| ЛС59—1 | 363 | 18 |
| <i>Холоднокатаные листы (при толщинах 0,4; 0,5; 1,2; 1,3; 1,35; 1,4; 1,5; 1,6; 1,65; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 2,75; 3,0; 3,5; 4,0÷7,5; 8,0; 9,0; 10,0; 11,0; 12,0: 600×1500; 800×2000; 1000×2000)</i> | | |
| <i>Холоднокатаные полосы (при толщине 0,4—10,0, ширина 40—500)</i> | | |
| Л90: | | |
| мягкая | 235 | 35 |
| полутвердая | 294 | 10 |
| твердая | 353 | 3 |
| Л85: | | |
| мягкая | 255 | 38 |
| полутвердая | 323 | 12 |
| твердая | 393 | 3 |
| Л80: | | |
| мягкая | 265 | 40 |
| полутвердая | 333 | 15 |
| твердая | 392 | 3 |
| Л68: | | |
| мягкая | 294 | 42 |
| полутвердая | 343 | 20 |
| твердая | 431 | 10 |
| особо твердая | 519 | — |
| Л63: | | |
| мягкая | 294 | 38 |
| четвертьтвердая | 343 | 20 |
| полутвердая | 412 | 10 |
| твердая | 490 | 4 |
| особо твердая | 588 | — |

Продолжение табл. 35

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % | | | |
|--|------------------|--------------|--------|---------|--------|
| | не менее | | | | |
| ЛС59—1: | | | | | |
| мягкая | 343 | 25 | | | |
| твердая | 461 | 5 | | | |
| ЛМц58—2: | | | | | |
| мягкая | 382 | 30 | | | |
| полутвердая | 421 | 15 | | | |
| твердая | 588 | 3 | | | |
| ЛО62—1 твердая | 392 | 5 | | | |
| Лента латунная (ГОСТ 2208—75) | | | | | |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> | | | | | |
| 0,14—0,22 | 10—200 | 0,25—0,45 | 10—250 | 0,5—2,0 | 20—600 |
| Л90: | | | | | |
| мягкая | 235—245 | 35 | | | |
| полутвердая | 392—421 | 10 | | | |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> | | | | | |
| 0,1—0,22 | 10—600 | 0,25—0,45 | 10—600 | 0,5—2,0 | 20—600 |
| Л90 твердая | | | >353 | 3 | |
| Л85: | | | | | |
| мягкая | 255—363 | 38 | | | |
| полутвердая | 323—431 | 12 | | | |
| твердая | >392 | 3 | | | |
| Л80: | | | | | |
| мягкая | 265—372 | 40 | | | |
| полутвердая | 333—431 | 15 | | | |
| твердая | >392 | 3 | | | |
| Л68: | | | | | |
| мягкая | 234—372 | 42 | | | |
| полутвердая | 343—441 | 20 | | | |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> | | | | | |
| 0,05—0,09 | 10—175 | 0,1—0,22 | 10—300 | | |
| 0,25—0,45 | 10—600 | 0,5—2,0 | 20—600 | | |
| Л68: | | | | | |
| твердая | 431—539 | 10 | | | |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> | | | | | |
| 0,14—0,22 | 10—300 | 0,25—0,45 | 10—600 | 0,5—1,0 | 20—600 |
| Л68 особо твердая | | | >519 | — | |
| Л63: | | | | | |
| мягкая | 294—412 | 38 | | | |
| полутвердая | 412—539 | 10 | | | |
| твердая | 539—617 | 4 | | | |
| особо твердая | >587 | — | | | |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> | | | | | |
| 0,14—0,22 | 10—200 | 0,25—0,45 | 10—250 | 0,5—2,0 | 20—600 |

Продолжение табл. 35

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % |
|---|------------------|--------------|
| | не менее | |
| Л63: четвертьтвердая | 343—470 | 20 |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> 0,14—0,40 10—175 0,45—1,4 20—280 1,5—2,0 20—600 | | |
| ЛС59—1 мягкая | 343—490 | 25 |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> 0,1—0,4 10—175 0,45—1,4 20—280 1,5—2,0 20—180 | | |
| ЛС59—1 твердая | 461—587 | |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> 0,35—1,2 20—300 | | |
| ЛС59—1 особо твердая | >587 | 3 |
| ЛМц58—2: мягкая | 382—490 | 30 |
| твердая | 587 | 4 |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> 0,14—0,4 10—175 0,45—1,4 20—280 | | |
| ЛМц58—2 полутвердая | 421—587 | |
| Лента латунная радиаторная (ГОСТ 20707—80) | | |
| <i>Толщина</i> <i>Ширина</i> 0,05—0,75 10—200 | | |
| Л63; Л90: мягкая | — | — |
| полутвердая | — | — |
| твердая | — | — |
| Л63 четвертьтвердая | — | — |
| Ленты и полосы из свинцовой латуни (ГОСТ 4442—72) | | |
| <i>Ленты толщиной 0,1—2,0, шириной 10—150</i> | | |
| ЛС63—3: мягкая | >294 | 25 |
| полутвердая | 343—441 | — |
| <i>Полосы толщиной 1,5—8,0, шириной 20—180</i> | | |
| ЛС63—3 особо твердая | 627 | 5 |
| Ленты и полосы томпаковые для плакирования (ГОСТ 2205—71) | | |
| <i>Ленты:</i> толщиной 0,7; 0,9; 1,0; 1,1; 1,5; 1,6; 1,7; 2,0 шириной 100—500 | | |
| <i>Полосы:</i> толщиной 2,5; 2,6; 3,0; 3,6; 4,0 шириной 100—500 | | |
| Л90 | — | — |

36. Круглый прокат из латуни [13, 23]

Продолжение табл. 36

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % | Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % |
|---|------------------|--------------|--|------------------|--------------|
| | не менее | | | не менее | |
| Прутки латунные. Круг- лое, квадратное и шести- гранное сечение (ГОСТ 2060—73) | | | <i>Диаметр 10—20</i> | | |
| <i>Диаметр 10—160</i> | | | ЛС63—3 полутвердая | 353 | 12 |
| Л60: прессованная | 294 | 30 | <i>Диаметр 10—160</i> | | |
| тянутая | 294 | 30 | ЛО62—1 прессованная | 363 | 20 |
| <i>Диаметр 3—50</i> | | | <i>Диаметр 3—50</i> | | |
| Л60 мягкая | 333 | 30 | ЛО62—1 тянутая полу- твердая | 392 | 15 |
| <i>Диаметр 3—40</i> | | | <i>Диаметр 10—160</i> | | |
| Л60 полутвердая | 392 | 17 | ЛЖС58—1—1 прессо- ванная | 294 | 20 |
| <i>Диаметр 3—12</i> | | | <i>Диаметр 3—50</i> | | |
| Л60 твердая | 470 | 9 | ЛЖС58—1—1 тянутая полутвердая | 441 | 10 |
| <i>Диаметр 10—160</i> | | | <i>Диаметр 10—160</i> | | |
| Л63: прессованная | 294 | 30 | ЛМц58—2 прессованная | 392 | 25 |
| тянутая | 294 | 40 | <i>Диаметр 3—12</i> | | |
| <i>Диаметр 3—50</i> | | | ЛМц58—2 тянутая полу- твердая | 441 | 20 |
| Л65 мягкая | 334 | 30 | <i>Диаметр 12—50</i> | | |
| <i>Диаметр 3—40</i> | | | ЛМц58—2 тянутая полу- твердая | 412 | 20 |
| Л63 полутвердая | 372 | 15 | <i>Диаметр 10—160</i> | | |
| <i>Диаметр 3—12</i> | | | ЛЖМц59—1—1 прессо- ванная | 431 | 28 |
| Л63 твердая | 441 | 10 | <i>Диаметр 3—12</i> | | |
| <i>Диаметр 10—160</i> | | | ЛЖМц59—1—1 тянутая полутвердая | 490 | 15 |
| ЛС59—1 прессованная | 363 | 18 | <i>Диаметр 12—50</i> | | |
| <i>Диаметр 3—50</i> | | | ЛЖМц59—1—1 тянутая полутвердая | 441 | 17 |
| ЛС59—1 мягкая | 333 | 22 | <i>Диаметр 10—160</i> | | |
| <i>Диаметр 3—40</i> | | | ЛАЖ60—1—1 прессован- ная | 441 | 18 |
| ЛС59—1 полутвердая | 392 | 15 | <i>Проволока латунная</i> (ГОСТ 1066—80) | | |
| <i>Диаметр 3—12</i> | | | круглая диаметром 0,1— 12; квадратная и шести- гранная со стороной 3— 12; | | |
| ЛС59—1 твердая | 490 | 5 | Л80; Л68; Л63; ЛС59—1: мягкая, полутвердая, твердая | — | — |
| <i>Диаметры 3—9,5; 10—14; 15—20</i> | | | | | |
| ЛС63—3 тянутая твердая | 490—588 | 1 | | | |

Продолжение табл. 36

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % |
|---|--|------------------------|
| Проволока латунная для холодной высадки (ГОСТ 12920—67; ГОСТ 1066—80) Диаметры 1; 1,2; 1,32; 1,4; 1,45; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,16; 2,2; 2,35; 2,4; 2,5; 2,6; 2,64; 2,85; 3,0; 3,26; 3,35; 3,48; 3,5; 3,6; 3,85; 4,0; 4,1; 4,38; 4,43; 4,8; 5,0; 5,2; 5,28; 5,8; 6,0; 7,0; 7,1; 7,8; 8,0; 8,3; 8,85; 9,0; 10,0 Л63: полутвердая твердая | 363 — | 18 — |
| Проволока из свинцовой латуни (ГОСТ 19703—79) Диаметр 0,45—12 ЛС63—3: мягкая полутвердая твердая Диаметр 0,45—6,5 ЛС63—3 особо твердая Диаметр 7,0—8,0 ЛС63—3 особо твердая | ≥ 294 392—510 510—617 617—715 617—636 | 32 3 — — — |
| Трубы латунные (ГОСТ 494—76) Диаметр 3—100; толщина стенки 0,5—10 Л63; Л68 тянутая и холоднокатаная | — — | — — |

0,55 г/(м²·сутки) в 2 %-ном растворе щелочи.

Коррозионная стойкость латуни ЛО90—1 в морской воде составляет 0,4—0,5 г/(м²·сутки), а мягкой латуни ЛО70—1 — 0,55 г/(м²·сутки); в 10 %-ном растворе H₂SO₄ — 1,65 г/(м²·сутки).

Коррозионная стойкость полутвердой латуни ЛО62—1 в морской воде составляет 0,55 г/(м²·сутки), а твердой латуни под действием 10 %-ного

Продолжение табл. 36

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % |
|--|--------------------------|----------------------|
| Диаметр 21—195; толщина стенки 1,5—42,5 Л60; Л63; ЛС59—1; ЛЖМц59—1—1 прессованная Трубы латунные для теплообменных аппаратов (ГОСТ 21646—76) Наружный диаметр 10—50; толщина стенок 0,8—3 | — | — |
| ЛО70—1 мягкая ЛОМш70—0,05; Л68; ЛМш68—0,05; ЛА77—2 мягкая Л68; ЛО70—1 полутвердая | 294 323 343 | 40 35 35 |
| Трубы латунные тонкостенные (ГОСТ 11383—75) Диаметр 1,5—28; толщина стенки 0,15—0,7 Л63 тянутая: мягкая твердая Л96 тянутая: мягкая твердая | 294 392 206 294 | 38 10 35 20 |

раствора H₂SO₄ — 1,51 г/(м²·сутки).

Коррозионная стойкость мягкой латуни ЛС59—1 в морской воде составляет 0,35 г/(м²·сутки), под действием 10 %-ного раствора H₂SO₄ — 1,42 г/(м²·сутки); предел выносливости этой латуни на воздухе и в морской воде составляет соответственно 190 и 100 МПа при 50·10⁶ циклов, а латуни ЛЖМц59—1—1 на воздухе и в морской воде — соответственно 140 и 80 МПа при 50·10⁶ циклов.

37. Физические и технологические свойства литейных латуней [10, 17, 18, 24]

| Латунь | ρ , г/м ³ | λ , Вт/(м·°С) | $\alpha \cdot 10^{-6}$, °С ⁻¹ | Температура плавления, °С | $\rho \cdot 10^6$, Ом·м | Литейная усадка, % | Жидкость, см | Коэффициент трения в паре со сталью | | Коррозионная стойкость, г/(м ² ·ч) | | Обработка резанием, % |
|-------------|---------------------------|-----------------------|---|---------------------------|--------------------------|--------------------|--------------|-------------------------------------|------------|---|-------|-----------------------|
| | | | | | | | | со смазкой | без смазки | морская вода | пар | |
| ЛЦ16К4 | 8,3 | 83,7 | 17 | 900 | 0,2 | 1,7 | 80 | 0,01 | 0,19 | 0,068 | 0,312 | 30 |
| ЛЦ14К3С | 8,6 | 83,7 | 17 | 900 | 0,2 | 1,7 | 60 | 0,009 | 0,15 | — | — | 50 |
| ЛЦ23А6Ж3Мц2 | 8,5 | 50,2 | 19,8 | 900 | — | 1,8 | — | — | — | — | — | 25 |
| ЛЦ30А3 | 8,5 | 113 | — | 995 | 0,08 | 1,25 | — | — | — | — | — | 30 |
| ЛЦ40АЖ | 8,5 | 113 | 21,6 | 904 | 0,09 | 1,7 | — | — | — | — | — | 30 |
| ЛЦ38Мц2С2 | 8,5 | 46 | 20,6 | 885 | 0,11 | 2 | 22 | 0,016 | 0,24 | 0,05 | — | 60 |
| ЛЦ35Н2ЖА | 8,4 | — | — | 916 | — | 1,7 | — | — | — | — | — | 20 |
| ЛЦ40С | 8,5 | 108,8 | 20,1 | 885 | 0,068 | 2,2 | 51 | 0,013 | 0,17 | 0,059 | 0,02 | 80 |
| ЛЦ36Мц20С2 | 8,5 | 50,2 | — | 890 | 0,12 | 1,8 | — | — | — | — | — | 35 |
| ЛЦ40Мц1,5 | 8,4 | 71,2 | 21,2 | 880 | 0,108 | 1,45 | 83 | 0,012 | 0,32 | — | — | 22 |
| ЛЦ40Мц3Ж | 8,5 | 100,5 | 22 | 870 | 0,12 | 1,6 | 60 | — | — | 0,047 | — | 25 |
| ЛЦ25С2 | 8,5 | 100,5 | — | 920 | 0,09 | 1,8 | — | — | — | — | — | 60 |

38. Механические свойства и область применения литейных латуней [11, 17, 23]

| Латунь | Литье | σ_B , МПа | δ , % | σ_{-1} , МПа | σ_T , МПа | НВ, МПа | $\sigma_{H'}$, кДж/м ² | Область применения |
|-------------|-------|------------------|--------------|---|------------------|----------|------------------------------------|---|
| ЛЦ16К4 | П | 245—343 | 15 | При 20·10 ⁶ циклов 100 | 115—195 | 980—1080 | 1180 | Детали, работающие в морской воде, при протекторной защите арматуры до 250 °С |
| | К | 295—490 | 15 | — | — | — | — | |
| | Ц | 295—490 | — | — | — | — | — | |
| ЛЦ14КЗСЗ | П | 245—295 | 7 | — | 135 | 880 | 390 | Подшипники, втулки |
| | К | 295—390 | 15 | — | — | 980 | — | |
| | Ц | 345—390 | — | — | — | — | — | |
| ЛЦ23А6ЖЗМц2 | П | 540—635 | 7 | — | 295—345 | 1570 | — | Гайки винтов, массивные червячные винты, работающие в тяжелых условиях |
| | К | 585—685 | 7 | — | — | 1570 | — | |
| | Ц | 635—735 | 7 | — | — | — | — | |
| ЛЦ30А3 | П | 275—335 | 12 | — | 145—175 | 780 | — | Коррозионно-стойкие детали |
| | К | 345—440 | 15 | — | — | 880 | — | |
| ЛЦ40АЖ | П | 335—930 | 20 | — | 245 | 780 | — | Арматура, втулки, подшипники |
| | К | 390—470 | 18 | — | — | 880 | — | |
| ЛЦ35НЖА | П | 345 | 20 | — | 175—195 | 980 | — | Арматура без притираемых поверхностей, работающих в воде, на воздухе, масле, жидком топливе до 250 °С |
| | К | 370—450 | 18 | — | — | 830 | — | |
| ЛЦ40С | К | 345—390 | — | — | 145 | 780 | 255 | Арматура, втулки, сепараторы для подшипников качения. Литье под давлением |
| | Ц | 200 | 20 | При 50·10 ⁶ циклов 185 | — | — | — | |

| | | | | | | | | |
|------------|------|---------|----|--|---------|---------|------|--|
| ЛЦ40Сд | Д | 200 | 6 | В морской воде 100 | — | 690 | — | Зубчатые колеса |
| ЛЦ36Мц20С2 | П | 295—390 | 6 | — | 225—285 | 880 | 85 | |
| | К | 295—345 | 4 | — | — | 980 | — | |
| ЛЦ38Мц2С2 | П | 295—390 | 10 | — | 215—275 | 690 | 685 | Антифрикционные детали, армировка вагонных подшипников |
| | К | 345—440 | 8 | — | — | 780 | — | |
| ЛЦ40Мц1,5 | П | 345 | 20 | При 20·10 ⁶ циклов 90 | 155 | 980 | 1180 | Авиадетали, несущие силовую нагрузку, неотчетственные подшипники и арматура, детали, подвергающиеся лужению, заливке баббитом |
| | К | 345 | 20 | — | — | 980 | — | |
| | Ц | 345 | 20 | — | — | 980 | — | |
| ЛЦ40Мц3Ж | П | 390—540 | 18 | — | 165—235 | 880 | 1760 | Несложные по конфигурации детали ответственного назначения и арматура для морского судостроения, работающие при температуре до 300 °С, массивные детали (гребные винты, лопасти, сепараторы) |
| | К | 540—635 | 10 | При 20·10 ⁶ циклов 135 | — | 980 | — | |
| | Д | 390 | 10 | При 50·10 ⁶ циклов в морской воде 80 | — | 880 | — | |
| ЛЦ25С2 | П | 245—295 | 8 | — | — | 690—780 | — | Штуцера гидросистем автомобилей |
| ЛЦ40Мц3А | К, Ц | 441 | 15 | — | — | 1130 | — | Для деталей несложной конфигурации |

Обозначения. П — литье в песок; К — литье в кокиль; Ц — центробежное литье.

Литейные латуни. Согласно ГОСТ 17711—80 существует 10 марок литейных латуней. Литейные латуни в виде чушек (ГОСТ 1020—77) содержат те же элементы, что и латуни, обрабатываемые давлением; от последних литейные латуни отличаются, как правило, большим легированием цинком и другими металлами. Вследствие малого интервала кристаллизации литейные латуни обладают хорошими литейными характеристиками. Свойства литейных латуней приведены в табл. 37, 38.

6. БРОНЗЫ

Бронзами называют сплавы меди, в которых цинк или никель не являются основными легирующими элементами.

По химическому составу бронзы подразделяются на две группы: оловянные, в которых основным легирующим элементом является олово, и безоловянные, не содержащие олово в качестве легирующего компонента.

По технологическому признаку бронзы делятся на литейные и деформируемые. Литейные бронзы предназначены для фасонных отливок. Деформируемые бронзы хорошо поддаются обработке давлением.

Бронзы по сравнению с латунью обладают лучшими механическими, антифрикционными свойствами и коррозионной стойкостью. В качестве легирующих элементов в бронзе используют олово, алюминий, никель, марганец, железо, кремний, свинец, фосфор, бериллий, хром, цирконий, магний и другие элементы.

Оловянные бронзы. Бронзы, в которых олово является основным легирующим элементом, называются оловянными.

Наибольшее практическое значение имеют сплавы, содержащие до 20 % Sn. Эта часть диаграммы состояния Cu—Sn представляет собой α -твердый раствор олова в меди, имеющий гранцентрированную кристаллическую решетку. Растворимость олова в меди меняется от 15,8 % при 586 °С до 1 % при 200 °С. Причем в реальных условиях затвердевания и охлаждения (в песча-

ных и металлических формах) область α -твердого раствора значительно сужается (примерно до 6 %). В равновесии с α -твердым раствором по мере понижения температуры находятся β -, γ -, δ -, ϵ -твердые растворы: β — на основе соединения Cu_5Sn с объемноцентрированной кубической решеткой; γ и δ — на основе $Cu_{31}Sn_8$ со сложной кубической решеткой; ϵ — на основе Cu_3Sn с гексагональной плотноупакованной решеткой.

К числу однофазных сплавов относятся бронзы с содержанием до 5—6 % Sn. В бронзах с более высоким содержанием олова при кристаллизации образуются α - и β -фазы. При охлаждении при 586 °С β -фаза распадается с образованием эвтектоида ($\alpha+\gamma$), при 520 °С γ -фаза распадается с образованием эвтектоида $\alpha+\delta$. На это обычно заканчиваются фазовые превращения в бронзах.

Механические свойства оловянных бронз достаточно высоки. С увеличением содержания олова возрастает твердость и прочность сплавов, но при этом снижается пластичность.

Оловянные бронзы слабо чувствительны к перегреву и газам, свариваются и паяются, не дают искры при ударах, не магнитны, морозостойки и обладают хорошими антифрикционными свойствами.

Добавки фосфора к оловянным бронзам значительно улучшают их механические, антифрикционные и литейные характеристики. Для механических свойств оптимальное содержание фосфора ~ 0,5 %. При содержании фосфора выше 0,5 % бронзы охрупчиваются, особенно при горячей прокатке. Однако в литейных антифрикционных бронзах может содержаться до 1,2 % P.

Небольшие добавки Zr, Ti, Nb и V улучшают механические свойства и обрабатываемость давлением в холодном и горячем состоянии. Никель при его содержании ~ до 1 % повышает механические свойства, коррозионную стойкость и измельчает зерно. Свинец значительно повышает антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием, но снижает механические свойства. Цинк, почти не оказывая влияния на механические свойства, улучшает технологические характеристики

39. Физические свойства оловянных бронз, обрабатываемых давлением [10, 17, 18]

| Бронза | Температура плавления, °С | | ρ , г/м ³ | $\alpha \cdot 10^{-6}$, °С ⁻¹ , при | | λ , Вт/(м × °С) | $\rho_s \cdot 10^{-6}$, Ом · м | E, МПа |
|--------------|---------------------------|---------|---------------------------|---|-----------|-------------------------|---------------------------------|---------|
| | Ликвидус | Солидус | | 20 °С | 20—300 °С | | | |
| BrOF6,5—0,4 | — | 995 | 8,8 | 17,1 | 19,1 | 71,2 | 0,176 | 109 800 |
| BrOF6,5—0,15 | — | 995 | 8,8 | 17,1 | 19 | 71,2 | 0,176 | 109 800 |
| BrOF7—0,2 | — | 900 | 8,6 | 17,0 | — | 41,9 | 0,17 | 112 700 |
| BrOF8—0,3 | — | 880 | 8,6 | 17,0 | — | 41 | 0,175 | 115 600 |
| BrOF4—0,25 | — | 1060 | 8,9 | 17,6 | 19,4 | 83,7 | 0,091 | 98 000 |
| BrOC4—3 | — | 1045 | 8,8 | 18 | — | 83,7 | 0,087 | 121 600 |
| BrOC4—4—2,5 | 1018 | 887 | 9 | 18,2 | — | 83,7 | 0,087 | 73 500 |
| BrOC4—4—4 | 1015 | — | 9,1 | 18,1 | — | 83,7 | 0,09 | 70 600 |

оловянных бронз. Железо повышает механические свойства и температуру рекристаллизации, однако повышенное содержание железа ухудшает технологические и коррозионные характеристики бронз.

Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением — деформируемые, подразделяются на следующие группы (ГОСТ 5017—74): оловянно-фосфористые бронзы BrOF8,0—0,3; BrOF6,5—0,4; BrOF6,5—0,15; BrOF7—0,2; BrOF4—0,25; оловянно-цинковые бронзы BrOC4—3; оловянно-цинково-свинцовые бронзы BrOC4—4—2,5 и BrOC4—4—4.

Физические и механические свойства бронз приведены в табл. 39, 40. Механические свойства оловянных бронз при низких температурах приведены в табл. 41.

Бронзы BrOF8—0,3 и BrOF6,5—0,4 применяют для сеток целлюлозно-бумажной промышленности. Бронза BrOF6,5—0,4 также используется для пружин, деталей машин и подшипников. Бронза BrOF6,5—0,15 применяется для изготовления лент, полос, прутков, деталей подшипников, биметаллических изделий; бронза BrOF7—0,2 — для прутков, шестерен, зубчатых колес, втулок и прокладок высоконагруженных машин; бронза BrOF4—0,25 — для трубок контрольно-измерительных и других приборов,

для манометрических пружин; бронза BrOC4—3 — для лент, полос, прутков, применяемых в электротехнике, для токоведущих пружин, контактов, штепсельных разъемов, для пружинной проволоки в химической промышленности, точной механике, для арматуры, шаберов в бумажной промышленности; бронзы BrOC4—4—2,5 и BrOC4—4—4 — для втулок и подшипников в автотракторной и автомобильной промышленности.

Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением, могут поставляться, так же как и латуни, в мягком (отожженном), полутвердом, твердом и особо твердом состоянии.

Бронзы BrOF6,5—0,4, BrOF6,5—0,15 и BrOC4—4—2,5 обрабатываются обычно в холодном состоянии (прокатка, волочение), а в горячем состоянии — лишь прессованием. Бронза BrOC4—3 хорошо обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии. Виды и свойства плоского и круглого проката из оловянных бронз приведены в табл. 42 и 43.

Литейные оловянные бронзы. Жидкотекучесть литейных оловянных бронз ниже, чем у других бронз, однако они имеют незначительную объемную усадку, что позволяет получать из этих сплавов фасонные отливки бронзы.

Оловянные шихтовые литейные бронзы в чушках (ГОСТ 614—73) служат

40. Механические свойства и технологические характеристики оловянных бронз, обрабатываемых давлением [17, 18, 23, 24]

| Бронза | σ_B | σ_T | δ , % | σ_{-1} , МПа | α_H , кДж/м ² | ψ , % | НВ, МПа | Коэффициент трения | | Температура, °С | | | | Обрабатываемость резанием, % |
|--|--------------------|-------------|--------------|---|---------------------------------|------------|----------------------|--------------------|------------|-------------------|-------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | МПа | | | | | | | со смазкой | без смазки | горячей обработки | отжига | начала рекристаллизации | низкотемпературного отжига | |
| БрОФ6,5—0,15; БрОФ6,5—0,4: литая | 245—345 | 140 | 15—30 | При 10·10 ⁶ циклов 265—335 | 490— 590 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 295—440 | 195— 245 | 60—70 | — | — | 80 | 685—820 | 0,01 | 0,12 | 700— 800 | 600— 650 | 350— 370 | 260 | 20 |
| | 685—785 | 580— 640 | 7—12 | — | — | 61 | 1570—2160 | — | — | — | — | — | — | — |
| БрОФ7—0,2: мягкая | 370—440 | — | 55—65 | При 10·10 ⁶ циклов 165 | 1745 | — | 835—930 | 0,011 | 0,33 | — | 600— 650 | — | — | 16,1 |
| | 880—1080 | 540 | 1—2 | — | — | — | 1720—2250 | — | — | — | — | — | — | — |
| БрОФ8—0,3: мягкая | 390—490 | — | 55—65 | — | — | — | 880—980 | — | — | — | 600— 650 | — | — | — |
| | 980—1180 | — | 1—2 | — | — | — | 1760—2350 | — | — | — | — | — | — | — |
| БрОФ4—0,25: мягкая | 295—375 | — | 40—58 | При 5·10 ⁶ циклов 151 | — | 85 | 540—685 | — | — | 700— 800 | 600— 650 | 350— 370 | 250 | 20 |
| | 590—685 | 530 | 6—10 | 245 | — | 60 | 1570—1670 | — | — | — | — | — | — | — |
| БрОЦ4—3: литая | 195—295 | 65 | 15 | — | 390 | — | 590—685 | — | — | 700— 800 | 600— 650 | 400 | 250 | — |
| | 295—390 | — | 35—45 | — | — | — | 590—685 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 490—590 | — | 3—6 | — | — | — | 1570—1670 | — | — | — | — | — | — | — |
| БрОЦ4—4—2,5: литая | 185 | 100 | 11 | — | — | 13 | 660 | 0,016 | 0,26 | — | 550— 650 | 400 | — | 90 |
| | 295—345 540—640 | 130 275 | 35—45 2—4 | — — | 390 — | 34 — | 480—685 1470—1760 | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — |
| БрОЦ4—4—4: мягкая | 315—335 | 130 | 30—40 | — | 360 | 34 | 610 | 0,016 | 0,26 | — | — | — | — | 90 |
| | 490—590 | — | 1—2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

41. Механические свойства оловянных бронз при низких температурах [16, 17, 18]

| Температура, °С | σ_B , МПа | δ , % | ψ , % | σ_T , МПа |
|--------------------|------------------|--------------|------------|------------------|
| BrOФ6,5—0,4 | | | | |
| 17 | 615 | 12 | 61 | — |
| —196 | 825 | 29 | 54 | — |
| —253 | 930 | 29 | 51 | — |
| BrOЦ10—2 | | | | |
| 20 | 245 | 8 | 36 | 175 |
| —190 | 305 | 15 | 24 | 205 |
| —253 | 390 | 18 | 38 | 315 |

42. Плоский прокат из оловянных бронз [11, 17]

| Полуфабрикат (размеры, мм) | | σ_B , МПа | δ , % |
|---------------------------------------|---------------|------------------|--------------|
| Полосы, ленты (ГОСТ 1761—79) | | | |
| <i>Толщина</i> | <i>Ширина</i> | | |
| 1—10 | 40—300 | | |
| 0,1—2 | 10—300 | | |
| BrOФ6,5—0,15: | | | |
| мягкая | | 295 | 34—38 |
| полутвердая | | 440 | 8—10 |
| твердая | | 665 | 3—5 |
| особо твердая | | 745 | — |
| термообработанная | | 590 | 10 |
| Ленты | | | |
| BrOЦ4—3: | | | |
| мягкая | | 295 | 38 |
| полутвердая | | 440 | 4—8 |
| твердая | | 620 | 2—4 |
| особо твердая | | 685 | — |
| Полосы и ленты (ГОСТ 15885—77) | | | |
| <i>Толщина</i> | <i>Ширина</i> | | |
| 1,53—3 | 50—300 | | |
| 0,5—2 | 100—200 | | |
| BrOЦ4—4—2,5: | | | |
| мягкая | | 295 | 35 |
| полутвердая | | 440 | 10 |
| твердая | | 540 | 5 |

43. Круглый прокат из оловянных бронз [11, 17]

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % |
|---|------------------|--------------|
| Прутки круглые (ГОСТ 10025—78) | | |
| <i>Диаметр 6—40</i> | | |
| BrOФ6,5—0,15 гнущая | 410 | 15 |
| <i>Диаметр 40—110</i> | | |
| BrOФ7—0,2 прессованная | 440 | 15 |
| Заготовки для изготовления проволоки, сеток и поясов поршневых колец | | |
| BrOФ6,5—0,15 мягкая | 345 | 55 |
| BrOФ7—0,2 мягкая | 355 | 55 |
| BrOФ8—0,3 мягкая | 380—480 | 55 |
| BrOФ6,5—0,4 твердая | 530 | — |
| Проволока | | |
| <i>Диаметр 0,115—2</i> | | |
| BrOФ6,5—0,4 твердая | 880 | 0 |
| <i>Диаметр 0,5—2</i> | | |
| BrOФ6,5—0,4 мягкая | 295 | 40 |
| Прутки круглые, квадратные, шестигранные (ГОСТ 6511—60) | | |
| <i>Диаметр 5—12</i> | | |
| BrOЦ4—3 тянутая | 430 | 10 |
| <i>Диаметр 13—15</i> | | |
| BrOЦ4—3 тянутая | 370 | 15 |
| <i>Диаметр 26—35</i> | | |
| BrOЦ4—3 тянутая | 335 | 16 |
| <i>Диаметр 36—40</i> | | |
| BrOЦ4—3 тянутая | 315 | 16 |
| <i>Диаметр 42—120</i> | | |
| BrOЦ4—3 прессованная | 275 | 25 |
| Проволока круглая, квадратная (ГОСТ 5221—77) | | |
| <i>Диаметр 0,1—12</i> | | |
| BrOЦ4—3 тянутая | 765 | — |

шихтой: BrO3Ц8С4Н1 — для литейной бронзы; BrO3Ц7С5Н; BrO3Ц13С4 — для бронзы BrO3Ц12С5; BrO4Ц7С5 — для бронзы BrO3, 5Ц7С5; BrO5Ц6С5 — для бронзы BrO5Ц5С и BrO4Ц4С17. Перечисленные литейные бронзы (ГОСТ 613—79) применяются для литья антифрикционных деталей. Кроме того, бронзы BrO3Ц12С5 и BrO3Ц7С5Н применяются для арматуры, работающей в воде и водяном паре (BrO3Ц7С5Н в морской воде и масле) давлением до 245 МПа.

Литейные нестандартные бронзы BrO10; BrO19 ответственного назначения применяются для арматуры и фасонных отливок; бронза BrO10Ф1 — для подшипников шестерен и втулок ответственного назначения; бронза BrO10Ц2 — для арматуры, подшипников, фасонных отливок; бронза BrO8Ц4 — для частей насосов и арматуры; бронза BrO6Ц6С3 — для паровой и водяной арматуры; бронза BrO8С12 — для ответственных подшипников, работающих при высоких давлениях; бронзы BrO5С25 и BrO1С22 — для изготовления подшипников и втулок, работающих при малых нагрузках и больших скоростях, малоулотнительных колец; бронза BrO6Ц6С3 — для паровой и водяной арматуры. Бронзы BrO5С25, BrO1С22, BrO8С12 относятся к группе свинцовистых бронз, к которым относятся сплавы BrС30 (для подшипников, сальников), BrС60Н2,5 (для подшипников, фасонных отливок). Вследствие невысоких механических свойств двойные свинцовистые бронзы применяют для втулок и подшипников в виде тонкого слоя на стальной основе. Свинцовистые бронзы с повышенным содержанием олова (BrO8С12, BrO10С10, BrO10С2Н3) характеризуются более высокими механическими свойствами, чем двойная свинцовистая бронза. Поэтому из этой бронзы изготавливают втулки и вкладыши подшипников без стальной основы. Физические и механические свойства литейных оловянных бронз приведены в табл. 44, 45.

Коррозионная стойкость оловянных бронз в атмосферных условиях хорошая. В сельской местности скорость коррозии бронз BrO5 и BrO8 равна 0,00015—0,0008 мм/год, в морской атмосфере 0,0001—0,0002 мм/год, в городской 0,0015—0,0018 мм/год. В водяном паре при малых скоростях истечения скорость коррозии оловянных бронз меньше (0,0025 мм/год), при высоких скоростях истечения — 0,9 мм/год. В перегретом до 250 °С водяном паре оловянные бронзы устойчивы до давления 2 МПа.

В морской воде оловянные бронзы более стойки, чем медь и латунь. Быстрому разрушению подвергаются оловянные бронзы под действием рудничных вод, содержащих окислительные соли.

Сильное воздействие на оловянные бронзы оказывают соляная и азотная кислоты; менее активной является серная кислота.

В растворах NaOH скорость коррозии составляет 0,25 мм/год, в растворах аммиака 1,27—2,54 мм/год, в водных растворах этилового спирта < 0,0025 мм/год. Скорость коррозии оловянных бронз в сухом четыреххлористом углеводе или в хлористом этиле < 0,0025 мм/год, а в этих же средах в присутствии влаги 1,27 мм/год.

При комнатной температуре кислород и сухие сернистый газ, газы-галогены или их водородные соединения практически не влияют на оловянные бронзы. При высоких температурах коррозия в газах-галогенах значительно возрастает. Скорость коррозии в сернистом газе при наличии влаги достигает 2,5 мм/год. Значительна (1,3 мм/год) и скорость коррозии оловянных бронз во влажных парах сероводорода при 100 °С. Скорости коррозии оловянных бронз в различных средах приведены в табл. 46.

Безоловянные бронзы по своим свойствам не уступают, а часто превосходят оловянные бронзы; поэтому их широко применяют в машиностроении. Безоловянные бронзы, обрабатываемые давлением, выпускаются в соответствии с ГОСТ 18175—78.

Алюминиевые бронзы (двух- и многокомпонентные) имеют большое распространение в машиностроении. Алюминий растворяется в меди, образуя α -твердый раствор замещения с пре-

44. Физические свойства и технологические характеристики литейных оловянных бронз [10, 17, 18]

| Бронза | Температура плавления, °С | ρ , т/м ³ | $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ при 20 °С | λ , Вт/(м·°С) | C_p , Дж/(кг·°С) | E , МПа | $\nu \cdot 10^6$, Ом·м | Температура, °С | | Линейная усадка, % | Жидкотекучесть, см | Обрабатываемость резанием, % |
|------------|---------------------------|---------------------------|--|-----------------------|--------------------|-----------|-------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| | | | | | | | | литья | низкотемпературного отжига | | | |
| БрО3Ц7С5Н | 1022 | 8,7 | 17,61 | 62,8 | 364,3 | 83 300 | — | — | — | — | 50 | — |
| БрО3Ц12С5 | 998 | 8,7 | — | — | — | 82 300 | — | — | — | — | 60 | — |
| БрО4Ц4С17 | 970 | 8,9 | — | — | — | — | — | — | — | — | 40 | — |
| БрО5Ц5С5 | — | 8,8 | 19,1 | — | 393,6 | 92 600 | — | 1250—1300 | — | 1,4—1,6 | 30 | 90 |
| БрО3,5Ц7С5 | — | 8,7 | — | — | — | — | — | — | — | — | 30 | 90 |
| БрО10 | 1020 | 8,8 | 18,5 | 48,1 | 368,4 | 103 900 | — | 1150 | 200 | 1,44 | 20 | 20 |
| БрО19 | 880 | 8,6 | 18,8 | — | — | 96 000 | — | — | — | — | — | — |
| БрО10Ф | 934 | 8,7 | 17,3 | 49 | 427 | 100 900 | 0,16 | 1150 | 200 | 1,44 | — | — |
| БрО10Ц2 | 1015 | 8,5 | 17,3 | 55,3 | 381 | 98 000 | 0,15E | 1120—1150 | — | 1,45—1,51 | 7 | — |
| БрО8Ц4 | 1000 | 8,8 | 16,6 | 68,2 | 355,9 | 98 000 | 0,135 | 1100—1150 | — | 1,40—1,54 | 54 | — |
| БрО8С12 | 940 | 9,1 | 17,1 | — | — | 73 500 | — | 1150 | — | 1,4 | 45 | — |
| БрО5С25 | 940 | — | 17,6 | 58,6 | — | 68 600 | — | 1150 | — | 1,5 | 40 | — |
| БрО6Ц6С3 | 967 | 8,82 | 17,1 | 75,4 | — | 88 200 | 0,09 | 1150 | — | 1,6 | 40 | — |
| БрО8Н4Ц2 | 810 | 8,86 | 17,61 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

45. Механические свойства литейных оловянных бронз [17, 18, 23, 24]

| Бронза | Способ литья | $\sigma_{в'}$, МПа | δ | | ψ | σ_T | | σ_{-1} | $\sigma_{н'}$, кДж/м ² | НВ, МПа | Коэффициент трения | | |
|------------|--------------|---------------------|----------|-------|--------|------------|-----|---------------|------------------------------------|---------|--------------------|------------|----------------|
| | | | % | | | МПа | | | | | со смазкой | без смазки | в морской воде |
| БрО3Ц7С5Н | П | 175 | 8 | — | — | — | — | — | 590 | — | 0,24 | 0,38 | |
| | К | 205 | 5 | — | — | 176 | — | — | 590 | 0,028 | — | — | |
| БрО3Ц12С5 | П | 175 | 8 | — | — | — | — | — | 590 | — | — | — | |
| | К | 205 | 5 | — | — | — | — | — | 590 | — | — | — | |
| БрО17Ц4С4 | П | 145 | 5 | — | — | — | — | — | 590 | — | — | — | |
| | К | 145 | 6 | — | — | — | — | — | 590 | — | — | — | |
| БрО5Ц5С5 | П | 145 | 6 | — | — | — | — | — | 590 | 0,016 | 0,26 | — | |
| | К | 175 | 4 | — | — | — | — | 205 | 590 | — | — | — | |
| БрО3,5Ц7С5 | П | 145 | 6 | — | — | — | — | — | 590 | — | — | — | |
| | К | 175 | 4 | — | — | — | — | — | 590 | — | — | — | |
| БрО10 | П | 215 | 3—10 | 10—14 | 175 | — | 90 | 685—785 | 0,0056 | 0,17 | — | | |
| | К | 295 | 3—10 | 10 | — | 185 | 295 | 1080 | — | — | — | | |
| БрО19 | К | 295 | 0,5 | — | 175 | — | 41 | 1570 | 0,005 | 0,4 | — | | |
| БрО16С5 | К | 245 | 0,5 | — | — | — | — | 1180 | — | — | — | | |
| БрО10Ф1 | П | 195 | 3 | 3 | 135 | — | 59 | 785—980 | 0,008 | 0,15 | 0,37 | | |
| | К | 245—295 | 3—10 | 10 | 195 | — | 88 | 880—1180 | — | — | — | | |
| БрО10Ц2 | П | 195—245 | 8 | 10—14 | 175 | — | 98 | 685 | 0,008— | 0,16— | — | | |
| | К | 195—245 | 5 | — | — | — | 147 | 880 | 0,06 | 0,20 | — | | |

Продолжение табл. 45

| Бронза | Способ литья | $\sigma_{в}$, МПа | δ | ψ | $\sigma_{т}$ | σ_{-1} | $\sigma_{н}$, кДж/м ² | НВ, МПа | Коэффициент трения | | |
|------------|--------------|--------------------|--------------|--------|--------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|------------|----------------|
| | | | | | | | | | со смазкой | без смазки | в морской воде |
| BrO8Ц4 | П К | 195 245 | 6—15 4—10 | 8—12 | 115 | — | 186 245 | 640 735—835 | 0,006 | 0,3 | — |
| | | | | | | | | | | | |
| BrO8C12 | П К | 145—175 145—195 | 3—8 | — | 100 115 | — | 98—137 | 685—980 785—1180 | 0,005 | 0,1 | — |
| | | | | | | | | | | | |
| BrO5C25 | П К | 115—135 135—175 | 4—6 6—8 | 7 | 80— 100 | — | 78 | 440—540 540—640 | 0,004 | 0,14 | — |
| | | | | | | | | | | | |
| BrO6C6Ц3 | П К | 145—195 175—215 | 8—12 4—8 | — | 80— 195 | — | 225 294 | 590 640—735 | 0,009 | 0,16 | — |
| | | | | | | | | | | | |
| BrC30 | К | 74 | 5 | 34 | 45 | — | — | ≥245 | — | — | — |
| BrC60H2,5 | К | ≥29 | ≥5 | — | — | — | — | ≥135 | — | — | — |
| BrO8H4Ц2 | П К | 265 345 | 14 16 | — | 175 | При 20—10° циклов 150 | — | 785 | — | — | — |
| | | | | | | | | | | | |
| BrO10C12H3 | К | 245 | 5 | — | — | — | — | 735 | 0,02 | 0,38 | — |

Обозначения: П — литье в песок; К — литье в кокиль.

46. Скорость коррозии оловянных бронз в различных средах [17, 18]

| Бронза | Морская вода (в мм/год) | Раствор H ₂ SO ₄ , г/(м ² ·сутки) | | | | | Морской туман | Сухой пар при 250 °С | Влажный пар при 100 °С |
|-------------|-------------------------|--|----------|-----------|----------|----------|---------------|----------------------|------------------------|
| | | при 20 °С | | при 80 °С | | | | | |
| | | 10 %-ный | 55 %-ный | 10 %-ный | 45 %-ный | 55 %-ный | | | |
| BrO10 | 0,016 | 4,1 | 1,26 | 23,8 | 8,5 | 7,1 | — | — | — |
| BrO5 | 0,02 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BrO10Ц2 | 0,18 | 3,5 | 0,53 | 15,6 | 7,8 | 4,6 | 0,06 | 0,02 | 0,02 |
| BrOC10—15 | 0,076 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BrOF6,5—0,4 | 0,04 | 5,1 | 0,97 | 17,9 | 8,6 | 5,2 | — | — | — |
| BrOF4—0,25 | 0,03 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BrOC4—3 | 0,022 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BrO4Ц4C2,5 | 0,028 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BrO6Ц6C3 | 0,028 | 4,9 | 0,4 | 17,6 | 7,0 | 5,6 | — | — | — |
| BrO6Ц3H6 | 0,005 | — | — | — | — | — | — | — | — |

делом растворимости 9,4%. Двойные алюминиевые однофазные бронзы (BrA5; BrA7; BrA10) отличаются высокой прочностью и пластичностью. Они хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Предназначены для упругих элементов — пружин, мембран, сильфонов, деталей, работающих в морской среде. Алюминиевые бронзы морозостойки, не магнитны, не дают искры при ударах. По коррозионной стойкости они превосходят латуни и оловянные бронзы. Вместе с тем эти сплавы трудно поддаются лайке и неустойчивы в условиях перегретого пара. Понижая электро- и теплопроводность меди, алюминий повышает ее жаростойкость.

Железо значительно улучшает механические свойства алюминиевых бронз, измельчая зерно; оно способствует задержке рекристаллизации. Алюминиевожелезные бронзы (BrAJ9—4) для улучшения прочностных характеристик подвергают старению при 250—300 °С 2—3 ч после закалки при 950 °С. Они применяются для шестерен, червяков, втулок, седел клапанов, гаек нажимных винтов в основном в авиационной промышленности.

Никель повышает механические свойства, жаростойкость, температуру

рекристаллизации и коррозионную стойкость алюминиевых бронз, антифрикционные свойства и устойчивость при низких температурах. Алюминиево-железоникелевые бронзы используются для направляющих втулок, клапанов, шестерен и для других деталей ответственного назначения в основном в авиационной промышленности.

В алюминиевых бронзах марганец повышает технологические и коррозионные свойства. Эти бронзы хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Применяются для червячных винтов, шестерен, втулок, в морском судостроении для деталей, работающих при температуре до 250 °С.

Бериллиевые бронзы, являясь дисперсионно-твердеющими сплавами, обладают высокими механическими, упругими и физическими свойствами. Отличаются высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью, циклической прочностью; они устойчивы при низких температурах, не магнитны, не дают искры при ударах. Закалку бериллиевых бронз осуществляют с температуры 750—790 °С, старение — при 300—325 °С. Добавки никеля, кобальта или железа способствуют замедлению скорости фазовых пре-

вращений при термической обработке, что значительно облегчает технологию закалки и старения. Кроме того, никель повышает температуру рекристаллизации, а марганец может частично заменить дорогой бериллий. Бериллиевые бронзы применяются для пружин, мембран, пружинящих деталей, в часовой промышленности.

Сплавы меди с марганцем отличаются высокими механическими свойствами, обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Они обладают повышенной жаропрочностью и коррозионной стойкостью. Применяются для точной арматуры.

Кремниевые бронзы обычно содержат никель или марганец. Эти сплавы отличаются высокими механическими, упругими и антифрикционными свойствами; при этом не теряют своей пластичности при низких температурах. Кремниевые бронзы хорошо паяются, обрабатываются давлением при низких и высоких температурах. Они не магнитны и не дают искры при ударах. Применяются для антифрикционных деталей, пружин, подшипников, в морском судостроении, для сеток, решеток, испарителей, направляющих втулок. Механические и физические свойства безоловянных бронз, обрабатываемых давлением, приведены в табл. 47—49. Виды и свойства круглого и плоского проката из безоловянных бронз приведены в табл. 50, 51.

Литейные безоловянные бронзы (ГОСТ 493—79) характеризуются высокой прочностью и хорошими антифрикционными и коррозионными свойствами. Они применяются для изготовления деталей, работающих в особо тяжелых условиях (зубчатые колеса, втулки, клапаны, шестерни для мощных кранов и турбин, червяки, работающие в паре с деталями из упрочненных сталей, подшипники, работающие при высоких давлениях и ударных нагрузках). Свойства литейных безоловянных бронз приведены в табл. 52.

7. МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ

К медно-никелевым сплавам относятся сплавы на основе меди, в которых основным легирующим элементом

является никель. Легирование меди никелем значительно повышает ее механические свойства, коррозионную стойкость, термоэлектрические характеристики. Промышленные медно-никелевые сплавы можно условно разделить на две группы: конструкционные и электротехнические. К первой группе относятся коррозионно-стойкие и высокопрочные сплавы типа мельхиор, нейзильбер и куниаль. В качестве дополнительных легирующих элементов в них добавляют марганец, алюминий, цинк, железо, кобальт, свинец, а также хром, церий, магний, литий.

Мельхиоры имеют высокую коррозионную стойкость в различных средах — в пресной и морской воде, в органических кислотах, растворах солей, в атмосферных условиях. Добавки железа и марганца увеличивают стойкость медно-никелевых сплавов против ударной коррозии. Являясь твердыми растворами, мельхиоры обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии.

Сплавы на основе меди, в которых основными легирующими компонентами являются никель и цинк, называются нейзильберами. Они представляют собой твердые растворы на основе меди. Легирование цинком приводит к повышению механических свойств медно-никелевых сплавов и приданию им красивого серебристого цвета и удешевлению. Нейзильберы отличаются высокой коррозионной стойкостью: не окисляются на воздухе, сравнительно устойчивы в органических кислотах и растворах солей. Нейзильберы обрабатываются давлением в горячем (за исключением свицовистого нейзильбера) и в холодном состоянии. Небольшое количество свинца вводится для улучшения обработки резанием.

Сплавы на основе тройной системы Cu—Ni—Al называют куниалями. Эти сплавы отличаются высокими механическими и упругими свойствами, коррозионной стойкостью, устойчивостью при низких температурах. Обрабатываются давлением в горячем состоянии.

Согласно диаграмме состояния предел растворимости α -твердого раствора на основе меди резко уменьшается

47. Физические свойства и технологические характеристики безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [10, 13, 23]

| Бронза | Тем- пера- тура плавления, °С | ρ , г/см ³ | α , 10 ⁻⁶ , °С ⁻¹ при 20 °С | A_s , Вт/(м·°С) | ρ_s , 10 ⁻⁸ , Ом·м | E, МПа | $\sigma_{0.2}$, кг/см ² | Температура, °С | | | Образование трещин, % |
|---|-------------------------------|----------------------------|--|-------------------|------------------------------------|---------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | горячей обработки | отжига | низкотемпературного отжига | |
| БрА5 | 1056 | 8,2 | 18,2 | 88—104,7 | 0,099 | 102 900 | — | 750—880 | 600—700 | — | 20 |
| БрА7 | 1040 | 7,8 | 17,8 | 79,5 | 0,11 | 117 600 | — | 750—880 | 600—750 | 275 | 20 |
| БрАЖ9—4 | 1040 | 7,5 | 16,2 | 58,6 | 0,123 | 110 700 | 423 | 750—850 | 700—750 | — | 20 |
| БрАЖМц10—3—1,5 | 1045 | 7,5 | 16,1 | 58,6 | 0,189 | 98 000 | — | 750—850 | 650—750 | — | 20 |
| БрАЖН10—4—4 | 1040 | 7,5 | 17,1 | 75,4 | 0,193 | 112 700 | — | 800—900 | 700—750 Старение 400 | — | 20 |
| БрАМц9—2 | 1060 | 7,6 | 17,0 | 71,2 | 0,11 | 90 200 | 461 | 800—850 | 650—750 | — | 20 |
| БрБ2: мягкая состаренная | 955 | 8,2 | 16,6 | 83,7 | 0,1 | 114 700 | 419 | 750—800 | 530—650 | — | 20 |
| Деформированная | 955 | 8,23 | 16,6 | 104,7 | 0,068 | 128 400 | — | 750—800 | Закалка 760—780 | — | 20 |
| | 955 | 8,23 | 16,6 | 75,4 | — | — | — | 750—800 | Старение 320, 10 ч | — | 20 |
| БрБНТ1,9 | 860 | 8,3 | 16,5 | 100,5 | 0,09 | 127 000 | — | 780—800 | 530—650 Закалка 760—780; | — | 20 |
| БрБНТ1,7 | 865 | 8,2 | 17,0 | 96,3 | 0,09 | 125 400 | — | 780—800 | старение 310—320 650—700 | — | 20 |
| | 865 | 8,2 | 17,0 | 96,3 | 0,09 | 125 400 | — | 780—800 | Закалка 755—775; | — | 20 |
| БрКМц3—1 БрКН1—3 после деформации и старения | 970 | 8,4 | 18 | 37,7 | 0,15 | 112 700 | 377 | 800—850 | старение 320—330 | 275 | 30 |
| | 1050 | 8,6 | 16,1 | 104,7 | 0,046 | 140 100 | — | 890—910 | 600—750 | Закалка 850, старение 450 | — |
| БрМц5 | 1007 | 8,6 | 20,4 | 41,9 | 0,143 | 102 900 | — | 800—850 | — | 700—750 | 20 |

48. Механические свойства безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [13, 17, 18, 24]

| Бронза | σ_B , МПа | δ | ψ | σ_T | σ_{-1} | НВ | a_H , кДж/м ² | Коэффициент трения | |
|-----------------|------------------|----------|--------|------------|---------------------------------------|-----------|----------------------------|--------------------|------|
| | | % | | | | | | МПа | |
| БрА5: | | | | | | | | | |
| литая в кокиль | 275 | 55 | 48 | 68 | — | 640 | 1570 | 0,0070 | 0,30 |
| мягкая | 370 | 65 | 70 | 155 | — | 590 | 1080 | — | — |
| твердая | 785 | 4 | — | 490 | При 100·10 ⁶ циклов 130 | 1960 | — | — | — |
| БрА7: | | | | | | | | | |
| литая в кокиль | 295 | 45 | — | 245 | — | 690 | 1470 | 0,012 | — |
| мягкая | 410—490 | 65—75 | 75 | — | — | 690 | — | — | — |
| твердая | 970 | 2—10 | 40 | — | При 10 ⁶ циклов 153 | 1570—2200 | — | — | — |
| горячекованная | 410—490 | 60—70 | 70—75 | — | 153 | 690—780 | — | — | — |
| БрАЖ9—4: | | | | | | | | | |
| литая в кокиль | 295—390 | 10—20 | 30 | 195 | — | 1200—1370 | 620 | 0,004 | 0,18 |
| мягкая | 390—490 | 35—45 | — | — | — | 980—1200 | — | — | — |
| твердая | 490—689 | 4—6 | — | 345 | При 40·10 ⁶ циклов 206 | 1570—1960 | — | — | — |
| БрАЖМц10—3—1,5: | | | | | | | | | |
| литая | 490 | 20 | 25 | 155 | — | — | 590—780 | 0,012 | — |
| мягкая | 390—490 | 20—30 | 55 | — | — | 1230—1370 | — | — | 0,21 |
| твердая | 590—690 | 9—12 | — | 185 | При 15·10 ⁶ циклов 275 | 1570—1960 | — | — | — |

Продолжение табл. 48

| Бронза | σ_B , МПа | δ | ψ | σ_T | σ_{-1} | НВ | a_H , кДж/м ² | Коэффициент трения | |
|-------------------------|------------------|----------|--------|------------|---------------------------------------|-----------|----------------------------|--------------------|------|
| | | % | | | | | | МПа | |
| БрАЖН10—4—4: | | | | | | | | | |
| литая | 750 | 10 | 12 | 295 | — | 1960 | 295—390 | 0,011 | 0,23 |
| мягкая | 440—590 | 35—45 | 45 | — | — | 1420 | 410 | — | — |
| твердая | 735—815 | 9—15 | 11 | — | При 50·10 ⁶ циклов 345 | 1760—2250 | — | — | — |
| БрАМц9—2: | | | | | | | | | |
| мягкая | 390—490 | 20 | — | 195 | — | 880—1180 | 685 | 0,006 | 0,18 |
| твердая | 700 | 4—5 | — | 490 | При 10 ⁶ циклов 206 | 1670 | — | — | — |
| прессованная | 390 | 25 | — | 235 | — | 1570 | — | — | — |
| БрБ2: | | | | | | | | | |
| мягкая | 390—590 | 30—50 | 65 | 245—349 | — | 1270—1470 | — | — | — |
| твердая | 785 | 2—4 | — | 860 | При 100·10 ⁶ циклов 185 | — | — | — | — |
| закаленная, состаренная | 1370 | 1—2 | — | 1250 | — | 3430—3920 | 685—1123 | 0,05 | — |
| литая | — | — | 46 | — | — | 1370 | 655 | 0,016 | — |
| БрБ2,5: | | | | | | | | | |
| литая | 440 | 30 | 42 | — | — | 1130 | — | — | — |
| состаренная | 1220 | 2 | — | 1080 | — | 3900 | — | — | — |
| БрБНТ1,9: | | | | | | | | | |
| мягкая | 390—590 | 30—50 | 70 | — | — | 830 | — | — | — |
| твердая | 590—880 | 1—3 | — | — | — | 1270 | — | — | — |
| состаренная | 1220 | 2,5 | — | 980 | — | 3330 | — | — | — |

Продолжение табл. 48

| Бронза | σ_B , МПа | δ | ψ | σ_T | γ | НВ | $\sigma_{нч}$, кДж/м ² | Коэффициент трения | |
|---|--------------------|---------------|--------|------------|--------------------------------------|-------------|------------------------------------|--------------------|------------|
| | | | | | | | | со смазкой | без смазки |
| БрБНП1,7: мягкая твердая состаренная | 390—490 | 50 | 75 | — | — | 835 | — | — | — |
| | 590—880 1130 | — 3,5 | — | — | — | — 3530 | — | — | — |
| БрКМц3—1: литая | 340 | 25 | — | 100 | При 10 ⁸ циклов 108 | 930 | 1470 | 0,013 | 0,4 |
| | 340—390 685 | 55—60 6—13 | — | 155 410 | 98 206 | 785 1900 | — | — | — |
| БрКН1—3: мягкая твердая | 340 | 30 | 70 | 145 | — | 735 | — | — | — |
| | 610 | 6 | 50 | 590 | При 20·10 ⁶ циклов 206 | 1670 | — | 0,017 | 0,45 |
| состаренная деформированная и со- старенная | 885 | 8 | 20 | 540 | — | 1760 | — | — | — |
| | 835 | 10 | 30 | 785 | 285 | 2160 | 390—980 | — | — |
| БрМц5: литая мягкая твердая | 245 | 30 | — | 145 | — | 690 | 1960 | 0,013 | 0,7 |
| | 295—350 490—590 | 35—45 2 | 50 | — 490 | — | 750 1570 | — | — | — |

49. Механические свойства безоловянных бронз при низких температурах [17, 18]

| Температура, °С | σ_B , МПа | δ , % | ψ , % | σ_T , МПа | $\sigma_{нч}$, кДж/м ² |
|---|------------------|--------------|------------|------------------|------------------------------------|
| БрА5 | | | | | |
| 17 | 412 | 61 | 70 | — | — |
| —196 | 568 | 81 | 76 | — | — |
| —253 | 637 | 83 | 72 | — | — |
| БрА7 | | | | | |
| 20 | 529 | 26 | 29 | 182 | — |
| —10 | 529 | 33 | 30 | 184 | — |
| —40 | 539 | 35 | 36 | 185 | — |
| —80 | 566 | 31 | 30 | 186 | — |
| —120 | 607 | 32 | 31 | 190 | — |
| —180 | 662 | 29 | 30 | 201 | — |
| БрБ2,5 | | | | | |
| Закалка с 800 °С в воду: | | | | | |
| 20 | 524 | 36 | 50 | 167 | — |
| —80 | 598 | 48 | 54 | 201 | — |
| —180 | 769 | 41 | 57 | 343 | — |
| БрБ2,5 | | | | | |
| Закалка с 800 °С в воду и старение при 300 °С, 2 ч: | | | | | |
| 20 | 1282 | 2,6 | 5 | 865 | — |
| —10 | 1303 | 0,8 | 9 | 872 | — |
| —40 | 1293 | 0,4 | 5 | 813 | — |
| —80 | 1392 | 0,4 | 5 | 1015 | — |
| —120 | 1372 | 0,4 | 4 | 960 | — |
| —180 | 1470 | 3 | 6 | 1370 | — |
| БрКМц3—1 | | | | | |
| Пруток холоднотянутый: | | | | | |
| 25 | 519 | 39,8 | 75,1 | — | — |
| 0 | 523 | 31,2 | 70,4 | — | — |
| —80 | 568 | 31,7 | 72,4 | — | — |
| —190 | 690 | 36,2 | 72,5 | — | — |
| БрАМц9—2 | | | | | |
| Пруток прессованный, отожженный: | | | | | |
| 20 | 529 | 51 | — | 147 | 129 |
| —20 | 539 | 45 | — | 196 | 129 |
| —40 | 549 | 48 | — | 196 | 129 |
| БрАЖ9—4 | | | | | |
| Пруток прессованный, отожженный: | | | | | |
| 20 | 602 | 31 | — | 255 | 32,3 |
| —20 | 622 | 27 | — | 274 | 29,4 |
| —40 | 632 | 27 | — | 284 | 26,5 |

50. Круглый прокат из безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [11, 23]

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % | НВ, МПа |
|--|------------------|--------------|-----------|
| Прутки круглые (ГОСТ 1628—78) <i>Диаметр 16—160; 5—40</i> | | | |
| БрАЖ9—4 прессованная | ≥ 539 | ≥ 15 | 1078—176 |
| БрАМц9—2: тянутая | ≥ 539 | ≥ 12 | — |
| прессованная | ≥ 470 | ≥ 15 | — |
| <i>Диаметр 30—100</i> | | | |
| БрАЖМц10—3—1,5 прессованная | ≥ 588 | ≥ 12 | 1274—1960 |
| Прутки квадратные и шестигранные (ГОСТ 1628—78) <i>Размер сечения 5—36</i> | | | |
| БрАЖН10—4—4 прессованная | ≥ 637 | ≥ 5 | 1670—1960 |
| БрКМц3—1: прессованная | ≥ 343 | ≥ 20 | — |
| тянутая | ≥ 470 | ≥ 15 | — |
| катаная | ≥ 392 | ≥ 15 | — |
| БрКН1—3 прессованная | ≥ 490 | ≥ 10 | — |
| Прутки (ГОСТ 15835—70) <i>Диаметр 5—40; 42—100</i> | | | |
| БрБ2: мягкая (после закалки или отжига) | 392—588 | ≥ 25 | 980—1470 |
| тянутая твердая (холоднодеформированная, закалка) | 637—882 | ≥ 1 | 1470 |
| прессованная | ≥ 441 | ≥ 20 | — |
| тянутая и состаренная после закалки | 1078 | ≥ 2 | 3136 |
| состаренная после закалки и холодной деформации | 1176 | ≥ 2 | 3332 |
| Проволока круглая, квадратная (ГОСТ 5222—72) <i>Диаметр 0,1—10</i> | | | |
| БрКМц3—1 твердая | ≥ 833 | ≥ 1 | — |
| Проволока (ГОСТ 15834—77) <i>Диаметр 0,06—12</i> | | | |
| БрБ2: мягкая (после закалки) | 392—637 | ≥ 20 | — |
| твердая (после закалки и старения) | 735—1176 | — | — |

51. Плоский прокат из безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [11, 17, 18]

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % | НВ, МПа |
|---|------------------|--------------|---------|
| Полоса, ленты (ГОСТ 1789—70) <i>Толщина 0,02—6; ширина 10—300; длина 2000</i> | | | |
| БрБ2: мягкая (после закалки) | 392—588 | 30 | <1274 |
| твердая (деформированная после закалки на 30—40 %) | 588—931 | 2,5 | <1670 |
| состаренная после закалки | 1078—1470 | 2 | <3234 |
| состаренная после деформации на 30—40 % | 1127—1568 | 1,5 | <3528 |
| БрБНТ 1,9: мягкая (после закалки) | 392—588 | 30 | <1176 |
| твердая (деформация после закалки на 30—40 %) | 588—931 | 2,5 | 1568 |
| состаренная после закалки | 1078—1470 | 2 | 3234 |
| состаренная после деформации на 30—40 % | 1127—1568 | 1,5 | 3528 |
| БрБНТ 1,7: твердая (деформация после закалки на 30—40 %) | 588—931 | 2,5 | 1470 |
| состаренная после деформации на 30—40 % | 1078—1470 | 2 | 3332 |
| Ленты | | | |
| БрА5: мягкая | ≥ 274 | ≥ 33 | — |
| полутвердая | ≥ 480 | ≥ 10 | — |
| твердая | ≥ 588 | $\geq 2,5$ | — |
| Ленты для пружин (ГОСТ 1048—79) <i>Толщина 3,1; ширина 200—300</i> | | | |
| БрА7: мягкая | 392 | 35 | — |
| термообработанная | ≥ 539 | 10 | — |
| твердая | 539—735 | 5 | — |
| особо твердая | ≥ 735 | — | — |
| Полосы, ленты (ГОСТ 1595—71) <i>Толщина 1—22; ширина 10—300; длина 1000—1500</i> | | | |
| БрАМц 9—2: горячекатаная | ≥ 441 | ≥ 15 | — |
| мягкая | ≥ 441 | ≥ 18 | — |
| твердая | ≥ 588 | ≥ 5 | — |
| Полосы и ленты (ГОСТ 4748—70) <i>Толщина 0,05—10; ширина 10—300; длина 500—5000</i> | | | |
| БрКМц 3—1: мягкая | ≥ 343 | ≥ 35 | — |
| полутвердая | 470—588 | ≥ 10 | — |
| твердая | 588—784 | ≥ 5 | — |
| особо твердая | ≥ 784 | — | — |

52. Свойства литейных безоловянных бронз [10, 17, 18, 24]

| Бронза | ρ , г/м ³ | Температура плавления, °С | $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ | λ , Вт/(м·°С) | $\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м | E | σ_B | σ_T |
|----------------|---------------------------|---------------------------|--|-----------------------|----------------------------|---------|------------|------------|
| | | | | | | | | |
| БрА10Ж3Мц2 | 7,5 | 1045 | 16 | 58,6 | 0,189 | 98 000 | 490 | 157 |
| БрА10Ж4Н4Л | 7,5 | 1040 | 17,1 | 75,4 | 0,193 | 112 700 | 590 | 294 |
| БрА9Мц2Л | 7,6 | 1060 | 17 | 71,2 | 0,11 | 90 280 | 440 | 196 |
| БрА10Мц2Л | — | — | — | — | — | — | 490 | — |
| БрА9Ж4 | 7,6 | 1040 | 16,32 | 58,6 | 0,123 | 110 700 | 390 | 196 |
| БрА7Ж1,5С1,5 | — | — | — | — | — | — | 290 | — |
| БрА11Ж6Н6 | — | — | — | — | — | — | 590 | — |
| БрС30 | 9,54 | 954 | 18,4 | 142,4 | — | 75 500 | 74,5 | 39 |
| БрС60Н2,5 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| БрА9Ж3Л | 7,6 | 1040 | 16 | 58,6 | 0,11 | 120 500 | 490 | 196 |
| БрСу6С12Ф0,3 | 8,0 | — | 17,8 | 46 | — | 78 400 | 147 | — |
| БрСу6Н2 | 8,7 | 1065 | 17,9 | 62,8 | — | 93 100 | 255 | — |
| БрСу6Ф1 | 8,5 | — | 17,3 | 4,6 | — | 93 100 | 216 | — |
| БрСу3Н3Ц3С20Ф | 9,1 | — | 17,4 | 54,4 | — | 73 500 | 167 | — |
| БрА9Ж4Н4Мц1 | — | — | — | — | — | — | 587 | — |
| БрА7Мц15Ж3Н2Ц2 | — | — | — | — | — | — | 607 | — |

| σ_{-1} | δ | ψ | σ_H , кДж/м ² | НВ, МПа | Линейная усадка, % | Жидкотекучесть, см | Обрабатываемость резанием, % | Коэффициент трения | | Коррозионная стойкость, г/(м ² ·сутки) | |
|---|----------|--------|---------------------------------|---------|--------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|------------|---|--------------------|
| | | | | | | | | со смазки | без смазки | 10 %-ная H ₂ SO ₄ | морская вода |
| В морской воде при 15·10 ⁶ циклов 275 | 20 | 25 | 686 | 980 | 2,4 | 70 | 20 | 0,012 | — | 2,7 | 1,0 |
| В морском тумане при 50·10 ⁶ циклов 343 | 10 | 12 | 490 | 1670 | 1,8 | 66—85 | 20 | 0,011 | 0,23 | 0,58 | 0,18 |
| При 20·10 ⁶ циклов 137. В морской воде при 40·10 ⁶ циклов 98 | 20 | — | 686 | 982 | 1,7 | 48 | 20 | 0,006 | 0,18 | — | 0,001—0,009 мм/год |
| — | 12 | — | — | 1078 | — | — | — | — | — | — | — |
| При 20·10 ⁶ циклов 137; при 40·10 ⁶ циклов в морской воде 108 | 10—20 | 30 | 588 | 980 | 2,49 | 85 | 20 | 0,004 | 0,18 | 0,40 | 0,25 |
| — | 18 | — | — | 980 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 2 | — | — | 2450 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 5 | 7 | 76,5 | 275 | — | — | — | 0,009 | 0,165 | — | — |
| При 10 ⁶ циклов 27,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| При 20·10 ⁶ циклов в морской воде 127; при 40·10 ⁶ циклов 108 | 10—12 | — | 196 | 980 | — | — | — | 0,004 | 0,18 | — | — |
| — | 2 | — | — | 588 | 1,3 | — | — | — | — | — | — |
| — | 6 | — | — | 804 | — | 22 | — | 0,013 | — | — | — |
| — | 5 | — | — | 784 | 1,3 | 35 | — | — | — | — | — |
| — | 2 | — | — | 637 | 1,25 | 30 | — | — | — | — | — |
| — | 12 | — | — | 1568 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 18 | — | — | 637 | — | — | — | — | — | — | — |

53. Физические свойства, технологические характеристики и области применения

| Сплав | Температура плавления, °С | | ρ , т/м ³ | λ , Вт/(м·°С) | c_p , Дж/(кг·°С) | $\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м | $T_{кр1}$, °С-1 | $\alpha \cdot 10^{-6}$, °С-1 | Температура, °С | | | | Область применения | | |
|--------------------------------------|---------------------------|---------|---------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------|--|
| | Ликвидус | Солидус | | | | | | | горячей обработки | отжига | низкотемпературного отжига | рекристаллизации | | Обрабатываемость резанием, % | |
| Мельхор: МНЖМц30—1—1 МН19 | 1230 | 1170 | 8,9 | 37,3 | — | 0,42 | 0,0012 | 16 | 142 100 137 200 | 860—950 900—1030 | 750—810 600—780 | 250—300 — | 450 420 | 20 — | Теплообменные аппараты в морском судостроении (конденсаторные трубы и термостаты), медицинский инструмент, детали точной механики и химической промышленности, штампованные детали |
| | 1190 | 1130 | 8,9 | 38,5 | — | 0,287 | 0,00029 | 16 | | | | | | | |
| Нейзильбер МНЦ15—20 | 1080 | — | 8,76 | 27,2—35,6 | 397,7 | 0,256 | 0,0002 | 16,6 | 137 200 | 800—970 | 700—750 | 250—300 | 400—450 | 20 | Детали приборов в электротехнике, радиотехнике, медицине, арматуре, посуда, точная механика |
| Свинцовый нейзильбер МНЦ16—29—1,8 | 1120 | 965 | 8,82 | — | — | — | — | — | 124 500 | — | 700—750 | 250 | 400 | 50 | Детали часовой промышленности и приборов |
| Куниаль А МНА13—3 | 1183 | 1120 | 8,5 | — | — | — | — | — | — | 900—1000 | — | Закалка 900; старение 500 | 600 | — | Изделия повышенной прочности |
| Куниаль Б МНА6—1,5 | — | 1145 | 8,7 | — | — | — | — | — | — | 850—900 | — | Закалка 900; старение 500 | 600 | — | Пружины ответственного назначения, изделия электротехнической промышленности |
| МН95—5 | 1120 | 1086 | 8,7 | 100,5 | 376,8 | 0,08 | 0,0015 | 16,4 | — | 950—1000 | 650 | — | 350 | — | Изделия машиностроения |
| МНЖ5—1 | 1120 | — | 8,7 | 129,8 | — | 0,07 | 0,0015 | 16,4 | — | 900—1000 | 800—850 | — | 350 | — | Конденсаторные трубы, сварные конструкции в судостроении |
| МН10 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 400 | — | То же |

конструкционных медно-никелевых сплавов [13, 17, 18, 23]

54. Механические свойства и коррозионная стойкость конструктивных медно-никелевых сплавов [10, 13, 17, 18, 24]

| Сплав | σ_B , МПа | δ | ψ | σ_T | σ_{-1} |
|--|------------------|----------|--------|------------|---------------------------------------|
| | | % | | МПа | |
| Мельхиор: МНЖМц30-1-1: | — | — | — | — | При 40·10 ⁶ циклов: |
| мягкий | 343—441 | 25—40 | 50 | — | 176 |
| твердый | 539—637 | 3—9 | — | — | 216 |
| МН19: | | | | | — |
| твердый | 490—784 | 3—5 | — | 392—588 | — |
| мягкий | 294—392 | 35—40 | 76 | — | При 100·10 ⁶ циклов 118 |
| Нейзильбер МНЦ15-20: | | | | | — |
| мягкий | 372—441 | 35—50 | — | 137 | При 100·10 ⁶ циклов |
| твердый | 588—784 | 2—4 | 5,2 | — | 118—137 |
| литой | — | — | 32 | — | — |
| Свинцовый нейзильбер МНЦС16-29-1,8: | | | | | — |
| мягкий | 343—441 | 40—45 | — | — | — |
| твердый | 588—686 | 2—4 | — | — | — |
| Кунналь А: МНА13-3: | | | | | — |
| мягкий | 372—461 | 10—15 | — | — | — |
| твердый | 882—931 | 2—5 | — | — | — |
| Кунналь Б: МНА6-1,5: | | | | | — |
| мягкий | 343—441 | 28—40 | 80 | 78,4 | — |
| твердый | 637—735 | 4—7 | 50 | — | — |
| МН95-5: | | | | | — |
| мягкий | 245—294 | 30—50 | 70 | 196 | — |
| твердый | 441—490 | 2—6 | — | 343—392 | — |
| МНЖ5-1: | | | | | — |
| мягкий | 216—255 | 50—60 | — | — | — |
| твердый | 390—490 | 5—10 | — | — | — |
| МН10: | | | | | — |
| мягкий | 245—294 | 44—50 | 40 | 98—196 | — |
| твердый | 490 | 2—8 | — | 294—392 | — |

Медно-никелевые сплавы [10, 13, 17, 18, 24]

| σ_B , МПа | НВ, МПа | Коррозионная стойкость (скорость коррозии), мм/год | | | | | | |
|------------------|------------------|--|--------------|-------------|-------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | | Пресная вода | Морская вода | Водяной пар | Морская атмосфера | Сельская атмосфера | 50 %-ная азотная кислота, мм/сут | 10 %-ная серная кислота |
| — | — | 0,03 | 0,03—0,13 | 0,0025 | 0,0011 | 0,00035 | 6,4 | 0,08 |
| Литой 882 | 588—686 980 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 1176 686 | 0,03 | — | — | 0,001 | 0,00035 | — | 0,1 |
| — | 686 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 1568—1715 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 490 | — 2548 | — | — | — | — | — | — | — |
| 1176 | — 2058 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | 862 | — | — | — | — | — | — | — |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| — | — | — | 0,01 | — | — | — | — | — |
| — | 882—980HV 372 | — | — | — | — | — | — | — |

с пониженном температуры. Поэтому кунниаль относится к дисперсионно-твердеющим сплавам. Они упрочняются после термической обработки, заключающейся в закалке с 900—1000 °С в воду и старении при 500—600 °С, 1—2 ч. При старении происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием двух- или трехфазной структуры с мелкодисперсными выделениями θ -фазы, представляющей собой соединение NiAl, или одновременно θ - и β -фазы, представляющей собой соединение NiAl₂.

К конструкционным медно-никелевым сплавам также относятся сплавы МН95—5 и МНЖ5—1, обладающие высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью, они не склонны к коррозионному растрескиванию.

Физические и механические свойства, технологические характеристики, области применения и полуфабрикаты медно-никелевых сплавов приведены в табл. 53—57.

Были предложены новые группы дисперсионно-твердеющих сплавов на основе системы Cu—Ni. Это сплавы для токоведущих пружин, работающих при высоких температурах (до 250 °С) состава: 1) Ni (15—20)%, Cr (3,5—4)%, Mn (2,1—3)%, V (0,01—0,5)%, Se (0,01—0,05)%, остальное Cu; после термической обработки (закалка + старение) сплав имеет следующие свойства: 370 HV; $\sigma_B = 1250$ МПа; $\delta = 3\%$; 2) Ni (4—4,5)%, Si (0,8—1,2)%, Cr (0,4—0,6)%, Al (0,7—1,1)%, Mg (0,3—0,6)%, Li (0,005—0,04)%; остальное Cu; после термической обработки (закалка + старение): 310 HV; $\sigma_B = 1000$ МПа; $\sigma_{0,2} = 930$ МПа; $E = 130$ ГПа; $\sigma_{упр} = 825$ МПа; электропроводность составляет 20% электропроводности меди.

Разработана принципиально новая группа сплавов типа нейзильбер с двухфазной ($\alpha + \beta$) структурой, например сплав Cu—15% Ni—37,5% Zn. К этим сплавам применяется обработка «микродуплекс», заключающаяся в закалке с последующей холодной деформацией с заданной степенью обжатия, определяющей возможность прохождения рекристаллизации при старении с одновременным выделением β -фазы.

55. Механические свойства медно-никелевых сплавов при низких температурах [11, 17, 18]

| Температура, °С | σ_B , МПа | σ_T , МПа | δ , % | ψ , % |
|-----------------|------------------|------------------|--------------|------------|
|-----------------|------------------|------------------|--------------|------------|

Мельхиор МН19

| | | | | |
|------|-----|-----|----|----|
| 20 | 354 | 190 | 26 | 78 |
| -10 | 386 | 197 | 28 | 77 |
| -40 | 410 | 199 | 29 | 77 |
| -80 | 423 | 200 | 29 | 76 |
| -120 | 455 | 200 | 28 | 75 |
| -180 | 506 | 201 | 36 | 72 |

Нейзильбер МНЦ15—20

Холоднокатанный

| | | | | |
|------|-----|-----|------|------|
| 20 | 507 | 476 | 21,5 | 54,3 |
| -183 | 643 | 553 | 35,5 | 62,6 |

Отожженный

| | | | | |
|------|-----|-----|------|------|
| 20 | 446 | 203 | 46,8 | 62,3 |
| -183 | 572 | 263 | 56,8 | 69,5 |

Кунниаль Б МНА6—1,5

| | | | | |
|------|-----|-----|----|----|
| 20 | 256 | 78 | 42 | 80 |
| -10 | 341 | 94 | 40 | 80 |
| -40 | 383 | 111 | 41 | 80 |
| -80 | 394 | 113 | 43 | 79 |
| -120 | 423 | 103 | 44 | 82 |
| -180 | 462 | 158 | 49 | 82 |

Термообработанный (закалка + старение)

| | | | | |
|------|-----|-----|----|----|
| 20 | 625 | — | 24 | 50 |
| -10 | 687 | 377 | 22 | 48 |
| -40 | 711 | 423 | 25 | 57 |
| -80 | 692 | 354 | 23 | 57 |
| -120 | 740 | 435 | 26 | 63 |
| -180 | 735 | 377 | 26 | 67 |

56. Плоский прокат из медно-никелевых сплавов [11, 18, 23]

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % |
|--|------------------|--------------|
| Полоса горячекатаная, холоднокатаная (ГОСТ 5063—73) | | |
| <i>Толщина 0,5—20; ширина 40—600; длина 400—2000</i> | | |
| МНЖМЦ30—1—1: | | |
| мягкий | 294 | 30 |
| твердый | 392 | 3 |
| МН19: | | |
| мягкий | 294 | 30 |
| твердый | 392 | 3 |
| МНЦ15—20: | | |
| мягкий | 343 | 35 |
| твердый | 539 | 1 |
| особо твердый | 637 | 1 |
| Лента (ГОСТ 5187—70) | | |
| <i>Толщина 0,1—2; ширина 6—300; длина 5000</i> | | |
| МН19: | | |
| мягкий | 294 | 25 |
| твердый | 392 | 2,5 |
| МНЦ15—20: | | |
| мягкий | 343 | 30 |
| полутвердый | 441—539 | 4 |
| твердый | 539—686 | 2 |
| особо твердый | 686 | — |
| Полосы | | |
| МНЦ16—29—1,8: | | |
| мягкий | — | — |
| полутвердый | — | — |
| твердый | — | — |
| Кунниаль Б: | | |
| МНА6—1,5 термообработанный | 539 | 3 |
| Листы | | |
| <i>Толщина 4,5—22</i> | | |
| МНЖ5—1: | | |
| холоднокатанный | 245 | 30 |
| мягкий | — | — |
| горячекатанный | 245 | 30 |

57. Круглый прокат из медно-никелевых сплавов [11, 18, 23]

| Полуфабрикат (размеры, мм) | σ_B , МПа | δ , % |
|---|------------------------|--------------|
| Трубы (ГОСТ 10092—75) | | |
| <i>Диаметр 10—35; толщина стенок 0,8—4</i> | | |
| МНЖМЦ30—1—1: тянутый мягкий полутвердый | 372 490 | 23 10 |
| Трубы (ГОСТ 17217—79) | | |
| <i>Диаметр 6—275; толщина стенок 1—60</i> | | |
| МНЖ5—1: тянутый прессованный | 255 225 | 30 25 |
| Трубы | | |
| <i>Диаметр 25—168</i> | | |
| МН95: мягкий твердый | 216 284 | 33 — |
| Прутки | | |
| МНЦ15—20 тянутый и катанный мягкий диаметром: | | |
| 6—50 | 294 | 30 |
| 6—22 | 441 | 5 |
| 23—30 | 392 | 7 |
| 32—50 | 343 | 8 |
| Кунниаль А диаметром 60: | | |
| МНА13—3: прессованный | 686 | 7 |
| МНЖ5—1: прессованный | 196 | 30 |
| Проволока (ГОСТ 5220—78) | | |
| <i>Диаметр 0,1—0,5</i> | | |
| МНЦ15—20: мягкий полутвердый твердый | 343 441 686—1078 | 20 4 — |
| Проволока твердая | | |
| плющенная | 637 | 1 |
| твердая | 539—784 | — |

Выделение β -фазы облегчает зарождение рекристаллизованных зерен вследствие обеднения пересыщенного твердого раствора и тормозит их рост благодаря снижению энергии их границ. В результате такой обработки образуются сверхмелкие зерна и мельчайшие выделения второй фазы, что приводит к росту механических свойств, особенно предела усталости, а при старении приобретает сверхпластичность [13].

Список литературы

- Бобро Ю. Г. Легированные чугуны. М.: Металлургия, 1976. 288 с.
- Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н. Основы металлографии чугуна. М.: Металлургия, 1969. 416 с.
- Воробьев Ю. А., Рябов С. П. Повышение точности отливок. ЦП НТО Машпром. М.: Машиностроение, 1980. 32 с.
- Высококачественные чугуны для отливок/В. С. Шумихин, В. П. Кутузов, А. И. Храменков и др. М.: Машиностроение, 1982. 222 с.
- Гини Э. Ч. К вопросу о пластических свойствах серого чугуна//Машины и автоматизация литейного производства. Труды МВТУ № 187. М.: 1975. С. 102—129.
- Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М.—Л.: Машиностроение, 1966. 562 с.
- Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: Справочник/М. Е. Дриц, Н. Р. Бочвар, Л. С. Гузей и др. М.: Наука, 1979. 248 с.
- Колотило Д. М., Челябинов Л. М., Углеродные литейные формы. Киев: Наукова думка, 1971. 163 с.
- Кристалл М. К., Титенский Э. Г. Свойства ковкого чугуна. М.: Металлургия, 1967. 231 с.
- Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1970. 364 с.
- Машиностроительные материалы: Справочник/Под ред. В. М. Раска-
- това. М.: Машиностроение, 1980. 512 с.
- Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом/Э. В. Захарченко, Ю. Н. Левченко, В. Г. Горенко и др. Киев: Наукова думка, 1986. 248 с.
- Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г. Пружинные сплавы цветных металлов. М.: Металлургия, 1984. 364 с.
- Пивоварский Е. Высококачественный чугун. Т. 1. М.: Металлургия, 1965. 650 с.
- Прейскурант № 25-01. Оптовые цены на отливки, поковки и горячие штамповки. М.: Прейскурантиздат, 1981. 463 с.
- Розенберг В. М., Иедлинская З. М., Черникова А. В.//Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Труды института Гипроцветметобработка. М.: Металлургия, 1978. Вып. 55. С. 47—49.
- Рубин М. Б., Бахарев В. Е. Подшипники в судовой технике. Л.: Судостроение, 1987. 344 с.
- Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Металлургия, 1974. 488 с.
- Солнцев Л. А., Зайденберг А. М., Малый А. Ф. Получение чугунов повышенной прочности. Харьков: Вища школа, 1986. 152 с.
- Справочник по чугунному литью/Под ред. Н. Г. Гиршовича, Л.: Машиностроение, 1978. 758 с.
- Федюкин В. К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов. Л.: Ленинградский университет, 1977. 144 с.
- Чугунное литье в станкостроении/Г. И. Клецкин, Г. Г. Абрамов, И. М. Воловик и др. М.: Машиностроение, 1975. 320 с.
- Шпичинецкий Г. Е., Шпичинецкий Е. С. Медь, никель и их сплавы//Справочник металлста. М.: Машиностроение. Т. 2, 1976. С. 415—453.
- Шпагин А. И. Антифрикционные сплавы. М.: Металлургиздат, 1956. 320 с.

1. ПРОЦЕСС ИЗНАШИВАНИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Повышение надежности узлов трения машин — важная проблема современного машиностроения. Самая совершенная по замыслу и конструкции машина может оказаться неработоспособной из-за неудовлетворительного функционирования узлов трения — подшипников, подпятников, шарниров, направляющих, кулачковых механизмов, тормозных устройств и т. п. Трение и изнашивание при контакте деталей машин и инструмента с обрабатываемым материалом и внешней средой (почвой, дорогой, рудой, углем, строительными материалами, металлами и сплавами и т. п.) определяют эффективность выполнения ими рабочих функций.

Явления и процессы, происходящие в зоне взаимодействия поверхностей при трении и изнашивании в присутствии различных жидких и газообразных сред, многообразны и сложны [69]. На участках фактического контакта шероховатых поверхностей действуют громадные удельные нагрузки, определяемые в пределах твердостью материалов, находящихся в контакте. При граничной смазке давления перераспределяются незначительно. Лишь при условиях гидродинамической или эластогидродинамической смазки нагрузка в трущемся сопряжении распределяется более равномерно по номинальной площади контакта.

В зоне контакта вершин поверхностных неровностей при трении неизбежны громадные деформации сдвига и при тяжелых режимах трения (высокие скорости и нагрузки) возникают температуры (температурные вспышки), могущие достигать точки плавления материалов, находящихся в контакте. В

результате материал поверхностных неровностей, непосредственно участвующих в трении, а также оксидные и адсорбированные пленки и «зажатая» между поверхностями смазка находятся в своеобразных миниатюрных химических реакторах с экстремальными параметрами (по нагрузкам, температурам и сдвиговым деформациям). В этих короткоживущих (при больших скоростях скольжения) микрореакторах осуществляются различные физические и химические процессы в весьма неравновесных условиях с образованием новых веществ и состояний материалов трущихся тел.

Проблемы трения, изнашивания и смазки сложны. В них тесно переплелись интересы разных фундаментальных и прикладных наук: механики, физики, физической химии, химии, материаловедения, теории прочности и пластичности и т. п. Процессы на участках фактического контакта, в том числе и разрушения, приводящие к отделению частиц, происходят при весьма быстро изменяющихся неравновесных условиях.

В соответствии с ГОСТ 27674—88 изнашивание классифицируется как процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела. В результате изнашивания возникает износ, определяемый в абсолютных или относительных единицах. В абсолютных единицах износ определяется по потере массы путем взвешивания, уменьшению линейных размеров, изменению объема детали. Износ, отнесенный к пути трения, объему выполненной работы, работе трения и т. д., является показателем интенсивности изнашивания. Износ, отнесенный ко времени процесса трения, определяет скорость изнашивания.

Различают износ при трении без смазки, граничной смазке и при наличии абразива. Износ по характеру деформирования поверхностей трения подразделяют на износ при упругом контакте, упругопластическом контакте и при микрорезании.

Работа трущегося сопряжения характеризуется тремя стадиями процесса изнашивания: приработкой, установившимся процессом изнашивания и периодом катастрофического износа.

Процесс приработки занимает короткий период времени и характеризуется повышенными активацией поверхностей, интенсивностью изнашивания и тепловыделением, что приводит к физико-химическим изменениям поверхностных слоев и созданию равновесной шероховатости. В результате приработки в системе вырабатывается комплекс выгодных свойств, определяющий максимальную несущую способность трущегося сопряжения.

Виды и характеристики изнашивания определены ГОСТ 23.001—77. Различают: механическое изнашивание, происходящее в результате механических воздействий; коррозионно-механическое, когда помимо механических действуют химические или электрические воздействия, и абразивное. Абразивное (механическое) изнашивание происходит в результате режущего или царапающего действия твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. Разновидностями механического изнашивания являются также усталостное изнашивание, начальные стадии фреттинг-коррозии и др. При воздействии жидкой или газовой среды и абразива различают гидроабразивное или газоабразивное изнашивание, а без определяющего действия абразивных частиц — эрозивное изнашивание.

Нередко детали машин работают в условиях кавитации. Изнашивание в этом случае, получившее название кавитационного [36], происходит при захлопывании вблизи поверхности детали пузырьков газа или пара (каверн), что создает местное повышение давления или температуры, приводящее к отделению частиц износа и разрушению поверхностных слоев.

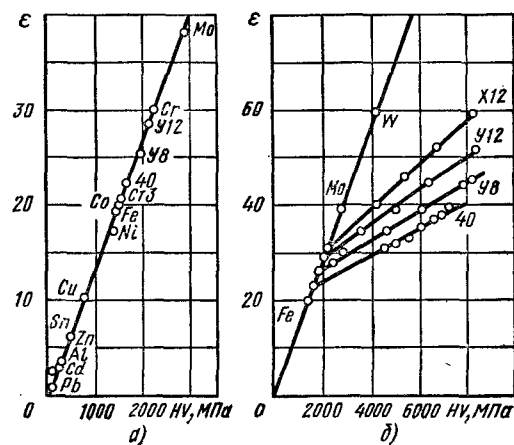
Большое количество трибосопряжений работает в условиях токоотсема. В этом случае возникает электроэрозивное изнашивание поверхностей трения в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

Закономерности процесса изнашивания зависят от условий эксплуатации конкретных трущихся узлов, режимов трения, материалов трущихся поверхностей, конструктивного исполнения и др.

Наибольший урон сельскохозяйственным машинам, горнодобывающему оборудованию, дорожностроительным машинам и т. д. наносит абразивное (и коррозионно-абразивное) изнашивание. Закономерности абразивного изнашивания (рис. 1) установлены фундаментальными исследованиями М. М. Хрущова и М. А. Бабичева [91, 92]. От естественного абразива (главным образом частиц SiO_2) с твердостью HV 10 000 МПа избавиться нельзя, можно только защищаться от него, используя уплотнения и, что более эффективно, применяя для трущихся сопряжений материалы с высокой твердостью (желательно превышающей твердость абразива). Как правило, такие материалы хрупки и непригодны для изготовления динамически нагруженных деталей машин. Решением этой проблемы является нанесение износостойких слоев. Повышение износостойкости в некоторых случаях достигается термической обработкой стальных деталей (объемной или поверхностной), различными химико-термическими методами модифицирования поверхностных слоев, дополнительными наклепом поверхностных слоев. Эффективно применение высоколегированных сталей (содержащих большое количество твердых карбидов), твердых сплавов, керамических материалов (например, корундовой керамики).

Одной из основных причин износа металлических материалов является схватывание трущихся поверхностей (по существу, твердофазная сварка). Среди различных предположений о механизме образования химических (или физических) связей между твердыми поверхностями наиболее широкое признание получили представления о необходимости преодоления для обра-

рис. 1. Зависимости относительной износостойкости ϵ при абразивном изнашивании (испытания при трении о шлифовальную шкурку) от твердости:



завания прочных связей между контактирующими поверхностями некоторого энергетического порога (энергии активации) [72, 73].

Явление схватывания при неблагоприятном соотношении механических свойств, находящихся в контакте твердых тел, приводит к образованию наростов («узлов схватывания»), задиров, заеданию, катастрофическому повреждению поверхностей трения и изнашиванию. Оно лежит также в основе так называемой фреттинг-коррозии [22] сопряжений, работающих при вибрации или относительном перемещении поверхностей с малой амплитудой (первая стадия представляет собой микросхватывание трущихся поверхностей).

Средством борьбы со схватыванием является применение смазочных материалов (жидких, пластичных и твердых). Однако смазочные пленки могут разрушаться и в этом случае неизбежен непосредственный контакт чистых (ювенильных) поверхностей.

Для предотвращения схватывания или снижения вызываемых повреждений до приемлемого уровня осуществляют следующие мероприятия:

а) для трущихся пар выбирают сочетание материалов с минимальной способностью к схватыванию;

б) легируют металлы с целью снижения способности к схватыванию и повышения протнвоадерных свойств;

в) повышают твердость сталей термической обработкой (закалкой);

г) изменяют состав и состояние поверхностных слоев химико-термической (цементация, азотирование, сульфидирование и т. д.) и поверхностной термической (закалка ТВЧ, лазерная и электронно-лучевая закалка) обработкой;

д) на поверхности трения наносят пленки мягких металлов и сплавов (индия, кадмия, олова, серебра, меди, латуни и т. п.);

е) вводят мягкие составляющие (свинец, олово) в антифрикционные сплавы (свинцовистые бронзы, алюминиево-оловянные сплавы);

ж) используют материалы, выполняющие функции твердой смазки (графит, дисульфид молибдена и другие халькогениды d -переходных металлов V—VI групп периодической системы элементов, фторопласт-4 и т. п.), или наносят соответствующие покрытия;

з) в пористую металлическую основу вводят жидкие или пластичные смазки (пористые самосмазывающиеся подшипники);

и) для изготовления деталей трущихся сопряжений применяют материалы, обладающие относительно материала контраста низкой адгезионной способностью (полимерные материалы, естественная и модифицированная древесина, углеграфитовые антифрикци-

1. Виды повреждений подшипников скольжения [12]

| Жидкостный режим трения | Смешанный или граничный режим трения | Без смазки |
|---|--|---|
| Усталостные повреждения (трещины, выкрашивание, разрушения) | Усталостные повреждения (трещины, выкрашивание, разрушения) | Износ вследствие схватывания, сопровождаемый вырывами и переносом металла с одной поверхности на другую |
| Износ в результате абразивного воздействия частиц, попадающих со смазкой | Износ в результате абразивного воздействия частиц и схватывания на отдельных участках поверхностей | Образование глубоких и широких борозд, приводящих к задиру трущихся поверхностей |
| Кавитационные повреждения вкладышей (местные и общие по всей или большей части поверхности) | Образование глубоких и широких борозд, приводящих к задиру трущихся поверхностей | Износ из-за смятия (пластической деформации трущихся поверхностей) |
| Коррозионные повреждения (общие или отдельных структурных составляющих) | | |

онные материалы, рубин и другие оксидные керамики, алмаз).

Эффективность действия смазочных материалов (жидких и пластичных) в предотвращении проявления схватывания трущихся поверхностей может быть повышена: введением в смазку поверхностно-активных, химически активных и полимеробразующих присадок, способствующих образованию на поверхностях прочных защитных пленок непосредственно в процессе трения; введением в смазку тонкодисперсных твердых веществ (графита, халькогенидов, металлов, полимеров и др.), предотвращающих непосредственный контакт поверхностей трения; обеспечением конструктивными мерами гидродинамических или гидростатических условий трения (поверхности при этом разделены слоем смазочного материала). Последнее относится также и к случаю газовой (газодинамической и газостатической) смазки. В некоторых случаях проявление схватывания может быть устранено применением газовых химически активных сред, образующих или способствующих образованию на поверхностях защитных пленок, препятствующих схватыванию (в зна-

чительной мере такую роль выполняет кислород воздуха).

Закономерности изнашивания некоторых трибосистем рассмотрим на примере подшипников скольжения коленчатых валов различных двигателей. Износ и повреждаемость таких подшипников определяется с учетом режима и рабочих температур (табл. 1).

В условиях жидкостной смазки интенсивность изнашивания незначительна и износ большей частью происходит вследствие попадания абразивных частиц. Для трущихся узлов характерен режим смешанного трения, когда имеются участки как жидкостной, так и граничной смазки. Такой режим часто возникает вследствие повышения давления и температуры, а иногда в связи с изменением геометрической формы подшипника в результате его износа, что, в частности, наблюдается у безвзорных подшипников скольжения грузовых вагонов.

Несущая способность таких подшипников с учетом износа баббитового слоя и условий работы определяется по критериям толщины масляного слоя, давления и произведения pv [11]. Результаты расчетов позволяют уста-

новить допустимые нормы эксплуатации вагонных подшипников по износу баббитового слоя (И), определяемому по изменению его толщины в зависимости от нагрузки, скорости и первоначального диаметрального зазора Δ .

При обнаружении повышенного износа шеек валов и подшипников и определении с помощью расчетов и соответствующих экспериментов наличия смешанного режима смазки искиывают пути перевода на жидкостной режим смазки. В соответствии с диаграммой Герси—Штрибека (рис. 2) образование такого режима (участок 3) возможно вследствие повышения вязкости смазки, угловой скорости и снижения давления. Смягчить условия работы трибосистемы иногда удается с помощью конструктивных изменений трущихся деталей. Например, бесканавочная конструкция подшипников коленчатого вала дизелей тепловозов позволила перевести работу таких подшипников в жидкостный режим смазки, устранить случаи задиров шеек коленчатых валов и существенно поднять долговечность трущегося узла [30].

В тех случаях, когда не удается перевести работу трибосистемы в условия жидкостной смазки, приходится искиывать пути обеспечения устойчивой работы и при смешанном режиме смазки. Это достигается подбором смазочных материалов (и присадок к ним), антифрикционных материалов и материалов цапф. При выборе смазочного материала надо ориентироваться на смазку, у которых переход из гидродинамического режима в режим нарушения сплошности происходит при более высокой температуре. Последнее достигается введением в смазку определенного количества и состава поверхностно-активных веществ (присадок), а также добавок различных металлических частиц (металлоплакирующие смазки), позволяющих в определенных условиях реализовать эффект избирательного переноса, и добавок других частиц, увеличивающих при контактировании поверхностей в режиме смешанной смазки долю участков с твердой смазкой. Области рационального использования различных антифрикционных сплавов и материалов цапф представлены в табл. 2 [12]. Рекомен-

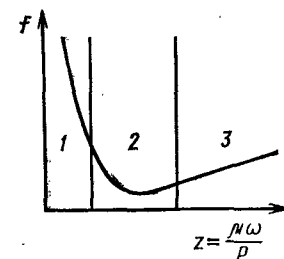


Рис. 2. Изменение коэффициента трения от комплексного параметра Зоммерфельда $z = \mu\omega/P$ (кривая Герси—Штрибека): 1 — зона граничной смазки; 2 — зона полужидкостной смазки; 3 — зона жидкостной смазки

дации по использованию различных металлов составлены с учетом технологических и конструктивных факторов. При этом учитывались показатели совместимости трущихся поверхностей.

В ряде случаев осуществляется работа подшипников в режиме трения без смазки. Это диктуется соответствующими конструктивными параметрами агрегатов и условиями работы (вакуум, высокий уровень нагрева и др.). Иногда трение без смазки является следствием аварийного состояния трибосистемы, возникающего при резком увеличении нагрузки, прекращении поступления смазки и по другим причинам. При трении без смазки сравнительно устойчивая работа достигается использованием антифрикционных материалов, содержащих твердые смазки и мягкие структурные составляющие и обладающих свойствами самосмазывания (например, металлофторопластового материала, алюминниво-оловяниого сплава и т. п.).

2. ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТИ

Материалы высокой твердости используются главным образом в трибосистемах, подверженных абразивному изнашиванию. Основным показателем, определяющим износостойкость при изнашивании закрепленным абразивом, имеющим твердость, намного превышающую твердость изнашиваемого материала, является твердость (микро-

2. Области рационального применения антифрикционных сплавов для подшипников скольжения [12]

| Сплавы | Условия работы | | | Рекомендуемые технологические и конструктивные факторы | | | |
|---|----------------|-----------|---------------|--|----------------------------------|-------------------------|--|
| | P , МПа | v , м/с | t масла, °C | Толщина слоя сплава, мм | Точность пригонки подшипника, мм | Твердость шейки НВ, МПа | Способ крепления сплава с корпусом |
| Баббиты всех марок | 1—5 | 2—5 | 50 | 3,0 | Десятые доли | — | Механический (в пазах) |
| | 1—5 | 5—10 | 60 | 3,0 | То же | — | Металлургический (прилуживание) |
| Баббиты: Б83, Б16, БН, БТ, Б6, БС1 БК2, СОС6-6, БС2, Б92 БК2, Б92 | 5—10 | 5—10 | 75 | 3,0 | Сотые доли | — | То же |
| | 5—12 8—15 | 10 15 | 80 100 | 1,0 0,1—0,3 | То же Тысячные доли | — | » » |
| Цинковые, нанесенные на сталь | 15—25 | 15 | 100 | 1,0 | То же | 3000 | Металлургический (прокатка или заливка) |
| Алюминиевые без мягкой составляющей, нанесенные на сталь | 15—25 | 15 | 100 | 0,5 | » | 3000 | Металлургический (прокатка) |
| Цельнолитые алюминиевые с мягкой фазой | 15—20 | 15 | 100 | — | » | 2000 | — |
| Свинцовистая бронза, нанесенная на сталь | 15—25 | 15 | 110 | 0,5 | » | 4000 | Металлургический (заливка или напекание) |
| Алюминиевые с мягкой фазой, нанесенные на сталь | 20—30 | 20 | 120 | 0,5 | » | 3000 | Металлургический (прокатка или заливка) |

твердость) поверхностного слоя [91, 92]. Определенная корреляция установлена и между износостойкостью материалов и модулем упругости. Если твердость материала близка или тем более намного превышает твердость абразива, показатели износостойкости резко возрастают. Условия, при которых в реальных случаях происходит абразивное изнашивание, разнообразны. Все это не позволяет однозначно ранжировать материалы по износостойкости (как это сделано, например, для прочности).

Сведений об износостойкости материалов высокой твердости, испытанных по какой-либо единой методике, нет. Приведенные в опубликованных работах данные, полученные по различным методикам и при несопоставимых условиях испытаний, не могут дать объективной оценки износостойкости твердых материалов. К тому же и свойства таких материалов зависят от технологии их получения, пористости и т. п.

Наиболее объективную информацию об относительной износостойкости рассматриваемых материалов, твердость которых существенно выше твердости основного природного абразива (оксида кремния), дают значения твердости и модуля упругости, указанные далее в таблицах. В значительной мере от этих характеристик зависят и противозадирные свойства материалов [73], важные для деталей машин, работающих в контакте не с абразивом, а друг с другом.

Из простых веществ высокой твердостью обладают лишь алмаз (углерод) и бор. Подавляющее большинство веществ с высокой твердостью — тугоплавкие химические соединения [51, 63, 65, 66, 101].

Представляют интерес металлоподобные карбиды, нитриды, бориды, силициды тугоплавких d -переходных металлов IV—VI групп Периодической системы. Большие перспективы у неметаллических бескислородных тугоплавких соединений — карбидов и нитридов бора и кремния, а также у твердых тугоплавких оксидов (алюминия, циркония и др.), ситаллов, нитрида алюминия, интерметаллидов и других соединений. Полезным комплексом триботехнических свойств должны также обладать

соединения f -переходных металлов (лантаноидов и актиноидов) с легкими элементами первых двух периодов (В, С, N, O, Si). Однако эти металлы более дороги и дефицитны, чем металлы «большой девятки».

Сложные тугоплавкие твердые соединения, содержащие несколько металлов и (или) металлоидов, изучены недостаточно и вследствие этого развитие материаловедения тугоплавких соединений требует серьезного внимания.

Из-за высокой хрупкости твердых соединений и трудности их обработки изготовление деталей из тугоплавких соединений в большинстве случаев нецелесообразно или экономически невыгодно. Основная область их применения — твердые составляющие композиционных материалов (например, твердых сплавов) и покрытия, наносимые самыми различными способами.

Сверхтвердые материалы. К сверхтвердым материалам (микротвердость которых превышает 50 000 МПа) относятся кубические модификации углерода (алмаз) и нитрида бора, свойства которых приведены в табл. 3 и 4.

Синтетические алмазы в виде порошков и плотных поликристаллических образований типа баллас и карбонадо используют для приготовления абразивного инструмента и абразивных паст. Баллас и карбонадо применяют для изготовления волок, резцов, шлифовальных кругов, а в дробленом виде — для производства абразивного инструмента. Спеканием смеси микропорошков синтетических и природных алмазов получают плотные поликристаллические образования алмаза (в виде цилиндров диаметром 3—4,5 мм и высотой 4 мм) с мелкозернистой структурой — СВ и дисмит. Прочность их при одноосном сжатии достигает 5000 МПа. Алмазы марки СВ предназначены для буровых коронок и долот, а также пил, применяемых при резке неметаллических материалов. Дисмит применяют для изготовления горнобурового инструмента, а также режущего инструмента (резцов, сверл и др.), используемого при обработке цветных металлов и сплавов, пластмасс, стеклопластиков.

Кубический нитрид бора получают только синтетическим путем из гексагональной модификации [101]. Приме-

3. Характеристики алмаза и кубического нитрида бора [66, 101]

| Характеристика | Алмаз | Кубический нитрид бора |
|---|-------------------|-----------------------------|
| Кристаллическая решетка | Кубическая | Кубическая |
| Период решетки, нм | 0,35675 | 0,36165 |
| Минимальное расстояние между атомами, нм | 0,154 | 0,156 |
| Плотность, т/м ³ : | | |
| теоретическая | 3,51 | 3,48 |
| пикнометрическая | 3,49—3,54 | 3,44—3,49 |
| Теплостойкость, °С | 850 | 1200 |
| Микротвердость по Кнуппу, МПа | 150 000 | 60 000 |
| Режущая способность при шлифовании корунда порошком зернистостью 10/7 | 3,2 | 0,8 |
| Модуль Юнга, МПа | 9·10 ⁹ | (8,09—9,73)·10 ⁹ |

яется главным образом для изготовления абразивного инструмента. По твердости кубический нитрид бора уступает алмазу, но существенно превосходит его по теплостойкости. Кроме того, он

4. Износостойкость алмаза, поликристаллических твердых материалов и твердых сплавов при трении о прослойку карбида бора № 8 (испытания по ГОСТ 5744—85) [93]

| Материал | Основа материала | Износостойкость, км/мм |
|--|------------------|------------------------|
| Алмаз — монокристалл (природный) | Алмаз | 50,0 |
| Поликристаллические твердые материалы: | | |
| СВСП | » | 10,0 |
| СКМ | » | 10,0 |
| Исмит | BN | 10,0 |
| СВА | Алмаз | 7,7 |
| АСПК | » | 6,6 |
| Гексаинт-Р | BN | 2,5 |
| Композит-05 | BN | 0,2 |
| ВК6-ОМ | WC | 0,3 |
| ВК6 | WC | 0,2 |

значительно менее адгезионно и химически активен по отношению к материалам на основе железа, никеля и кобальта [17]. В США кубический нитрид бора выпускается под названием боразон, в СССР — эльбор и кубонит [101]. Марки эльбора и кубонита: ЛО и КО обычной прочности, ЛР и КР повышенной. Разновидности поликристаллического материала (созданные на основе эльбора, кубонита, вюрцитоподобного и гексагонального нитрида бора) — эльбор-Р, гексаинт-Р, исмит, ПНТБ, композит и др. — выпускаются в виде пластины различной формы и цилиндрических вставок массой от 0,5 кар. до нескольких каратов. Изготавливают из них металлорежущий инструмент, применяемый при обработке труднообрабатываемых закаленных сталей, чугунов и сплавов с твердостью HRC > 40. Стойкость такого инструмента в 10—20 раз больше стойкости твердосплавного (при этом обеспечивается повышенная производительности в 2—4 раза).

К композиционным сверхтвердым материалам относится «славутич», не уступающий природным алмазам по износостойкости, но значительно превышающий их по прочности [101]. Изготавливают его в виде цилиндров и пластины различных размеров (до 25 мм). Применяют славутич для буровых долот, кругов (карандашей, брусков, роликов) и т. п.

5. Структура и свойства металлоподобных карбидов переходных металлов [63, 67, 101]

| Карбид | Кристаллическая решетка | ρ , т/м ³ | $T_{пл}$, °С | H, МПа | $\rho \cdot 10^3$, Ом·м | $E \cdot 10^{-4}$, МПа | $-\Delta C_{900}^0$, кДж·моль ⁻¹ |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------|--------|--------------------------|-------------------------|--|
| TiC | Кубическая | 4,94 | 3067 | 29 000 | 52,2 | 4,94±0,1 | 205,55 |
| ZrC _{0,97} | » | 6,56 | 3420 | 26 000 | 50,0 | 4,01±0,8 | 193,26 |
| HfC _{0,99} | » | 12,76 | 3828 | 27 000 | 45,0 | 4,8±0,1 | 205,61 |
| VC _{0,87} | » | 5,71 | 2648 | 29 000 | 65,0 | 4,95 | 99,02 |
| NbC _{0,99} | » | 7,80 | 3600 | 24 000 | 51,1 | 4,79±0,09 | 137,59 |
| TaC _{0,88} | » | 14,50 | 3983 | 25 000 | 42,1 | 5,5±0,11 | 143,30 |
| Cr ₂₃ C ₆ | Гексагональная | 6,96 | 1500 | 9 700 | 127 | — | 600,43 |
| Cr ₇ C ₃ | Ромбическая | 6,90 | 1780 | 13 800 | 109 | — | 209,75 |
| Cr ₃ C ₂ | Гексагональная | 6,60 | 1810 | 13 300 | 75 | 3,698 | 98,90 |
| Mo ₂ C | То же | 9,18 | 2400 | 15 000 | 71 | 5,307 | 46,93 |
| WC | То же | 15,67 | 2776 | 21 000 | 19,2 | 7,37±0,15 | 38,79 |
| W ₂ C | компактная | 17,23 | 2700 | 19 900 | 80,0 | — | — |

Металлоподобные соединения. Высокой твердостью и износостойкостью обладают металлоподобные карбиды переходных металлов с незаполненными *d*-электронными оболочками [51, 63, 65, 66, 67, 101]. Они представляют собой фазы внедрения или близкие к ним структуры, в которых атомы углерода занимают октаэдрические или тетраэдрические пустоты плотноупакованных металлических подрешеток (табл. 5).

Поршковые карбиды применяют для обработки металлов. Некоторые детали из карбидов изготавливают методами порошковой металлургии (прессование с последующим спеканием или горячее прессование). Карбиды широко используют в качестве основного компонента твердых сплавов, наплавочных материалов, поверхностных покрытий (наносимых газозащитным, детонационным и другими методами). Карбиды служат в качестве упрочняющей фазы легированных сталей и поверхностных слоев, образующихся при цементации, нитроцементации, карбонитрации и др. Упрочняющая карбидная фаза образуется

также при диффузионном насыщении углеродистых сталей активными карбидообразующими элементами (например, хромом), а также при контактном эвтектическом плавлении с углеродом (графитом) сталей и никелевых сплавов, содержащих карбидообразующие легирующие элементы [68].

Эффективным новым технологическим способом получения карбидов, а также и других тугоплавких соединений является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

Высоким сопротивлением абразивному изнашиванию обладают металлоподобные нитриды переходных металлов с незаполненными *d*- и *f*-оболочками (табл. 6) [1, 51, 63, 64, 65, 67, 101].

Металлоподобные нитриды — металлические проводники с высокой теплопроводностью — представляют собой фазы внедрения с кубической и гексагональной структурами. Пластичность их выше, чем других тугоплавких соединений (карбидов, боридов, силицидов). Характерным для металлоподобных нитридов является широкая

6. Структура и свойства металлоподобных нитридов [63, 67, 101]

| Нитрид | Кристаллическая решетка | Область гомогенности, ат. доли N, % | ρ , г/м ³ | $T_{пл}$, °C | H, МПа | $\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м | $E \cdot 10^{-5}$, МПа | $-\Delta G_{298}^0$, кДж·моль ⁻¹ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------|--------|----------------------------|-------------------------|--|
| TiN | ГЦК | 37,5—50,0 | 5,43 | 3200 | 20 000 | 25 | 3,9—5,0 | 294,34 |
| ZrN | ГЦК | 46—50 | 7,09 | 2980 | 18 500 | 21 | 3,0—4,5 | 342,96 |
| HfN | ГЦК | — | 13,84 | 3000 | 21 500 | 33 | 4,8 | 345,45 |
| V ₃ N | ГПУ | 25—33 | 5,97 | — | 19 000 | 123 | — | — |
| VN | ГЦК | 41—50 | 6,04 | 2050 | 15 200 | 85 | 3,5—4,6 | 192,01 |
| Nb ₂ N | ГПУ | 28,5—33,5 | 8,23 | 2420 | 17 200 | 142 | — | — |
| NbN | ГПУ | 50,0—50,6 | 8,40 | 2300 | 16 500 | 78 | 4,0—4,836 | 194,83 |
| Ta ₂ N | ГПУ | 28,5—31,0 | 15,81 | 2050 | 12 200 | 263 | — | 242,36 |
| TaN | ГПУ | 44,5—47,3 | 15,46 | 3087 | 10 800 | 128 | 5,758 | 223,85 |
| Cr ₂ N | ГПУ | 32—33 | 6,51 | 1650 | 15 700 | 84 | 3,10 | — |
| CrN | ГЦК | — | 6,14 | 1500 | 10 930 | 640 | 3,198 | — |
| Mo ₂ N | ГЦК | 32—33 | 9,44 | 895 | 6 300 | 20 | — | — |
| WN | ГЦК | — | — | — | — | — | — | — |

Разлагается при $T > 700^\circ\text{C}$

область гомогенности. Применяются в виде упрочнителей пластичной металлической матрицы в композиционных материалах, а также в виде покрытий, наносимых газозащитными и вакуумными ионно-плазменными методами. Твердость нитридных покрытий, получаемых этими способами, существенно превышает твердость компактных материалов. Создаются твердые сплавы с использованием нитридов в качестве твердой составляющей.

Высокой твердостью и износостойкостью обладают бориды переходных металлов IV—VI групп Периодической системы элементов (табл. 7) и редкоземельных металлов.

Структура низших боридов (богатых металлом) определяется металлической подрешеткой. В высших боридов (богатых бором) структуру определяют атомы бора, образующие жесткие подрешетки с ковалентными связями бор — бор в виде сеток.

Образование взаимных твердых растворов боридов, как правило, приводит к улучшению свойств по сравнению с исходными боридами. Например, двой-

ной борид титана — хрома (твердый раствор TiB₂ и CrB₂) имеет более высокую твердость, износостойкость и жаростойкость, чем отдельные.

С ростом отношения бор/металл уменьшается удельное электрическое сопротивление и коэффициент термического расширения, увеличиваются температура плавления, микротвердость и улучшаются другие механические характеристики. Это свидетельствует об упрочнении межатомных связей в решетке при переходе от низших боридов к высшим.

При переходе от диборидов металлов IV группы к диборидам V и затем к VI группе температура плавления, микротвердость и модуль упругости уменьшаются, а коэффициент термического расширения увеличивается.

Бориды применяют для изготовления сопел установок, распыляющих жидкие металлы, лодочек, тиглей, в качестве защитных покрытий на тугоплавких металлах (бориды титана, циркония, ниобия и хрома), а также обладающих высокой износостойкостью покрытий и наплавов на сталях и чу-

7. Структура и свойства боридов [63, 67, 101]

| Борид | Кристаллическая решетка | ρ , г/м ³ | $T_{пл}$, °C | H, МПа | $\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м | $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ | $E \cdot 10^{-5}$, МПа | $-\Delta G_{298}^0$, кДж·моль ⁻¹ |
|-------------------|-------------------------|---------------------------|---------------|-------------------|----------------------------|--|-------------------------|--|
| TiB ₂ | Гексагональная | 4,45 | 2980 | 34 800 | 9,0 | 4,5 | 5,405 | 319,5 |
| ZrB ₂ | » | 6,17 | 3200 | 21 900 | 9,7 | 5,9 | 4,958 | 323,62 |
| HfB ₂ | » | 10,5 | 3250 | 29 000 | 10,6 | 6,3 | 4,797 | 325,50 |
| VB ₂ | » | 5,1 | 2400 | 28 000 | 22,7 | 7,9 | 3,404 | — |
| Nb ₂ B | Ромбическая | 7,6 | 2300 | 22 000 | 40,0 | 12,9 | — | — |
| NbB ₂ | Гексагональная | 6,97 | 3000 | 26 000 | 25,7 | 7,7 | 6,376 | — |
| TaB ₂ | » | 11,7 | 3037 | 26 000 | 32,5 | 7,9 | 6,867 | 188,25 |
| Cr ₃ B | Ромбическая | 6,5 | 1870 | 13 500 | 107,0 | 14,2 | 4,101 | — |
| CrB | » | 6,2 | 2100 | 21 000 | 45,5 | 12,3 | 3,606 | 77,04 |
| CrB ₂ | Гексагональная | 5,6 | 2200 | 22 000 | 30,0 | 10,5 | 4,503 | 123,23 |
| MoB | Тетрагональная | 8,8 | 2600 | 23 000— 24 500 | — | — | — | 70,74 |
| WB | » | 16,0 | 2800— 2920 | — | — | — | — | 71,11 |

гунах (бориды титана, хрома и их сплавы).

Силициды переходных металлов IV—VI групп Периодической системы элементов [62, 63, 65, 67, 101] находят применение в самолетостроении, атомной, ракетной и космической технике, главным образом в качестве жаропрочных и жаростойких материалов, а так-

же защитных покрытий. Свойства дисилицидов металлов «большой девятки» тугоплавких металлов приведены в табл. 8.

Наибольшее применение получил дисилицид молибдена благодаря тому, что он обладает хорошей электропроводностью и высокой стойкостью к окислению. Из него изготавливают элект-

8. Свойства дисилицидов [63, 67, 101]

| Материал | Плотность, г/м ³ | $T_{пл}$, °C | H, МПа | $E \cdot 10^{-5}$, МПа | $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ (в интервале 20—1000 °C) | $-\Delta G_{298}^0$, кДж·моль ⁻¹ |
|-------------------|-----------------------------|---------------|---------------|-------------------------|---|--|
| TiSi ₂ | 4,13 | 1540 | 8 920 | 3,551 | 10,3 | 132,15 |
| ZrSi ₂ | 4,86 | 1700 | 10 630 | 2,599 | 8,37 | 149,36 |
| HfSi ₂ | 9,03 | 1750 | 9 120 | — | — | 225,94 |
| VSi ₂ | 4,66 | 1660 | 8 900—9 600 | — | 12,0 | 148,47 |
| NbSi ₂ | 5,66 | 2100 | 10 820 | 2,551 | 10,6 (20—1100 °C) | 123,32 |
| TaSi ₂ | 9,1 | 2200 | 14 070 | — | 10,2 | 116,01 |
| CrSi ₂ | 5,0 | 1500 | 9 960—11 500 | — | 12,9 (20—700 °C) | 98,77 |
| MoSi ₂ | 6,24 | 2030 | 12 000—13 500 | 4,405 | 8,3 | 118,49 |
| WSi ₂ | 9,25 | 2165 | 13 000—14 000 | 5,307 | 7,35 | 91,86 |

9. Свойства карбида кремния [63, 67, 101]

| Модификация | $\rho, \text{т/м}^3$ | Твердость | | Температура диссоциации, °С | $\alpha \cdot 10^6, \text{°С}^{-1}$ | $E \cdot 10^9, \text{МПа}$ | $-\Delta G_{298}^{\circ}, \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ |
|----------------|----------------------|-----------|---------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|
| | | по Моосу | H, МПа | | | | |
| Гексагональная | 3,214 | 9,0—9,3 | 21 300—29 500 | 2780 | 4,2—4,7 (при 427 °С) | 4,08 | 69,49 |
| Кубическая | 3,166 | 9,2—9,8 | 26 100—37 400 | 2830 | 3,8 (при 200 °С) | 4,013—4,324 | — |

трические нагревательные элементы, эксплуатирующиеся на воздухе при температурах до 1600 °С.

Неметаллические бескислородные соединения. Карбид кремния SiC (или карборунд) представляет собой соединения кремния с углеродом [21, 63, 67, 101]. Кроме модификации с гексагональной кристаллической решеткой (α -SiC) имеется модификация с кубической структурой типа алмаза (β -SiC). Карбид кремния отличается высокой твердостью, теплопроводностью, огнеупорностью, специфическими электрическими и полупроводниковыми свойствами (табл. 9).

Карбид кремния химически стоек (на него действует только смесь азотной и плавиковой кислот, а также фосфорная кислота при температуре 230 °С). При нагреве в воздушной среде на поверхности образуется тонкий слой оксида кремния SiO₂, защищающий карбид кремния от дальнейшего окисления.

Из карбида кремния изготавливают изделия методами керамической или порошковой технологии. Известны пористые материалы, в которых зерна карбида кремния сцементированы кремнеземистыми, глиноземистыми и нитридокремневыми связками. Беспористые поликристаллические материалы, получаемые горячим прессованием или реакционным спеканием, отличаются от пористых более высокими механическими свойствами, тепло- и электропроводностью, химической стойкостью.

Из пористых поликристаллических карбидокремневыми материалов (со связующими) изготавливают абразивный инструмент (применяемый для обработки твердосплавного инструмента), огнеупорные материалы, изделия электротехнического назначения (электрические нагреватели, поджигатели и инитронов и т. д.). Беспористые материалы на основе карбида кремния применяют в качестве специальных огнеупоров, высокотемпературных нагревателей («силитовые» и «глобаровые» стержни), торцовых уплотнений, для изготовления деталей, подвергающихся интенсивному коррозионному и абразивному воздействию.

Карбид кремния является составной частью силицированного графита, выпускаемого в соответствии с ТУ 48-01-77—71 [101].

Приведенные в табл. 10 неметаллические нитриды отличаются высокой износостойкостью (кроме гексагонального BN), высокой стойкостью в агрессивных средах, значительной термостойкостью при быстрых теплосменах и высокой огнеупорностью. Применяются они для футеровки металлургических устройств, сопл для распыления металлов, тиглей для получения чистых металлов, а также для изготовления конструктивных элементов в газотурбостроении, энергетике, космической технике. Широкое применение получили кубический и вюрцитоподобный (гексанит или исмит) нитрид бора в качестве инструментальных материалов. В качестве высокоэффективного

инструментального материала применяют и нитрид кремния. Существенное улучшение свойств достигается введением в нитрид кремния различных оксидов (алюминия, магния, иттрия и др.), углерода, карбидов, нитридов [1]. Перспективным материалом является композиция Si₃N₄-Al₂O₃, получившая название «сиалон». Горячепрессованная композиция Si₃N₄-Al₂O₃-TiC имеет торговую марку «силит» [66].

Нитрид кремния также является перспективным материалом для изготовления деталей так называемых «адиабатных» двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок.

Бескислородное соединение — карбид бора В₄С — отличается высокими твердостью (HV 37,8 ГПа) и модулем упругости (483,4 ГПа), что предопределило его использование в качестве абразивного материала. Высокая износостойкость компактного карбида бора позволила использовать его в качестве деталей точных приборов. Имеются сообщения о том, что карбид бора был успешно применен для изготовления деталей газодинамических подшипников гироскопических приборов.

Керамик и ситаллы. Высокой твердостью и износостойкостью обладают керамические материалы. К ним, в частности, относятся тугоплавкие оксиды (алюминия, бериллия, циркония, хрома и др.) [88, 101].

В качестве твердого износостойкого материала наибольшее распространение получил оксид алюминия. Устойчивая модификация α -Al₂O₃ встречается в природе в виде простых (обыкновенный корунд, наждак и др.) и полудрагоценных (лейкосапфир, сапфир, рубин и др.) разновидностей. Цвет зависит от содержания других оксидов. Чистый оксид алюминия, кристаллизующийся в гексагональной системе, имеет твердость по Моосу 9 ($H \cdot 2 \cdot 10^4$ МПа), модуль Юнга порядка $3,5 \cdot 10^5$ МПа, плотность 3,95—4,02 т/м³, температуру плавления 2050 °С. Основным сырьем для получения чистого оксида алюминия являются бокситы, содержащие от ~ 50 до 100 % Al₂O₃.

Порошки корунда (природного и особенно синтетического) широко при-

10. Свойства неметаллических нитридов и нитрида алюминия [63, 67, 101]

| Нитрид | Кристаллическая решетка | $\rho, \text{т/м}^3$ | $T_{пл}$ (или диссоциация), °С | H, МПа | $E \cdot 10^9, \text{МПа}$ | $\rho \cdot 10^9, \text{Ом} \cdot \text{м}$ | $\alpha \cdot 10^6, \text{°С}^{-1}$ | $-\Delta G_{298}^{\circ}, \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ |
|---|-------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---|-------------------------------------|--|
| AlN | Гексагональная плотнопакетная | 3,12—3,27 | 2400 (разлагается) | 12 300 | — | $> 10^{13}$ (при 20 °С) | 4—6 | 288,01 |
| α -BN | Гексагональная | 2,29 | 3000 (под давлением азота) | 1—2 (по Моосу) | 0,865—0,344 | 10^{13} (при 20 °С) | 0,5—1,7 | 224,61 |
| β -BN Si ₃ N ₄ | Кубическая Гексагональная | 3,45 3,18 | 1900 (разлагается) | 60 000 ± 1200 33 000 ± 1200 | 8,09—9,73 3,2 | Диэлектрик 10^{13} — 10^{14} | — 2,75 | — 675,93 |

меняют для изготовления разнообразного абразивного инструмента. Компактные поликристаллические корундовые материалы (минералокерамики), например микролит ЦМ-332, характеризуются высокими твердостью (HRA 90—93), теплостойкостью, химической стойкостью и износостойкостью. Кроме оксида алюминия эта керамика содержит в качестве модификатора (позволяющего получать однородную мелкозернистую структуру) некоторое количество оксида магния.

Минералокерамический материал применяют с целью изготовления резцов (режущих пластин) для получения чистой обработки углеродистых и легированных сталей и чугуна. Пластинки из этого материала существенно дешевле твердосплавных и позволяют обрабатывать металлы и сплавы при более высоких скоростях резания. Корундовая керамика применяется также в нефтяной промышленности (износостойкие насадки гидромониторных долот, горловины насосов пескоструйных аппаратов, штуцера фонтанной арматуры), для изготовления нитеводителей ткацких станков и т. п. Используется она также в приборостроении (например, для изготовления деталей газодинамических подшипников гидроскопов), электротехнике и в других отраслях промышленности. Перспективно применять корундовую керамику в сельскохозяйственном машиностроении (сопла для разбрызгивания ядохимикатов и жидких минеральных удобрений, элементы почвообрабатывающих орудий). Свойства минералокерамики регламентирует ГОСТ 6912—87.

Синтетический, окрашенный в красный цвет прозрачный монокристаллический оксид алюминия (легированный оксидом хрома в количестве 2—3 %) — рубин применяют для изготовления часовых камней, некоторых деталей точных приборов и т. п. Монокристаллические стержни рубина применяют в лазерной технике. Возрос интерес к стабилизированному оксиду циркония, являющемуся перспективным материалом для изготовления деталей, предназначенных для работы при высоких температурах, в частности в аднабатных двигателях (плотность 5,6 т/м³,

твердость по Моосу 7, модуль Юнга порядка $1,7 \cdot 10^5$ МПа).

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) представляют собой полукристаллические материалы, получаемые регулируемой кристаллизацией стекла [101]. Состоят из кристаллов (размером менее 1 мкм) и остаточной стекловидной фазы, содержание которой, как правило, менее 50 % по объему. Существует много разновидностей ситаллов, различающихся входящими в них окислами. Твердость ситаллов достигает высоких значений (до 10 000 МПа). Высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью обладают петроситаллы (на основе габро-норитовых, базальтовых и других горных пород), пироксеновые ситаллы (СаО—MgO—Al₂O₃—SiO₂) и шлакоситаллы (получаемые из стекол, сваренных на основе металлургических и топливных шлаков). Из них изготавливают детали пар трения (плауижеры, части насосов и т. п.), применяемые в химическом машиностроении, футеровку мельниц и мелющие тела, нитеводители текстильных машин, точные калибры, фильеры для синтетических волокон и другие детали, работающие в условиях интенсивного абразивного изнашивания.

Твердые сплавы. Высокими твердостью и износостойкостью обладают композиционные материалы — твердые сплавы (ГОСТ 3882—74; ГОСТ 26530—85), состоящие из частиц тугоплавких соединений (главным образом карбидов) переходных металлов и связки (чаще всего кобальтовой) [83, 95, 101]. Сведения о составе и свойствах твердых сплавов приведены в гл. VIII, об износостойкости при различных видах абразивного изнашивания — в табл. 11—13.

Твердые сплавы применяют для изготовления горнобурового и режущего инструмента, а также для инструмента с целью обработки металлов давлением и быстрознашающихся деталей машин, приборов и приспособлений. Для горнобурового инструмента эффективно использовать сплавы WC—Co с крупными карбидными зёрнами. Из более мелкозернистых марок твердых сплавов WC—Co изготавливают инструмент для обработки резанием чугунов и других материалов, не образующих сливных стружек. Инструмент из сплавов марок

11. Износостойкость твердых сплавов при трении по электрокорундовой шлифовальной шкурке (ГОСТ 5009—82) с зернистостью абразива 10 [93]

| Твердый сплав | Твердость HRA (не менее) | Износостойкость, км/мм |
|---------------|--------------------------|------------------------|
| | | |
| ВК6 | 88,5 | 1,0 |
| ВК8 | 87,5 | 0,8 |
| ВК10 | 87,0 | 0,6 |
| ВК15 | 86,0 | 0,4 |
| ВК20 | 84,0 | 0,2 |
| ВК25 | 82,0 | 0,1 |
| Вольфрам | — | 0,055 |
| T30K4 | 92,0 | 0,2 |
| T15K6 | 90,0 | 0,3 |
| T5K10 | 88,5 | 0,2 |
| TT7K12 | 87,0 | 0,2 |
| TH-20 | 90,0 | 0,2 |
| KXH-15 | 85,0 | 0,1 |
| KHT-16 | 89,0 | 0,1 |
| Кобальт | — | 0,021 |

13. Износостойкость твердых сплавов при изнашивании об абразивную прослойку (СТП ИСМ 610—81) из электрокорунда зернистостью 8 (ГОСТ 3647—80) [93, 94]

| Сплав | Твердость HRA (не менее) | Износостойкость, км/мм |
|---------|--------------------------|------------------------|
| | | |
| ВК3-М | 91,0 | 2,0 |
| ВК4 | 89,5 | 1,3 |
| ВК4-В | 88,0 | 0,9 |
| ВК6 | 88,5 | 1,7 |
| ВК6-М | 90,0 | 3,3 |
| ВК6-ОМ | 90,5 | 10,0 |
| ВК6-В | 87,5 | 0,8 |
| ВК8 | 87,5 | 1,4 |
| ВК8-В | 86,5 | 1,1 |
| ВК8-ВК | 87,5 | 3,3 |
| ВК10 | 87,0 | 1,1 |
| ВК10-М | 88,0 | 2,0 |
| ВК10-ОМ | 88,5 | 5,0 |
| ВК10-КС | 85,0 | 1,1 |

12. Износостойкость твердых сплавов при изнашивании о прослойку различных абразивных материалов [94]

| Абразивный материал | Н, ГПа | Износостойкость твердых сплавов, км/мм | |
|--------------------------|--------|--|------|
| | | ВК6 | ВК15 |
| Синтетический алмаз АС2 | 100 | 0,2 | 0,2 |
| Карбид бора | 37—43 | 0,2 | 0,2 |
| Карбид кремния (зеленый) | 30—33 | 0,4 | 0,2 |
| Электрокорунд | 20—24 | 1,7 | 0,8 |
| Кварц | 11—12 | 6,6 | 3,1 |

ТК и ТТК применяют для обработки резанием сталей и труднообрабатываемых сплавов.

Инструмент для обработки давлением и износостойкие детали изготавливают обычно из средне- и высококобальтовых твердых сплавов типа ВК. Безвольфра-

Продолжение табл. 13

| Сплав | Твердость HRA (не менее) | Износостойкость, км/мм |
|----------|--------------------------|------------------------|
| | | |
| ВК11-ВК | 87,0 | 1,2 |
| ВК15 | 86,0 | 0,8 |
| ВК20 | 84,0 | 0,6 |
| ВК20-КС | 82,0 | 0,4 |
| ВК20-К | 79,0 | 0,4 |
| ВК25 | 82,0 | 0,4 |
| T30K4 | 92,0 | 0,6 |
| T15K6 | 90,0 | 1,7 |
| T14K8 | 89,5 | 1,1 |
| T5K10 | 88,5 | 1,1 |
| T5K12 | 87,0 | 0,8 |
| TT7K12 | 87,0 | 0,9 |
| TT8K6 | 90,5 | 3,3 |
| TT10K8-Б | 89,0 | 3,3 |
| TT20K9 | 89,0 | 1,7 |
| TH-20 | 90,0 | 0,3 |
| KHT-16 | 89,0 | 0,3 |
| KXH-15 | 85,0 | 0,2 |
| Кобальт | — | 0,14 |

мовые сплавы применяют для изготовления инструмента (режущего, для обработки давлением, измерительного), пресс-форм и деталей, от которых требуется высокая износостойкость.

Наплавочные материалы. Износостойкие материалы высокой твердости часто применяют в виде толстых слоев (единицы и десятки миллиметров), наплавляемых на поверхности деталей различными методами. Применяемые для этой цели материалы (электроды, проволоки, порошки) получили название наплавочных. Используются они для восстановления изношенных деталей (восстановительная наплавка) и для повышения надежности деталей (износостойкая и антикоррозионная наплавка). Наиболее распространенный вид наплавочных материалов — покрытые металлические электроды, применяемые для ручной дуговой наплавки. Восстановительную и антикоррозионную наплавку осуществляют сварочными электродами, износостойкую — наплавочными электродами.

Для маркировки электродов применяют в основном буквенно-цифровую систему обозначения, стандартизованную для сталей [32, 43, 48, 97, 101].

Стали, используемые для изготовления сварочной проволоки по ГОСТ 2246—70, дополнительно маркируются буквами Св, а наплавочной проволоки по ГОСТ 10543—82 — буквами Нп.

Электроды для дуговой сварки обозначаются буквой Э и следующими за ней буквами и цифрами. Первые две или три цифры обозначают содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, следующие за буквенными обозначениями элементов, указывают среднее содержание элемента в процентах (если содержание элемента менее 1,5 %, цифра не ставится). При среднем содержании кремния до 0,8 % и марганца до 1,0 % буквы С и Г не ставятся.

Прутки для наплавки обозначают индексом ПрН, гранулированные порошки из сплавов — индексом ПГ. Далее следуют буквы и цифры, указывающие среднее содержание элементов сплава, из которого изготовлен порошок. Порошковые проволока и лента обозначаются соответственно ПП и ПЛ, а спеченная из порошков — ЛС.

Кроме того, применяются электроды и порошки, с названиями, не отвечающими изложенным выше правилам.

Марки, составы и свойства наплавочных материалов, а также флюсов, применяемых в СССР и других странах — членах СЭВ, приведены в каталоге¹.

Состав *наплавочных электродов*, применяемых для повышения износостойкости, приведен в табл. 14.

Электроды группы I применяют для наплавки деталей, эксплуатируемых при обычной температуре. Металл, наплавленный электродами группы II, имеет структуру бейнита или мартенсита с остаточным аустенитом (при высоком содержании углерода образуются также и карбиды). Наплавочные слои обладают высокой красностойкостью, благодаря чему эти материалы можно применять с целью повышения износостойкости штампов для горячей обработки металлов давлением. Электроды группы III позволяют наносить слои, хорошо обрабатывающиеся в отожженном состоянии. После закалки и отпуска твердость наплавочного металла высокая (до HRC 54—62). Для наплавки деталей из высокомарганцевистой стали марки 110Г13Л (эксплуатируемых при больших ударных нагрузках) применяют электроды группы IV. Электроды группы V предназначены для наплавки металлорежущего инструмента и штампов для горячей обработки металлов давлением. Электроды групп VI—VIII служат для наплавки деталей, работающих при различных сочетаниях ударного и абразивного воздействия, соответственно при максимальной, средней и минимальной ударных нагрузках. Структура наплавочных слоев с твердостью HRC 48—62 состоит преимущественно из мартенсита и избыточного карбида хрома. Металл, наплавочный при использовании электродов группы IX, обладает высокими противозадирными свойствами при трении без смазки, а также высокими антикоррозионными и антикоррозионными свойствами и высокой износостойкостью при обычных и высоких температурах.

¹ Наплавочные материалы СЭВ. Киев: МЦНТИ. 1979. 622 с.

14. Наплавочные электроды [48, 101]

| Группа | Тип электрода | Марка электрода | Наплавка |
|--------|---|--|--|
| I | Э-10Г2 Э-11Г3 Э-12Г4 Э-15Г5 | ОЗН-250У ОЗН-300У ОЗН-350У ОЗН-400У | Деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивного изнашивания, сопровождающегося ударами |
| II | Э-30В8Х3 Э-35Х12В3СФ | ЦШ-1, ИН-1 Ц-16 | Горячих штампов |
| III | Э-37Х9С2 Э-70Х3СМТ Э-100Х12М | ОЗШ-3 ЭН-60М ЭН-Х12М | Холодных штампов |
| IV | Э-65Х11Н3 Э-65Х25Г13Н3 | ОМГ-Н ЦНИИН-4 | Изношенных деталей из стали 110Г13Л |
| V | Э-90В10Х5Ф2 Э-105В6Х5М3Ф3 Э-08К15В7М5Х3СФ | ЦИ-2У И-1 ОЗИ-4 | Металлорежущего инструмента, вытяжных и прошивных горячих штампов |
| VI | Э-95Х7Г5С Э-30Х5В2Г2СМ | 12АН/ЛМВТ ТКЗ-Н | Деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания |
| VII | Э-300Х28Н4С4 Э-110Х14В13Ф2 | ЦС-1 ВСН-6 | Деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивного абразивного изнашивания с ударными нагрузками |
| VIII | Э-320Х23С2ГТР Э-320Х25С2ГР | Т-620 Т-590 | Деталей, эксплуатируемых в условиях преимущественно абразивного изнашивания |
| IX | Э-08Х17Н8С6Г Э-13Х16Н8М5С5Г4Б Э-190К62Х29В5С2 | ЦН-6М ЦН-6Л, ЦН-12М УН-12Л, ЦН-2 | Уплотнительных поверхностей трубопроводной аппаратуры для энергетики и нефтеаппаратуры |

15. Порошковая проволока [48, 101]

| Марка проволоки | Наплавляемый металл | Дополнительная защита | HRC наплавляемого металла | Назначение (наплавляемые изделия) |
|-----------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|--|
| ПП-АН105 | 100Г13Н4 | — | 20—25 | Железнодорожные крестовины, отливки из стали 110Г13Л |
| ПП-АН106 | 10Х14Т | — | 42—48 | Уплотнительные поверхности арматуры для температуры $\leq 450^\circ\text{C}$ |
| ПП-АН125 | 200Х15СТР | — | 50—58 | Зубья и козырьки ковшей экскаваторов, лопатки дымососов |
| ПП-АН170 | 70Х20Р3Т | — | 60—65 | Рабочие колеса и улитки грунтовых насосов |
| ПП-3Х2В8 | 35Х2В8Ф | Флюс АН-20 | 44—50 | Валки горячей прокатки, ножи блюмингов |
| ПП-25Х5ФМС | 25Х5ФМС | То же | 40—46 | Обжимные валки горячей прокатки |

Состав в свойства покрытых электродов регламентируются следующими документами [48]: ГОСТ 10051—75; ТУ 14-4-(317—73), (633—75), (779—76); ТУ 5.965-(4027—72), (4034—73), (4040—73), (4048—73), (4051—73), (11032—75); ТУ ВНИИСТ; нормалью ЛК.0386-ООПОКЗ.

Стальную наплавочную проволоку (из углеродистой, легированной и высоколегированных сталей) используют в качестве плавящегося электрода при восстановительной и износостойкой наплавке под флюсом, в среде углекислого газа и в смесях защитных газов. Холоднокатаную электродную ленту из коррозионно-стойких сталей используют для антикоррозионной наплавки в химическом, нефтяном и атомном машиностроении.

Стальная наплавочная проволока марок Нп выпускается по ГОСТ 10543—82, стальная сварочная для наплавки марок Св — по ГОСТ 2246—70. Твердость слоев, наплавленных проволоками марок Нп, колеблется в пределах НВ 1600—3400 МПа (после наплавки) и HRC 32—56 (после закалки); проволоками марок Св в пределах НВ 1200—3000 МПа (после наплавки) и НВ 5500—6000 МПа (после закалки).

Для наплавки материалов с повышенным содержанием углерода и легирующих компонентов применяют обычно *порошковые проволоки*, представляющие собой оболочку из пластичного металла, заполненную смесью легирующих, газо- и шлакообразующих материалов (табл. 15).

Аналогичное строение имеют *порошковые ленты* (шириной 10—30 мм, толщиной 3—4 мм) ПЛ-АН101 (для наплавки высокохромистого чугуна типа 300Х25Н3С) и ПЛ-АН102 (для наплавки сплава типа 250Х20С3Ф). Порошковые ленточные электроды используют, в частности, для наплавки деталей засыпного аппарата доменных печей и т. п. Состав и свойства порошковых проволок регламентируются следующими документами: ГОСТ 26101—84; ТУ 14-4-(247—72), (344—73), (484—74); ТУ 14-4-609 (610, 683, 684, 770)—76; ТУ 14-4-799 (800, 802, 840)—77; ТУ 48-21-(49—72); ТУ 19-4206-35—75; ТУ 86 УССР 085.137—76; ТУ ИЭС 18—75 (41—78); ТУ ВНИИСТ. Порошковые ленты выпускаются в соответствии с ГОСТ 26467—85, ТУ ИЭС 89—73, (107—75), (108—75), (164—77); ТУ 48-19-43—73.

Спеченные электродные ленты изготовляют прокаткой смеси порошка пла-

стичного металла (железа, никеля, меди) и порошков легирующих материалов с последующим спеканием ленты в защитной среде. При наплавке под флюсом АН-60 спеченной ленты ЛС-70Х3МН получают износостойкий наплавленный слой твердостью HRC 58—62. Наплавленный спеченной электродной лентой ЛС-5Х4В3ФС металл обладает высокой термостойкостью (применяют для наплавки валков горячей прокатки металлов). Спеченные ленты применяются в автомобильной промышленности, в металлургическом и химическом машиностроении и др. [48, 101].

Для защиты наплавляемого металла используются флюсы. Эти неметаллические материалы, расплавляясь при наплавке, защищают расплавленный металл от окисления, обеспечивают стабильность дуги и получение наплавленного металла заданного состава.

Применяют также спеченные *прутки и присадочные кольца*. Присадочные кольца марок ПК-НХ35С3 (ТУ ЛЗЛК) и ПК-ХН60ВУ (ТУ 37.311.017—74) из жаростойких хромоникелевых сплавов используют для плазменной наплавки клапанов автомобильных двигателей и других двигателей внутреннего сгорания [48]. Спеченные электроды из карбидохромовых керметов КХН-15, КХН-20 и КХН-30 (на основе карбида хрома с никелевой связкой) применяют для наплавки слоев, обладающих высокой твердостью, износостойкостью и стойкостью к окислению и коррозии [101].

Для наплавки износостойких и жаростойких слоев газопламенным и дуговым (неплавящимся электродом) способами применяют литые *присадочные прутки* из сормайт, стеллита и релита [Пр-С1, Пр-С2, Пр-С27, Пр-В3К, Пр-В3К-Р (ГОСТ 21449—75); Релит-3, Релит-ТЗ (ТУ 48-42-34—70), АН-ЛЗ (ТУ 26-02-769—77)]. Литые кольца марок ЭП (ТУ 14-131-133—73, ТУ 14-131-344—77) используют для плазменной наплавки клапанов автомобильных двигателей [48].

В табл. 16 приведен химический состав сормайт и их свойства.

Сормайт № 1 — заэвтекктический сплав, близкий по составу и структуре к высокохромистым чугунам; сормайт

16. Химический состав и свойства сормайт (ГОСТ 21449—75) [48, 101]

| Сормайт | Содержание элементов, % | | | | | | | Свойства | | | | | |
|-------------|-------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| | Fe | Cr | Ni | C | Si | Mn | S | P | $\sigma_{\text{в}}$, МПа | $\alpha_{\text{т}}$, $10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ | $T_{\text{пл}}$, $^\circ\text{C}$ | $\rho_{\text{т}}$, т/м^3 | HRC |
| № 1 (Пр-С1) | Основа | 27—31 | 3—5 | 2,5—3,3 | 2,8—3,5 | 0,4—1,5 | До 0,07 | До 0,06 | 700 | 12 | 1275 | 7,4 | ≥ 50 |
| № 2 (Пр-С2) | Основа | 13—17 | 1,5—2,5 | 1,5—2,0 | 1,5—2,2 | 0,4—1,0 | До 0,07 | До 0,06 | 1100 | 13 | 1300 | 7,6 | ≥ 44 |

17. Химический состав и свойства стеллитов (48, 101)
(Fe остальное)

| Сплав | Содержание элементов, % | | | | | | | | | | ρ_{15} г/см ³ | $T_{пл}$ °C | σ_B МПа | HRC |
|-------|-------------------------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|------|----------------------------------|----------------|-------------------|-----|
| | Cr | W | Co | Ni | C | Si | Mn | P | S | — | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| В2К | 27—33 | 13—17 | 47—55 | 2,0—2,2 | 1,8—2,5 | 1,0—2,0 | 1,0—1,2 | <0,008 | <0,07 | — | 1260 | 600—700 | 46—48 | |
| В3К | 28—32 | 4—5 | 58—62 | 2,0—2,2 | 1,0—1,5 | 2,3—2,5 | — | — | — | 8,55 | 1275 | 600—700 | 42—43 | |

№ 2 — доэвтектический сплав, близкий к высокохромистым сталям. Структура сормаитов состоит из сложных карбидов хрома и железа и эвтектики. Сормаиты наплавляют на детали, подверженные абразивному изнашиванию (плужные лемеха, ножи бульдозеров и грейдеров, шнеки цементных насосов и т. п.), на инструменты для обработки металлов давлением, на детали, работающие в среде агрессивных газов при повышенных температурах (засыпных аппаратов доменных печей и др.). Выпускаются сормаиты в виде прутков (диаметром 6—7 мм) и крупных (с размерами частиц до 1,25 мм) и мелких (0,02—0,04 мм) порошков. Прутковый сормаит обычно наплавляют дуговым методом или с помощью газовой горелки, порошковый сормаит — с помощью токов высокой частоты.

Высокой износостойкостью и стойкостью против коррозии обладают хромовольфрамокобальтовые наплавочные сплавы — стеллиты. В СССР изготавливают и применяют стеллиты В2К, В3К (табл. 17) и В3К-Р.

Основой сплава является вязкий аустенит, обуславливающий высокую ударную стойкость и прочно удерживающий карбидные зерна. Содержание карбидной фазы составляет 30—45%. Для повышения пластичности в стеллиты вводят редкоземельные элементы. Стеллиты выпускаются в виде стержней диаметром 4—7 мм. Их наплавляют на изнашиваемые поверхности деталей и режущие кромки инструментов дуговым, электрошлаковым, газопламенным или индукционным способом в два-три слоя. Износостойкость повышается в 3—5 раз. Твердость и соответственно износостойкость наплавленных слоев мало изменяются до температуры 700 °C. Широкому применению стеллитов препятствует дефицитность основных компонентов (кобальта, вольфрама).

Рэлит — эвтектическая смесь карбидов вольфрама (WC и W_2C). Содержит 95—96% W и 3,6—4,0% общего углерода (свободного не более 0,1%). Обладает более высокой твердостью (H 24 000—30 000 МПа), чем монокарбид вольфрама. Выпускают рэлит в виде крупки марки 3 (зерновой) и в

виде электродов марки ТЗ (трубчато-зерновой), представляющих собой заполненные крупной трубочки из низкоуглеродистой стали. Применяется рэлит для армирования бурового инструмента, для наплавки режущего инструмента машин, разрабатывающих мерзлые грунты, шек дробилок, зубьев ковшов экскаваторов и других деталей машин, подверженных интенсивному абразивному изнашиванию.

Гранулированные порошки, получаемые распылением струи жидкого металла водой высокого давления или азотом, применяют при индукционной, плазменной и газопорошковой (газопламенной) наплавке. По гранулометрическому составу различают порошки крупные (размер частиц 1,25—0,8 мм), средние (0,8—0,4 мм), мелкие (0,4—0,16 мм) и очень мелкие (менее 0,16 мм). Крупные порошки применяют для наплавки токами высокой частоты, средние и мелкие — для плазменной наплавки, очень мелкие — для газопламенной наплавки.

Достаточно широко применяются порошки на железной и никелевой основах (табл. 18).

Для наплавки применяют также различные смеси порошков, приготовляемые механическим смешиванием размолотых ферросплавов, углеродистых материалов, а также карбидов и боридов. Предназначаются для дуговой наплавки износостойких слоев неплавящимся (обычно графитовым) электродом на детали, подвергающиеся интенсивному абразивному изнашиванию: ножи бульдозеров и грейдеров, ковши экскаваторов (смесь С-2М); лопасти глиномешалок, детали земснарядов (смесь БХ); пресс-форм для брикетирования угли, лопаток дробемеров (смесь КБХ и т. п.).

Промышленно выпускаются следующие гранулированные порошки на железной и никелевой основах (главным образом высокохромистые) ПР (ГОСТ 21448—75), СНГН (ТУ 48-19-212—76), ВСНГН (ТУ 48-19-214—76), НПЧ (ТУ 48-19-40—73), а также наплавочные смеси С-2М, БХ, КБХ, ФБХ6-2 (ГОСТ 21448—75), ПС (ТУ 48-19-122—74) [8, 101].

18. Химический состав и назначенные гранулированных порошков [101]

| Марка порошка | Средний химический состав, % | | | | | | | | | | HRC наплавленного металла, не менее | Назначение (наплавляемые изделия) |
|---------------|------------------------------|-----|-----|------|--------|-----|--|----|---|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | B | Fe | — | | | | |
| | | | | | | | | — | — | | | |
| ПГ-С1 | 2,9 | 3,5 | 1,2 | 29,0 | 4,0 | — | Основа | 51 | Детали металлургического оборудования, сельскохозяйственных машин | | | |
| ПГ-УС25 | 4,9 | 2,1 | 1,2 | 38,0 | 1,4 | — | Основа | 55 | Лемехи плугов и детали, подвергающиеся абразивному изнашиванию без ударов | | | |
| ПГ-СР2 | 0,35 | 2,5 | — | 13,5 | Основа | 1,8 | Уплотнительные поверхности арматуры тепловых и атомных электростанций для температур до 600 °C | 35 | | | | |
| ПГ-СР3 | 0,55 | 3,0 | — | 15,0 | Основа | 2,4 | | 45 | | | | |

3. ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ И МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СЛОИ

Твердые износостойкие тугоплавкие соединения хрупки. По этой причине, а также из-за технологических трудностей и высокой стоимости они, как правило, не могут быть использованы в качестве основных материалов для изготовления деталей машин. Удовлетворить противоречивые требования к поверхностным (высокая твердость и износостойкость, высокие антифрикционные свойства) и объемным (высокие прочность и ударная вязкость) свойствам можно путем создания композиций с послойным расположением материалов, выполняющих различные функции. В связи с тем, что допускаемый износ деталей машин мал (обычно не более нескольких десятых долей миллиметра), толщина поверхностного слоя с заданным комплексом триботехнических свойств может быть небольшой.

Нанесение покрытий на те или иные материалы не просто улучшает их свойства, а приводит к образованию нового композиционного материала с присущим ему комплексом свойств, который должен учитываться при разработке конструкций машин и механизмов.

Существует много традиционных способов создания поверхностных слоев с повышенной износостойкостью [15, 27, 65, 68]. Наиболее широко применяются методы поверхностной закалки, поверхностного наклепа, различные химико-термические способы обработки (в первую очередь цементация и азотирование) и т. д. Все шире применяются методы, основанные на воздействии на поверхностные слои деталей потоков частиц (ионов, атомов, кластеров) и квантов с высокой энергией. К ним следует отнести в первую очередь вакуумные ионно-плазменные методы [26, 33, 34, 45, 71, 104] и лазерную обработку [16, 23, 38, 104]. Существенно развились также способы осаждения покрытий из газовой фазы при атмосферном давлении и в разряженной атмосфере [1, 42, 54, 105]. Мощный импульс получили применение газотермических методов нанесения покрытий в связи с развитием плазменных

[8, 40, 90] и детонационного [5, 55, 76, 90] способов напыления порошкообразных материалов различного состава. Значительный интерес представляет возможность создания поверхностных слоев с использованием метода контактного эвтектического плавления [68].

Предшественниками вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев являются методы химического осаждения из газовой фазы [4, 42, 54, 105] и термовакuumные методы [61].

Покрытия, получаемые методами химического осаждения из газовой фазы. Методы химического осаждения из газовой фазы (или газофазные методы) основаны на осаждении покрытий на нагретую подложку в результате разложения относительно нестойких газообразных веществ или взаимодействия двух или более газообразных веществ (или переведенных в паровую фазу твердых веществ) с образованием на поверхности слоя химического соединения [4, 42, 54, 105].

Наибольшее распространение получил метод осаждения покрытий из карбида титана на нагретых до высокой температуры (1000—1100 °С) деталях и инструменте в результате химической реакции двух находящихся в газообразном состоянии веществ:



Получаемые таким образом покрытия в несколько раз повышают стойкость неперетачиваемого инструмента из твердых сплавов.

Из-за высоких температур, необходимых для прохождения реакции и образования прочного соединения с подложкой, этот метод непригоден для закаленных углеродистых и быстрорежущих сталей. Однако [105] можно наносить покрытия из других износостойких соединений при значительно более низких температурах (табл. 19) или закаливать детали сразу после нанесения покрытий.

Существенным усовершенствованием процессов газофазного осаждения покрытий явилось создание установок, работающих по замкнутому циклу без

19. Твердые тугоплавкие соединения, получаемые химическим осаждением из газовой смеси [105]

| Материал покрытия | H, МПа | Исходные вещества | Температура основы при осаждении, °С |
|-------------------------|---------------|---|--------------------------------------|
| VC | 20 000—30 000 | $\text{VCl}_4 + \text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3 + \text{H}_2$ | 1500—2000 |
| Si_3N_4 | 25 000—30 000 | $\text{SiCl}_4 + \text{NH}_3$ | 1200—1600 |
| SiC | 25 000—40 000 | $\text{CH}_3\text{SiCl}_3 + \text{H}_2$ | ~1400 |
| B ₂ C | 30 000—35 000 | $\text{BCl}_3 + \text{CH}_4 + \text{H}_2$ | ~1300 |
| HiC | 18 000—25 000 | $\text{HfCl}_4 + \text{CH}_4 + \text{H}_2$ | 1000—1300 |
| Al_2O_3 | 20 000—25 000 | $\text{AlCl}_3 + \text{H}_2 + \text{CO}_2$ | 800—1300 |
| TiN | 20 000—27 000 | $\text{TiCl}_4 + \text{N}_2 + \text{H}_2$ | 650—1700 |
| TiC | >32 000 | $\text{TiCl}_4 + \text{CH}_4$ | 800—1100 |
| WC | ~17 000 | $\text{WCl}_6 + \text{CH}_4$ | 900—1100 |
| W ₂ C | 20 000—25 000 | $\text{WF}_6 + \text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2$ | 325—600 |

выброса вредных веществ в атмосферу [4].

Покрытия, получаемые термовакuumным напылением. Термовакuumный метод нанесения покрытий [45, 61] основан на конденсации на поверхностях деталей пленки металла или химического соединения, переведенного в парообразное состояние нагревом наносимого вещества (от нагревателя сопротивления, электронным лучом, индукционным методом, взрывом проволоки и, наконец, лазерным лучом). Энергия атомов или молекул в образующейся паровой фазе невелика, поэтому для образования качественного покрытия с хорошей адгезией к основе требуется нагревать ее до температур, обеспечивающих прохождение диффузионных процессов на границе покрытия — основа. Термовакuumные методы могут быть реализованы в высоком вакууме. Производительность этих методов может быть достаточно высокой. К их недостаткам относятся: изотропный разлет наносимых веществ при их испарении (что приводит к высоким непроизводительным потерям напыляемых материалов); невозможность нанесения недостаточно стабильных веществ; трудность нанесения сплавов заданного состава при различной упругости паров компонентов; необходимость нагрева деталей (подложки) до высоких температур.

Вакуумные ионно-плазменные покрытия и модифицированные слои. Для образования качественного покрытия при более низких температурах деталей необходимо повысить энергию конденсирующихся на них частиц. При соударении с твердой поверхностью частиц с достаточно высокой энергией в микрообъемах создаются условия, при которых обеспечивается образование химических связей без объемного нагрева деталей (что лежит в основе всех вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий). В образовании покрытия при этих методах участвуют нейтральные и возбужденные частицы (атомы, молекулы и кластеры) с высокой энергией (превышающей в десятки и сотни раз энергию тепловых атомов и молекул) и ионы, энергию которых можно варьировать в широких пределах изменением ускоряющего напряжения.

Вакуумные ионно-плазменные процессы нанесения покрытий характеризуются следующими основными этапами: генерацией атомарного или молекулярного потока вещества, его ионизацией, ускорением и фокусировкой и, наконец, конденсацией на поверхности деталей или подложки. Для генерации потока вещества используются разогрет потоком электронов и различные формы газовых разрядов (тлеющий, дуговой с нерасходуемым термомис-

20. Влияние режимов ионного азотирования на толщину и твердость износостойкого слоя [42]

| Сталь | Температура, °С | Длительность азотирования (в ч) для получения слоя толщиной, мм | | | | | HV, МПа |
|---------|-----------------|---|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | | 0,15—0,2 | 0,2—0,25 | 0,25—0,3 | 0,3—0,35 | 0,35—0,4 | |
| 40X | 520 | 4—5 | 7—9 | 9—12 | 12—15 | 15—18 | 5000—5500 |
| 40XФА | 520 | 4—5 | 6—8 | 8—10 | 12—15 | 15—18 | 5100—5600 |
| 18XГТ | 550 | 3—4 | 4—5 | 6—8 | 9—12 | 15—18 | 5300—6000 |
| 30X3МФ | 530 | 4—5 | 6—8 | 9—12 | 15—18 | — | 7000—7600 |
| 38X2МЮА | 550 | 4—5 | 5—7 | 7—9 | 9—12 | 15—18 | 9000—9500 |

сионным катодом, дуговой с термоавтоэмиссионным расходуемым катодом) [26, 45, 71].

Применительно к нуждам машиностроения вакуумные ионно-плазменные методы нанесения покрытий и создания модифицированных поверхностных слоев можно условно разделить на четыре группы: а) ионно-диффузионные методы, осуществляемые в тлеющем разряде; б) методы, основанные на явлении катодного распыления в разряде постоянного тока и в высокочастотном разряде; в) ионное осаждение; г) ионное легирование и внедрение (имплантация).

Примером методов первой группы является ионное азотирование [4, 42], которое может проводиться при более низких температурах и со значительно большей скоростью (табл. 20), чем традиционное (в результате радиационного стимулирования скорость диффузии азота многократно увеличивается). Ионно-диффузионные методы могут быть также применены для насыщения поверхностных слоев кремнием, углеродом и другими элементами, получения карбонитридных слоев и т. п.

При использовании методов, основанных на явлении катодного распыления [61, 71], покрытие образуется в результате конденсации главным образом нейтральных частиц, выбиваемых из мишени бомбардировкой ионами инертного газа (аргона, криптона), имеющими высокую энергию. Энергия частиц наносимого материала по крайней мере на порядок выше, чем энергия частиц,

образующихся при испарении в термовакуумных методах. Методы позволяют наносить самые тугоплавкие и недостаточно стабильные соединения с сохранением их стехиометрического состава, нанесение которых термовакуумными методами невозможно. Находят применение системы с автономными ионными источниками. Системы распыления на постоянном токе используются для нанесения покрытий из проводящих электрический ток материалов, системы высокочастотного распыления — из диэлектриков.

Наиболее полно преимущества методов, основанных на явлении катодного распыления, реализуются в системах магнетронного распыления [25], в которых разряд осуществляется в скрещенных электрических и магнитных полях. Благодаря этому производительность магнетронных распылительных систем одного порядка с производительностью установок, работающих по методу КИБ (с электродуговым испарителем). К преимуществам их относится отсутствие капельной фазы, что позволяет наносить покрытия практически без искажения исходного качества поверхности.

При использовании методов ионного осаждения [26, 71] частицы наносимого материала, переведенного тем или иным способом в газообразное или парообразное состояние, ионизируются и ускоряются в электрическом поле. Адгезия и служебные характеристики покрытий повышаются при увеличении энергии частиц, задаваемой ускоря-

ющим напряжением. В нашей стране применяются методы КИБ (конденсация при ионной бомбардировке), РЭП (реактивное электронно-плазменное напыление) и др. В табл. 21 приведены сведения об износостойкости покрытий, нанесенных методом КИБ.

Ионное легирование, или имплантация [33, 106], основано на том явлении, что при больших энергиях ионы проникают в кристаллическую решетку на большую глубину (легируя таким образом поверхностный слой детали). Этому способствует радиационно-стимулированная диффузия, благодаря которой легируется слой, толщина которого во много раз превышает глубину начального проникновения ионов. Механические свойства и износостойкость модифицированных таким способом поверхностных слоев повышаются также и в результате искажений кристаллической решетки, возникающих при «вбивании» в нее ионов легирующего компонента.

Ионные методы нанесения покрытий осуществляются с участием как физических (состав наносимого материала не изменяется), так и химических процессов (образуются новые соединения). При таких методах, именуемых реактивными, происходят плазмохимиче-

ские реакции с ионами рабочего газа или специально вводимых в камеру добавок. Таким образом можно получать покрытия из самых разнообразных материалов и в самых невероятных комбинациях. Освоено получение чистых металлов, карбидов, нитридов, силицидов, халькогенидов, оксидов и т. п. Можно получать покрытия сложного состава (например, оксикарбиды), многослойные или переменного по толщине состава.

Разработаны методы нанесения алмазоподобных пленок с очень высокой твердостью [31]. Образование покрытий при использовании реактивных (плазмохимических) процессов происходит в неравновесных условиях. Благодаря этому в тонких слоях могут образовываться химические соединения, по составу, структуре и свойствам сильно отличающиеся от наблюдаемых для объемных материалов (получаемых в условиях, близких к равновесным).

Ряд разработанных методов ионного нанесения покрытий уже находит применение в промышленности. Успешно используется ионное азотирование. Стойкость непереключаемого инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, а также штампового инструмента и оснастки повышается в

21. Триботехнические характеристики покрытий TiN, нанесенных на сталь Р6М5 методом КИБ, при трении со смазкой М14В2 по разным материалам (линейный контакт) [34]

| Материал контртела | H ₂₀₀ материала контртела, ГПа | Удельный объемный износ, мм ³ /мм | | Коэффициент трения |
|-------------------------------|---|--|-------------------------------|--------------------|
| | | контртела (×10 ⁶) | покрытия (×10 ¹¹) | |
| Медь М1 | 0,9 | 16 000/600 | 58/5,4 | 0,11/0,09 |
| Техническое железо Э | 1,6 | 9 000/140 | 110/80 | 0,12/0,08 |
| Серый чугун | 3,2 | 70/2,1 | 40/3,5 | 0,13/0,03 |
| Сталь 45 | 5,6 | 2 100/1,4 | 17/2,7 | 0,11/0,08 |
| Сталь 20X2H4A (цементованная) | 9,4 | 140/2,8 | 6,7/1,3 | 0,14/0,03 |
| Сталь 38XМЮА (азотированная) | 11,1 | 340/4,9 | 11/2,0 | 0,12/0,09 |

Примечание. В числителе — значения для покрытия в исходном состоянии, в знаменателе — после полирования.

22. Относительная износостойкость плазменных покрытий (при истирании по шлифовальной шкурке в течение 1 мин при скорости скольжения 8 м/с и давлении 1,7 МПа) [90]

| Материал покрытия | Износ, мг | Относительная износостойкость |
|--|-----------|-------------------------------|
| Сталь: | | |
| низкоуглеродистая, легированная молибденом | 900 | 1 |
| коррозионно-стойкая | 711 | 1,27 |
| хромомолибденовая | 509 | 1,77 |
| Стеллит: | | |
| № 66 | 486 | 1,85 |
| № 33 | 289 | 3,11 |
| № 11 | 66,3 | 13,57 |
| Колмоной: | | |
| № 4 | 142,1 | 6,33 |
| № 5 | 111,3 | 8,09 |
| № 6 | 35,5 | 25,35 |

несколько раз при ионном реактивном нанесении тонких слоев (до 10 мкм) некоторых тугоплавких веществ (карбидов, нитридов, оксидов, оксикарбидов). Высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия из MoS_2 без связующего, наносимые с помощью катодного распыления [18].

Газотермические покрытия. Часть газотермических методов — газоплазменных и электродуговой металлизации — хорошо известна и достаточно широко применяется. Плазменное и детонационное нанесение покрытий является одним из наиболее перспективных направлений порошковой металлургии. Сопротивление износу и коррозии деталей из обычных конструкционных материалов может быть многократно увеличено при незначительном расходе порошковых материалов.

При плазменном нанесении покрытий [8, 40, 90] материал плавится и распыляется струей дуговой низко-

температурной плазмы, состоящей из электронов, положительных ионов и нейтральных атомов. Ионизированный поток газа характеризуется высокими температурами (5000—10 000°C) и относительно невысокими скоростями (до 250—600 м/с). В качестве рабочего газа чаще всего применяют аргон. Поскольку струя плазмы захватывает воздух, напыление активных по отношению к кислороду материалов осуществляется в камерах, предварительно заполняемых инертным газом. Получили развитие и другие методы нанесения покрытий в «динамическом» вакууме.

Плазменные покрытия имеют сложную арочную структуру. Пористость покрытий колеблется в пределах 2—15%. Плазменными методами можно наносить покрытия практически из всех материалов. Плакированные порошки позволяют включать в состав покрытий даже недостаточно стабильные при нагреве материалы (например, MoS_2).

Высокая температура и энергия плазмы позволяют с успехом использовать плазменный метод для нанесения покрытий из всех тугоплавких материалов (за исключением сублимирующихся и интенсивно разлагающихся при температуре нанесения), отличающихся высокой энергией связи в кристаллической решетке и вследствие этого высокой твердостью. Наносимые покрытия оглачаются высокой износостойкостью (табл. 22).

При детонационном способе нанесения покрытий [5, 55, 76, 90] в канал открытого с одного конца ствола через смеситель подается порция газовой смеси, способной детонировать при зажигании, и порция порошка наносимого материала. С помощью запального устройства инициируется взрыв газовой смеси. Напыляемый материал нагревается, ускоряется и выбрасывается на поверхность детали. В результате взрыва смеси горючего газа (обычно ацетилена) и кислорода введенные в газ частицы напыляемого материала разогреваются (не выше 2850°C) и разгоняются до очень высоких скоростей (примерно до 1000 м/с). При ударе частиц, обладающих высокой кинетической энергией, о твердую поверхность освобождается большое коли-

чество теплоты и их температура может достигать 4000°C.

Плазменный способ обеспечивает нагрев частиц до более высоких температур, чем детонационный. Ограничения по температуре при детонационном способе нанесения покрытий компенсируются более высокой кинетической энергией частиц, что позволяет наносить и тугоплавкие материалы. Благодаря высоким скоростям напыляемых частиц детонационные покрытия по сравнению с плазменными и тем более обычными газоплазменными имеют более высокие плотность (98—99%) и прочность сцепления с основой. Существенным преимуществом детонационного метода по сравнению с газоплазменным и плазменным является его дискретность, а вследствие этого и меньшая теплонапряженность. Нагрев обрабатываемой детали в процессе напыления может не превышать 200°C.

Освоено нанесение детонационным методом покрытий самого разнообразного состава: твердосплавных с использованием различных карбидов (вольфрама, хрома) и сплавов (Co, Ni, Ni+Cr); оксидных (из оксидов алюминия, титана и хрома), металлических. Это позволяет многократно повышать износостойкость деталей машин и инструмента.

Детонационные покрытия за рубежом нашли широкое применение, особенно в авиации. Фирмой Юнион Карбайд, являющейся монополистом в капиталистических странах по нанесению покрытий детонационным методом, разработаны покрытия, состав и свойства которых приведены в табл. 23.

Нанесение детонационных покрытий позволяет многократно увеличивать износостойкость деталей машин (табл. 24).

Лазерные методы модифицирования и легирования поверхностных слоев. Значительные возможности повышения износостойкости поверхностей появились с разработкой промышленных лазеров [16, 23, 38, 104]. Благодаря высокой плотности энергии в луче лазера (до 10^9 Вт/см²) возможен быстрый нагрев тонкого поверхностного слоя металла, вплоть до его расплавления. Последующий быстрый отвод теплоты в объем металла приводит

к закалке поверхностного слоя с приданием ему высокой твердости и износостойкости. (Процессы, происходящие в поверхностном слое, а следовательно, и его свойства определяются мощностью и длительностью действия лазерного луча.) Можно также осуществлять легирование поверхностного слоя [38] предварительным нанесением каким-либо способом слоя легирующего компонента на поверхность с последующим расплавлением лучом лазера, а также наносить покрытия введением порошка напыляемого материала в луч лазера. Накоплен достаточный большой опыт лазерного упрочнения деталей из сталей и чугунов. В табл. 25 и 26 приведены сведения о повышении износостойкости сталей в результате лазерной закалки (в сопоставлении с другими методами упрочнения).

Электронские покрытия. Метод электронского легирования основан на переносе материала электрода (преимущественно материала анода) при импульсном искровом разряде в газовой среде на обрабатываемую поверхность [100]. Для нанесения электронских покрытий применяют вибрирующие электроды. В Болгарии был разработан способ упрочнения вращающимся электродом. В СССР для нанесения покрытий применяют ручные и механизированные установки (типа ЭФИ и др.).

При нанесении металлических покрытий в материале основы сохраняется исходный фазовый состав. При легировании соединениями (металлоподобными) происходит, как правило, химическое взаимодействие с материалом основы с образованием химических соединений элементов, входящих в наносимый материал, с элементами основы. Нанесение электронских покрытий существенно повышает износостойкость и антифрикционность поверхностей. В табл. 27 и 28 приведены значения относительной износостойкости электронских покрытий [100], установленные при испытаниях по методике М. М. Хрушова и М. А. Бабичева [91] (изнашивание по электрокорундовой шкурке).

При гидроабразивном изнашивании в результате электронского легирования существенно повышается износ-

23. Основные свойства наиболее широко применяемых за рубежом детонационных

| Свойства покрытий | Марка и | | |
|---|-------------------------|---|--|
| | LW-1 (WC+9 % Co) | LW-1N30 (WC+13-15 % Co) | LW-5 (25 % WC + + 5 % Ni + + смесь карбидов W и Cr) |
| Твердость по Виккерсу, МПа | 12 500—14 000 | 11 000—12 500 | 10 000— 12 000 |
| Максимально допустимая температура в окислительной среде, °C | 540 | 540 | 760 |
| Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$ | 2,2 (при 20—540 °C) | 2,5 (при 20—540 °C) | 2,6 |
| Временное сопротивление при растяжении, МПа | 560 | 560—630 | 280 |
| Прочность сцепления с базовым материалом, МПа | 175,7 | 175,7 | 140,6 |
| Пористость, % | 0,5 | 0,5—1 | 0,5—1 |
| Rz, мкм: | | | |
| после нанесения | — | 3 | |
| после обработки | — | 0,025 | |
| Плотность, т/м ³ | 14,2 | 13,4 | 10,1 |
| Обеспечиваемые параметры | Высокая износостойкость | Высокая износостойкость, повышенная стойкость к механическим и термическим воздействиям | Сопротивление коррозии |

Примечание. Состав всех покрытий указан в мас. долях, кроме покрытий

покрытий [76]

состав покрытия

| LC-1C (Cr ₃ C ₂ + + 15 % Ni-Cr) | (Cr ₃ C ₂ + + 35 % Ni-Cr) | LCN-1 (Cu+41 % Ni+4 % In) | LC-4 (99 % Cr ₂ O ₃) | LC-5 (Cr ₂ O ₃ + + 20 % Al ₂ O ₃) | LA-2 (99 % Al ₂ O ₃) |
|---|--|---------------------------------|---|--|--|
| 10 000— 12 000 | 7000 | 3000 | 13 500 | 9250 | 11 000—12 000 |
| 980 | 980 | — | 540 | 870 | 650—980 |
| 3,6 | — | — | 6—7 (при 20—540 °C) | — | 2,2 (при 20—1000 °C) |
| 530 | — | — | 140 | 105 | 150 |
| — | 126,5 | 77,3 | — | — | 70,0 |
| 0,5—1 | 1 | 0,5—1 | — | 0,75—1,5 | 1—2 |
| — | 4 | 6 | — | — | 4 |
| — | 0,05 | — | — | — | 0,05 |
| 6,5 | 6,5 | 8,4 | 5 | 4,77 | 3,45 |
| Износостойкость при высоких температурах и в коррозионных средах, стойкость в струе пламени | Сопротивление при повышенных температурах износу и ударным нагрузкам | Антифрикционные свойства | Стойкость против окисления, пониженная стойкость к ударам | Сопротивление износу, химическому воздействию и высоким температурам | Сопротивление износу, химическому воздействию и высоким температурам |

тия Cr₃C₂ + 35 % Ni-Cr, состав которого указан в об. долях.

24. Относительная износостойкость детонационных покрытий¹ из твердых сплавов на титановом сплаве ВТЗ-1 (нагрузка 29,4 МПа; температура 300 °С; амплитуда виброперемещений 110 мкм; число циклов $5 \cdot 10^5$) в одноименном сочетании [55]

| Материал покрытия | Относительный износ | Относительная износостойкость |
|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| ВТЗ-1 без покрытия | 1 | 1 |
| ВК8 | 0,553 | 1,81 |
| ВК15 | 0,35 | 2,86 |
| ВК20 | 0,282 | 3,55 |

¹ Толщиной 150—200 мкм.

стойкость сталей (табл. 29). Разгаростойкость поверхностей после электроискрового легирования также значительно возрастает (табл. 30).

Области целесообразного применения электронского легирования достаточно многообразны. Однако дискретность и пористость покрытий, небольшая толщина, низкая производительность, высокая шероховатость обрабо-

25. Износ образцов из сталей, упроченных разными методами (трение на машине МИ-1М по сферическому образцу из стали ШХ15 со смазкой маслом И-12) [23]

| Сталь | Метод упрочнения | Н, МПа | Линейный износ, мкм | | Износ по массе, мг | | Суммарный износ | |
|-------|------------------|-----------|---------------------|--------|--------------------|-------|-----------------|--------------|
| | | | образца | сферы | образца | сферы | линейный, мкм | по массе, мг |
| 40X | Лазерная закалка | 7300—9800 | 2,45 | 52,51 | 1,74 | 0,27 | 54,96 | 2,0 |
| 3X2B8 | Азотирование | — | 2,66 | 110,20 | 2,79 | 1,16 | 112,86 | 3,9 |
| 20 | Цементация | — | 10,50 | 52,17 | 3,75 | 0,26 | 62,67 | 4,0 |
| 40X | Закалка, отпуск | 4370 | 23,00 | 23,43 | 12,74 | 0,05 | 46,43 | 12,7 |
| 40X | То же | 2500 | 70,00 | 31,25 | 40,44 | 0,09 | 101,25 | 40,53 |

таинных поверхностей, остаточные напряжения растяжения препятствуют широкому их внедрению.

Электронское легирование применяется для увеличения надежности деталей машин, приборов и механизмов, инструмента (режущего и деформирующего), кокилей для литья металлов, а также для размерного восстановления деталей машин.

Гальванические покрытия. Гальваническими методами можно наносить покрытия из металлов, сплавов и композиционных материалов [9, 24, 101, 104].

Введение в состав покрытий на основе хрома, железа и никеля частиц других материалов (КЭП) существенно повышает их триботехнические свойства [9, 24]. Введение порошков карбидов, оксидов, боридов, алмаза и т.п. позволяет существенно повысить износостойкость покрытий; введение халькогенидов, графита, полимеров — антифрикционность покрытий. Технология электролитического осаждения позволяет получать покрытия с содержанием частиц до 40 % и толщиной до 100 мкм.

В покрытия вводят карбиды (WC, TiC, ZrC, HfC, SiC, B₂C), бориды (TiB₂, ZrB₂, HfB₂, TaB₂), силициды (TaSi₂), нитриды (BN, Si₃N₄), оксиды (Al₂O₃, Cr₂O₃, SiO₂, ZrO₂, ThO₂), сульфиды (MoS₂, WS₂).

26. Триботехнические характеристики образцов из стали 45 после лазерной закалки (трение по бронзе БрОФ10-1 с пластичной смазкой ЦИАТИМ-201) [16]

| Схема испытания | Состояние стального образца | Линейная интенсивность изнашивания | Коэффициент трения |
|-------------------------|-------------------------------------|---|--------------------|
| Вал — частичный вкладыш | Исходное После обработки лазером | 0,18·10 ⁻⁹ 0,98·10 ⁻¹⁰ | 0,040 0,033 |
| Вал — плоский образец | Исходное После обработки лазером | 1,15·10 ⁻⁸ 0,40·10 ⁻⁸ | 0,189 0,072 |

Примечание. Длительность испытаний для первой схемы 3 ч, для второй — 8 ч.

При одновременном введении в покрытие частиц с высокой твердостью и частиц твердой смазки износостойкость и антифрикционные свойства повышаются. Наилучшими триботехническими свойствами обладают композиционные покрытия на основе никеля. В табл. 31 приведены значения износостойкости

28. Твердость и относительная износостойкость стали Ст3, упроченной переходными металлами и их карбидами [100]

27. Относительная износостойкость стали 45, упроченной тугоплавкими соединениями [100]

| Материал электрода | Относительная износостойкость ε |
|--|---------------------------------|
| Сталь 45 в исходном состоянии | 1,0 |
| TiB ₂ | 8,0 |
| ZrB ₂ + 5 % Mo | 7,6 |
| Cr ₃ C ₂ + 15 % Ni | 6,6 |
| B ₂ C | 5,6 |
| Cr ₃ C ₂ | 5,5 |
| TiC | 5,0 |
| TiC + 30% IX18H9T | 4,7 |
| Ti5K6 | 4,7 |
| ZrC | 4,0 |
| ZrN | 3,3 |
| NbC | 3,5 |

| Материал электрода | Толщина слоя, мкм | Н, МПа | Относительная износостойкость ε |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|---------------------------------|
| Ti | 280—300 | 11 000—12 000 | 1,2 |
| Zr | 300—350 | 13 000 | 1,4 |
| V | 230 | 9 300—12 000 | 1,66 |
| Nb | 200—250 | 13 000—13 700 | 1,7 |
| Ta | 200 | 15 000—16 000 | 2,4 |
| Cr | 300 | 10 130—12 500 | 1,7 |
| Mo | 150—200 | 17 000—19 000 | 1,9 |
| W | 150—200 | 21 000—29 000 | 3,4 |
| TiC | 80—120 | 30 400 | 9,9 |
| ZrC | 70—120 | 26 500 | 7,8 |
| NbC | 80—150 | 16 600 | 5,0 |
| Cr ₃ C ₂ | 120—160 | 16 000 | 4,0 |
| Mo ₂ C | 100—180 | 14 000 | 1,4 |
| WC | 110—180 | 17 000 и 32 000 | 2,0 |
| Сталь Ст3 | — | — | 1 |

29. Свойства и относительная износостойкость стали 45, упрочненной электронским легированием, при гидроабразивном изнашивании¹ [100]

| Материал электрода | H, МПа | Относительная износостойкость ϵ |
|--------------------------------|--------|--|
| Сталь 45 в исходном состоянии | 3 800 | 1 |
| TiC | 19 500 | 5,22 |
| Cr ₃ C ₂ | 14 500 | 4,07 |
| TiB ₂ | 29 000 | 3,76 |
| ZrB ₂ | 21 000 | 3,62 |
| ZrC | 20 500 | 3,08 |
| NbC | 18 500 | 3,05 |

¹ Испытания в течение 4 ч, диаметр струи 6 мм, окружная скорость образцов, закрепленных на диске, 60 м/с.

30. Относительная разгаростойкость¹ стали 5ХНВ, упрочненной электронским легированием [100]

| Материал электрода | Количество циклов до образования сетки трещин | Относительная разгаростойкость |
|---------------------------------|---|--------------------------------|
| Сталь 5ХНВ в исходном состоянии | 100—150 | 1 |
| Феррохром | 600—700 | 5,2 |
| 93 % TiC + 7 % Fe | 600—700 | 5,2 |
| Ta | 550—700 | 5,0 |
| 14 % V + 86 % Fe | 700—800 | 6,0 |
| Mo | 600—700 | 5,2 |
| Cr | 600—700 | 5,2 |

¹ Циклический нагрев ТВЧ до 650 °С и охлаждение в проточной воде до 30—40 °С.

31. Состав и свойства никелевых композиционных покрытий [9]

| Основа покрытия | Объемное содержание MoS ₂ , % | H, МПа | Относительная износостойкость ϵ |
|-----------------------------------|--|--------|--|
| Ni-WC | 6,4 | 3900 | 1,1 |
| Ni-TiC | 8,6 | 4500 | 5,5 |
| Ni-Al ₂ O ₃ | 7,3 | 3800 | 2,7 |
| Ni-ZrO ₂ | 6,2 | 3800 | 1,1 |
| Ni-ZrB ₂ | 6,2 | 3800 | 1,5 |
| Ni-NiB ₂ | 4,0 | 4000 | 2,7 |

*1 Износостойкость дана в сравнении с основой покрытия (без MoS₂).

стойкости для ряда композиционных никелевых покрытий. Значения коэффициента трения существенно снижаются при введении в состав покрытия даже небольшого количества твердой смазки (около 1 % MoS₂).

Химико-термические методы модифицирования поверхностных слоев [27, 42, 54, 81, 101, 107] металлов и сплавов сочетают в себе одновременное термическое и химическое воздействия с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя. Осуществляются они в результате диффузионного насыщения металла или сплава неметаллами C, N, B, Si и др. или металлами Al, Cr, Zr и др. (раздельного и в ряде методов совместного) в определенном температурном интервале в активной (или специально-активируемой) среде.

Для повышения износостойкости и долговечности деталей из сталей широко применяется цементация (науглероживание), нитроцементация (цианирование, карбонитрация) и азотирование. В меньшей степени применяется насыщением бором и кремнием, а также металлами (Cu, Al и др.). Выбор того или иного способа насыщения и диффундирующего элемента (элементов) осуществляется с учетом требований, предъявляемых к свойствам модифицированной поверхности, вида производства, размеров обрабатываемых

32. Сравнительная абразивная износостойкость¹ отдельных фаз диффузионных слоев, полученных при различных видах химико-термической обработки ($p = 1$ МПа, $v = 30$ м/с) [42]

| Вид обработки | Сталь | Фазовый состав слоя | Относительная износостойкость ϵ |
|---|-------|--|--|
| Борирование двухфазное (в расплаве карбид бора + Na ₂ B ₄ O ₇) | 45 | FeB Fe ₂ B | 6,75 2,24 |
| | 10 | FeB Fe ₂ B | 5,00 2,07 |
| | У8 | FeB Fe ₂ B | 6,10 1,76 |
| Борирование однофазное (в расплаве карбид кремния + Na ₂ B ₄ O ₇) | 20 | Fe ₂ B | 2,65 |
| | У8 | Fe ₂ B | 2,49 |
| Хромирование | 20 | Cr ₂₃ C ₆ + Cr ₇ C ₃ | 4,48 |
| | У8 | Cr ₂₃ C ₆ + Cr ₇ C ₃ | 5,60 |
| Силицирование | 10 | α' -фаза α -фаза | 1,56 0,98 |
| | 45 | Cr ₂₃ C ₆ + Cr ₇ C ₃ | 5,17 |
| Хромосилицирование | У8 | Cr ₂₃ C ₆ + Cr ₇ C ₃ | 6,75 |
| | У8 | Fe ₃ (Al, Si) | 1,56 |
| Титаноалитирование | У8 | (Fe, Ti) Al + (Fe, Ti) ₃ Al | 2,17 |
| Ванадийалитирование | У8 | (Fe, V) ₃ Al | 1,68 |

¹ В качестве эталона использовалась закаленная сталь 45.

деталей, требуемой толщины получаемого слоя и т. п.

В табл. 32 в качестве примера приведены значения относительной износостойкости сталей 45, 10 и У8 после различных видов химико-термической обработки.

4. МАТЕРИАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ К ИЗНАШИВАНИЮ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ДАВЛЕНИЙ И УДАРНЫХ НАГРУЗОК

При повышенных нагрузках, и особенно при ударном ее приложении, износ и повреждение поверхностей

трения будут определяться не только видом материала и его свойствами, но и специфическими условиями работы: теплонапряженностью, уровнем динамических воздействий, агрессивностью среды, наличием абразива и др. При ударном контактировании поверхностей различают [14] следующие виды изнашивания: ударно-абразивное, ударно-гидроабразивное, ударно-усталостное и ударно-тепловое.

Разрушение металла при ударно-абразивном изнашивании осуществляется в результате малоциклового усталости микрочастиц металла вследствие циклического приложения нагрузки

при упругопластическом контакте. Ударно-абразивное изнашивание связано с внедрением в металл твердой частицы. Критерием износостойкости, как правило, являются значения твердости. Чем выше твердость, тем выше сопротивляемость изнашиванию.

При ударно-гидроабразивном изнашивании соударение металлических поверхностей происходит при наличии жидкости и твердых частиц. При этом изнашивание происходит путем прямого внедрения частиц, связанного с ударом, и относительно их перемещения, что приводит к микрорезанию.

Ударно-усталостное изнашивание происходит при многократном соударении поверхностей в отсутствие абразивных частиц. В основе механизма изнашивания этого вида лежит многократная деформация поверхностного слоя, приводящая к наклепу, охрупчиванию и последующему отделению частиц. Износостойкость существенно снижается с увеличением энергии удара.

Ударно-тепловое изнашивание происходит при соударении поверхностей, которые по условиям работы испытывают значительный объемный нагрев. При таком виде износа отделение частиц происходит в результате многократного пластического деформирования или среза объемов металла при внедрении твердых частиц.

К материалам, устойчивым при работе в условиях больших давлений и ударных нагрузок, предъявляются следующие требования: а) повышенная твердость и одновременно определенное количество запас по пластичности; б) повышенная теплостойкость; в) высокая коррозионная стойкость.

В СССР и за рубежом основными материалами для эксплуатации в условиях высоких давлений и ударных нагрузок являются инструментальные стали [20]. В результате термической обработки они приобретают высокую твердость, прочность и износостойкость. Многие инструментальные стали обладают также теплостойкостью.

Износостойкость материалов, работающих в условиях больших нагрузок, при ударном их приложении зависит от многих факторов [14, 39, 47, 80, 81, 91].

При ударно-абразивном и ударно-гидроабразивном изнашивании основным критерием интенсивности изнашивания является твердость [81]. М. М. Тененбаум [80] оценивает способность абразивных частиц внедряться в поверхностный слой и разрушать его при перемещении по соотношению значений микротвердости испытываемого материала H и абразива H_a :

$$K_T = \frac{H}{H_a} \quad (1)$$

При критическом значении коэффициента $K_T = 0,5 \div 0,7$ возможно разрушение металла при однократном воздействии абразивной частицы (микрорезание); при $K_T > 0,7$ процесс изнашивания переходит в многоцикловый (частицы износа отделяются в результате многократного деформирования металла) с резко снижающейся интенсивностью изнашивания по мере увеличения коэффициента K_T . При микрорезании интенсивность изнашивания обратно пропорциональна твердости, а при многоцикловом разрушении зависимость интенсивности изнашивания от твердости не является линейной.

При одинаковой твердости стали интенсивность изнашивания уменьшается по мере увеличения содержания остаточного аустенита [80]. По существу, это стали с метастабильным аустенитом. В процессе разрушения микрочастиц металла происходит превращение аустенита в мартенсит; при этом достигается определенное упрочнение поверхностного слоя, создаются сжимающие внутренние напряжения, выделяются мелкодисперсные карбиды по плоскостям скопления.

При ударно-абразивном изнашивании линейная связь между износостойкостью и твердостью сохраняется до определенного значения энергии удара [80]. При увеличении энергии удара наблюдается либо увеличение темпа интенсивности изнашивания при возрастании твердости, либо твердость в определенном интервале вообще не влияет на износостойкость. При ударно-гидроабразивном изнашивании в зависимости от энергии удара повышается содержание углерода и соответственно

твердости оказывает неоднозначное влияние на интенсивность изнашивания.

При ударно-усталостном изнашивании выбор износостойких материалов устанавливается не только исходя из твердости. Динамический характер приложения нагрузок не дает возможности использовать инструментальные стали, обладающие высокой твердостью. Стали высокой твердости (HRC 60—68) обладают малой пластичностью, в том числе ударной вязкостью, и плохо перераспределяют напряжения на участках их концентраций. Поэтому сопротивляемость изнашиванию, связанная с накоплением поврежденной при циклическом нагружении, будет снижаться у сталей, не обладающих определенным запасом пластичности. В связи с этим работа на зарождение трещины, а главное работа, затрачиваемая на ее развитие, у сталей, имеющих высокую твердость, но малый запас пластичности, невелика.

Для сталей с мартенситной структурой и твердостью выше HRC 52—54 не наблюдается прямой зависимости между твердостью и прочностью. При перегреве в процессе закалки, несмотря на высокую твердость, прочность резко падает (рис. 3) [20]. При термической обработке необходимо достичь благоприятного сочетания высокой твердости и прочности и необходимой пластичности.

Снижение твердости с HRC 68 до HRC 55 мало изменяет показатели пластичности. Существенное возрастание этих показателей происходит при снижении твердости HRC до 45—48 из-за коагуляции карбидов. Пластичность возрастает в большей степени у сталей, содержащих меньшее количество карбидов с большей способностью к коагуляции (карбиды M_3C , $M_{23}C_6$), и в меньшей степени для более легированных сталей с карбидами типа M_6C .

Рекомендуются следующие интервалы значений твердости для сталей различного назначения: высокий (св. HRC 59—66) для металлорежущих инструментов и штампов холодного деформирования (твердость, близкую к верхнему пределу, устанавливают для инструментов чистового резания и для

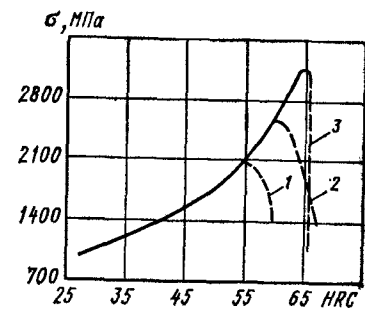


Рис. 3. Предел прочности инструментальных сталей в зависимости от твердости. Прочность определена при растяжении (для HRC до 52—53) и при изгибе (HRC > 54—55). Штриховые линии указывают зависимость, полученные в результате перегрева при закалке: 1 — сталь с 0,5 % С; 1,5 % Cr и 2,5 % W; 2 — сталь с 1,2 % С; 1,7 % W; 0,7 % Cr и 1 % Si; 3 — быстрорежущая сталь типа P6M5

штампов для прессования и вытяжки); умеренный (HRC 42—50) для штампов горячего деформирования, в первую очередь для создания высокой сопротивляемости термической усталости, штампов холодного деформирования (высадочных и др.), работающих в условиях ударных нагрузок, некоторых деревообрабатывающих и слесарно-монтажных инструментов. Износостойкость сталей по мере увеличения температуры отпуска (рис. 4) снижается [14]. Темп снижения износостойкости у сталей одинаков, хотя общий уровень износа существенно ниже у стали У8.

Разрушение в условиях ударно-усталостного изнашивания проявляется наиболее полно при работе штампового инструмента при холодной деформации металла. Износ легированных и углеродистых сталей при одинаковой твердости различен [14]. Легированные стали оказываются более износостойкими, чем углеродистые. Так, сталь У12 имеет в 2—3,2 раза меньшую износостойкость, чем сталь Х12М [14]. Сложные карбиды в легированной стали положительно влияют на износостойкость при малой энергии удара (5 Дж/см²). С увеличением энергии удара до 14 Дж/см² карбидная фаза

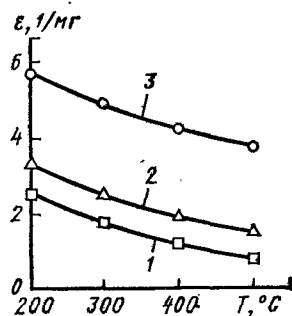


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на износостойкость углеродистых сталей: 1 — сталь 45; 2 — сталь У12; 3 — сталь У8

способствует ускорению изнашивания. Она является своеобразным концентратором напряжений и способствует выкрашиванию отдельных микрообъемов.

Для штамповых сталей содержание углерода ограничивается 0,3—0,5%. Чем меньше углерода, тем допускается большее содержание легирующих элементов.

При ударно-тепловом изнашивании надежность инструментов определяется прежде всего сопротивляемостью термической усталости. Эта характеристика определяется теплостойкостью — способностью сплавов при нагреве рабочей части, возникающем в эксплуатации, сохранять структуру и свойства, необходимые для прохождения рабочего процесса (резание, деформирование и др.). Теплостойкость сталей с карбидным упрочнением связана больше всего со свойствами твердого раствора. Чем выше температура фазового превращения, тем больше теплостойкость стали.

У сталей с интерметаллидным упрочнением теплостойкость определяется выделяющимися частицами фаз — упрочнителей, которые могут эффективно задерживать общее разупрочнение стали вследствие большой дисперсности, отличий типа кристаллических решеток и большой сопротивляемости к коагуляции при нагреве.

Сопротивление термической усталости характеризуется также разгаростойкостью — сопротивляемостью стали образованию поверхностных трещин

при многократном нагреве и охлаждении. Особенно это существенно для штамповых сталей — теплостойких и полутеплостойких. На разгаростойкость влияет структурное состояние, запас пластичности, чувствительность к окислению и др.

При твердости стали в готовом штампе HRC 45—50 структура трооститная. Слабыми участками в таких сталях являются отдельные включения феррита и карбиды. При содержании феррита более 10—15% сопротивляемость разгаростойкости снижается весьма существенно. Карбиды или интерметаллиды сильно снижают разгаростойкость при содержании более 5—8% и при неравномерном их распределении [20].

Для основной группы штамповых сталей, чем выше пластичность (вязкость), тем выше и разгаростойкость. Для сталей, используемых в пресс-формах и для жидкой штамповки, влияние пластичности на разгаростойкость сказывается в меньшей мере. Возникновение трещин является следствием активного воздействия жидких металлов (эффект П. А. Ребиндера [60]), коррозии и эрозии.

Для изготовления деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, широко применяются высокомарганцовистые стали [85] — в частности, аустенитная сталь марки 110Г13 (1—1,3% Си 11—14% Мп, до 0,3% Si, не более 0,03% Р и 0,03% S). В литом состоянии структура ее представляет аустенитную матрицу и карбиды. Для повышения прочности и пластичности ее закаливают в воде от температуры 1100—1150 °C (этим достигается растворение карбидов и получение более однородного аустенита). Термически обработанная таким образом сталь в результате деформирования и ударного воздействия в процессе эксплуатации наклепывается и приобретает высокую износостойкость. Из стали 110Г13 изготавливают звенья гусениц (траки) тракторов и других гусеничных машин, шары дробильных мельниц, щеки камнедробилок и другие изделия, работающие при ударно-абразивном изнашивании.

Высокой износостойкостью при высоких давлениях и ударных нагрузках обладают высококобальтовые (20—

30% Со) твердые сплавы типа В и КС. Их применяют для оснащения бурового инструмента и штампового инструмента, работающих при значительных ударных нагрузках.

5. КАВИТАЦИОННО-СТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Выбор кавитационно-стойких материалов определяется особенностями их работы в условиях кавитации. В движущемся потоке жидкости при уменьшении давления до уровня меньшего, чем упругость насыщенных паров, возникает нарушение сплошности, образуются полости, каверны, пузыри. При движении они сокращаются и исчезают — захлопываются. При смыкании полостей материал, контактирующий с жидкостью, испытывает гидродинамические удары, в результате которых происходит разрушение и эрозия. Давление при этом достигает 126—250 МПа, а температура 230—720 °C.

В кавитационном разрушении материала определенное значение имеет абразивное изнашивание, так как в потоке жидкости в том или ином количестве всегда имеются абразивные частицы [37]. На разрушение влияет и электрохимическая коррозия, которая сказывается в большей степени при малых скоростях потока. Наиболее весомым процессом, определяющим разрушение материала в процессе кавитации, является механическое силовое воздействие, приводящее к разрушению при контактировании. При таком воздействии разрушение может произойти вследствие усталости либо хрупкого или вязкого отделения частиц. Кавитация вызывает пластическую деформацию поверхностных слоев. При этом создается определенная степень деформационного упрочнения металла с возможным последующим разупрочнением. Однако, как правило, в процессе кавитации наблюдается повышение твердости, что указывает на преобладание процессов упрочнения. При увеличении кавитационного воздействия свойства металла (прочность, пластичность, твердость и др.) непрерывно изменяются. Энергия деформа-

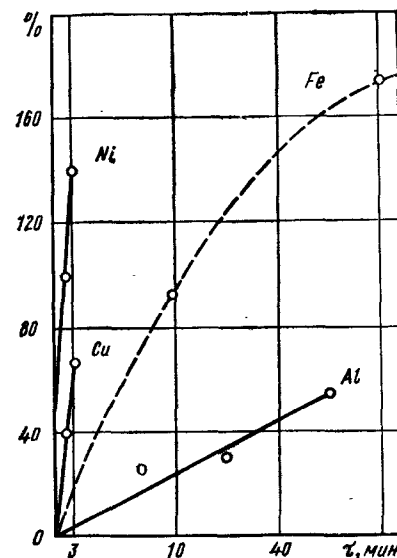


Рис. 5. Кинетика упрочнения разных металлов при микроударном нагружении (относительное изменение микротвердости)

ции расходуется на разрушение; большая же ее часть превращается в теплоту, идет на накопление дефектов, а другая часть расходуется на фазовые превращения, если они могут протекать в сплаве.

В инкубационный — начальный период энергия удара в основном расходуется на пластическую деформацию. При этом металл наклепывается. При кавитационном разрушении деформационное упрочнение и кинетика изменения твердости у металлов с однотипной решеткой разнятся весьма существенно (рис. 5) [7].

Никель и медь упрочняются очень быстро и для них достигается предельное насыщение за короткий промежуток времени. Иначе ведут себя железо и золото. Они имеют большую кавитационно-эрозионную стойкость.

В развитии кавитационно-эрозионного разрушения большая роль отводится структурному фактору. Так, стали ферритного класса сопротивляются кавитационному разрушению хуже, чем аустенитные (рис. 6) [7].

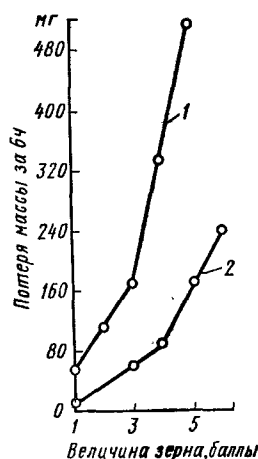


Рис. 6. Влияние величины зерна на сопротивление разрушению феррита (1) и аустенита (2)

Кавитационная стойкость обратно пропорциональна величине зерна. Увеличивает кавитационную стойкость легирование. У сталей ферритного класса более положительный эффект наблюдается при легировании хромом, чем кремнием. Еще больший эффект достигается при легировании молибденом.

Легирование в значительно большей степени влияет на сопротивление кавитационному разрушению у аустенитных сталей. В качестве легирующих компонентов используют марганец и никель. По продолжительности инкубационного периода и кавитационной стойкости марганцовые стали существенно превосходят никелевые. Кавитационная стойкость резко повышается при распаде аустенита с образованием мартенситной структуры. Мартенсит, не содержащий углерод, обладает малой кавитационной стойкостью. Максимальная кавитационная стойкость достигается при содержании углерода 0,4%. Дальнейшее повышение углерода не приводит к повышению кавитационной стойкости. Мартенситная структура обеспечивает большую кавитационную стойкость не только в сталях, но и в медных и титановых сплавах [7].

Стали аустенитного класса относят к сплавам с нестабильным твердым

раствором. Под влиянием деформации от воздействия захлопывающихся пузырьков при кавитации аустенит превращается в мартенсит. У мартенсита, образованного вследствие деформации, субзерна имеют малые размеры, а искажения решетки проявляются в большей степени. Поэтому твердость его выше, чем твердость мартенсита, образованного в результате закалки. Такие стали хорошо сопротивляются разрушению при кавитации.

Реализованы два способа получения мартенситной структуры, обладающей высокой кавитационной стойкостью [7]:

1) использование сталей, легированных хромом и марганцем, образующих нестабильные твердые растворы, способные упрочниться при деформации во время эксплуатации, вследствие образования мартенсита;

2) образование безуглеродистого мартенсита с последующим его старением, приводящим к упрочнению.

К сплавам первой группы относятся аустенитные стали. Типичным представителем такого сплава является сталь 30X10Г10 [7] (табл. 33). В структуре литой стали карбиды расположены по границам зерен и двойников. После закалки от 1100 °С иковки структура стали полностью аустенитная. Распад аустенита проходит очень интенсивно при пластической деформации; при этом достигается высокая степень упрочнения. Стойкость этой стали к кавитационным разрушениям, по сравнению с другими сталями, применяемыми в гидротурбостроении, существенно выше.

Нередко в рабочих условиях детали должны сочетать высокую кавитационную стойкость с коррозионной и абразивной стойкостью. С этой целью в хромомарганцовые стали, содержащие до 0,1% С, 13—17% Сг, 10—15% Мп, добавляют 0,1—0,3% N₂.

Ко второму типу относятся стали с высоким содержанием никеля и низким — углерода (0,03—0,05%), что позволяет при закалке получать безуглеродистый мягкий мартенсит. Легирующие элементы подбираются с учетом того, чтобы при отпуске происходил распад пересыщенного твердого раствора с образованием интерметаллидов.

33. Состав, свойства и кавитационная стойкость некоторых сталей, используемых в гидротурбостроении [7]

| Сталь | Содержание компонентов ¹ , % | | | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ , % | Потеря массы за 6 ч испытаний, мг |
|-------------------|---|----------|-----------|----------|------------|----------------|--------------|-----------------------------------|
| | С | Мп | Сг | Ni | | | | |
| 30Л (1414—75) | 0,14—0,22 | 0,3—0,65 | — | — | 400 | 225 | 25 | 1456 |
| 20X13 (5632—72) | 0,14—0,22 | — | 12,0—14,0 | — | 600 | 400 | 20 | 870 |
| 17X18N9 (5632—72) | 0,13—0,20 | — | 17,0—19,0 | 8,0—10,0 | 570 | 210 | 40 | 890 |
| 30X10Г10 | 0,3—0,4 | 9,0—11,0 | 9,0—11,0 | — | 700 | 400 | 16 | 15 |

¹ Остальное Fe.

К таким легирующим элементам относят Al и Ti, которые в сочетании с никелем могут давать интерметаллиды типа Ni₃Ti, Ni₃Al и Ni₃(Ti, Al).

Разработан новый класс сталей, названных тристалями, т. е. сталями, в которых превращение инициируется деформацией (*Transformation Induced Plasticity*). В таких сталях высокая прочность и пластичность, а также кавитационная стойкость достигаются выбором определенного состава стали, режима термической обработки и температурной деформации. Состав трипсталей следующий: 0,3% С, 9% Сг, 8% Ni, 4% Мо, 2% Мп, 2% Si или 0,25% С, 25% Ni, 4% Мо, 1,5% Мп. Трипстали считают сплавами, сочетающими самую высокую прочность и вязкость. Поэтому они являются самыми надежными конструкционными материалами.

Кавитационная стойкость чугунов, как правило, ниже стойкости сталей. Наиболее слабыми участками микроструктуры, подверженными разрушению от кавитации, являются графитовые включения. Серый чугун с пластичным графитом обладает низкой кавитационной стойкостью. Чугун с шаровидным графитом имеет более высокую сопротивляемость кавитационным разрушениям. В отличие от серых белых чугунов обладают значительно большей

кавитационной стойкостью. Кавитационная стойкость чугунов зависит не только от формы графита, но и от прочности металлической основы на границах раздела с графитом. С целью увеличения прочности основы чугуна его легируют чаще всего никелем или молибденом. Например, легированный серый чугун с 1% Ni и 0,28% Мо имеет в 2 раза большую кавитационную стойкость, чем нелегированный [7].

Нередко в условиях воздействия кавитации работают детали, изготовляемые из цветных сплавов [101]. Наиболее распространенными являются медные сплавы. Различие в кавитационной стойкости медных сплавов определяется фазовым составом. Медные сплавы имеют мягкую, пластичную α -фазу и твердую, хрупкую β -фазу. Разрушение сплава от микродаров при кавитации начинается на границах и распространяется в сторону менее прочной β -фазы. С увеличением количества β -фазы и более равномерным ее распределением кавитационная стойкость возрастает. В бронзах в α -фазном состоянии повышение кавитационной стойкости достигается легированием твердого раствора. В табл. 34 это прослеживается на примере различных бронз [7], легированных кремнием, бериллом, марганцем и др.

34. Сравнительная стойкость бронз в α -фазном состоянии [7]

| Бронза | Режим термической обработки | Потеря массы, мг, через каждый час | | | | | НВ, МПа |
|----------------|---|------------------------------------|-----|-----|------|------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| БрОЦ4-3 | Закалка 800 °С, вода | 215 | 446 | 958 | 1154 | 1640 | 650 |
| БрКМц3-1 | То же | 170 | 351 | 608 | 962 | 1200 | 570 |
| БрБ2 | Закалка 850 °С, вода | 150 | 214 | 470 | 545 | 700 | 1170 |
| БрАЖМц10-3-1,5 | Нагрев 700 °С, охлаждение с печью | 84 | 188 | 356 | 451 | 580 | 1500 |
| БрАМц9-2 | Закалка 1000 °С, вода, отпуск 480 °С, 2 ч, воздух | 29 | 57 | 119 | 240 | 34 | 1150 |
| БрАЖМц6-2-3 | Закалка 800 °С, вода | 10 | 28 | 42 | 96 | 12 | 240 |

35. Сравнительная стойкость бронз в α -и β -фазном состоянии [7]

| Бронза | Структурное состояние | Потеря массы, мг, через каждый час | | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------|------------------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| БрАЖМц6-2-4 | α -фаза | 10 | 28 | 42 | 96 | 120 | 192 | 256 | 301 | 359 | 418 |
| БрАМц9-2 | β -фаза | 6 | 18 | 24 | 33 | 45 | 53 | 65 | 73 | 82 | 90 |

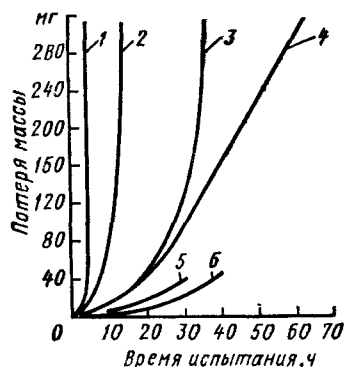


Рис. 7. Кавитационная стойкость титановых сплавов в зависимости от фазового состава:

1) α -фаза; 2) $\alpha + \text{Ti}_2\text{Me}$ (40 % β -фазы + 60 % α -фазы); 3) 40 % β -фазы + 60 % α (высокодисперсная фаза); 4) β -фаза; 5) β -фаза + ω -фаза; 6) 70 % β -фазы + 30 % α (высокодисперсная фаза)

Еще в большей степени легирование повышает кавитационную стойкость в бронзах, находящихся в β -фазном состоянии (табл. 35).

Существенно влияет на кавитационную стойкость форма структурных составляющих. Предпочтительной является зернистая форма, а не пластинчатая. Зернистая форма способствует меньшей концентрации напряжений и распределяет энергию удара на большую площадь.

В качестве кавитационностойких получают распространение титановые сплавы. Наиболее высокой стойкостью обладают сплавы на основе β -фазы (до 70 %) с мелкодисперсными выделениями α -фазы [7] (рис. 7). В титановых сплавах, так же как и в медных, кавитационная стойкость во многом определяется фазовым составом.

36. Химический состав титановых сплавов [101] (основа титан)

| Сплав | Содержание легирующих элементов, % | | | | | | |
|----------------------------|------------------------------------|------|------|-----|-----|-----|----|
| | Al | Mo | Cr | Fe | Si | V | Nb |
| Альфа + бета-сплавы | | | | | | | |
| BT6C | 5,0 | — | — | — | — | 4,0 | — |
| BT6 | 6,0 | — | — | — | — | 4,5 | — |
| AT-6 | 6,0 | — | 1,5 | 1,5 | 1,5 | — | — |
| BT3-1 | 6,0 | 2,5 | 2,0 | 0,5 | 0,3 | — | — |
| BT14 | 4,5 | 3,0 | — | — | — | 1,0 | — |
| BT16 | 2,5 | 5,0 | — | — | — | 5,0 | — |
| BT22 | 5,0 | 5,0 | 1,0 | 0,6 | — | 4,5 | — |
| BT23 | 4,5 | 2,0 | 1,0 | 0,6 | — | 4,5 | — |
| Псевдобета-сплавы | | | | | | | |
| BT15 | 3,0 | 7,5 | 11,0 | — | — | — | — |
| TC6 | 3,0 | 5,0 | 11,0 | — | — | 6 | — |
| Бета-сплавы | | | | | | | |
| 4201 | — | 33,0 | — | — | — | — | — |
| HT-50 | — | — | — | — | — | — | 50 |

Химический состав сплавов, содержащих β -фазу, приведен в табл. 36 [100]. Альфа + бета-сплавы подразделяются на твердеющие при закалке и мягкие после закалки. Высокопрочные титановые сплавы — термически упрочняемые (марок BT6, AT-6, BT3-1, BT14, BT16, BT22, BT23, BT15) — содержат β -фазу в широких пределах (4—85 %).

6. АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Антифрикционные материалы предназначены для использования в различных подшипниках скольжения, применяемых чаще, чем подшипники качения. К числу таких подшипников относятся: гидродинамические и гидростатические, газодинамические и газостатические, самосмазывающиеся с твердой смазкой, самосмазывающиеся пористые (пропитанные жидким или пластичным смазочным материалом) и др.

К антифрикционным материалам предъявляются определенные требования. Они должны обладать: 1) по возможности низкими значениями коэффициента трения (для снижения потерь на трение); 2) высокой износостойкостью; 3) способностью быстро прирабатываться и легко приспособиваться к ужесточению условий работы трибосистемы (вторичная приработка); 4) повышенной сопротивляемостью к заеданию и задиру; 5) хорошими свойствами совместимости трибосистемы; 6) достаточной прочностью и сопротивляемостью усталостным, кавитационным, коррозионным и абразивным повреждениям.

Различают антифрикционные материалы металлические, неметаллические (полимерные, древесные, графитовые и др.) и комбинированные (металлополимерные, графитометаллические и др.).

Металлические материалы. Наиболее распространенными являются сплавы на основе свинца и олова (баббиты), медные сплавы (бронзы и

латуни), алюминиевые и цинковые сплавы. В меньшей мере используются чугуны и стали.

Баббиты. Наиболее давними подшипниковыми материалами являются мягкие сплавы на оловянной и свинцовой основах [81]. Баббиты обладают низкой твердостью (НВ 130—320 МПа), имеют невысокую температуру плавления (240—320 °С), повышенную размягчаемость (НВ 90—240 МПа при 100 °С), отлично прирабатываются и обладают высокими антифрикционными свойствами. В то же время они обладают низким сопротивлением усталости, что влияет на работоспособность подшипников.

В СССР стандартизованы две группы сплавов (табл. 37).

В 1981 г. литейные сплавы на основе свинца и олова для многослойных подшипников регламентированы международным стандартом (Reg. № ИСО 4381—81).

Наиболее распространенные в зарубежной практике баббиты приведены в табл. 38 и 39. Химический состав и свойства сплавов на основе свинца приведены в табл. 38, а на основе олова — в табл. 39.

Выбор подшипниковых сплавов должен осуществляться с учетом толщины слоя баббита.

Гетерогенное микростроение сплавов типа Б83 с крупными твердыми кубическими кристаллами химического соединения SnSb (β -фазы) не способствует удовлетворительной сопротивляемости усталостным повреждениям под действием циклических нагрузок в тонкослойных подшипниках (толщина слоя менее 1 мм) [10]. Для тонкослойных вкладышей баббит должен удовлетворять следующим требованиям:

не иметь резко выраженной неоднородной структуры; для них возможно использование однофазных сплавов при достаточном сопротивлении металла смятию;

поскольку работа тонкослойных прецизионных вкладышей должна протекать в основном в условиях жидкостного трения, меньшее значение имеют антифрикционные свойства материала, более важно повышенное сопротивление усталости;

баббитовый антифрикционный слой желательно применять с пониженной твердостью до НВ 150—200 МПа; при этом улучшается прирабатываемость; сопротивляемость смятию в тонком слое повышается под влиянием подложки; для обеспечения надлежащей долговечности подшипников существенное значение имеет прочность соединения баббита с корпусом, определяемая способностью слоя полуды сопротивляться разрушению.

В СССР для тонкослойных подшипников применяют сплавы СОС6-6, БК2 с добавкой переплава (табл. 40).

Подшипники с толщиной баббитового слоя ~3 мм используют при сравнительно легких условиях работы. Баббитовый слой таких подшипников (Б83, Б16, БН, БКА) обладает хорошей способностью прирабатываться и является своеобразным компенсатором всякого рода неточностей, образованных при обработке и монтаже трущихся деталей и возникающих в процессе эксплуатации. К такому типу относятся подшипники скольжения вагонов, вкладыши тихоходных мощных судовых двигателей, компрессоров и др.

Сплавы на медной основе, употребляемые в качестве антифрикционных, известны как бронзы (оловянные и безоловянные) и латуни. Подшипники изготовляют из бронзы в монометаллическом и биметаллическом исполнении. Монометаллические подшипники (вкладыши, втулки и др.) изготовляют из бронзы, обладающих достаточной прочностью и твердостью. Бронзы, употребляемые в таких подшипниках, подразделяют на сплавы с высоким содержанием олова (до 10 %) и низким (до 3 %). ГОСТ 613—79 определяет состав малооловянистых бронз; с высоким содержанием олова бронзы используют в ответственных случаях. Составы и свойства наиболее употребительных оловянных бронз приведены в гл. II.

Для изготовления свертных втулок, торцовых дисков и других антифрикционных деталей применяют деформируемые оловянные бронзы.

Для биметаллических подшипников в качестве антифрикционного слоя употребляются бронзы, содержащие

37. Составы (в %) баббитов, используемых в СССР [81] Баббиты (ГОСТ 1320—74)

| Баббит | Sn | Sb | Cu | Cd | Ni | As | Pb |
|--------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Б88 | | 7,3—7,8 | 2,5—3,5 | 0,8—1,2 | 0,15—0,25 | — | — |
| Б83 | Основа | 10,0—12,0 | 5,5—6,5 | — | — | — | — |
| Б83С | | 9,0—11,0 | 5,0—6,0 | — | — | — | 1,0—1,5 |
| Б16 | 15,0—17,0 | 15,0—17,0 | 1,5—2,0 | — | — | — | — |
| БН | 9,0—11,0 | 13,0—15,0 | 1,5—2,0 | 0,1—0,7 | 0,1—0,5 | 0,5—0,9 | Основа |
| БС6 | 5,5—6,5 | 5,5—6,5 | 0,1—0,3 | — | — | — | — |

Сплавы [ГОСТ 1209—78 (свинец остальное)]

| Сплав | Sn | Ca | Na | Mg | Al |
|-------|---------|-----------|---------|-----------|-----------|
| БКА | — | 0,95—1,15 | 0,7—0,9 | — | 0,05—0,20 |
| БК2 | 1,5—2,1 | 0,30—0,55 | 0,2—0,4 | 0,01—0,05 | — |
| БК2Ш | 1,5—2,1 | 0,65—0,90 | 0,7—0,9 | 0,03—0,09 | — |

38. Литейные сплавы на основе свинца (международный стандарт ИСО 4381)

| Химические элементы | Химический состав, % | | | |
|---------------------|----------------------|------------|---------------|-----------|
| | PbSb15SnAs | PbSb15Sn10 | PbSb14Sn9CuAs | PbSb10Sn6 |
| Pb | 80,0—84,0 | 71,0—77,0 | 70,0—78,0 | 80,0—86,0 |
| Sb | 13,5—15,5 | 14,0—16,0 | 13,0—15,0 | 9,0—11,0 |
| Sn | 0,9—1,7 | 9,0—11,0 | 8,0—10,0 | 5,0—7,0 |
| Cu | 0,7 | 0,7 | 0,7—1,5 | 0,7 |
| As | 0,8—1,2 | 0,6 | 0,3—1,0 | 0,25 |
| Cd | 0,02 | 0,05 | 0,3—0,7 | 0,05 |
| Ni | — | — | 0,2—0,6 | — |
| Bi | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Fe | — | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Al | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| Другие элементы | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |

Свойства материалов испытываемого прутка

| Твердость *1 НВ, МПа, при температуре, °С: | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|
| 20 | 180 | 210 | 220 | 160 |
| 50 | 150 | 160 | 220 | 160 |

Продолжение табл. 38

| Химические элементы | Химический состав, % | | | |
|---|----------------------|------------|---------------|-----------|
| | PbSb15SnAs | PbSb15Sn10 | PbSb14Sn9CuAs | PbSb10Sn6 |
| 120 | 140 | 140 | 160 | 140 |
| 150 | 100 | 100 | 100 | 80 |
| $\sigma_{0,2}$, МПа, при температуре, °С: | | | | |
| 20 | 39 | 43 | 46 | 39 |
| 50 | 37 | 32 | 39 | 32 |
| 100 | 25 | 30 | 27 | 27 |
| Прочность связи между подшипниковым материалом (предельные величины, см. стандарт ИСО 4386/2) и сталью с содержанием 0,1 % С (толщина подшипникового материала св. 6 мм), МПа | 60 | 70 | 67 | 65 |
| Усталость при изгибе 10^7 циклов, МПа | ± 24 | ± 25 | ± 26 | ± 21 |
| Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ | 25 | 24 | 24,7 | 25,3 |
| Температурный интервал плавления, °С | 240—350 | 240—270 | 240—420 | 240—260 |
| Температурный интервал литья, °С | 450—500 | 480—520 | 480—520 | 480—520 |
| Плотность, т/м ³ | 9,7 | 9,9 | 9,7 | 10,3 |

*1 Для испытания на твердость см. стандарт ИСО 4384, части 2 и 3.

*2 Температура жидкой фазы металла будет 380 °С, если содержание меди выше 0,5 %.

повышенное количество свинца без олова (BrC30) или с 1 % Sn. Для монOMETаллических подшипников иногда используется свинцовистая бронза BrOC5—25 (5 % Sn и 25 % Pb).

Помимо оловянных бронз сравнительно широко используют сплавы, не содержащие олово (безоловянные). Некоторые из сплавов по свойствам не уступают, а иногда и превосходят оловянные бронзы.

В тяжело нагруженных трущихся деталях (дорожные машины, тяжелое станочное оборудование, скользящие соединения теплопередающего оборудования и др.) применяют высокопрочные алюминиевые бронзы [102]. В качестве антифрикционных используются так называемые кремнистые и марганцовистые латуни [81] и находят применение алюминиево-железные латуни.

39. Литейные сплавы на основе олова (международный стандарт ИСО 4381)

| Химические элементы | Химический состав, % | | |
|---------------------|----------------------|-----------|------------|
| | SnSb12Cu6Pb | SnSb8Cu4 | SnSb8Cu4Cd |
| Sn | 79,0—81,0 | 88,0—90,0 | 88,0—90,0 |
| Sb | 11,0—13,0 | 7,0—8,0 | 7,0—8,0 |
| Cu | 5,0—7,0 | 3,0—4,0 | 3,0—4,0 |
| Cd | — | — | 0,8—1,2 |
| Pb | 1,0—3,0 | 0,35 | 0,35 |
| As | 0,1 *1 | 0,1 *2 | 0,5 |
| Ni | — | — | 0,1—0,5 |
| Bi | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| Fe | 0,1 | 0,1 | 0,05 |
| Al | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| Zn | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| Другие элементы | 0,4 | 0,2 | 0,2 |

Свойства материалов испытуемого прутка

| | | | |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| Твердость НВ, МПа, при температуре, °С: | | | |
| 20 | 250 | 220 | 280 |
| 50 | 200 | 170 | 250 |
| 120 | 120 | 110 | 190 |
| 150 | 80 | 80 | 130 |
| $\sigma_{0,2}$, МПа, при температуре, °С: | | | |
| 20 | 61 | 47 | 62 |
| 50 | 60 | 44 | 44 |
| 100 | 36 | 27 | 30 |
| Прочность связи между подшипниковым материалом (предельные величины, см. стандарт ИСО 4386/2) и сталью с содержанием 0,1 % С (толщина подшипникового материала св. 6 мм), МПа | 40 | 80 | 90 |
| Усталость при изгибе 10^7 циклов, МПа | ± 28 | ± 31 | ± 34 |
| Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ | 22,7 | 23,9 | 23,9 |
| Температурный интервал, °С: плавления литья | 183—400 480—520 | 233—360 440—460 | 233—360 440—460 |
| Плотность, т/м ³ | 7,4 | 7,3 | 7,3 |

*1 В отдельных случаях допускается максимальное значение 0,8 %.

*2 В отдельных случаях допускается максимальное значение 0,5 %.

40. Состав (в %) баббитов¹, используемых для тонкослойных подшипников [10]

| Баббит | Sn | Sb | As | Ca |
|--------------------------|---------|-------------|--------------|----------|
| ССС6-6 | 5,5—6,5 | 5,5—6,5 | — | — |
| БС2 | 1,5—2,5 | 9,0—10,0 | 0,5—0,8 | — |
| БК2 с добавкой переплава | 1,5—2,1 | 0,15—0,3 Na | 0,04—0,09 Mg | 0,08—0,3 |

¹ Основа — свинец.

Сплавы на медной основе широко распространены во всем мире. Для примера в табл. 41 приведены составы стандартных бронз, применяемых в ФРГ и США.

Сплавы на алюминиевой основе обладают достаточным сопротивлением усталости, коррозионной стойкостью в маслах, имеют сравнительно высокую задиростойкость и хорошие анти-

41. Составы (в %) бронз, применяемых за рубежом [81]

| Бронза | Стандарт | Состав | | | | Прочие элементы |
|----------------------------------|------------------|--------|----|----|----|-----------------|
| | | Cu | Pb | Sn | Zn | |
| Бронзы, применяемые в ФРГ | | | | | | |
| GCuPb22Sn | DIN 1716 | 84 | 22 | 1 | — | — |
| GCuPb10Sn | DIN 1716 | 80 | 10 | 10 | — | — |
| GCuSn7ZnPb | DIN 1705 | 83 | 6 | 7 | 4 | — |
| GCuSn10 | DIN 1705 | 90 | — | 10 | — | — |
| G CuSn8 | DIN 17662 | 92 | — | 8 | — | — |
| CuZn31Si | DIN 17660 | 68 | — | — | 31 | 1As |
| CuAl19Mn | DIN 17665 | 88 | — | — | — | 3Mn |
| Бронзы, применяемые в США | | | | | | |
| Свинцовистая медь | SAE 480 | 65 | 35 | — | — | — |
| То же | SAE 48 | 70 | 30 | — | — | — |
| Свинцовисто-оловянистая бронза | AMS 4840 | 70 | 25 | 5 | — | — |
| Полупластичная бронза | SAE 67 | 78 | 16 | 6 | — | — |
| Свинцовистая красная бронза | SAE 40 | 85 | 5 | 5 | 5 | — |
| Бронзовые подшипники | SAE 660 | 83 | 7 | 7 | 3 | — |
| Фосфористая бронза | SAE 64 | 80 | 10 | 10 | — | 1,0 P |
| Пушечная бронза | SAE 620 | 88 | 2 | — | 2 | — |
| То же | SAE 620 | 88 | 4 | — | 4 | — |
| Свинцовистая пушечная бронза | SAE 65 | 88 | 2 | 10 | — | — |
| Алюминиевая бронза | AST MB 148-52-9C | 85 | — | — | — | 4 Fe, 11 Al |

42. Состав¹ (в %) алюминиевых антифрикционных сплавов (ГОСТ 14113—78)

| Группа | Сплав | Ni | Mg | Sb | Cu | Si | Sn | Ti |
|--------|--------|---------|---------|---------|------|------|------|-----------|
| I | АН-2,5 | 2,7—3,3 | — | 3,5 | — | — | — | — |
| | АСМ | — | 0,3—0,7 | 3,5—6,5 | — | — | — | — |
| II | АО9-1 | — | — | — | 1,0 | — | 9,0 | — |
| | АО3-1 | 0,4 | — | — | 1,0 | 1,85 | 3,0 | — |
| | АО9-2 | 1,0 | — | — | 2,25 | 0,5 | 9,0 | — |
| | АО9-2Б | — | — | — | 1,75 | — | 9,0 | 0,02—0,10 |
| | АО20-1 | — | — | — | 1,0 | — | 20,0 | 0,02—0,10 |

¹ Остальное — алюминий.

фрикционные свойства. Эти свойства определили тенденцию к замене ими антифрикционных сплавов на свинцовой и оловянной основе, а также свинцовистой бронзы.

Алюминиевые сплавы употребляют для изготовления монометаллических деталей (штулок, подшипников, шарниров и др.) и биметаллических подшипников. Последние изготавливают штамповкой из биметаллической полосы или ленты со слоем алюминиевого сплава, соединенного со сталью в процессе совместного пластического деформирования при прокатке. Для монометаллических подшипников употребляют сравнительно твердые сплавы, а слой биметаллических вкладки изготавливают из менее твердого пластичного металла.

Алюминиевые сплавы классифицируют преимущественно по микроструктурному признаку [10]. Эта классификация отражает антифрикционные свойства сплавов, так как общепризнанной является роль мягких структурных составляющих в уменьшении износа и увеличении сопротивляемости задире трущейся пары. К группе I относятся сплавы, имеющие включения твердых структурных составляющих (FeAl₃, Al₃Ni, CuAl₂, Mg₂Si, AlSb, кремний и др.) в пластичной основе металла. В сплавах группы II наряду с твердыми составляющими имеются мягкие включения. Применя-

емые в СССР антифрикционные сплавы на алюминиевой основе представлены в табл. 42 [56, 102, 103].

Наиболее употребляемые сплавы вошли в международный стандарт ИСО 4383 (табл. 43).

С появлением тягоснагруженных двигателей в автомобилестроении, тракторостроении, транспортном машиностроении и других появилась острая необходимость в материалах подшипников, обладающих повышенной задиростойкостью. В связи с этим в СССР, Японии, Англии и Америке разрабатываются алюминиево-оловянные сплавы, содержащие до 30 и даже 40 % Sn, и отработывается технология изготовления сплавов, содержащих свинец. Такие сплавы обладают [102] способностью хорошо сопротивляться задире при ультратонких смазочных слоях, однако эта особенность достигается наиболее полно при содержании $\geq 14\%$ Pb. В СССР разработан метод получения алюминиево-свинцовых (до 30 % Pb) сплавов из гранул [56]. Гранулы отливаются во вращающийся стакан с круглыми отверстиями при частоте вращения 1500 мин⁻¹. Струя разбивается на капли, которые через отверстия попадают в воду и кристаллизуются со скоростью 10²—10⁴ °C/с. Последующее прессование гранул осуществляется различными способами.

43. Сплавы *1 на основе алюминия (ИСО 4383)

| Химические элементы | Химический состав, % | | | | |
|---------------------|----------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| | AlSn20Cu | AlSn6Cu | AlSi4Cd | AlCd3CuNi | AlSi11Cu |
| Cu | 0,7—1,3 | 0,7—1,3 | 0,05—0,15 | 0,7—1,3 | 0,7—1,3 |
| Sn | 17,5—22,5 | 5,5—7,0 | — | — | 0,2 |
| Ni | 0,1 | 1,3 | — | 0,7—1,3 | 0,1 |
| Cd | — | — | 0,8—1,4 | 2,7—3,5 | — |
| Si | 0,7 *2 | 0,7 *2 | 3,5—4,5 | 0,7 *2 | 10,0—12,0 |
| Fe | 0,7 *2 | 0,7 *2 | 0,35 | 0,7 *2 | 0,3 |
| Mn | 0,7 *2 | 0,7 *2 | 0,2 | 0,7 *2 | 0,1 |
| Ti | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| Другие элементы | 0,5 | 0,5 | 0,25 | 0,15 | 0,3 |

*1 Основа — алюминий.

*2 Общее содержание Si + Fe + Mn не должно превышать 1 %.

Сплавы на цинковой основе, обладая низкой температурой плавления (~400 °С), в большей степени, чем бронзы и алюминиевые сплавы, размягчаются при нагреве, благодаря чему легче прирабатываются. По этой причине подшипники из цинковых сплавов меньше изнашивают сопряженные поверхности цапфы при падении абразивов.

Цинковые сплавы являются весьма технологичными при изготовлении как монометаллических, так и биметаллических трущихся деталей. Соединение цинкового сплава со сталью легко достигается литьем и совместной прокаткой [10]. Соединение жидкого цинкового сплава со сталью достигается с помощью слоя жидкого цинка, наносимого способом горячего цинкования.

Подшипники и другие детали из цинковых сплавов употребляются в литом и обработанном давлением (прокатка, прессованье) состояниях. Составы стандартных сплавов (ГОСТ 21437—75) и их свойства приведены в табл. 44.

После горячей обработки давлением (250—300 °С) прочность и пластичность цинковых сплавов повышаются. Это сказывается и на показателях сопротивления усталости. Например, для

литого сплава ЦАМ9-1,5 предел выносливости при переменном изгибе вращающихся круглых образцов 50 МПа, а для прессованного сплава — 100—110 МПа [10].

Состав наиболее употребительных цинковых сплавов приведен в табл. 45.

Сплавы на железной основе. В качестве антифрикционных материалов стали используют в очень легких условиях работы при небольших давлениях и невысоких скоростях скольжения. Будучи твердыми и имея высокую температуру плавления, стали плохо прирабатываются, сравнительно легко схватываются с сопряженной поверхностью цапфы и образуют задиры. Обычно используют так называемые медистые стали, содержащие малое количество углерода, либо графитизированные стали, имеющие включения свободного графита. Состав некоторых сталей, рекомендуемых к использованию взамен бронз в легких условиях работы, приведен в табл. 46.

Чугуны применяют для подшипников и других трущихся деталей в большем количестве и ассортименте, чем стали. Антифрикционные свойства чугунов определяются в значительной степени строением графитовой составляющей. Чугун с глобидальной формой графита и с толстыми пластинками

44. Состав (в %) отечественных стандартных сплавов на цинковой основе [81]

| Сплав | Al | Cu | Mg | Свойства сплавов | | | | | |
|----------|----------|---------|-----------|---------------------------|--------------|---------|---------------------------|--------------|---------|
| | | | | литых | | | обработанных давлением | | |
| | | | | $\sigma_{\text{в}}$, МПа | δ , % | НВ, МПа | $\sigma_{\text{в}}$, МПа | δ , % | НВ, МПа |
| ЦАМ9-1,5 | 9,0—11,0 | 1,0—2,0 | 0,03—0,06 | 250 | 1,0 | 950 | 300 | 10,0 | 850 |
| ЦАМ10-5 | 9,0—12,0 | 4,0—3,5 | 0,03—0,06 | 250 | 0,4 | 1000 | 350 | 4,0 | 900 |

не менее

45. Состав ¹ (в %) зарубежных цинковых сплавов [81]

| Сплав | Al | Cu | Mg | Mn |
|---------------------|---------|---------|-----------|-----|
| Ю10 (ФРГ) | 9—11 | 0,6—1,0 | 0,02—0,05 | — |
| 410 (ФРГ) | 3,7—4,3 | 0,6—1,0 | 0,02—0,05 | — |
| (Япония) | 10 | 2 | — | 0,2 |
| Алцен 305 (Австрия) | 30 | 5 | — | — |

¹ Основа — цинк.46. Состав ¹ (в %) антифрикционных сталей [81]

| Сталь | Cu | Al | C | Si | Mn | S | P |
|-------------------|----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Медистая | 32 | 2,5 | 0,1 | — | — | — | — |
| Графитизированная | — | — | 1,6 | 1,0 | 0,3 | 0,03 | 0,03 |

¹ Основы — железо.

более износостоек, чем чугун в тонких пластинках. В структуре антифрикционного чугуна желательно иметь минимальное количество свободного феррита (не более 15%) и должен отсутствовать свободный цементит [52, 98]. Область использования антифрикционных чугунов ограничивается легкими условиями работы (см. гл. II).

Сплавы, изготавливаемые методом порошковой металлургии. Прессованием или прокаткой порошков на железной и медной основах и последующим спеканием удается изготовить различные пористые антифрикционные детали [46, 87]. Такие детали перед установкой пропитывают маслом. Как правило, их используют при работе в условиях недостатка смазки, хотя они устойчиво работают и при обильной смазке (трение со смазочным материалом) [87]. В качестве добавки к железным и медным пористым изделиям используют порошки твердых смазок: графита, дисульфида молибдена, нитрида бора и др. Композицию на железной основе обычно составляют с графитом, причем от его сорта в значительной степени зависят механические и антифрикционные свойства. Составы наиболее распространенных пористых сплавов на железной, алюминиевой и медной основах и некоторые свойства их приведены в [81].

Для определения границ использования антифрикционных сплавов необходимо знать сопротивление усталости, прирабатываемость, сопротивляемость изнашиванию, совместимость и задиростойкость [10, 12, 102].

Антифрикционные материалы на основе полимеров предназначены, как правило, для работы с жидкостями, не обладающими смазочными свойствами (водой и др.), и без смазки (в том числе в вакууме). Для повышения антифрикционности, механических свойств и износостойкости, а в ряде случаев и теплопроводности, в исходные полимеры вводят различные наполнители. Часто полимеры используют в качестве составной части антифрикционных материалов, заполняющей поры конструктивной основы (металлической, углеграфитовой, древесной).

Полимеры являются также существенной частью (связующим) большинства твердосмазочных покрытий, нашедших применение главным образом в вакууме и некоторых газовых средах, в которых использование жидких и пластичных смазок по ряду причин недопустимо.

Антифрикционные самосмазывающиеся пластмассы (АСП). Применение подшипников скольжения из антифрикционных самосмазывающихся пластмасс вместо традиционных (металлических) смазываемых подшипников скольжения и подшипников качения предпочтительнее вследствие упрощения конструкции подшипниковых узлов, снижения трудоемкости при изготовлении и эксплуатации, уменьшения габаритов и массы, экономии нефтяных смазочных материалов и т. д.

По составу АСП можно разделить на несколько групп [84].

Первая группа — композиции, содержащие в полимере главным образом антифрикционные добавки (одну или несколько): наполнители со слоистой анизотропной структурой (графит, дисульфид молибдена и другие халькогениды металлов V—VI групп Периодической системы элементов, нитрид бора и т. п.), антифрикционные полимеры (полиэтилен, фторопласт-4 и другие фторполимеры) и жидкие или пластичные смазочные материалы (АСП типа «маслянитов»). Выбор типа и количества наполнителя проводится с учетом назначения АСП и условий его работы: температуры, нагрузки, скорости скольжения, внешней среды и т. д.

При работе на воздухе и в газах с нормальной влажностью в качестве наполнителя применяют графит, в осушенных газах (в том числе инертных) и в вакууме — дисульфид молибдена и другие халькогениды. В зависимости от требований к АСП, природы и дисперсности наполнителя оптимальное его содержание колеблется в широких пределах.

Механические и теплофизические свойства АСП с антифрикционными добавками мало отличаются от соответствующих свойств наполненных полимеров (им присущи многие недо-

статки исходных полимеров: низкая теплопроводность, высокие и нестабильные значения коэффициента термического расширения, повышенной водопоглощение и др.).

Вторая группа — композиции с комплексными наполнителями; наряду с антифрикционными содержат также жесткий прочный наполнитель (например, кокс; стеклянные, углеродные, металлические или полимерные волокна; ткани; древесную крошку и шпон; металлические или минеральные порошки). Форма частиц наполнителя может быть различной. Применяют мелкие и крупные порошки (до 1300 мкм), короткие и непрерывные волокна, а для намоточных изделий и листовых материалов — ленты и ткани.

Введение комплексных наполнителей существенно улучшает физико-механические и триботехнические свойства АСП.

Третья группа — комбинированные материалы (типа металлофторопластовой ленты [75]) совмещают в себе преимущества составных частей: прочность и теплопроводность металлической (стальной) основы; высокие теплопроводность, прочность и противозадирные свойства напеченного пористого слоя из сферических частиц антифрикционного сплава; антифрикционные свойства заполняющей поры и образующей поверхностный слой смеси полимера с наполнителем. В СССР выпускаются комбинированные материалы для работы без смазки (с фторопластом-4) и со смазкой (фторопласт-4 заменен полиформальдегидом). Семейство таких материалов, удачно объединяющих и усиливающих свойства разных групп материалов, будет расширяться.

В качестве основы (связующего) АСП применяют термопластичные [2, 6, 19, 35, 57, 77, 82, 84, 89] и терморезистивные полимеры. Из термопластичных наиболее часто используют высокопрочные кристаллические полиамиды (П6, П12, П66, П610, ПА610), капрон, нейлон, сополимеры формальдегида, поликарбонат, теплостойкие полиамиды, полиакрилаты, а также полиэтилен (главным образом высокомолекулярный), фторопласт-4 и другие фторполимеры.

Из терморезистивных связующих применяют почти все известные полимеры этого типа: фенолформальдегидные, эпоксидные, фурановые, эпоксикремнийорганические и др.

По методу переработки в изделия АСП делятся на литьевые, прессовочные, экструзионные, намоточные. Изделия изготовляют из листовых и стержневых материалов механической обработкой или предварительной намоткой пропитанной ткани с последующим прессованием. Из ленточных материалов типа металлофторопластовой ленты втулки и подшипники другой формы (в том числе сферические «ШН») изготовляют штамповкой. АСП применяют для изготовления втулок подшипников скольжения, уплотнений, поршневых колец, сепараторов шарикоподшипников, направляющих, мелкозубчатых колес и т. п.

Важным показателем АСП является теплопроводность. Наибольшей теплопроводностью, приближающейся к теплопроводности металлов, обладают графитопласты, содержащие углеродного наполнителя в которых достигает 75—85%. Однако такие материалы обладают малой сопротивляемостью ударным разрушениям, что ограничивает их применение в узлах трения, подверженных вибрациям и ударам. Для работы в этих условиях используют низконаполненные термопласты и материалы с волокнистыми или ткаными наполнителями (типа текстолита).

Возможность использования АСП в конкретных узлах приборов и машин в значительной мере определяется такими свойствами, как водопоглощение, химическая стойкость в агрессивных средах, коэффициент термического расширения. Наиболее водостойкими являются АСП на основе сополимеров формальдегида, поликарбоната, фторопласта-4, фторопласта-40, эпоксидных связующих, фурановых смол. АСП характеризуются более низкими значениями коэффициента термического расширения по сравнению с исходными полимерами. Для всех АСП характерна достаточно высокая химическая стойкость (наибольшей обладает АСП на основе фторопласта-4).

Разработано большое количество АСП разнообразных составов [2, 6, 19, 35, 57, 77, 82, 84, 89]. Результаты исследований (значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания), как правило, трудно сопоставимы, так как они в большинстве случаев получены по разным методикам на лабораторных испытательных машинах, различающихся схемами трения, значениями коэффициента взаимного перекрытия, нагрузками, скоростями скольжения.

Наиболее просто и достаточно точно для практики работоспособность АСП оценивается по допустимым значениям произведения pv [p — нагрузка, МПа; v — скорость скольжения, м/с] для заданного ресурса работы.

Так как в большинстве случаев значения коэффициента трения зависят от скорости скольжения, то долговечность можно оценивать по произведению fpu , представляющему собой мощность трения (работу сил трения в единицу времени). Учитывая, что практически вся работа сил трения превращается в теплоту, в некоторых случаях ожидаемую долговечность можно оценивать по произведению pv и возникающей в зоне трения температуре [29, 75].

Наполненные фторполимеры. Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) обладает «врожденными» антифрикционными свойствами [35, 89]. При трении без смазки по самому себе, металлам и другим твердым телам для него характерны (при малых скоростях скольжения) значения коэффициента трения порядка нескольких сотых. При повышении температуры коэффициент трения снижается, в диапазоне отрицательных температур — растет. Эмпирически полученная зависимость коэффициента трения фторопласта-4 от температуры и скорости скольжения описывается (при температурах от комнатной до +150 °С и скорости скольжения до 1 м/с) формулой $f = (824 - 3,1t)v^{0,3} \cdot 10^{-4}$, где t — температура, °С; v — скорость скольжения, см/с. В отличие от большинства других материалов значения коэффициента трения фторопласта-4 по самому себе и другим материалам с повышением скорости скольжения не

снижаются, а растут. Благодаря этому фторопласт-4 обладает высокими анти-скачковыми и демпфирующими свойствами. Но он обладает низкими механической прочностью, износостойкостью и теплопроводностью и высоким коэффициентом термического расширения. Введение наполнителей во фторопласт, не изменяя коэффициента трения, существенно повышает его износостойкость (в сотни и даже тысячи раз) и механические свойства [35].

В нашей стране выпускаются композиционные антифрикционные материалы на основе фторопласта-4 с различными наполнителями (мас. доля, %): Ф4Г21М7 (21 % графита с 7 % дисульфида молибдена); Ф4Г20М5С10 (20 % графита, 5 % дисульфида молибдена и 10 % рубленого стекловолокна); Ф4К20 (20 % кокса); Ф4Г3 (3 % графита); Ф4Г10 (10 % графита); Ф4С15 (15 % стекловолокна); Ф4К15М5 (15 % кокса и 5 % дисульфида молибдена) [35, 57, 84, 89]. Материалы 7В-2А и АФГ-80ВС (ОСТ 48-75—73) содержат в качестве наполнителя графит, а АФГМ (ОСТ 48-75—73) содержит 35 % графита и 15 % дисульфида молибдена [35].

В табл. 47 приведены свойства графитофторопластовых материалов.

Разработаны и другие композиционные материалы на основе фторопласта-4 (наполненные фторопласты) [84, 89]: ФН-202, ФН-3 (10 % порошка никеля, 3 % нитрида бора и дисульфида молибдена); МС-13 (добавки меди и дисульфида молибдена); АМИП-15М (15 % ситалла и 3—5 % дисульфида молибдена).

Износостойкость приведенных выше композиционных материалов на два-три порядка выше, чем исходного полимера. Значения коэффициента трения приблизительно такие же, как у чистого фторопласта-4.

Композиционные материалы на основе фторопласта-4 могут работать без смазки при нагрузке до 14 МПа. Обычно их применяют при скоростях скольжения не более 0,5—1,0 м/с. Допустимые значения произведения pv при работе без смазки не больше 0,1—0,2 МПа·м/с (для 1000 ч работы).

47. Свойства графитофторопластовых материалов [35]

| Свойство | 7В-2А | АФГМ | АФГ-80ВС |
|--|----------|-----------|-----------|
| Плотность, т/м ³ | 1,9—2,0 | 2,1—2,3 | 2,05—2,15 |
| Водопоглощение, % | 0—0,1 | 0—0,02 | 0—0,05 |
| Предел прочности, МПа: | | | |
| при сжатии | 35—38 | 15—26 | 11—19 |
| при изгибе | 20—30 | 10—15 | — |
| НВ, МПа | 85—129 | 67—143 | 60—95 |
| λ , Вт/(м·°С) | 8,2—17,4 | 1,16—1,74 | 0,58—1,16 |
| $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ | 1,5—2,5 | 4,0—7,0 | 8,0—13,0 |
| Е _{сж.} , МПа | 900—1200 | 700—1000 | 600—900 |
| Допустимая рабочая температура, °С | 250 | 180 | 200 |

Металлофторопластовые материалы [28, 29, 70, 75] предназначены для подшипниковых узлов машин и приборов, работающих в широком диапазоне условий.

Подшипники скольжения, изготовляемые штамповкой из ленточного металлофторопластового комбинированного материала [29, 70, 75], способны успешно работать без смазки в различных газовых средах (в том числе и химически активных) и в вакууме, а также при недостаточной смазке в диапазоне температур от -200 до +300 °С (при кратковременной работе до +350 °С). Выдерживают удельные нагрузки до 150 МПа. Металлофторопластовый материал состоит из стальной основы (стали 08кп, 10кп), тонкого напыленного пористого слоя из высококобальтовой бронзы (0,3 мм), поры которого заполнены смесью фторопласта-4 с дисульфидом молибдена (рис. 8). Ленточный материал (ТУ 27-01-01-1—75) изготовляют на линиях непрерывного действия с использованием порошковой металлургии, а подшипники (свертные втулки, упорные шайбы, сферические подшипники) из него — штамповкой. Обработка резанием сведена к минимуму. Исходные материалы расходуется экономно. Технологические процессы изготовления ленты и подшипников практически безотходные. Наружный диаметр металлофторо-

пластовых подшипников в 2 раза, а масса в 10—15 раз меньше, чем у соответствующих подшипников качения. Кроме того, при применении металлофторопластовых подшипников материалоемкость машин и конструкций снижается с уменьшением габаритов и массы корпусных деталей.

Разработана методика выбора подшипников для работы без смазки по значениям произведения нагрузки на скорость pv (МПа·м/с) и температуры в зоне контакта, определяемой расчетным методом или экспериментально. Номограмма для определения длительности работы подшипников без смазки приведена на рис. 9. Задаваясь долговечностью узла и его температурой, можно определить допустимые

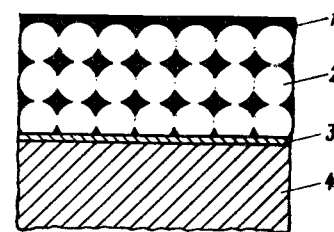


Рис. 8. Металлофторопластовый материал: 1 — фторопласт-4 с наполнителем; 2 — сферические частицы бронзы; 3 — медный подслоя; 4 — стальная основа

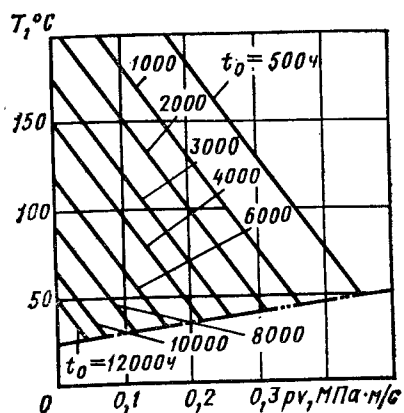


Рис. 9. Номограмма для определения длительности работы металлофторопластовых подшипников по значению произведения pv и температуре

значения произведения и в конечном счете размеры подшипника.

Работоспособность подшипников в жидких средах, не обладающих смазочным действием (воде, бензине, керосине, спирте), а тем более при наличии смазок, существенно выше, чем при работе без смазки. При наличии смазок высокие противозадирные свойства материала обеспечивают работу подшипников при пусковых режимах и перегрузках. Несущая способность определяется из условий образования слоя гидродинамической смазки. Проведенными испытаниями доказана достаточно высокая радиационная стойкость металлофторопластовых подшипников (до 75 Мрад) [35].

Подшипники скольжения из металлофторопластового материала применяются с большим экономическим эффектом в авиации, машиностроении для легкой и пищевой промышленности, автомобилестроении, электротехнической промышленности (в погружных двигателях насосов для добычи нефти). Перспективно их применение в сельхозмашиностроении (в том числе в конструкции зерноуборочных комбайнов), в станкостроении взамен игольчатых подшипников качения и монометаллических бронзовых подшипников, для высоковольтной аппа-

ратуры. Они успешно применяются в аксиально-поршневых насосах гидроприводов кузнечно-прессового оборудования. Перспективно их использование в роботостроении. Это обусловлено их малыми габаритами и массой, абсолютной фреттингоустойчивостью, отсутствием скачков при трении и низким статическим трением. Вследствие аномальной зависимости коэффициента трения от скорости скольжения (с увеличением скорости коэффициент трения растет) металлофторопластовые подшипники обладают высокими демпфирующими свойствами, что подтверждается их многолетней эксплуатацией в несущей системе осовных вертолетов.

Перспективно применение металлофторопластовых подшипников в машинах, узлы трения которых работают при низких и криогенных температурах. Безграничны возможные области перспективного применения металлофторопластовых подшипников в сельскохозяйственном машиностроении и машиностроении для животноводства и кормопроизводства.

Металлофторопластовая лента выпускается (по ТУ 27-01-01-1—75) шириной до 100 мм и толщиной 1,1; 1,6 и 2,6 мм. В соответствии со стандартом СТП 27-01-20-117—75 изготавливают свертные металлофторопластовые втулки диаметром 6—55 мм (разной длины). В табл. 48 приведены размеры металлофторопластовых подшипников. Рекомендуемые зазоры при работе подшипников без смазки приведены в табл. 49.

У комбинированных антифрикционных материалов коэффициент термического расширения практически такой же, как у стали, благодаря этому при эксплуатации подшипников в очень широком диапазоне температур зазор существенно не изменяется. Незначительное изменение зазора наблюдается лишь вследствие несколько большего коэффициента термического расширения у бронзы (слой пористой бронзы имеет толщину $\sim 0,3$ мм) и некоторого «выпучивания» при нагреве фторопласта с наполнителем из пор этого слоя.

В некоторых отраслях промышленности действуют собственные стандар-

48. Размеры (в мм) металлофторопластовых подшипников (по СТП 27-01-20-117—75) [75]

| $d_{вн}$ (пред. откл. по Н8 *1) | $d_{нар}$ (пред. откл. по Н8 *1) / $u8$ | Толщина | Длина L (пред. откл. $-0,2$ мм) |
|---------------------------------|---|---------|---------------------------------|
| 8 | 10 | 1,0 | 8, 10, 12 |
| 10 | 13 | 1,5 | 6, 10, 12, 16, 25 |
| 12 | 15 | 1,5 | 8, 10, 12, 16, 20, 25 |
| 15 | 18 | 1,5 | 10, 12, 16, 20, 22, 25 |
| 16 | 19 | 1,5 | 10, 12, 16, 20, 25 |
| 18 | 21 | 1,5 | 12, 16, 20, 25, 32 |
| 20 | 23 | 1,5 | 12, 16, 20, 25, 32, 40 |
| 22 | 25 | 1,5 | 16, 20, 25, 32, 36, 40 |
| 25 | 28 | 1,5 | 16, 20, 25, 32, 40, 45 |
| 30 | 33 | 1,5 | 20, 25, 32, 40, 45, 50 |
| 32 | 37 | 2,5 | 20, 25, 28, 32, 40, 50 |
| 36 | 41 | 2,5 | 25, 32, 40, 50 |
| 40 | 45 | 2,5 | 32, 40, 45, 50, 60 |
| 45 | 50 | 2,5 | 32, 40, 50, 60, 65 |
| 55 | 60 | 2,5 | 32, 40, 50, 60, 65, 70, 75 |

*1 Предельные отклонения подшипников в запрессованном состоянии. Внутренний диаметр посадочного места в изделии выполняется по посадке Н8 с параметром шероховатости поверхности $Ra \leq 0,63$ мкм.

49. Рекомендуемые зазоры для металлофторопластовых подшипников, работающих без смазки [75]

| Внутренний диаметр втулок, мм | Расчетный диаметр зазор, мкм | Гарантированный зазор, мкм | | |
|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------|---------|
| | | минимальный | максимальный | средний |
| 10—18 | 30 | 30 | 100 | 65 |
| 18—30 | 35 | 35 | 125 | 80 |
| 30—40 | 40 | 40 | 140 | 90 |
| 40—55 | 45 | 45 | 145 | 95 |

ты, в том числе и на свертные втулки с фланцем.

Для смазки водой (в том числе горячей) нашли применение изготавливаемые индивидуально подшипники и подпятники из металлофторопластового материала С-1 и (С-1-У) [28].

По типу металлофторопластового разработан и выпускается промышленностью ленточный комбинированный материал для работы со смазкой. Отличие его от металлофторопластового заключается в использовании вместо фторопласта-4 другого полимера (полиформальдегида) и наполнителя. Толщина слоя полимера, выступающего над вершинами бронзовых частиц, больше (0,2—0,3 мм); благодаря этому рабочую поверхность подшипника после установки на место можно обрабатывать резанием (в случае применения металлофторопластовых подшипников это исключается). В поверхностном полимерном слое в шахматном порядке сделаны углубления для удержания смазки.

Антифрикционные материалы на основе древесины, резины и фторопластовых тканей. При смазке водой в качестве антифрикционных материалов используют резины различного состава. Разработан способ прививки к поверхности резины фторуглеродных молекул, что придает им антифрикционные и антиадгезионные свойства при трении без смазочного материала (скользящие резины).

50. Свойства материалов на основе древесины (ТУ 83-БССР-11-86) [81]

| Свойства | Наполненная древесина | | |
|---|-----------------------|-----------|-----------|
| | АПД-1 | АПД-2 | АПД-3 |
| ρ , т/м ³ | 1,15—1,25 | 1,1—1,5 | 1,3—1,4 |
| НВ, МПа (с торца) | 100—110 | 100—110 | 160—180 |
| Водопоглощение за 30 суток во влажных условиях ($W = 95\%$) | 10—12 | 25—30 | 3—6 |
| Коэффициент трения при работе без смазки | 0,08—0,12 | 0,03—0,04 | 0,09—0,12 |
| Интенсивность линейного изнашивания $I \cdot 10^9$ | 0,7 | 0,0055 | 0,84 |
| Максимальная рабочая температура, °С | 90—100 | 80—90 | 200—210 |

Примечание. Древесина АПД-1 наполнена раствором полиэтилена в масле МС-20; АПД-2 — солями меди и ее оксидами, а также глицеринном; АПД-3 — стеаратом в кремнеорганическом соединении.

Достаточно широкое применение находят антифрикционные материалы на основе природного полимерного материала — древесины. Используется древесина твердых пород (бакаута, самшита, бука), содержащая смолы, обладающие смазочным действием, вещества. Менее ценные породы дерева модифицируют — уплотняют, пропитывают смазочными материалами, полимерами, соединениями металлов [13, 57, 77, 84].

Для подшипников скольжения используют материалы ДСП-Б, ДСП-В и ДСП-Г. В табл. 50 приведены свойства некоторых материалов, разработанных в ИММС АН БССР. Древесная крошка и шпон используются в качестве наполнителей в древлестах — антифрикционных материалах на основе полимеров.

Расширяется применение тканых антифрикционных материалов. Они состоят из волокон (нитей) фторопласта-4 («полифена»), сотканых вместе с волокнами из других материалов (полимеров, металлов и др.) таким образом, что лицевая сторона состоит преимущественно из волокон фторопласта-4, а обратная — из воло-

кон второго материала. Освоено производство тканых материалов нафтлен и даклен. Такие материалы к конструкционной основе приклеиваются (в случае использования металлических волокон они могут припаиваться). Свойства тканых материалов приведены в табл. 51.

Углеграфитовые антифрикционные материалы. Для работы без смазки в различных газовых (исключая инертные газы, осушенные газы и воздух, вакуум) и жидких агрессивных средах в широком диапазоне температур (от -200 до $+2000$ °С) нашли применение графитовые антифрикционные материалы [3, 49, 53, 81, 101]. Они выгодно отличаются от других неметаллических материалов высокими теплопроводностью (93—210 Вт/(м·°С) и электропроводностью (удельное электросопротивление $5 \cdot 10^{-6}$ — $50 \cdot 10^{-6}$ Ом·м), термической стойкостью в нейтральных и восстановительных газовых средах (до 3000 °С) и очень низкими значениями коэффициента термического расширения α [(2—3) 10^{-6}]. Графитовые материалы стойки в большинстве кислот и щелочей, растворах солей и органических

растворителях. При трении по риду металлов без смазки коэффициент трения графитовых материалов может составлять 0,04—0,05. В вакууме [74], инертных газах, осушенном воздухе и ряде других обезвоженных газах значения коэффициента трения могут возрастать на порядок, что сопровождается интенсивным пылевидным изнашиванием.

Графитовые антифрикционные материалы могут применяться как конструкционные для деталей, работающих при высоких температурах в безокислительных средах, что обусловлено повышением прочности графитовых материалов при увеличении температуры. Благодаря этому свойству при высоких температурах (более 1500 °С) прочность графитовых материалов в инертных средах самая высокая.

По геологическим признакам графитовые антифрикционные материалы подразделяются на следующие основные группы: 1) обожженные твердые (АО); 2) графитированные (АГ); 3) обожженные и графитированные, пропитанные смолами (полимерами); 4) обожженные и графитированные, пропитанные металлами; 5) с полимерным связующим (эти материалы правильнее относить к наполненным полимерным материалам). Физико-механические свойства антифрикционных

графитовых материалов приведены в табл. 52.

Графитовые антифрикционные материалы получают из нефтяного кокса с добавками природного графита, а иногда — из пекового кокса, сажи и антрацита в различных соотношениях. Для получения обожженных материалов (АО) отпрессованные заготовки (при давлениях 60—250 МПа) обжигают в восстановительной атмосфере (обычно в газовых печах) при 1000—1500 °С. В процессе обжига идет коксование связующего без структурных изменений основного твердого сырья. Графитированные материалы (АГ) получают при вторичной термической обработке (графитации) обожженных твердых материалов в электропечах при 2200—2500 °С. Исходные углеродные материалы рекристаллизуются, образуя графитовую структуру, совершенство которой зависит от температуры и длительности термической обработки, а также от свойств исходного сырья.

Полученные таким образом материалы — пористые. При заполнении пор металлами или полимерами повышаются плотность и прочностные характеристики материалов.

Разработаны материалы на основе углерода. К ним относятся углесталл, силицированный графит, углеграфитовые материалы с различными

51. Свойства тканых материалов на основе волокон фторопласта-4 [2]

| Свойства | Материал | |
|---|--------------|---|
| | Нафтлен-8 | Даклен |
| Масса 1 м ² , кг | Не менее 1,5 | Легкий, <0,6 Средний, 0,6—1,2 Тяжелый, >1,2 |
| Толщина, мм | 2,5 ± 0,5 | 0,3—0,5 |
| Диапазон рабочих температур, °С | —80 ÷ +120 | —194 ÷ +200 |
| Допустимые рабочие нагрузки, МПа | 600 | 200—600 |
| Коэффициент трения при давлении 20 МПа: | | |
| по полированной стали | 0,032—0,016 | 0,028—0,016 |
| по шлифованной стали | 0,044—0,041 | 0,036—0,032 |

52. Свойства графитовых антифрикционных материалов [53, 81, 101]

| Материал | Предел прочности, МПа | | E, МПа | Твердость по Шору | ρ , г/см ³ | Допустимая рабочая температура, °С | |
|---------------|-----------------------|------------|--------|-------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| | при сжатии | при изгибе | | | | окислительной | восстановительной и нейтральной |
| АО-1500 | 150—180 | 60—80 | 16 000 | 60—65 | 1,65—1,7 | 350—400 | 1300—1500 |
| АО-600 | 110—150 | 50—70 | 14 000 | 55—60 | 1,5—1,6 | 300—350 | 1200—1400 |
| АГ-1500 | 80—100 | 40—50 | 13 000 | 45—50 | 1,7—1,8 | 400—450 | 2300—2500 |
| АГ-600 | 60—80 | 35—40 | 10 000 | 43—45 | 1,6—1,7 | 400—450 | 2300—2600 |
| АО-1500-Ф | 300—350 | 140—170 | 16 500 | 70—75 | 1,75—1,8 | — | — |
| АО-1500-К | 230—250 | 90—100 | 16 000 | 70—72 | 1,7—1,75 | — | — |
| АГ-1500-Ф | 160—180 | 70—80 | 13 500 | 55—60 | 1,75—1,80 | — | — |
| АГ-1500-К | 100—120 | 50—60 | 13 000 | 50—60 | 1,7—1,75 | — | — |
| АО-1500-СО5 | 260—280 | 100—120 | 17 000 | 70—75 | 2,7—3 | 300 | 300 |
| АО-1500-В83 | 250—270 | 90—100 | 17 000 | 70—75 | 2,6—2,9 | 230 | 230 |
| АГ-1500-СО5 | 150—160 | 60—75 | 13 500 | 65—70 | 2,5—3,1 | — | — |
| АГ-1500-В83 | 140—150 | 50—60 | 13 500 | 70—72 | 2,4—2,8 | — | — |
| АГ-1500-ВрС30 | 150—160 | 60—70 | 13 200 | 70—75 | 2,2—2,5 | — | — |

Примечание. Ф — фенолформальдегидная смола; К — кремнийорганическая смола; СО5 — свинец с 5 % олова; В83 — высокооловянистый баббит; ВрС30 — свинцовая бронза.

пропитками (для работы на воздухе при повышенных температурах) и т. п. В качестве фрикционных (антифрикционных) начинают находить применение материалы из углеродных волокон и тканей в углеродной матрице («термары»). Эти материалы обладают высокими теплостойкостью и прочностными характеристиками. Углерод (графит, кокс, углеродные и графитированные волокна и ткани) широко применяются в качестве компонентов композиционных материалов на основе полимеров и металлов. Значительное количество мелкодисперсного графита (природного и синтетического) используется в качестве добавок к жидким и пластичным смазкам, применяемым в машиностроении и при обработке металлов давлением (главным образом высокотемпературной).

При трении графитовых материалов по металлам и другим твердым материалам (керамике, различным твердым тугоплавким соединениям) на поверхности контакта образуется ориентированная пленка графита (плоскостью базиса параллельно поверхности скольжения). Наилучшая ориентация пленки и минимальные значения коэффициента трения наблюдаются при трении графита по металлам (карбидообразующим и растворяющим углерод), адгезия к которым максимальна.

Интенсивность износа при увеличении нагрузки изменяется мало, до определенного ее значения, превышение которого приводит к нарушению благоприятной ориентации перенесенной пленки, что сопровождается повышением коэффициента трения и многократным увеличением интенсивности изнашивания (пылевидный износ).

Высокие значения коэффициента трения и интенсивный износ наблюдаются при трении графитовых материалов в вакууме и в нейтральных газовых средах [74], особенно после предварительного обезгаживания (например, прокаливанием в вакууме).

Углеродистые антифрикционные материалы применяют при изготовлении поршневых колец компрессоров для сжатия газов (попадание нефтяных смазочных материалов в которые недопустимо) и холодильных агрега-

тов, различных подвижных уплотнений для герметизации газовых и жидких сред, подшипников скольжения (работающих в газовых и жидких средах, в широком диапазоне температур и скоростей скольжения, при активных коррозионных воздействиях), различных направляющих.

Состояние стандартизации антифрикционных материалов. Разработаны и действуют государственные стандарты или технические условия на баббиты на оловянной, свинцово-сурьмянистой и свинцовой основах (ГОСТ 1320—74, ГОСТ 1209—78 и ТУ), антифрикционные алюминниевые сплавы (ГОСТ 14113—78 и ряд ТУ), цинковые сплавы (ГОСТ 21437—75), оловянные (ГОСТ 613—79 и ряд ТУ) и безоловянные бронзы (ГОСТ 18175—78, ГОСТ 493—79), деформируемые оловянистые бронзы для изготовления свертных биметаллических втулок (ГОСТ 5017—74), латуни (ГОСТ 17711—80, ГОСТ 15527—70), биметаллические ленты с алюминиевыми сплавами (ряд ТУ), металлофторопластовые ленты (ТУ), литые полиамиды (ГОСТ 10589—87 и ряд ТУ), капролон (ТУ), наполненные полиамиды (ТУ) и ряд других антифрикционных материалов.

Размеры втулок подшипников скольжения и вкладышей регламентируются ГОСТ 1978—81, ГОСТ 11525—82, ГОСТ 11611—82, ГОСТ 24832—81, ГОСТ 24833—81, ГОСТ 25143—82, ГОСТ 25105—82.

Существует стандарт «Подшипники скольжения машин. Термины и определения» (ГОСТ 18282—88, ГОСТ 27674—88).

7. ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Тормозные устройства из фрикционных материалов предназначены для превращения кинетической энергии движущихся масс в теплоту при сохранении их работоспособности для последующих многократных циклов торможения. При работе в сцеплениях они должны надежно обеспечить передачу движения от того или иного двигателя к исполнительному механизму.

К специфическим условиям работы фрикционных материалов относятся: 1) широкий диапазон скоростей скольжения (до 50 м/с, а иногда и выше) и нагрузок (до десятков тонн); 2) высокий уровень нагрева трущихся поверхностей вследствие трения без смазки; 3) трение в нестационарных условиях при многократных нагревах и охлаждениях; 4) различная продолжительность контактирования трущихся поверхностей.

При таких режимах работы фрикционная трибосистема должна обладать способностью тормозить в заданных условиях; коэффициент трения должен быть в пределах 0,2—0,5 [57]. Наименьший коэффициент трения назначается из условий создания необходимой силы трения; наибольший коэффициент определяется ограничением по самозаклиниванию. В автомобильных тормозах и на железнодорожном транспорте расчетный коэффициент трения принят равным 0,35 и 0,2, а в авиационных тормозах 0,25—0,5. Коэффициент трения изменяется в зависимости от многих параметров (скорости, нагрузки, температуры) и определяется также видом материалов трущихся поверхностей [81].

Разработаны и применяются фрикционные материалы для весьма легких (температура на поверхностях трения до 100 °С), легких (до 250 °С), средних (до 600 °С), тяжелых и сверхтяжелых (до 1000 °С и выше) условий работы [96]. При эксплуатации фрикционных материалов в масле температура обычно не превышает 100—150 °С.

Для легких условий эксплуатации в качестве фрикционных материалов находят применение стали, чугуны и бронзы. Однако для них характерны нестабильные значения коэффициента трения (сильно зависящие от скорости скольжения и температуры) и склонность к схватыванию, особенно при повышенных температурах. Для фрикционных устройств, работающих при условиях эксплуатации средней тяжести, применяют асбофрикционные материалы и спеченные материалы на основе бронз. Для тяжелых и сверхтяжелых условий эксплуатации применяют спеченные материалы на

железной основе, а в последние годы — углеродные материалы (углеродные или графитовые волокна в углеродной матрице). При выборе материала принимается также во внимание способность прирабатываться и сопротивление изнашиванию.

Тормозные детали (накладки, колодки и др.) испытывают напряжения сжатия, растяжения, сдвига, в ряде случаев ударные нагрузки [96]. Поэтому должны учитываться характеристики механических свойств (пределы текучести при растяжении и сжатии, пределы прочности, ударная вязкость, твердость), как при комнатной, так и рабочей температурах. Из физических свойств большее значение имеют теплоемкость и теплопроводность [96, 99], от которых в значительной мере зависит температура, возникающая при торможении. Тепловой режим трения зависит также от конструкции и размеров фрикционного сочленения. Важной характеристикой является коэффициент взаимного перекрытия $K_{вз}$ [59, 96], представляющий собой частное от деления номинальных площадей контакта трущихся элементов (меньшую на большую). Неполное взаимное перекрытие обеспечивает возможность теплоотдачи с открытых участков поверхностей трения; при полном перекрытии вся теплота идет в глубь трущихся тел и тепловой режим сопряжения становится более напряженным.

Фрикционные материалы разделяются на две группы: 1) металлические; 2) неметаллические.

В тяжелых условиях эксплуатации при работе без смазки наиболее долговечными и износостойкими являются легированные чугуны. Лучшие свойства имеют чугуны с перлитной основой. Феррита допускается не более 10%. При более высоком содержании феррита снижается коэффициент трения и облегчается схватывание поверхностей [41]. Срок службы тормозных колодок вагонов железнодорожного транспорта из чугунов с высоким содержанием фосфора (до 3%) по сравнению с серым чугуном, не содержащим фосфора, повышается в среднем на 12%. При этом умень-

53. Состав наиболее употребительных фрикционных материалов, полученных методом порошковой металлургии [77, 86, 101]

| Материал | Мас. доля, % | | | | | | Другие добавки, % |
|----------|--------------|----|----|------------|------------------|--------|--|
| | Fe | Cu | Ni | C (графит) | SiO ₂ | Асбест | |
| ФМК-8 | 45 | — | 25 | 7 | — | — | 10 Cr; 6 W; 7 Cu ₂ S 6 BaSO ₄ 5 FeSO ₄ ; 5 SiC; 5 B ₄ C 6,5 Mn; 6,5 BN; 10 B ₄ C; 3,5 SiC; 2,5 MoS ₂ |
| ФМК-11 | 64 | 15 | 0 | 9 | 3 | 3 | |
| МКВ-50А | 64 | 10 | 0 | 8 | 0 | 3 | |
| СМК-80 | 48 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

шается также интенсивность изнашивания колес.

В качестве фрикционных материалов часто применяются также стали 30ХГСА, 65Г и 12Х18Н9Т.

Перспективно применены спеченные фрикционные материалы на основе железа и меди. Из материалов на железной основе наибольшее распространение получили материалы ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50А и СМК-80 [53, 77, 86]. Их состав приведен в табл. 53, а свойства — в табл. 54.

Фрикционные спеченные материалы на основе меди находят широкое использование при работе без смазки. Оловянистые бронзы обладают высоким коэффициентом трения и по сравнению с железными материалами изнашиваются меньше вследствие меньшей способности схватываться с материалом контртела. Состав фрикционных материалов на медной основе приведен в табл. 55.

В тормозах автотранспорта, тракторов, железнодорожного транспорта

54. Характеристики некоторых фрикционных материалов на железной основе, изготовляемых в СССР [58, 86]

| Материал | ρ , г/см ³ | НВ, МПа | σ_b | $\sigma_{ср}$ | $\sigma_{сж}$ | λ , Вт/(м·°С) | Износ (в мкм) за одно торможение при скорости 20 м/с и мощности торможения $2,5 \cdot 10^7$ Вт/(м ² ·с) | |
|----------|----------------------------|----------|------------|---------------|---------------|-----------------------|--|------------------|
| | | | | | | | Фрикционный материал | Контрольный ЧДМХ |
| ФМК-8 | 6,0 | 600—900 | 9—100 | 70—90 | 450—500 | 37,7 | 5—8 | 1—2 |
| ФМК-11 | 6,0 | 800—1000 | 50—70 | 80—100 | 300—350 | 19—46 | 16,0 | 2,0 |
| МКВ-50А | 5,0 | 800—1000 | 30—40 | 67—85 | 150—210 | 18,8—27,2 | 6,0 | 5,5 |
| СМК-80 | 5,7 | 800—1000 | — | 65—80 | 200—250 | 21—29 | 1,25 | 4,0 |

55. Состав фрикционных материалов на медной основе, полученных методом порошковой металлургии [86]

| Мас. доля, % | | | | | | | Другие добавки, % |
|--------------|------|------|-----|------------|--------|------------------|---|
| Cu | Sn | Pb | Fe | C (графит) | Асбест | SiO ₂ | |
| 68—76 | 8—10 | 7—9 | 3—5 | 6—8 | 0 | 0 | Ti, V, Si, 2—10 As, <6 MoS ₂ , 40 стеклянной фриты, 10 сульфида алюминия |
| 60—75 | 6—10 | 20 | 5 | 1—8 | 0 | 0 | |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 3 | 30 | 0 | |
| 68—86 | 5—10 | 5—15 | 2 | 4—8 | 3 | 3 | До 2 Ni 0,75 Si; 6 Zn |
| 75 | 8 | 5 | 4 | 1—20 | 0 | 0 | |

нашли широкое применение асбофрикционные материалы [57]. Главным компонентом фрикционных асбополимерных материалов (ФПМ) является кризотил-асбест (ГОСТ 12871—83), применяемый в качестве теплоустойчивого материала. Асбест обладает способностью очищать поверхность трения от загрязнений, что способствует высоким значениям коэффициента трения (до 0,8). В качестве армирующих компонентов, наряду с асбестом, используются шлаковая или минеральная вата, а также стеклянные, базальтовые, углеродные и другие волокна. Наполнителями являются железный сурик, баритовый концентрат, оксиды хрома и других металлов, глинозем, каолин, вермикулит, мел и др. Широко используют в ФПМ углеродные наполнители: измельченный кокс, графит, технический углерод. Для снижения температуры на поверхности трения повышением теплопроводности добавляют металлические наполнители в виде порошков или стружки меди, латуни, цинка, алюминия, железа и др.

Связующими в ФПМ являются каучуки и смолы, а также их комбинации. Наибольшее распространение находят бутадиеновые (СКБ, СКБСР, СКД), бутадиен-нитрильные (СКН-26м), бутадиен-метилвинилпирролиновые, стирольные, метилстирольные и другие синтетические каучуки, а также натуральный каучук. Широкое применение нашли фенолформальдегидные и анилинфенолформальдегидные (модифицированные) смолы.

По способу изготовления фрикционные изделия подразделяют на формованные, вальцованные, тканые, спирально- и эллипсо-навитые. Применяют также изделия из пропитанного картона. Основой тканых фрикционных материалов является асбестовая ткань, основой спирально-навитых изделий — асбестовые нити.

Формованные изделия на каучуковом, смоляном и комбинированном связующих применяются в тормозах автотранспортных машин и тракторов, в муфтах сцепления, в тормозах железнодорожного подвижного состава и в других фрикционных устройствах. Недостатком вальцованных фрикционных эластичных материалов (лент) является сравнительно невысокая прочность. Тканые изделия обладают высокой прочностью, но имеют сравнительно невысокую фрикционную теплоустойчивость. Процесс их изготовления трудоемок и мало производительен. Спирально-навитые изделия (с основой из специально переплетенных нитей асбеста) применяют для изготовления накладок сцепления. Прессованные изделия из пропитанного асбестового картона (преимущественно накладки сцепления) имеют низкие эксплуатационные свойства, и применение их нельзя считать перспективным.

Фрикционные асбополимерные детали крепятся к металлическому корпусу или основе (колодке, ведомому диску сцепления и т. п.) различными способами: механически (заклепками, болтами, винтами), приклеиванием,

приформованием (в процессе изготовления).

Тормозные и фрикционные устройства рассчитываются на теплоустойчивость и долговечность [57] с использованием инженерных методов расчета фрикционных пар и процессов торможения [81, 96], разработанных на основе уравнений тепловой динамики трения. Для оценочных практических расчетов применяются методы, основанные на эмпирических и статистических данных стендовых испытаний и эксплуатации фрикционных устройств аналогичных конструкций [99].

В табл. 56 приведены некоторые сведения о серийно выпускаемых нашей промышленностью асбофрикционных материалах [57].

Более 80 % материалов производится методом формования. Около 40 % изделий из асбофрикционных материалов (главным образом тормозные накладки) изготавливают на каучуковом связующем, 25 % — на смоляном связующем, 35 % — на комбинированном.

Некоторые характеристики асбофрикционных материалов, необходимые для расчета процессов торможения, приведены в табл. 57 и 58, а также в [57].

Прочностные свойства (пределы прочности при разрыве, сжатии и срезе, твердость) при повышении температуры для большинства асбофрикционных материалов снижаются и их зависимость описывается экспонентой. Для отдельных материалов при ~300 °C наблюдается переход через минимум (что объясняется структурными превращениями в материале в результате термохимических процессов).

Интенсивность изнашивания асбофрикционных материалов с повышением температуры (до 600 °C) возрастает. В основе механизма износа лежит сначала деструкция полимерного связующего, а затем процессы окисления и выгорания ряда компонентов. В табл. 59 приведены результаты испытаний асбофрикционных материалов при трении трубчатых образцов торцами, которые могут быть использованы для предварительного выбора фрикционных материалов и оценок

рабочих характеристик фрикционных узлов на этапе проектирования и конструирования машин.

Обычно при натуральных испытаниях значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания несколько ниже, чем при лабораторных испытаниях на моделях. Использование этих показателей позволяет в реальной конструкции иметь некоторый коэффициент запаса по тормозному моменту и по сроку службы, обусловленному износом.

Наибольшей фрикционной теплоустойчивостью обладают материалы Ретинакс А (ФК-16Л, код 06) и Ретинакс Б (ФК-24А, код 07). В соответствии с ГОСТ 10851—73 первый из них можно успешно применять в тормозах и муфтах при кратковременной поверхностной температуре до 1100 °C, второй — при температуре до 700 °C. Длительно действующая объемная температура для этих материалов не должна превышать 300 °C. Накладки дисковых тормозов из материалов 145-40 (код 66); Т-266 (код 4); 358-40 (код 94) выдерживают поверхностную температуру до 450—500 °C и объемную до 200—250 °C. Эластичные материалы (коды 26, 27, 28, 44, 52) применяют в узлах трения с поверхностной температурой до 200 °C. Остальные фрикционные асбополимерные материалы работоспособны при максимальных температурах поверхностей трения в пределах 250—350 °C.

Состав и свойства асбофрикционных материалов регламентируются ГОСТ 1786—89, ГОСТ 1198—78, ГОСТ 15960—78, ГОСТ 10851—73*.

Трение и изнашивание асбополимерных материалов осложнено протекающими разнообразными физико-химическими процессами (обусловленными влиянием окружающей среды и высоких температур), часто влияющими на коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Эффективность применения тормозных материалов может быть существенно повышена созданием в зоне трения определенной газовой среды. Ведутся исследования по использованию для этой цели выхлопных газов. В частности, положительный эффект получен при воздействии на тормозной узел газов, состоящих из

56. Краткая характеристика ФПМ и типы изделий на их основе [57]

| Код материала по ОКП | Обозначение асбокаучуковой массы | Типы изделий на основе ФПМ и краткая характеристика |
|----------------------|----------------------------------|--|
| 01 | АГ-1Б | Накладки барабанного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала |
| 02 | — | Накладки сцепления и пластины, формованные из картона, пропитанного фенолформальдегидной смолой |
| 03 | К-5 | Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста, комбинированного связующего (каучук + смола) |
| 04 | К-15-6 | Тормозные колодки, формованные из асбосмоляной смеси |
| 05 | — | Накладки сцепления и сектора, формованные из материала, состоящего из асбестовых нитей с латунной проволокой, пропитанных смолой |
| 06 | ФК-16Л | Тормозные колодки, сектора, вкладыши, формованные из асбосмоляного материала, армированного латунной проволокой |
| 07 | ФК-24А | Тормозные колодки и накладки, формованные из асбосмоляного материала |
| 08 | 43-612 | Тормозные колодки для ленточного тормоза трактора, формованные из асбосмоляного материала |
| 11 | — | Накладки сцепления, тормозные накладки, сектора, пластины, формованные из тканого асбестового материала, армированного латунной или медной проволокой, пропитанного смолой |
| 12 | — | Накладки сцепления, формованные из тканой асбестовой ленты, армированной латунной или медной проволокой, пропитанной олифой из льняного масла |
| 13 | Т-167 | Накладки барабанного тормоза автомобиля «Жигули», формованные из асбокаучукового материала |
| 14 | Т-266 | Накладки дискового тормоза автомобиля «Жигули», формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола + каучук) |
| 15 | Т-332 | Накладки сцепления автомобиля «Жигули» из материала из спирально-навитых асбестовых нитей, армированных латунной проволокой, с латексно-смоляной пропиткой |
| 16 | 1-43 | Накладки барабанного тормоза грузового автомобиля, формованные из смеси на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола) |
| 17 | 1-271 | Накладки сцепления, формованные из смеси на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола), с латунной стружкой |
| 18 | 2-61 | Накладки стояночного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала |
| 21 | 2-339 | Накладки барабанного тормоза грузового автомобиля, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола) |
| 22 | 2-540 | Накладки сцепления и сектора, формованные из материала на основе асбеста, комбинированного связующего (каучук + смола) |

Продолжение табл. 56

| Код материала по ОКП | Обозначение асбокаучуковой массы | Типы изделий на основе ФПМ и краткая характеристика |
|----------------------|----------------------------------|---|
| 23 | 3-2 | Накладки барабанного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала |
| 24 | 3-55 | Тормозные колодки для шахтных подъемных машин и накладки сцепления, формованные из асбокаучукового материала |
| 26 | 6КВ-10 (ЭМ-2) | Накладки фрикционных узлов, тормозные вальцованные эластичные ленты из асбокаучукового материала |
| 27 | 6КВ-10А | Тормозные колодки, формованные из асбокаучукового материала |
| 28 | 6КВ-56А (ЭМ-2) | Тормозные накладки, тормозные вальцованные ленты, накладки сцепления из асбокаучукового материала |
| 29 | 6КХ-1 | Накладки барабанного тормоза грузового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала |
| 31 | 6КХ-1Б | Накладки сцепления, колодки и накладки тормозные, формованные из асбокаучукового материала |
| 33 | 6КХ-15 | Тормозные колодки, формованные из асбокаучукового материала |
| 34 | 6КФ-32 | Накладки барабанного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала |
| 36 | 6КФ-58 | Накладки барабанного тормоза автомобиля, формованные из асбокаучукового материала |
| 37 | 6КФ-59 | То же |
| 41 | 6КФ-61 | » |
| 42 | 6КФ-62 | Накладки барабанного тормоза автомобиля, формованные из асбокаучукового материала, содержащего латунную стружку |
| 43 | 6ЛП-55 | Накладки сцепления и тормозные пластины, сектора из прессованного асблатексного картона |
| 44 | 6-147Н (ЭМ-3) | Тормозные накладки, тормозные вальцованные эластичные ленты из асбокаучукового материала |
| 45 | 7КФ-3А | Накладки сцепления, формованные из асбокаучукового материала |
| 47 | 7КФ-34 | Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола) |
| 51 | 8-1 | Тормозные колодки для железнодорожных вагонов, формованные из асбокаучукового материала |
| 52 | 8-45 (ЭМ-1) | Тормозные вальцованные эластичные ленты, сектора и вкладыши из асбокаучукового материала |
| 53 | 40Б-1-10 | Тормозные накладки для тракторов, работающие в условиях трения со смазкой, формованные из асбосмоляного материала |
| 54 | 41-2 | Тормозные колодки для велосипедов, формованные из асбокаучукового материала |
| 56 | 41-132 | Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола) |

Продолжение табл. 56

| Код материала по ОКП | Обозначение абсолюта каучуковой массы | Типы изделий на основе ФПМ и краткая характеристика |
|----------------------|---------------------------------------|--|
| 57 | 42-321-67 | Фрикционные шайбы рычагов управления отопителем и фрикционные кольца демпфера ведомого диска сцепления легкового автомобиля из асбокаучукового материала, вырубленные из листового вальцованного материала |
| 58 | 42-334-67 | Фрикционные кольца упорного фланца, муфты сцепления легкового автомобиля из асбокаучукового материала |
| 59 | 42-975 | Накладки барабанного тормоза грузового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала |
| 62 | 101-303 | Накладки сцепления спирально-навитого типа, формованные из материала на основе асбестовой нити, армированные латунной проволокой, пропитанной латексом |
| 63 | 143 | Тормозные колодки и накладки, сектора и вкладыши, формованные из асбокаучукового материала |
| 65 | 143-63Т-4 | Накладки сцепления, формованные из асбокаучукового материала |
| 66 | 145-40 | Накладки дискового тормоза легкового автомобиля, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола + каучук) |
| 67 | 221-111-70 | Фрикционные кольца демпфера ведомого диска муфты сцепления легкового автомобиля из асбокаучукового материала |
| 71 | ЛАТ-2 | Асбестовые ленты для фрикционных узлов, тканые, армированные латунной проволокой, с масляной пропиткой |
| 72 | ЛАТ-1 | Асбестовые ленты для фрикционных узлов, тканые, армированные латунной проволокой, с масляно-смоляной пропиткой |
| 73 | — | Фрикционные асбестовые пластины из ткани, пропитанные фенолформальдегидной смолой |
| 76 | 5-6 | Тормозные колодки для вагонов метрополитена, формованные из асбокаучукового материала |
| 79 | АГ-1БС-11 | Тормозные колодки для автомобилей и автопоездов семейства МАЗ-6422 |
| 82 | 1-287 | Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола) |
| 84 | ЛАТ-3 | Асбестовые тканые ленты, армированные латунной проволокой с каучуковой пропиткой |
| 85 | 2140 | Накладки дискового тормоза легкового автомобиля, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола + каучук) |
| 86 | 1-4 | Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола + каучук) |
| 87 | 328-303 | Тормозные колодки для железнодорожных вагонов, формованные из асбокаучукового материала |

Продолжение табл. 56

| Код материала по ОКП | Обозначение асбокаучуковой массы | Типы изделий на основе ФПМ и краткая характеристика |
|----------------------|----------------------------------|---|
| 94 | 358-40 | Накладки дискового тормоза легкового автомобиля, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола + каучук) |
| 97 | 2141 | Накладки сцепления, формованные из асбокаучукового материала |
| 99 | 321-24 | Накладки сцепления, формованные из материала, представляющего собой спирально-навитые асбониты, армированные латунной проволокой, пропитанные латексом и смолой |

57. Физико-механические характеристики накладок барабанных тормозов [57]

| Показатель | Формованные на связующем | | | Эластичные |
|---------------------------|--------------------------|-----------------|-----------|------------|
| | каучуковом | комбинированном | смоляном | |
| НВ, МПа | 200—310 | 210—440 | 250—430 | 20—35 |
| ρ , т/м ³ | 2,0—2,5 | 2,0—2,6 | 2,1—2,5 | 1,9—2,3 |
| Предел прочности, МПа: | | | | |
| $\sigma_{ср}$ | 36—69 | 21—39 | 28—47 | 14—26 |
| $\sigma_{сж}$ | 57—105 | 43—152 | 73—124 | 22—50 |
| $\sigma_{разр}$ | 15—52 | 20—25 | 22—28 | 10—12 |
| $E_{длг}$, МПа | 2100—5000 | 3900—6700 | 5100—7500 | 110—210 |
| Коэффициент трения | 0,44—0,56 | 0,42—0,50 | 0,37—0,40 | 0,46—0,49 |
| c , кДж/(кг·°С) | 0,88—1,17 | 0,92—1,15 | 0,96—1,0 | 0,88—1,10 |
| λ , Вт/(м·°С) | 0,40—0,52 | 0,41—0,64 | 0,76—0,81 | 0,43—0,50 |

58. Физико-механические характеристики накладок сцепления [57]

| Показатель | Формованные на связующем | | Картонно-латексные | Картонно-бакелитовые | Тканобакелитовые | Спирально-навитые |
|---------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|----------------------|------------------|-------------------|
| | каучуковом | комбинированном | | | | |
| НВ, МПа | 230 | 220—270 | 190 | 320 | 280—370 | 110—170 |
| ρ , т/м ³ | 2,2 | 1,9—2,3 | 1,6 | 2,0 | 2,0—2,1 | 1,5—1,8 |
| Предел прочности, МПа: | | | | | | |
| $\sigma_{ср}$ | 34 | 24—45 | 51 | 84 | 81—90 | 11—12 |
| $\sigma_{сж}$ | 89 | 63—110 | 73 | 104 | 95—102 | 37—57 |
| $\sigma_{разр}$ | 34 | 18—36 | 11 | 55 | 18—19 | 14—28 |
| $E_{длг}$, МПа | 3200 | 3500—4500 | 4800 | 5600 | 4700—4900 | 3300 |
| Коэффициент трения | 0,47 | 0,38—0,53 | 0,43 | 0,34 | 0,41—0,44 | 0,5—0,57 |
| c , кДж/(кг·°С) | 1,13 | 0,92—1,13 | 1,09 | 1,05 | 1,22 | 1,26—1,34 |
| λ , Вт/(м·°С) | 0,51 | 0,42—0,48 | 0,35 | 0,35 | 0,44—0,45 | 0,38 |

59. Энергетическая интенсивность изнашивания ФПМ при различных температурах [57]

| Шифр (код) материала | Интенсивность изнашивания (мкг/Дж) при температуре, °С | | | | |
|----------------------|--|------|------|------|------|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| АГ-1Б (01) | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,65 | 1,25 |
| (02) | 0,7 | 0,4 | 0,35 | 1,25 | 2,5 |
| К-5 (03) | 0,1 | 0,15 | 0,3 | 0,65 | 1,3 |
| К-15-6 (04) | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 2,1 |
| (05) | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,8 | 1,9 |
| ФК-16Л (06) | 0,37 | 0,36 | 0,35 | 0,65 | 0,9 |
| ФК-24А (07) | 0,13 | 0,15 | 0,25 | 0,6 | 0,9 |
| 43-612 (08) | 0,3 | 0,3 | 0,35 | 0,6 | 1,5 |
| (11) | 0,35 | 0,35 | 0,75 | 1,3 | 1,6 |
| (12) | 0,35 | 0,45 | 0,7 | 1,25 | 2,15 |
| Т-167 (13) | 0,35 | 0,75 | 1,5 | 2,2 | — |
| Т-266 (14) | 0,6 | 0,4 | 0,35 | 0,75 | 1,6 |
| Т-332 (15) | 0,4 | 0,3 | 0,75 | 1,6 | 2,3 |
| 1-43 (16) | 0,2 | 0,25 | 0,4 | 0,75 | 1,7 |
| 1-271 (17) | 0,1 | 0,13 | 0,15 | 0,25 | 1,15 |
| 2-61 (18) | 0,15 | 0,1 | 0,25 | 0,6 | 1,25 |
| 2-339 (21) | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,6 | 1,25 |
| 2-540 (22) | 0,1 | 0,15 | 0,25 | 0,7 | 1,25 |
| 3-2 (23) | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 2,1 | — |
| 3-55 (24) | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 1,5 | — |
| ЭМ-2, 6КВ-10 (26) | 0,45 | 0,5 | 0,65 | 1,6 | — |
| 6КВ-10А (27) | 0,43 | 0,5 | 0,60 | 1,5 | — |
| ЭМ-2, 6КВ-56А (28) | 0,45 | 0,52 | 0,60 | 1,6 | — |
| 6КХ-1 (29) | 0,2 | 0,2 | 0,6 | 1,2 | 1,8 |
| 6КХ-1Б (31) | 0,3 | 0,31 | 0,40 | 0,85 | 1,7 |
| 6КХ-15 (33) | 0,3 | 0,35 | 0,40 | 0,8 | 1,2 |
| 6КФ-32 (34) | 0,25 | 0,28 | 0,30 | 1,2 | 2,2 |
| 6КФ-58 (36) | 0,25 | 0,27 | 0,32 | 1,25 | 2,3 |
| 6КФ-59 (37) | 0,17 | 0,2 | 0,3 | 1,25 | 2,5 |
| 6КФ-61 (41) | 0,3 | 0,25 | 0,3 | 0,5 | 0,8 |
| 6КФ-62 (42) | 0,3 | 0,22 | 0,3 | 0,6 | 0,8 |
| 6ЛП-55 (43) | 0,25 | 0,2 | 0,75 | 4 | — |
| ЭМ-3, 6-147Н (44) | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 2,4 | — |
| 7КФ-3А (45) | 0,3 | 0,32 | 0,4 | 0,8 | 1,6 |
| 7КФ-34 (47) | 0,1 | 0,15 | 0,3 | 1,5 | 1,8 |
| 8-1 (51) | 0,2 | 0,1 | 0,15 | 0,5 | 1,5 |
| ЭМ-1,8-45 (52) | 0,13 | 0,15 | 0,18 | 0,8 | — |
| 40Б-1-10 (53) | 0,3 | 0,35 | 0,45 | 0,6 | 0,7 |
| 41-132 (56) | 0,13 | 0,15 | 0,2 | 0,4 | 1,1 |
| 42-975 (59) | 0,15 | 0,16 | 0,25 | 0,6 | 1,0 |
| 101-303 (62) | 0,3 | 0,4 | 0,75 | 2,2 | 2,5 |
| 143 (63) | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 1,0 | 2,2 |
| 143-63Т-4 (65) | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,9 | 1,8 |
| 145-40 (66) | 0,3 | 0,35 | 0,48 | 0,7 | 1,3 |
| (73) | 0,9 | 0,9 | 0,3 | 0,8 | 1,6 |
| 5-С (76) | 0,35 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,7 |
| АГ-1БС-11 (79) | 0,13 | 0,15 | 0,23 | 0,55 | 1,0 |

Продолжение табл. 59

| Шифр (код) материала | Интенсивность изнашивания (мкг/Дж) при температуре, °С | | | | |
|----------------------|--|------|------|------|------|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| 1-287 (82) | 0,15 | 0,20 | 0,20 | 0,25 | 0,30 |
| 2140 (85) | 0,25 | 0,30 | 0,45 | 0,65 | 1,2 |
| 1-4 (86) | 0,2 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,35 |
| 328-303 (87) | 0,1 | 0,12 | 0,17 | 0,4 | 1,9 |
| 358-40 (94) | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,45 | 1,5 |
| 2141 (97) | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,8 | 1,6 |
| 321-24 (99) | 0,25 | 0,35 | 0,70 | 2,0 | 2,3 |

60. Сравнение свойств асбеста со свойствами его заменителей (по данным фирмы Феродо) [57]

| Показатель | Хризоти-лаасбест | Стальное волокно | Стекловолокно | Натураль-ные органи-ческие во-локна | Синтетиче-ские органи-ческие во-локна | Минераль-ная вата | Арамидные волокна | Углеродные волокна |
|--|------------------|------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Термостойкость | в | в | в | н | н | в | в | в |
| Теплопроводность | н | в | н | н | н | н | н | н |
| Термическая проч-ность | в | в | в | н | н | в | в | в |
| Стойкость к излому | в | в | н | в | в | н | в | н |
| Площадь поверхности | б | м | м | б | м | м | м | м |
| Совместимость со свя-зующими (смолами) | х | п | х | х | х | х | х | п |

Обозначения: в — высокая; и — низкая; б — большая; м — маленькая; х — хорошая; п — плохая.

74—77 % азота; 0,3—0,8 % кислорода; 5—12 % углекислого газа; 5—10 % окиси углерода; 0,001—0,5 % углеводородов; 0,01 % альдегидов; 0,0002—0,5 % закиси азота [57].

В связи с тем, что асбест небезопасен для здоровья, ведутся исследования, направленные на создание безасбестовых фрикционных материалов. Замена асбеста в тормозных материалах довольно сложна. Трудно подобрать материал, обладающий комплексом свойств, характерных для асбеста: высокими термостойкостью и прочностью, невысокой стоимостью

и др. Зарубежные фирмы используют различные волокна для замены асбеста: металлические (стальные, латунные, бронзовые), углеродные, полиамидные, алюмосиликатные, базальтовые, стеклянные и др. (табл. 60).

Одним из возможных перспективных заменителей асбеста, нашедших применение за рубежом, является высокопрочное и теплостойкое волокно Кевлар. Износостойкость фрикционных накладок, содержащих Кевлар, может быть выше асбестовых при сохранении стабильных фрикционных характеристик и при высоких температу-

рах (волокно не плавится). В ряде случаев целесообразно применять углеродные волокна (особенно в фрикционных материалах (углерод—углерод)). Применение стальных волокон обеспечивает высокую тормозную эффективность, но при этом имеет место повышенное изнашивание контртела. Результаты исследований свидетельствуют о реальной возможности эффективной замены асбеста при производстве отечественных тормозных материалов с необходимым комплексом свойств.

Список литературы

1. Андриевский Р. А., Спивак И. И. Нитрид кремния и материалы на его основе. М.: Металлургия, 1984. 136 с.
2. Антифрикционные самосмазывающиеся пластмассы и их применение в промышленности. М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1984. 143 с.
3. Антифрикционные углеродные материалы: Каталог. М.: Союзпромэкспорт, 1973. 13 с.
4. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов в активированных газовых средах. М.: Машиностроение, 1979. 224 с.
5. Бартев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. 215 с.
6. Богатин О. Б., Мороз В. А., Черский И. Н. Основы расчета полимерных узлов трения. Новосибирск: Наука, 1983. 214 с.
7. Богачев И. Н. Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. М.: Металлургия, 1972. 189 с.
8. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техніка, 1986. 223 с.
9. Бородин И. Н. Упрочнение деталей композиционными покрытиями. М.: Машиностроение, 1982. 141 с.
10. Буше Н. А. Подшипниковые сплавы для подвижного состава. М.: Транспорт, 1967. 224 с.
11. Буше Н. А., Азаренко В. А. Расчет несущей способности вагонного подшипника скольжения//Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1985. № 6. С. 32—35.
12. Буше Н. А., Копытько В. В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. 126 с.
13. Вигдорович А. И., Сагалев Г. В. Применение древопластов в машиностроении. М.: Машиностроение, 1977. 150 с.
14. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М., Албагачев А. Ю. Изнашивание при ударе. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
15. Власов В. М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. М.: Машиностроение, 1987. 304 с.
16. Влияние лазерного термоупрочнения на износостойкость металлов при граничном трении//В. Н. Литвинов, Н. М. Михин, Г. И. Козлов, А. Д. Сокурено//Трение и износ. 1983. Т. IV, № 2. С. 341—343.
17. Влияние температуры на адгезионное взаимодействие поликристаллических алмаза и эльбора в контакте с металлами/Семенов А. П. и др.//ФИЗХОМ. 1975. № 6. С. 131—134.
18. Влияние температуры подложки на структуру и триботехнические свойства тонких слоев MoS_2 , полученных высокочастотным катодным распылением/М. В. Ноженков и др.//Физика, химия и механика. 1984. № 8. С. 113—119.
19. Воронков Б. В. Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение, 1979. 224 с.
20. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
21. Гнесин Г. Г. Карбидкремниевые материалы. М.: Металлургия, 1977. 277 с.
22. Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шенеля В. В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техніка, 1974. 270 с.
23. Горленко О. А. Износостойкость поверхностей, упрочненных лазерной обработкой//Трение и износ. 1981. Т. II, № 1. С. 27—31.
24. Гурьянов Г. В. Электроосаждение износостойких композиций. Кишинев: Штиинца, 1985. 283 с.
25. Данилин Б. С., Сырчи В. К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 62 с.
26. Дороднов А. М., Петросов В. А. О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств//ЖТФ. 1981. Т. 51, № 3. С. 504—524.

27. Дубинин Г. Н. Классификация методов диффузионного насыщения поверхности сплавов металлами/Диффузионные покрытия на металлах. Киев: Наукова думка, 1965. С. 3—12.
28. Дьячков А. К., Маховенко А. И. Применение воды в качестве смазочного материала для подшипников скольжения//Вестник машиностроения. 1981. № 12. С. 27—31.
29. Ефимов А. И., Семенов А. П. Оценка долговечности металлофторметалловых подшипников//Вестник машиностроения. 1975. № 1. С. 3—6.
30. Захаров С. М., Никитин А. П., Загорянский Ю. А. Подшипники колесчатых валов тепловозных дизелей. М.: Транспорт, 1981. 31 с.
31. Зорин Е. И., Сухоруков В. В., Тетельбаум Д. И. Осаждение карбиновых и алмазоподобных пленок в плазме газового ВЧ-разряда//ЖТФ. 1981. Т. 51, № 1. С. 175—177.
32. Износостойкость и структура твердых наплавов/М. М. Хрущов, М. А. Бабичев, Е. С. Беркович и др. М.: Машиностроение, 1971. 96 с.
33. Ионная имплантация/Под ред. Дж. К. Хирвонена. М.: Металлургия, 1986. 392 с.
34. Исследование износа вакуумно-плазменных покрытий из TiN при трении по металлическим материалам/А. П. Любченко, В. М. Мацевитый, Г. Н. Бакакин и др.//Трение и износ. 1983. Т. IV, № 5. С. 892—897.
35. Истомин Н. П., Семенов А. П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. М.: Наука, 1981. 148 с.
36. Козырев С. П. Генезис кавитационного изнашивания//Трение и износ. 1980. № 5. С. 793—808.
37. Козырев С. П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1964. 140 с.
38. Колесников К. С., Колесников Ю. В., Инютин В. П. Легирование поверхностей слоев деталей машин с использованием лазерного излучения//Машиноведение. 1987. № 4. С. 10—19.
39. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
40. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М.: Машиностроение, 1981. 192 с.
41. Ларин Т. В., Асташкевич Б. М., Транковская Г. Ф. Влияние ванадия, меди и алюминия на износостойкость и фрикционные свойства фосфористых чугунов для тормозных колодок//Вестник ВНИИЖТа. 1986. № 8. С. 40—42.
42. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н./Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
43. Лышца Л. С., Гринберг Н. А., Куркумелли Э. Г. Основы легирования наплавленного металла. М.: Машиностроение, 1969. 188 с.
44. Литейные бронзы/К. П. Лебедев, Л. С. Райнес, Г. Ф. Шеметев, А. Д. Горячев. Л.: Машиностроение, 1973. 312 с.
45. Мовчан Б. А., Малашенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наукова думка, 1983. 231 с.
46. Мошков А. Д. Пористые антифрикционные материалы. М.: Машиностроение, 1968. 207 с.
47. Мур Д. Основы применения трибоники. М.: Мир, 1978. 487 с.
48. Наплавочные материалы стран-членов СЭВ (каталог). Киев—М.: МЦНТИ, 1979. 620 с.
49. Новые конструкционные материалы на основе углерода: Каталог М.: 1971. 70 с.
50. Огнеупоры и их применение/Под ред. Я. Инамуры. М.: Металлургия, 1984. 448 с.
51. Особо тугоплавкие элементы и соединения: Справочник/Р. Б. Котельников, С. Н. Башлыков, Э. Г. Галнабаров, А. И. Каштанов. М.: Металлургия, 1969. 372 с.
52. Петриченко В. К. Антифрикционные материалы и подшипники скольжения. М.: Машгиз, 1954. 383 с.
53. Плуталова Л. А. Графитовые антифрикционные материалы. М.: ЦИНТИАМ. Серия VI—81, 1963. 44 с.
54. Повышение качества поверхности и лакирование металлов: Справочник/Под ред. А. Кнаушнера. М.: Металлургия, 1984. 368 с.

55. Повышение ресурса компрессорных лопаток детонационным напылением износостойких покрытий/В. А. Венедиктов, А. З. Шарыпов, А. И. Хорошенин, П. Л. Морозов//Трение и износ. 1980. Т. 1. № 6. С. 1093—1096.
56. Подшипники из алюминиевых сплавов/Н. А. Буше, А. С. Гуляев, В. А. Двоскина, К. М. Раков. М.: Транспорт, 1974. 256 с.
57. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник/Е. В. Зиновьев, А. Л. Левин, М. М. Бородулин, А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
58. Порошковая металлургия. Материалы. Технология. Свойства. Области применения: Справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 622 с.
59. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар/Под ред. И. В. Крагельского. М.: Наука, 1979. 268 с.
60. Ребиндер П. А., Шукин Е. Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессе их деформации и разрушения/Успехи физических наук, 1972. Т. 108. Вып. 1. С. 1—39.
61. Ройх И. Д., Колтунов Л. Н., Федосов С. Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1976. 368 с.
62. Самсонов Г. В. Силициды и их использование в технике. Киев: Изд-во АН УССР, 1959. 204 с.
63. Самсонов Г. В., Винницкий И. М. Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976. 600 с.
64. Самсонов Г. В., Кулик О. П., Полищук В. С. Получение и методы анализа нитридов. Киев: Наукова думка, 1978. 317 с.
65. Самсонов Г. В., Эпик А. П. Тугоплавкие покрытия. М.: Металлургия, 1973. 400 с.
66. Сверхтвердые материалы/Францевич И. Н., Гнесин Г. Г., Курдюмов А. В. и др. Киев: Наукова думка, 1980. 295 с.
67. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: Справочник/Под ред. Косолаповой Т. Я. М.: Металлургия, 1986. 928 с.
68. Семенов А. П. Вопросы получения температуроустойчивых антифрикционных и износостойких покрытий методом контактного эвтектического плавления//Защитные высоко-температурные покрытия. Л.: Наука, 1972. С. 121—126.
69. Семенов А. П. Проблемы трения и износа в современном машиностроении//Вестник АН СССР, 1987. № 6. С. 40—50.
70. Семенов А. П. Рациональные области применения металлофторопластовых подшипников//Вестник машиностроения. 1981. № 12. С. 9—12.
71. Семенов А. П. Создание износостойких и антифрикционных покрытий и слоев на поверхностях трения деталей машин новыми методами//Трение и износ. 1982. № 3. С. 401—411.
72. Семенов А. П. Схватывание металлов. М.: Mashiz, 1958. 280 с.
73. Семенов А. П. Схватывание металлов и методы его предотвращения при трении//Трение и износ. 1980. Т. 1. № 2. С. 236—246.
74. Семенов А. П., Поздняков В. В., Крапошина Л. Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами. М.: Наука, 1974. 109 с.
75. Семенов А. П., Савинский Ю. Э. Металлофторопластовые подшипники. М.: Машиностроение, 1976. 192 с.
76. Семенов А. П., Федько Ю. П., Григоров А. И. Детонационные покрытия и их применение. М.: НИИМаш, 1977. 72 с.
77. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка, 1979. 188 с.
78. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1975. 488 с.
79. Сорокин Г. М. Критерии износостойкости стали при ударе по абразиву//Машиноведение, 1973. № 3. С. 89—94.
80. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 271 с.
81. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. М.: Машиностроение. Кн. 1, 1978. 400 с. Кн. 2, 1979. 358 с.
82. Трение и износ материалов на основе полимеров/В. А. Белый, А. И. Свириденко, М. И. Петроковец, В. Г. Савкин. Минск: Наука и техника, 1976. 432 с.
83. Третьяков В. И. Основы металловедения и технологии производства

- спеченных твердых сплавов. М.: Металлургиздат, 1976. 528 с.
84. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс. М.: ВНИИЦентр ГСССД, 1982. 64 с.
85. Тылкин М. А. Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. М.: Металлургия, 1971. 608 с.
86. Федорченко И. М., Крячек В. М., Панасты И. И. Современные фрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1976. 334 с.
87. Федорченко И. М., Пугина Л. И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980. 403 с.
88. Физико-химические свойства окислов: Справочник/Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1969. 456 с.
89. Фторуглеродные пластники: Каталог-справочник/Под общей ред. С. Г. Малкевич; составитель В. П. Шедрина. Черкассы: Отд-ние НИИТЭХима. 1974. 84 с.
90. Хасуй А. Техника напыления. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
91. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
92. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследование изнашивания металлов. М.: АН СССР, 1960. 351 с.
93. Цыпин Н. В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. Киев: Наукова думка, 1983. 193 с.
94. Цыпин Н. В. Износостойкость твердых сплавов при абразивном изнашивании//Трение и износ, 1983. № 1. С. 80—85.
95. Чапорова И. Н., Чернявский К. С. Структура спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1975. 248 с.
96. Чичинадзе А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М.: Наука, 1967. 231 с.
97. Шеенко И. Н., Орешкин В. Д., Репкин Ю. Д. Современные наплавочные материалы. Киев: Наукова думка, 1970. 238 с.
98. Шпагин А. И. Антифрикционные сплавы. М.: Металлургиздат, 1956. 326 с.
99. Щеренков Г. М., Кулев В. А. Расчет основных размеров и параметров муфт сцепления автомобилей и тракторов//Вестник машиностроения. 1974. № 2. С. 40—42.
100. Электроискровое легирование металлических поверхностей/Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров, Г. А. Бовкун, В. С. Сычев. Киев: Наукова думка, 1976. 220 с.
101. Энциклопедия неорганических материалов. Киев: Главная редакция УСЭ, 1977. Т. 1. 840 с.; Т. 2. 814 с.
102. Pratt G. G. New developments in bearing materials — SAE Preprints. Intern. Autom. Eng. Congress, Jan. 13—17, 1969, N 690112.
103. Sliding — Bearing Materials. — Machine Design, 1974, Vol. 46, N 15. P. 37—44.
104. Tribology International, 1978. Vol. 11. N 2. P. 99—143.
105. Wear, 1978, Vol. 48. N 2. P. 225—266; 291—299.
106. White G., Dearnaley G. The Influence of Nitrogen Ion Implantation on Rolling Contact Fatigue Performance. — Wear, 1980, vol. 64, N 2. P. 327—332.
107. Wilson R. W. Surface Treatment to Combat Wear. — First European Tribology Congress. The Inst. of Mech. Eng. Conf. Publication 18, 1973. P. 165—176.

К материалам с высокими упругими свойствами относятся пружинные стали и сплавы.

В промышленности используются разнообразные пружинные стали и сплавы, так как условия службы изготавливаемых из них упругих элементов (пружин, рессор, мембран, сильфонов и др.) различны. Независимо от условий применения пружинные сплавы должны иметь определенные, характерные для всех конструкционных сплавов, свойства — высокую прочность в условиях статического, циклического или динамического нагружения, достаточную пластичность и вязкость, а также высокое сопротивление разрушению.

Однако основным свойством, которым должны обладать пружинные стали и сплавы, является высокое сопротивление малым пластическим деформациям как в условиях кратковременного (предел упругости), так и длительного (релаксационная стойкость) нагружения, зависящее от состава и структуры этих материалов, а также от параметров воздействия на них внешних условий — температуры, коррозионной активности внешней среды и др. Между сопротивлением малым пластическим деформациям и пределом выносливости во многих случаях существует корреляционная связь. Установлена также связь между сопротивлением малым пластическим деформациям и степенью развития таких неупругих эффектов, как амплитудно-зависимое внутреннее трение, упругое последействие (прямое и обратное) и упругий гистерезис.

Таким образом, сопротивление малым пластическим деформациям определяет весь комплекс основных свойств пружинных сталей и сплавов.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРУЖИНЫХ СПЛАВОВ ПО ОСНОВНЫМ СПОСОБАМ УПРОЧНЕНИЯ

К сплавам, упрочняемым холодной пластической деформацией и последующим отпуском или низкотемпературным отжигом, относятся углеродистые и легированные стали перлитного класса с повышенным содержанием углерода (0,4—1,0%), а также низкоуглеродистые стали аустенитного класса, подвергаемые упрочнению холодной пластической деформацией (после предварительной термической обработки), затем дополнительному отпуску. В первую группу также входят сплавы меди (однофазные латуни, бронзы), молибдена и рення, ниобия и др.

Характерной особенностью всех сплавов рассматриваемой группы является анизотропия упругих свойств, резко выраженная в деформированном состоянии, но уменьшающаяся после отпуска (или при дорекристаллизационном отжиге) в результате перераспределения напряжений и дислокаций.

К сплавам, упрочняемым в результате мартенситного превращения, относятся углеродистые и легированные стали. Эти стали упрочняются в результате мартенситного превращения при закалке, в том числе совмещенной с различными видами термомеханической обработки — высокотемпературной (ВТМО) или низкотемпературной (НТМО) или в процессе холодной пластической деформации, как, например, в сталях переходного аустенитно-мартенситного класса.

Максимум сопротивления малым пластическим деформациям стали и сплавы этой группы приобретают после дополнительного отпуска (старения).

в процессе которого помимо изменения структурного или фазового состояния уменьшается уровень внутренних напряжений.

К сплавам, упрочняемым в результате дисперсионного твердения (старения), относятся мартенситно-старяющиеся стали, аустенитные дисперсионно-твердеющие сплавы, бериллиевые бронзы и т. п., упрочнение которых является следствием выделения дисперсных частиц избыточных фаз из пересыщенного в результате закалки твердого раствора при последующем старении (или отпуске). Максимальное упрочнение этих сталей и сплавов достигается в случае использования термомеханической обработки по следующей технологической схеме: закалка, холодная пластическая деформация и старение (отпуск).

Наиболее перспективным направлением для получения высоких прочностных свойств у существующих сплавов и для создания новых высокопрочных пружинных сплавов является совмещение в каждом из них нескольких структурных механизмов упрочнения. В этом случае классификация даже по основным для каждой группы сплавов методам упрочнения теряет свою определенность и становится слишком сложной и в то же время недостаточно четкой. Поэтому более целесообразно классифицировать пружинные сплавы по назначению.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРУЖИНЫХ СПЛАВОВ ПО НАЗНАЧЕНИЮ

Пружинные сплавы общего назначения относятся к классу конструкционных материалов, и поэтому они должны в первую очередь обладать высокими пределами прочности, упругости, выносливости, релаксационной стойкостью и сопротивлением разрушению.

Пружинные сплавы специального назначения наряду с повышенными механическими свойствами должны иметь определенные физико-химические и физические свойства, требова-

ния к которым изменяются в зависимости от условий эксплуатации соответствующих упругих элементов. В частности, к этим сплавам могут предъявляться требования повышенной коррозионной стойкости, немагнитности, малого удельного электрического сопротивления и др.

Пружинные сплавы общего назначения. К этим сплавам относятся преимущественно углеродистые и легированные стали, главным образом перлитного класса, и лишь в ограниченной степени мартенситного класса (табл. 1). У этих сталей обычно повышенное содержание углерода (0,4—1,2%), что и определяет высокую степень их упрочнения в результате холодной пластической деформации или мартенситного превращения при закалке.

Углеродистые пружинные стали 65, 70, 75, 80, 85, У9А, У10А, У11А, У12А отличаются низкой коррозионной стойкостью, сравнительно высоким температурным коэффициентом модуля упругости и сниженной релаксационной стойкостью даже при небольшом нагреве. Поэтому они непригодны для работы при температурах выше 100 °С. Кроме того, углеродистая сталь имеет малую прокаливаемость и поэтому ее можно применять лишь для изготовления пружин малого сечения. При закалке, когда необходимо охлаждение пружин в воде, неизбежно наблюдается значительная их деформация, а при очень сложных конфигурациях могут возникать трещины.

Легированные пружинные стали отличаются более высокой релаксационной стойкостью, чем углеродистые, и, кроме того, позволяют получать высокие прочностные свойства (в том числе и предел упругости) в сочетании с повышенной вязкостью и сопротивлением хрупкому разрушению в упругих элементах повышенного сечения. Возможность закалки пружин и других упругих элементов из некоторых более высоколегированных пружинных сталей на воздухе также позволяет сильно уменьшить зональные остаточные напряжения, что повышает стабильность характеристик изделий во времени.

1. Химический состав (мас. доли, %) и применение легированных пружинных сталей общего назначения (ГОСТ 14959—79)

| Сталь | C | Mn | Si | Cr | Ni | Cu | Другие элементы | Примерное назначение |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-----------------|---|
| 60Г | 0,57—0,65 | 0,70—1,00 | 0,17—0,37 | ≤0,25 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | Пружины механизмов и машин |
| 65Г | 0,62—0,70 | 0,90—1,20 | 0,17—0,37 | ≤0,25 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 70Г | 0,67—0,75 | 0,90—1,20 | 0,17—0,37 | ≤0,25 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 50ХГ | 0,46—0,54 | 0,70—1,00 | 0,17—0,37 | 0,90—1,20 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | Рессоры автомашин. Пружины подвижного состава железнодорожного транспорта |
| 50ХГА | 0,47—0,52 | 0,80—1,00 | 0,17—0,37 | 0,95—1,20 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 55ХГР | 0,52—0,60 | 0,90—1,20 | 0,17—0,37 | 0,90—1,20 | ≤0,25 | ≤0,20 | 0,001—0,003 В | |
| 55С2 | 0,52—0,60 | 0,60—0,90 | 1,50—2,00 | ≤0,30 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 55С2А | 0,53—0,58 | 0,60—0,90 | 1,50—2,00 | ≤0,30 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 60С2 | 0,57—0,65 | 0,60—0,90 | 1,5—2,0 | ≤0,30 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 60С2А | 0,58—0,63 | 0,60—0,90 | 1,6—2,0 | ≤0,30 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 70С3А | 0,66—0,74 | 0,60—0,90 | 2,40—2,80 | ≤0,30 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 50ХФА | 0,46—0,54 | 0,50—0,80 | 0,17—0,37 | 0,80—1,10 | ≤0,25 | ≤0,20 | 0,10—0,20 V | Пружины особо ответственного назначения; рессоры легковых автомобилей |
| 51ХФА *1 | 0,47—0,55 | 0,30—0,60 | 0,15—0,30 | 0,75—1,0 | — | — | 0,15—0,25 V | |
| 50ХГФА | 0,48—0,54 | 0,80—1,00 | 0,17—0,37 | 0,95—1,10 | ≤0,25 | ≤0,20 | 0,15—0,25 V | |
| 55СГФ | 0,52—0,60 | 0,95—1,25 | 1,5—2,0 | ≤0,30 | ≤0,25 | ≤0,20 | 0,10—0,15 V | |

Продолжение табл. 1

| Сталь | C | Mn | Si | Cr | Ni | Cu | Другие элементы | Примерное назначение |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|---------------------------|---|
| 45ХН2МФА *2 | 0,42—0,50 | 0,50—0,80 | 0,17—0,37 | 0,80—1,10 | 1,30—1,80 | ≤0,20 | 0,20—0,30 Mo, 0,10—0,20 V | Крупные клапанные пружины, торсионные валы |
| 70С2ХА | 0,65—0,75 | 0,4—0,6 | 1,40—1,70 | 0,2—0,4 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | Пружины часовых механизмов. Крупные пружины ответственного назначения |
| 50ХСА | 0,45—0,55 | 0,30—0,50 | 0,80—1,20 | 0,90—1,20 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 60С2ХА | 0,56—0,64 | 0,40—0,70 | 1,40—1,80 | 0,70—1,00 | ≤0,25 | ≤0,20 | — | |
| 60С2ХФА | 0,56—0,64 | 0,40—0,70 | 1,40—1,80 | 0,90—1,20 | ≤0,25 | ≤0,20 | 0,10—0,20 V | |
| 65С2ВА | 0,61—0,69 | 0,70—1,00 | 1,50—2,00 | ≤0,30 | ≤0,25 | ≤0,20 | 0,80—1,20 W | |
| 60С2Н2А | 0,56—0,64 | 0,40—0,70 | 1,40—1,80 | ≤0,30 | 1,40—1,70 | ≤0,20 | — | |

*1 Сталь 51ХФА предназначена для изготовления проволоки.
*2 По ГОСТ 4543—61.

Примечание. Согласно ГОСТ 14959—79 в стали, изготовленной скрап-процессом, содержание остаточных меди и никеля не более 0,3 % каждого, вместо 0,25 % при использовании других металлургических процессов выплавки. Содержание P и S в качественной стали ≤0,035 %, а в высококачественной ≤0,025 % каждого.

В зависимости от конфигурации упругих элементов, их размеров, требуемых свойств и экономичности технологического процесса производства для изготовления этих изделий применяют пружинную сталь: 1) холоднодеформированную, предварительно термически обработанную, обычно патентованную, проволоку или ленту; 2) термически обработанную закалкой и последующим отпуском до заданной прочности ленту или проволоку; 3) холоднокатаную и горячекатаную сталь для пружин, подвергаемых затем закалке.

Для изготовления холоднодеформированной, термически обработанной пружинной проволоки (ГОСТ 9389—75) обычно применяют углеродистые стали с 0,4—1,0 % С в соответствии с ГОСТ 1050—74 и ГОСТ 1435—74, реже, с повышенным содержанием марганца (65Г), а в некоторых случаях — также и низколегированные стали 50ХФА, 70С2ХА согласно ГОСТ 14959—79 (табл. 1), предварительно до холодной пластической деформации подвергнутые термической обработке — патентированию, в результате которой сталь приобретает структуру тонкопластинчатого сорбита. Пружинную проволоку этой группы по значениям прочности разделяют на три класса. Для проволоки максимальной прочности (I класс) обычно применяют углеродистые стали У7А—У9А, а также стали КТ-2 (0,86—0,91 % С; 0,2—0,4 % Mn; 0,17—0,37 % Si) и ЗК-7 (0,68—0,76 % С; 0,5—0,8 % Mn; 0,17—0,37 % Si) с пониженным содержанием примесей; для проволоки повышенной прочности (II и III классы) используют сталь 65Г, а для проволоки нормальной прочности (III класс) — сталь 45.

Проволоку I, II и III классов используют главным образом для изготовления одножильных или многожильных винтовых цилиндрических пружин сжатия и растяжения, работающих в условиях статического или циклического нагружения. Из проволоки III класса из-за ее пониженной прочности изготавливают лишь слабонагружаемые пружины. Проволоку I—

III классов, как правило, изготавливают из углеродистых сталей, в том числе из 65Г, но для пружин, которые работают при повышенных температурах и напряжениях, применяют низколегированные стали. Прочность проволоки тем выше, чем больше суммарная степень холодной пластической деформации (частые обжатия, т. е. за 1 проход при волочении, 10—12 %) или соответственно чем меньше ее диаметр. При этом наибольшее упрочнение при сохранении достаточной пластичности и вязкости достигается только после предварительного патентирования.

В результате упрочняющей холодной пластической деформации патентованная проволока приобретает значительные остаточные напряжения, которые сильно снижают предел упругости, почти не влияя на предел прочности. Для уменьшения этих напряжений и повышения предела упругости и релаксационной стойкости — основных характеристик пружинной стали — готовые пружины после навивки или гибки подвергают последующему низкотемпературному отпуску при 200—300 °С. Рост предела упругости в результате этого отпуска достигает примерно 100 % исходной величины, тогда как предел прочности возрастает примерно лишь на 10 %. Релаксационная стойкость пружин после отпуска возрастает по сравнению с неотпущенными примерно в 2—3 раза. Также возрастает и предел выносливости (на 5—10 %), причем температура отпуска для достижения максимума этого свойства обычно выше (300—350 °С), чем температура отпуска для достижения максимального предела упругости (обычно 200—300 °С) (табл. 2). При назначении режима отпуска следует учитывать влияние не только температуры, но и его продолжительности (табл. 3).

Рекомендуемые режимы отпуска пружин из патентованной высокоуглеродистой стальной проволоки: температура 175 °С с выдержкой 2 ч или 220—300 °С с выдержкой 1 ч или 350 °С с выдержкой 15 мин.

Пружины, изготовленные из патентованной и холоднодеформированной стальной проволоки или ленты, после дополнительного отпуска при-

обретают высокую прочность, в том числе и сопротивление усталости, при повышенной вязкости. Эта сталь рекомендуется для изготовления тяжело нагруженных пружин преимущественно из профилей малого сечения (толщиной или диаметром до 1,5—2 мм). При больших диаметрах проволоки не удается обеспечить высоких степеней обжатия, и поэтому стандартный комплекс механических свойств в этих сечениях ниже, хотя и не уступает свойствам, получаемым после обычной закалки и отпуска. Однако по ограниченной выносливости и меньшей склонности к хрупкому разрушению пружины из патентованных сталей превосходят упрочненные в результате закалки и отпуска. В то же время у стали, закаленной и отпущенной до равной твердости с патентованной и холоднокатаной, более высокий предел упругости и большая релаксационная стойкость при 20 °С; при нагреве эта стойкость для стали после обоих упрочняющих обработок практически одинакова.

Термически обработанную или нагартованную (упрочненную) пружинную ленту и проволоку изготавливают из углеродистой (60, 70, У7А—У12А) или легированной (65Г, 70С2ХА, 60С2А) стали (см. табл. 1). Лента отличается высокой точностью размеров, повышенной прочностью, высоким качеством отделки поверхности в результате шлифования и полирования*, что определяет ее высокое сопротивление хрупкому разрушению и сопротивление выносливости. Последнее может быть повышено при шлифовании не только поверхности, но и закругленных кромок, полученных в результате плющения проволоочной заготовки под валками.

Свойства термически обработанной или нагартованной ленты приведены в табл. 4 и 5.

*1 После шлифования или полирования ленту подвергают низкотемпературному отпуску, который уменьшает возникающие при поверхностной обработке остаточные напряжения и создает оксидную пленку желтую или синюю, способствующую лучшему сохранению смазочного материала.

2. Зависимость усталостной прочности проволоки диаметром 0,5 мм из стали У8А от степени деформации волочением и температуры последующего отпуска

| Степень деформации, % | σ_{-1} (в МПа) после отпуска при температуре, °С | | | | | |
|-----------------------|---|------|-----|------|------|------|
| | Без отпуска | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| 30 | 750 | 750 | 760 | 770 | 750 | 770 |
| 50 | 900 | 900 | 870 | 890 | 880 | 880 |
| 70 | 1020 | 1020 | 980 | 1030 | 1050 | 1000 |
| 90 | 1000 | 1000 | 950 | 980 | 980 | 930 |

3. Влияние продолжительности отпуска при 300 и 500 °С на предел выносливости проволоки диаметром 0,5 мм из стали У8А после волочения с отжигом 70 % (числитель) и 90 % (знаменатель) (По данным Л. А. Красильникова)

| Температура отпуска, °С | σ_{-1} (в МПа) после отпуска при 300 и 500 °С с выдержкой, мин | | | | | |
|-------------------------|---|------|------|------|------|------|
| | 0,1 | 0,5 | 1 | 5 | 10 | 20 |
| 300 | 1020 | 1070 | 1080 | 1070 | 1050 | 1020 |
| | 1030 | 1060 | 1080 | 1000 | 980 | 980 |
| 500 | 1060 | 1100 | 1030 | 1020 | 1060 | 1020 |
| | 1070 | 1020 | 950 | 920 | 920 | 920 |

4. Прочностные свойства термически обработанной или нагартованной ленты (ГОСТ 21997—76)

| Группа прочности | σ_B , МПа | НВ |
|------------------|------------------|---------|
| 1П | 1300—1600 | 375—485 |
| 2П | 1610—1900 | 486—600 |
| 3П | ≥1900 | ≥600 |

5. Свойства вязкости (число переменных изгибов) термически обработанной или нагартованной ленты (ГОСТ 21997—76)

| Толщина ленты, мм | Радиус валков, мм | Число переменных изгибов (не менее) по группам прочности | | | | | |
|-------------------|-------------------|--|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| | | 1П | | 2П | | 3П | |
| | | Стали | | | | | |
| | | 60, 70, 65Г, У7А, У8А | У9А, У10А, У12А, 60С2А, 70С2ХА | 60, 70, 65Г, У7А, У8А | У9А, У10А, У12А, 60С2А, 70С2ХА | 60, 70, 65Г, У7А, У8А | У9А, У10А, У12А, 60С2А, 70С2ХА |
| 0,16 | 2 | 28 | 21 | 21 | 16 | 17 | 14 |
| 0,20 | 2 | 23 | 18 | 17 | 14 | 13 | 10 |
| 0,30 | 4 | 35 | 29 | 26 | 20 | 19 | 18 |
| 0,40 | 4 | 26 | 24 | 19 | 15 | 12 | 10 |
| 0,50 | 6 | 31 | 25 | 22 | 18 | 19 | 15 |
| 0,60 | 6 | 25 | 21 | 17 | 14 | 11 | 9 |
| 0,70 | 6 | 20 | 17 | 12 | 9 | 5 | 3 |
| 0,80 | 8 | 17 | 14 | 11 | 9 | 3 | 2 |
| 0,90 | 8 | 14 | 12 | 7 | 4 | — | — |
| 1,00 | 8 | 12 | 10 | 2 | 1 | — | — |

6. Химический состав (мас. доли, %) сталей для термически обработанной проволоки

| Сталь | C | Mn | Si | Ni | Cr | Al | Cu |
|-------|-----------|-----------|-----------|------|-------|-------|-------|
| 65ГА | 0,65—0,70 | 0,70—1,0 | 0,15—0,30 | ≤0,2 | ≤0,15 | ≤0,08 | ≤0,2 |
| 68ГА | 0,65—0,70 | 0,70—1,0 | 0,15—0,25 | ≤0,2 | ≤0,12 | ≤0,05 | ≤0,15 |
| 68А | 0,65—0,70 | 0,40—0,55 | 0,15—0,25 | ≤0,2 | ≤0,12 | ≤0,05 | ≤0,15 |

Из термически обработанной или нагартованной плюшевой ленты изготавливают пружины сравнительно простой конфигурации путем вырубки с применением, если необходимо, небольшой гибки. После этих операций проводят низкий отпуск при 200—300 °С для снятия напряжений.

Помимо термически обработанной или нагартованной ленты в промышленности для изготовления пружин также применяют и термически обработанную проволоку диаметром 1,2—5,5 мм, изготавливаемую согласно ГОСТ 1071—81 из сталей 65ГА, 68ГА, 68А *1 (табл. 6) и 51ХФА.

*1 По ГОСТ 14959—79.

После закалки и отпуска свойства стальной проволоки зависят от ее диаметра (табл. 7).

Основные достоинства термически упроченной проволоки — минимальные отклонения от прямолинейности формы и повышенная релаксационная стойкость, особенно у проволоки повышенных диаметров. Стали этого типа используют главным образом для изготовления клапанных пружин.

Холоднокатаная и горячедеформированная сталь для пружин (ГОСТ 2283—79) может быть или в нагартованном состоянии, или после отжига, в том числе и после отжига на зернистый перлит. Из этих полуфабрикатов изготавливают пружины более слож-

ной конфигурации и точных размеров, чем из указанных ранее полуфабрикатов. Пружинную холоднокатаную ленту изготавливают из инструментальных (У7—У13 и У7А—У13А) и пружинных (60Г, 65Г, 85, 60С2А, 60С2, 50ХФА, 65С2ВА и 70С2ХА) сталей (см. табл. 1). Механические свойства пружинной холоднокатаной ленты приведены в табл. 8.

Для производства пружин и рессор крупных сечений применяют сортовой и полосовой горячекатаный прокат из углеродистых и легированных сталей (табл. 1). Эти упругие элементы изго-

товляют навивкой или штамповкой в холодном или горячем состоянии. Пружины и другие элементы, изготовленные из холодно- или горячекатаного проката, для достижения требуемого комплекса механических свойств подвергаются упрочняющей обработке — закалке и отпуску или ВТМО и отпуску.

Свойства и режимы термической обработки углеродистых и легированных сталей приведены в табл. 9. Закалку пружин из этих сталей проводят в воде или масле. Пружины, рессоры и другие упругие элементы

7. Механические свойства проволоки (ГОСТ 1071—81)

| Номинальный диаметр проволоки, мм | σ_b , МПа, категории качества | | Диаметр валка, мм | Число перегибов на 180° для проволоки класса | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------|-------------------|--|----|
| | первой | высшей | | I | II |
| | | | | не менее | |
| 1,20 | 1764—2058 | 1764—1960 | 7,5 | 5 | 4 |
| 1,40 | 1715—2009 | 1715—1911 | | 4 | 3 |
| 1,60 | 1715—2009 | 1715—1911 | 10 | 7 | 6 |
| 1,80 | 1666—1960 | 1666—1862 | | 7 | 6 |
| 2,00 | 1666—1960 | 1666—1862 | | 6 | 5 |
| 2,30 | 1617—1911 | 1617—1813 | 15 | 7 | 6 |
| 2,50 | 1617—1911 | 1617—1813 | | 6 | 5 |
| 2,75 | 1617—1911 | 1617—1813 | | 6 | 5 |
| 3,00 | 1568—1862 | 1568—1764 | | 4 | 3 |
| 3,20 | 1568—1862 | 1568—1764 | | 20 | 8 |
| 3,40 | 1568—1862 | 1568—1764 | 8 | | 7 |
| 3,50 | 1470—1764 | 1470—1666 | 7 | | 6 |
| 3,60 | 1470—1764 | 1470—1666 | 7 | | 6 |
| 3,75 | 1421—1715 | 1421—1617 | 7 | | 6 |
| 4,00 | 1421—1715 | 1421—1617 | 6 | | 5 |
| 4,10 | 1372—1666 | 1372—1568 | 30 | | 8 |
| 4,20 | 1372—1666 | 1372—1568 | | 7 | 6 |
| 4,50 | 1372—1666 | 1372—1568 | | 6 | 5 |
| 4,80 | 1323—1617 | 1323—1519 | | 4 | 4 |
| 5,00 | 1323—1617 | 1323—1519 | | 4 | 4 |
| 5,50 | 1274—1568 | 1274—1470 | | 4 | 4 |

Примечание. Число скручиваний из 360° — 10 для проволоки класса I и 8 для проволоки класса II.

8. Механические свойства пружинной ленты (ГОСТ 2283—79)

| Стали | Толщина, мм | Лента отожженная | | Лента нагартван-ная *1 |
|---|-----------------------|-------------------|----------------|------------------------|
| | | σ_B , МПа | δ_B , % | σ_B , МПа |
| | | не менее | | |
| 50Г, 60Г, 65Г, У7, У7А, У8 У8А У8Г, У8ГА, У9, У9А, У10, У10А, У11, У11А, У12, У12А, 85 У13, У13А 50ХФА, 60С2А, 60С2, 65С2ВА, 70С2ХА | До 1,5 вкл Св. 1,5 | 650 750 750 | 15 10 10 | 750—1200 |
| | 0,10—4,0 | 900 900 | — 8 | 800—1200 |

*1 Нагартванная лента разделяется по классам прочности на Н1, Н2 и Н3 при соответственном увеличении абсолютных значений σ_B от 750 до 1200 МПа.

больших сечений и те, от которых требуется повышенная релаксационная стойкость, в том числе и при небольшом нагреве, изготавливают из легированных сталей, чаще всего кремнистых, а также из хромомарганцевых, хромованадиевых.

Твердость пружин после обычной закалки и отпуска, как правило, находится в пределах 42—48 HRC. При более высокой твердости пружины склонны к хрупкому и в том числе к замедленному разрушению. Пружины, рессоры и другие упругие элементы больших сечений и те, от которых требуется повышенная релаксационная стойкость, в том числе и при небольшом нагреве, изготавливают из легированных сталей, чаще всего из кремнистых, а также хромомарганцевых, кремнехромистых, хромованадиевых и др. Указанные в табл. 9 режимы отпуска позволяют характеризовать качество пружинных сталей. Практически используемые режимы отпуска тех или иных упругих элементов зависят от условий их службы и могут варьироваться в достаточно широких пределах. В табл. 10—14 приведены зависимости свойств наиболее распространенных пружинных сталей от тем-

пературы отпуска, по которым можно назначать его оптимальные режимы. Помимо закалки и отпуска в ряде случаев применяют изотермическую закалку на нижний бейнит, в частности для сталей перлитного класса марок 60С2, 65С2ВА, 50ХФА и др. После аустенизации при температурах, указанных в табл. 9, осуществляют переохлаждение до 280—350 °С и после соответствующей выдержки пружины охлаждают в масле.

После изотермической закалки у пружинной стали повышаются пластичность, вязкость и уменьшается склонность к хрупкому разрушению. При этом снижаются внутренние напряжения, деформация при закалке и склонность к хрупкому разрушению. Поэтому для пружин, подвергнутых изотермической закалке, допустима более высокая твердость (до 50—52 HRC), чем после обычной закалки и отпуска. После изотермической закалки предел упругости и релаксационная стойкость ниже, чем после обычной закалки и отпуска (при равном временном сопротивлении); но они могут быть повышены путем дополнительного отпуска при темпера-

9. Свойства и режимы термической обработки углеродистых и легированных пружинных сталей

| Стали | Критические точки, °С | | Режим термической обработки (ориентировочный) | | | Механические свойства | | | |
|--------------|-----------------------|----------|---|------------------|-------------------------|-----------------------|------------|----------|--------|
| | A_{c1} | A_{c3} | Температура закали-ки, °С | Закалочная среда | Температура отпуска, °С | не менее | | | |
| | | | | | | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ |
| | | | | | | МПа | | % | |
| 65 | 727 | 752 | 830 | Масло | 470 | 785 | 980 | 10 | 35 |
| 70 | 730 | 743 | 830 | » | 470 | 835 | 1030 | 9 | 30 |
| 75 | 730 | — | 820 | » | 470 | 885 | 1080 | 9 | 30 |
| 80 | 730 | — | 820 | » | 470 | 930 | 1080 | 8 | 30 |
| 85 | 730 | — | 820 | » | 470 | 980 | 1130 | 8 | 30 |
| У9А *1 | 730 | — | 760—790 | Масло или вода | 300—420 | — | — | — | — |
| У10А—У12А *1 | 730 | — | 770—810 | То же | 300—420 | — | — | — | — |
| 60Г | — | — | 830 | Масло | 470 | 785 | 980 | 8 | 30 |
| 65Г | — | — | 830 | » | 470 | 785 | 980 | 8 | 30 |
| 70Г | — | — | 830 | » | 470 | 835 | 1030 | 7 | 25 |
| 55С2 | 775 | 840 | 870 | Масло или вод | 470 | 1175 | 1270 | 6 | 30 |
| 55С2А | 775 | 840 | 870 | Масло или вод | 470 | 1175 | 1270 | 6 | 30 |
| 60С2 | 750 | 820 | 870 | Масло | 470 | 1175 | 1270 | 6 | 25 |
| 70С3А | — | — | 850 | » | 470 | 1470 | 1470 | 6 | 25 |
| 60С2Г | — | — | 870 | » | 470 | 1325 | 1470 | 6 | 25 |
| 50ХГ | 750 | 775 | 850 | » | 470 | 1175 | 1270 | 7 | 35 |
| 50ХГА | 750 | 775 | 850 | » | 470 | 1175 | 1270 | 7 | 35 |
| 55ХГР | 750 | 790 | 850 | » | 470 | 1175 | 1270 | 7 | 35 |
| 60с2А | 750 | 820 | 870 | » | 420 | 1375 | 1570 | 6 | 20 |
| 50ХФА | — | — | 850 | » | 470 | 1080 | 1270 | 8 | 35 |
| 50ХГФА | — | — | 850 | » | 470 | 1325 | 1420 | 6 | 35 |
| 55С2ГФ | — | — | 870 | » | 470 | 1375 | 1570 | 6 | 25 |
| 60С2ХА | — | — | 870 | » | 470 | 1325 | 1470 | 6 | 25 |
| 60С2ХФА | — | — | 870 | » | 470 | 1470 | 1670 | 6 | 25 |
| 65С2ВА | — | — | 850 | » | 420 | 1665 | 1860 | 5 | 20 |
| 60С2Н2А | — | — | 870 | » | 470 | 1325 | 1470 | 8 | 30 |

*1 При закалке в воде температуру закалки принимают по нижнему пределу, а при закалке в масле — по верхнему.

10. Временное сопротивление сталей (σ_B в МПа) после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей

| Сталь | Температура отпуска (динамического старения), °C | | | | | |
|--------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 |
| 65 | 2350/2450 | 2280/2400 | 1980/2140 | 1770/1880 | 1420/1570 | 1170/1200 |
| 65Г | 2250/2400 | 2200/2350 | 2100/2260 | 2000/2150 | 1830/1900 | 1600/1650 |
| 60С2А | 2300/2370 | 2350/2360 | 2280/2300 | 2140/2250 | 1760/1820 | 1500/1620 |
| 60С2ХА | 2100/2350 | 2230/2400 | 2250/2350 | 2200/2300 | 2050/2150 | 1850/1900 |
| 65С2ВА | 2150/2300 | 2400/2510 | 2370/2430 | 2300/2390 | 2150/2200 | 1950/2000 |
| 50ХА | 2180/2210 | 2100/2150 | 1920/2000 | 1850/1900 | 1660/1700 | 1530/1550 |
| 50ХГА | 2250/2300 | 2140/2170 | 1890/1980 | 1800/1840 | 1600/1670 | 1420/1500 |
| 50ХГФА | 2280/2350 | 2200/2250 | 2080/2150 | 2000/2030 | 1910/2000 | 1830/1870 |
| 50ХФА | 2300/2380 | 2150/2300 | 2150/2200 | 2060/2150 | 1900/2000 | 1770/1800 |
| 40ХФА | 2060/2080 | 1900/1950 | 1800/1860 | 1660/1750 | 1580/1640 | 1420/1440 |

11. Предел текучести ($\sigma_{0,2}$ в МПа) после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей

| Сталь | Температура отпуска (динамического старения), °C | | | | | |
|--------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 |
| 65 | 1800/2240 | 1750/2180 | 1630/2000 | 1500/1800 | 1330/1470 | 1100/1160 |
| 65Г | —/2000 | 2030/2270 | 2030/2230 | 1900/2050 | 1760/1800 | 1560/1600 |
| 60С2А | 1900/2250 | 2100/2280 | 2090/2200 | 2030/2120 | 1630/1710 | 1400/1450 |
| 60С2ХА | 1800/1840 | 2000/2150 | 2000/2200 | 1960/2140 | 1890/2020 | 1720/1820 |
| 65С2ВА | — | —/2270 | 2090/2250 | 2050/2120 | 1950/2020 | 1740/1800 |
| 50ХА | 1920/2070 | 1850/2000 | 1780/1800 | 1690/1750 | 1530/1600 | 1450/1500 |
| 50ХГА | 1960/2020 | 1890/1960 | 1800/1850 | 1660/1750 | 1500/1580 | 1360/1450 |
| 50ХГФА | 1900/2110 | 1930/2070 | 1900/1950 | 1830/1900 | 1700/1800 | 1600/1650 |
| 50ХФА | 1920/2100 | 1950/2060 | 1900/2020 | 1900/2000 | 1760/1850 | 1600/1650 |
| 40ХФА | 1640/1840 | 1620/1820 | 1650/1700 | 1580/1620 | 1500/1550 | 1360/1400 |

12. Предел упругости ($\sigma_{0,005}$ в МПа) после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей

| Сталь | Температура отпуска (динамического старения), °C | | | | | |
|--------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 |
| 65 | 1050/1600 | 1220/1600 | 910/1300 | 850/1250 | 820/1170 | 730/1030 |
| 65Г | 1100/2100 | 1200/2100 | 1350/2050 | 1500/1850 | 1350/1650 | 1200/1400 |
| 60С2А | 1310/1940 | 1450/2050 | 1490/2020 | 1450/1900 | 1210/1620 | 1180/1300 |
| 60С2ХА | 1220/1700 | 1500/1900 | 1520/1920 | 1620/1900 | 1500/1800 | 1300/1060 |
| 65С2ВА | 1220/1680 | 1400/1890 | 1580/1950 | 1690/1910 | 1590/1850 | 1420/1660 |
| 50Х | 950/1510 | 1000/1550 | 1150/1550 | 1160/1500 | 1200/1400 | 1050/1250 |
| 50ХГА | 940/1500 | 1050/1600 | 1200/1560 | 1260/1520 | 1200/1400 | 1050/1220 |
| 50ХГФА | 950/1500 | 1230/1600 | 1250/1580 | 1300/1550 | 1250/1500 | 1170/1400 |
| 50ХФА | 1050/1500 | 1200/1600 | 1200/1580 | 1270/1580 | 1200/1550 | 1150/1400 |
| 40ХФА | 900/1370 | 930/1450 | 1050/1420 | 1100/1400 | 900/1380 | 850/1290 |

туре, равной температуре предшествующей изотермической выдержки при закалке.

В табл. 15 приведены данные о свойствах стали 60С2А после изотермической закалки и последующего отпуска, а также после закалки и отпуска, которые показывают преимущества первого процесса термической обработки. Свойства пружинных сталей могут быть существенно повышены (см. табл. 10—14) в результате применения процесса динамического старения (или отпуска под нагрузением) [3]. Эта обработка заключается в нагружении стали после предварительной закалки и низкого отпуска (при 170—180 °С) при среднетемпературном нагреве (отпуске) внешней нагрузкой, обеспечивающей напряженне в образце до значений 0,7—0,8 предела текучести при этих температурах. Под влиянием этих напряжений общие закономерности изменения свойств закаленных сталей от температуры обычного отпуска или динамического старения одинаковы. Улучшение свойств в результате динамического старения является следствием более полного распада остаточного аустенита и формирования структурного состояния сталей, отличающегося от наблюдаемого после обычного отпуска. Это связано с влиянием напряжений, возникших под воздействием нагрузки, на условия выделения карбидов, их структуру, распределение морфологии. Напряжения стабилизируют когерентно-связанные с матрицей частицы ϵ -карбида, которые в итоге сохраняются до более высоких температур (250 °С), когда после обычного отпуска в структуре отмечаются лишь частицы цементита. Кроме того, при динамическом старении изменяются морфология и ориентировка частиц карбидов, дисперсность которых после всех температур процесса обработки выше, чем после обычного отпуска. Эти изменения структуры, а также субструктуры и определяют улучшение всего комплекса свойств пружинных сталей.

Пружинные сплавы специального назначения. Сплавы этого класса разделяются на следующие группы: а) коррозионно-стойкие; б) немагнит-

13. Предел выносливости (σ_{-1} в МПа) и малочикловой выносливости (σ_N в МПа при $N = 10^5$ циклов) после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей

| Сталь | Температура отпуска (динамического старения), °C | | | | | |
|--------|--|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | 250 | | 300 | | 350 | |
| | σ_{-1} | σ_N | σ_{-1} | σ_N | σ_{-1} | σ_N |
| 65Г | 500/710 | 600/920 | 640/750 | 580/890 | 680/780 | 545/1000 |
| | 550/730 | 620/770 | 580/790 | 740/1040 | 630/820 | 840/980 |
| | 610/830 | 740/940 | — | — | 710/900 | 850/1000 |
| 60С2А | 530/660 | 590/730 | — | — | 550/630 | 570/600 |
| | 575/710 | 650/800 | — | — | 590/700 | 630/800 |
| | 570/710 | 640/810 | — | — | 590/720 | 650/820 |
| 50ХГА | 500/680 | 540/750 | — | — | 520/630 | 560/700 |
| | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — |
| 50ХГФА | — | — | — | — | 650/740 | 650/860 |
| | — | — | — | — | 590/780 | 820/960 |
| | — | — | — | — | — | — |
| 50ХФА | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — |
| 40ХФА | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — |

14. Максимальная релаксационная стойкость (в %) *1 пружинных сталей после термической обработки

| Сталь | Закалка и отпуск | Закалка и динамическое старение |
|-----------|------------------|---------------------------------|
| 65 *2 | 2,4 | 1,0 |
| 65Г *2 | 2,2 | 0,9 |
| 60С2 *2 | 2,2 | 0,8 |
| 65С2ВА *3 | 1,2 | 0,5 |
| 60С2ХА *3 | 2,2 | 1,0 |
| 50ХГА *3 | 2,6 | 1,0 |
| 50ХГФА *2 | 2,3 | 0,8 |
| 50ХФА *3 | 2,2 | 0,8 |

*1 Релаксационная стойкость $\frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \cdot 100$. Условия испытания: исходное напряжение $\sigma_0 = 0,7\sigma_{0,2}$; σ_t — напряжение после нагружения при испытании 30 мин.

*2 После закалки и отпуска (или динамического старения) при 250 °С.

*3 После закалки и отпуска (или динамического старения) при 350 °С.

15. Влияние изотермической закалки и последующего отпуска на механические свойства стали 60С2А

| Обработка | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_{пц}$ | δ_b | ψ | $KCU, \text{КДж/м}^2$ |
|---|------------|----------------|---------------|------------|--------|-----------------------|
| | МПа | | | % | | |
| Изотермическая закалка с выдержкой при 290 °С. То же, отпуск 1 ч при температуре, °С | 2050 | 1715 | 1499 | 11 | 40 | 489 |
| 150 | 1980 | 1765 | 1567 | 12 | 46 | 568 |
| 290 | 1930 | 1812 | 1648 | 12,5 | 50 | 489 |
| 400 | 1773 | 1715 | 1568 | 13,5 | 40 | 372 |
| Закалка и отпуск при 420 °С | 1765 | 1648 | 1529 | 11 | 48 | 353 |

ные; в) с низким температурным коэффициентом модуля упругости; г) высокоэлектропроводные.

Коррозионно-стойкие сплавы (табл. 16) применяют для изготовления пружин регулирующих устройств и приборов, работающих в коррозионно-активных средах. Применение таких пружин значительно эффективнее, чем пружин с гальваническими покрытиями.

Для пружин, стойких в атмосфере пара, воздуха, воды и слабоокисляющих сред, применяют высокохромистые стали типа 30Х13 и 40Х13. Пружины из этих сталей изготавливают методами холодной (или горячей) навивки или изгиба, а затем закалывают при 1000—1050 °С с охлаждением в воде или масле и далее проводят отпуск при 300—350 °С (если пружины работают при климатических темпе-

16. Химический состав (мас. доли, %) коррозионно-стойких пружинных сталей и сплавов (ГОСТ 5632—72)

| Сталь (или сплав) | C | Si | Mn | Cr | Ni | Ti | Mo | Другие элементы |
|----------------------|---------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------------------|
| 20Х13 | 0,16—0,24 | ≤0,6 | ≤0,6 | 12,0—14,0 | — | — | — | — |
| 30Х13 | 0,26—0,34 | ≤0,6 | ≤0,6 | 12,0—14,0 | — | — | — | — |
| 40Х13 | 0,36—0,45 | ≤0,6 | ≤0,6 | 12,0—14,0 | 1,5—2,5 | — | — | — |
| 14Х17Н2 | 0,11—0,17 | ≤0,8 | ≤0,8 | 16,0—18,0 | — | — | — | — |
| 08Х18Н10Т | Не более 0,08 | ≤0,8 | ≤0,0 | 17,0—19,0 | 9,0—11,0 | 5·С—0,7 | — | — |
| 12Х18Н | » 0,12 | ≤0,8 | ≤0,0 | 17,0—19,0 | 9,0—11,0 | — | — | — |
| 12Х18Н9Т | » 0,12 | ≤0,8 | ≤0,0 | 17,0—19,0 | 8,0—9,5 | 5·С—0,8 | — | — |
| 17Х18Н9 | 0,13—0,21 | ≤0,8 | ≤0,0 | 17,0—19,0 | 8,0—10,0 | — | — | — |
| 37Х12Н8Г8МФБ | 0,34—0,40 | 0,3—0,8 | 7,5—9,5 | 11,5—13,5 | 7,0—9,0 | — | 1,1—1,4 | 1,25—1,55 V, ≤0,2 Nb |
| 09Х15Н8Ю | Не более 0,09 | ≤0,8 | ≤0,8 | 14,0—16,0 | 7,0—9,4 | — | — | 0,7—1,3 Al |
| 09Х17Н7Ю | » 0,09 | ≤0,8 | ≤0,8 | 16,5—18,0 | 6,5—7,5 | — | — | 0,7—1,1 Al |
| 06Х16Н7М2Ю | 0,06—0,10 | ≤0,7 | ≤0,7 | 15,0—16,5 | 6,5—7,5 | — | 1,0—2,0 | — |
| (3065 *1) | » 0,06—0,10 | ≤0,7 | ≤0,7 | 15,0—16,5 | 6,5—7,5 | — | — | — |
| 17ХНГТ | Не более 0,05 | ≤0,6 | 0,8—1,2 | 15,5—17,5 | 6,5—7,5 | 0,80—1,20 | — | 0,5 Al |
| (34814, 0Х17Н7ГТ *2) | » 0,05 | ≤0,6 | 0,8—1,2 | 15,5—17,5 | 6,5—7,5 | — | — | — |
| 36НХТЮ | Не более 0,05 | 0,3—0,7 | 0,8—1,2 | 11,5—13,0 | 35,0—37,0 | 2,7—3,2 | — | 0,9—1,2 Al |
| 36НХТЮ3М | » 0,05 | 0,3—0,7 | 0,8—1,2 | 12,5—13,5 | 35,0—37,0 | 2,7—3,2 | — | 1,0—1,3 Al |
| 36НХТЮ8М | » 0,05 | 0,3—0,7 | 0,8—1,2 | 12,0—13,5 | 35,0—37,0 | 2,7—3,2 | — | 1,0—1,3 Al |
| 70НХМБЮ *3 | » 0,06 | ≤0,55 | ≤0,55 | 14,0—16,0 | Основа | — | — | 0,7—1,3 Al |
| | | | | | | | | 8,0—9,0 Nb |

Аустенитно-мартенситные стали, упрочняемые фазовым наклепом и дисперсионным твердением

Аустенитные сплавы, упрочняемые дисперсионным твердением (ГОСТ 10994—74)

*1 ТУ 14-1-1369—75.

*2 По ГОСТ 10994—74.

*3 По ТУ 14-1-2796—79.

ратурах) и при 500—550 °С (если они работают при нагреве). В первом случае сталь 30X13 имеет следующие механические свойства: $\sigma_B = 1800$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1350$ МПа; $\sigma_{пл} = 1200$ МПа; $\psi = 45\%$ и $\delta = 10\%$; после более высокого отпуска (500 °С): $\sigma_B = 1850$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1500$ МПа; $\sigma_{пл} = 1250$ МПа; $\psi = 35\%$ и $\delta = 11\%$.

У высокохромистых сталей 30X13 и 40X13 наряду с удовлетворительной коррозионной стойкостью большая прокаливаемость, что обеспечивает высокую прочность в крупных сечениях, но в то же время они склонны к хрупким разрушениям и сильно деформируются при термической обработке.

Для повышения коррозионной стойкости пружин из сталей 30X13 и 40X13, особенно тех, которые изготавливают методами горячей деформации и закалывают с нагревом в печах без защитной атмосферы, необходимы шлифование и полирование поверхности. Более повышенная коррозионная стойкость, но при снижении прочности достигается на стали с повышенным содержанием хрома (14X17H2). После закалки при 1000 °С с охлаждением на воздухе и отпуска при 300—350 °С $\sigma_B = 1300$ МПа, $\delta = 10\%$ и $KCU = 1,6$ мДж/м².

Высоким упругим, хорошей коррозионной стойкостью, меньшей склонностью к хрупкому разрушению и меньшей деформацией при термической обработке отличаются дисперсионно-твердеющие стали аустенитно-мартенситного класса с низким содержанием углерода. Это стали 09X15H8Ю, 09X17H7Ю1, 0X17H7ГТ, 0X7H13ГТ. Режим их термической обработки: закалка при 900—950 °С, обработка холодом при -70 °С (2—3 ч) и старение при 450—500 °С.

Более высокие прочностные свойства при высоком сопротивлении хрупкому разрушению и сопротивлению коррозии достигнуты у практически безуглеродистых мартенситно-старяющихся сталей, упрочняемых закалкой и отпуском (старение). Стали типа 03X12H10D2ТБ, 04X14K13H4M3ТБВ-ВД (ЭП767) *1 по прочности и корро-

зионной стойкости превосходят стали 40X13, 30X13, а также 14X17H2.

У сталей 03X12H10D2ТБ *2 ($\leq 0,03\%$ С; $\leq 0,1\%$ Si; $\leq 0,1\%$ Mn; $10-11\%$ Ni; $11,5-12,5\%$ Cr; $1,0-1,4\%$ Ti; $1,8-2,1\%$ Cu; $0,1-0,3\%$ Nb) после закалки при 870 °С, обработки холодом при -70 °С (2 ч) и отпуска (старения) при 450 °С (6 ч) следующие механические свойства: $\sigma_B = 1800$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1700$ МПа; $\sigma_{0,002} = 1300$ МПа; $\delta = 10\%$, а у стали 04X14K13H4M3ТБВ-ВД *1 (ЭП767) ($\leq 0,04\%$ С; $\leq 0,2\%$ Si; $\leq 0,2\%$ Mn; $13,5-15,0\%$ Cr; $3,8-4,8\%$ Ni; $2,6-3,6\%$ Mo; $0,2-0,5\%$ Ti; $\leq 0,15\%$ V; $0,3-0,5\%$ W; $13,0-14,0\%$ Co; $0,01\%$ Ce) после закалки при 950 °С, обработки холодом при -70 °С (16 ч) и отпуска (старения) при 550 °С (6 ч): $\sigma_B = 1700$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1580$ МПа; $\sigma_{0,002} = 1250$ МПа и $\delta = 12\%$.

Эти стали устойчивы в морской воде и окислительных средах. Упругие элементы из них можно изготавливать методами холодной штамповки из закаленных заготовок, а затем уже их подвергать упрочняющему старению (отпуску). Возможно также и другой способ — горячая деформация (штамповка), а затем закалка и старение.

Немагнитные пружины и сплавы. Более высокая коррозионная стойкость в сочетании с немагнитностью и отсутствием склонности к хрупким разрушениям характеризует аустенитные хромоникелевые стали.

Широко применяют аустенитные стали типа 18-9, 18-10, упрочняемые после закалки пластической деформацией с высоким обжатием, в процессе которой, особенно при низких температурах, может образовываться так называемый мартенсит деформации, что увеличивает степень упрочнения, но в то же время делает сталь ферромагнитной.

Обычно стали этой группы, например 08X18H10Т, используют для изготовления пружин; полуфабрикаты в виде проволоки или ленты.

Прочность проволоки тем больше, чем меньше диаметр или толщина. При диаметре 8,01 мм $\sigma_B = 1400-1600$ МПа и $\delta \geq 20\%$, а при диаметре 0,11—0,71 мм $\sigma_B = 1750$

2050 МПа и число скручиваний не менее 4.

Используя полуфабрикаты (лента или проволока) из стали типа 18-9 или 18-10 диаметром или толщиной более 10 мм, нельзя получить большие обжатия и соответственно повышенную прочность. Поэтому из этих сталей пружины больших сечений не изготавливают.

Технология изготовления пружин из коррозионно-стойких сталей указанного типа состоит из следующих операций: навивки, отпуска (обычно при 450 °С), заневоливания и полирования.

При конструировании упругих элементов из сталей 08X18H10Т и 12X18H9Т рекомендуется принимать модуль нормальной упругости равным 190 ГПа, модуль сдвига 70 ГПа; допускаемые напряжения *1 для пружин с неограниченной долговечностью 600—800 МПа, а с ограниченной — 850—1200 МПа. После навивки пружин из сталей типа 18-10 и 18-9 производится отпуск, повышающий их работоспособность, для первой стали при 450 °С, а для второй — при 500 °С.

В тех случаях, когда нужна полная немагнитность в сильноупрочненном состоянии, применяют стали 17X18H9 и 37X12H8Г8МФБ также после сильной деформации.

Когда необходимо изготавливать немагнитные и коррозионно-стойкие пружины и другие упругие элементы сложной формы методами холодной пластической деформации с большим обжатием, с глубокой и сложной вытяжкой, например сиффоны, гофрированные мембраны и т. п., используют аустенитные дисперсионно-твердеющие сплавы, упрочняемые термической обработкой. В закаленном аустенитном состоянии эти сплавы высокопластичны и легко деформируются давлением, а затем после деформации (формовки) в процессе последующего отпуска (старения) упрочняются. Эти сплавы в отличие от предыдущих упрочняются и в больших сечениях и поэтому могут

быть применены для изготовления сравнительно крупных по размерам упругих элементов. К числу таких сплавов на железоникельхромовой основе относятся 36НХТЮ, 36НХТЮ5М и 36НХТЮ8М (табл. 16). Помимо повышенной коррозионной стойкости указанные сплавы также отличаются теплоустойкостью: 36НХТЮ — до 250 °С, 36НХТЮ5М — до 250—300 °С и 36НХТЮ8М — до 300—350 °С. Термическая обработка и свойства этих сплавов приведены в табл. 17.

Для упругих элементов, у которых должна быть наиболее высокая коррозионная стойкость, особенно в окислительных средах, применяют сплавы 70НХМБЮ и 47ХНМ на никельхромовой основе. У первого высокая коррозионная стойкость и теплоустойкость; его можно использовать при температуре до 500—550 °С (табл. 17).

Для упругих элементов малых сечений и простой формы, но от которых требуется очень высокая прочность ($\sigma_B \geq 2500-3000$ МПа), высокое сопротивление усталости и коррозионная стойкость при немагнитности, применяют сплавы на (Co—Ni—Cr)-основе. Основная область применения этих сплавов — заводные пружины различных механизмов. Состав этих сплавов приведен в табл. 18. Их упрочняют путем термомеханической обработки, включающей в себя закалку, холодную пластическую деформацию с высокими обжатиями и последующее старение (отпуск) для преобразования субструктуры и образования сегрегаций из атомов углерода и легирующих элементов. Режимы упрочняющей обработки и механические свойства сплавов этого типа приведены в табл. 19.

Пружинные сплавы с низким температурным коэффициентом модуля упругости. Для упругих элементов, часовых механизмов и т. д. применяют сплавы с низким температурным коэффициентом модуля упругости, что обеспечивает повышенную точность работы указанных изделий. Эти сплавы ферромагнитные, обычно на железоникельхромовой основе, упрочняются в результате термической и термомеханической обработки. Со-

*1 По ТУ 14-1-1179—74.

*2 По ТУ 14-1-1452—75.

*1 Верхний предел — для проволоки диаметром 0,2 мм, а для пружинной проволоки диаметром 8 мм.

17. Механические свойства и режимы термической обработки леит из аустенитных сплавов *1

| Сплав | Состояние сплава (исходное) | Рекомендуемый режим термической обработки | Толщина ленты, мм | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ_5 , % | HRC | $\sigma_{0,005}$, МПа *3 |
|------------|---|---|-------------------------------|------------|----------------|----------------|------------|---------------------------|
| | | | | МПа | | | | |
| 36НХТЮ | Полунагартованное или нагартованное | Закалка при 920—950 °С, охлаждение водой и старение при 650—670 °С, 4 ч | 0,1—0,9 1,0—2,0 | 1180 | — | 5 | — | 600—700 |
| | | | | 1180 | 785 | 6 | 35 | |
| 36НХТЮ5М | * | Закалка при 975 ± 10 °С, охлаждение водой и старение при 700—750 °С, 4 ч | 0,1—0,9 1,0—2,0 | 1230 | — | 4 | — | 700—800 |
| 1270 | | | | 930 | 4 | 38 | | |
| 36НХТЮ8М | | Закалка при 1000—1050 °С, охлаждение водой, старение при 750 ± 10 °С, 4 ч | 0,1—0,9 1,0—2,0 | 1270 | — | 4 *2 | — | 800—900 |
| 1320 | | | | 1030 | 4 *2 | 42 | | |
| 40КХНМ | Полунагартованное Нагартованное Высоконагартованное | Старение при 450—550 °С, 2—4 ч | 0,1—2,0 0,1—2,0 0,1—2,0 | 1270 | — | — | — | |
| | | | | 1670 | — | — | — | |
| | | | | 1770 | — | — | — | |
| 70НХМБЮ *2 | — | Закалка при 1150 °С и старение при 750 °С, 5 ч | — | 1350— | 1200— | 8—17 | 44—46 | |
| 47ХНМ *2 | — | | | 1600 | 1400 | 5—10 | 430—440 НВ | |
| | | Закалка при 1250 °С и старение при 725 °С, 5 ч | | 1350— | 1250— | | | |
| | | | | 1450 | 1350 | | | |

*1 См. ГОСТ 14117—85 и Справочник прецизионных сплавов. М.: Металлургия. 1974.

*2 До 01.07.90 г.

*3 Для толщины 0,3 мм.

18. Химический состав (мас. доли, %) коррозионно-стойких, немагнитных и высокопрочных пружинных сплавов на (Co—Ni—Cr)-основе (ГОСТ 10994—74)

| Сплав | C | Si | Mn | Co | Ni | Cr | Mo | Другие легирующие элементы |
|-----------|-----------|------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------------------------------|
| 40КХНМ | 0,07—0,12 | ≤0,5 | 1,8—2,2 | 39,0—41,0 | 15,0—17,0 | 19,0—21,0 | 6,4—7,4 | — |
| 40КНХМВТЮ | ≤0,05 | ≤0,5 | 1,8—2,2 | 39,0—41,0 | 18,0—20,0 | 18,0—20,0 | 3,0—4,0 | 6—7 W; 0,2—0,5 Al; 1,5—2,0 Ti |

19. Механические свойства и режимы упрочняющей обработки проволоки из коррозионно-стойких, немагнитных и высокопрочных пружинных сплавов на основе системы Co—Ni—Cr [5]

| Сплав | Режим обработки | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_{0,005}$ | δ , % | HV |
|-----------|---|------------|----------------|------------------|--------------|---------|
| | | МПа | | | | |
| 40КХНМ | Закалка при 1100—1150 °С, деформация, старение при 400—450 °С, 4 ч | 2500—2700 | 2300—2500 | 1700 | 3—5 | 600—700 |
| 40КНХМВТЮ | Закалка при 1100—1150 °С, холодное волочение с обжатием 85 % и старение при 500—550 °С, 4 ч | 2000—2200 | 1800—2000 | 1500—1600 | 4—6 | 550—600 |

20. Химический состав (в %) сплавов с постоянным и низким температурным коэффициентом модуля упругости (ГОСТ 10994—74)

| Сплав | C | Si | Mn | Ni | Cr | Ti | Al |
|---------|-------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| 42НХТЮ | ≤0,05 | 0,5—0,8 | 0,5—0,8 | 41,5—43,5 | 5,3—5,9 | 2,4—3,0 | 0,5—1,0 |
| 42НХТЮА | ≤0,05 | 0,4—0,7 | 0,3—0,6 | 41,5—43,5 | 5,0—5,6 | 2,3—2,9 | 0,6—1,0 |
| 44НХТЮ | ≤0,05 | 0,3—0,6 | 0,3—0,6 | 43,5—45,5 | 5,0—5,6 | 2,2—2,7 | 0,4—0,8 |

21. Механические свойства и режимы термической обработки сплавов с постоянным и низким температурным коэффициентом модуля упругости [5] (исходное состояние сплава — нагартованное)

| Сплав | Рекомендуемый режим термической обработки | Толщина ленты, мм | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | HRC | $\sigma_{0,005}$, МПа |
|--------|--|-------------------|------------------|----------------------|--------------|-----|------------------------|
| | | | не менее | | | | |
| 42НХТЮ | Закалка при $910 \pm 10^\circ\text{C}$, охлаждение водой, старение при $690 \pm 10^\circ\text{C}$, 3 ч | 0,1—0,9 | 980 | — | 5 | — | 600—700 *1 |
| | | 1,0—2,0 | 1080 | 735 | 8 | 30 | |
| 44НХТЮ | | 0,1—0,9 | 1030 | — | 5 | — | 600—650 *1 |
| | | 1,0—2,0 | 1080 | 685 | 8 | 30 | |

*1 Для толщины 0,3 мм.

сплавов и режимы упрочняющей обработки приведены в табл. 20 и 21.

Сплавы 42НХТЮ и 42НХТЮА имеют постоянный модуль упругости при температуре до 100°C , сплав 44НХТЮ — при температуре до 200°C .

Высокоэлектродроводные пружинные сплавы [2]. К этой группе относятся бериллиевые бронзы, фосфористая бронза и некоторые другие сплавы, преимущественно на основе меди.

Из многочисленных пружинных сплавов на основе меди наибольшее применение приобрели бериллиевые бронзы — т. е. меднобериллиевые сплавы с содержанием от 0,4—0,7 до 2—2,5 % Ве, часто имеющие в своем составе и дополнительные легирующие элементы — никель, кобальт, титан,

серебро, а также весьма эффективно влияющий на их свойства магний, количество которого не превышает 0,2 % (табл. 22). Бронзы, содержащие 0,25—0,7 % Ве и отличающиеся высокой электрической проводимостью, в СССР не изготавливаются, так как практически эти же свойства ($\sim 50 \times 10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) могут быть достигнуты у магниевых бронз БрМг0,3, БрМг0,5, БрМг0,8, а также кадмиевой бронзы БрКд0,7.

Широкое применение бериллиевых бронз в промышленности объясняется тем, что наряду с высокими значениями предела упругости и релаксационной стойкости они обладают хорошей коррозионной стойкостью, немагнитностью, повышенной электрической проводимостью и ценными тех-

нологическими свойствами — хорошо штампуются, паяются, свариваются и т. д. Прочностные свойства бериллиевых бронз настолько высоки, что в ряде случаев именно они независимо от их физико-химических свойств определяют использование этих сплавов в промышленности. Абсолютные значения предела упругости бериллиевых бронз — основного свойства пружинных сплавов — не превышают величины, которые можно получить для стали, но благодаря почти в 1,5—2 раза меньшему модулю упругости ($110—130 \text{ ГПа}$) они характеризуются максимальной энергией упругой деформации ($\sigma^2_{\text{упр}}/2E$) и максимальной упругой деформацией ($\sigma_{\text{упр}}/E$), которые могут быть достигнуты в упругих элементах. Поэтому при равном напряжении в упругих элементах из бериллиевой бронзы может быть достигнута большая упругая деформация, чем в упругих элементах из стали (значение этой деформации часто используется как основной параметр при конструировании упругих элементов), или соответственно при равном значении упругой деформации в этих изделиях из бронзы будут меньше действующие напряжения. Поэтому будут меньше и значения упругого гистерезиса, упругого последействия и других свойств несовершенной упругости — основных показателей качества упругих элементов.

Свойства отечественных бериллиевых бронз в разном исходном состоя-

нии — после закалки (мягкое состояние), а также в результате последующей холодной пластической деформации с обжатием 30—40 % (твердое состояние) приведены в табл. 23. Там же приведены и свойства бронз после упрочняющей обработки — старения, во время которого в структуре бронзы образуются зародыши или предвыделения γ -фазы, отвечающей по составу соединению Cu_3Be . На рис. 1 и 2 представлены значения релаксации напряжений в бериллиевой бронзе при 20°C , а также при нагреве до 150°C — температуры, которая является предельно высокой для применения бериллиевых бронз, после упрочняющей термической обработки. На рис. 3—4 приведены зависимости деформации и скорости ползучести бронзы БрБНТ1,9 при 20 и при $20—150^\circ\text{C}$ после закалки и старения, а на рис. 5 — сопротивление усталости бериллиевых бронз.

Представленные выше данные позволяют конструкторам рассчитывать упругие элементы и прогнозировать стабильность их службы в условиях эксплуатации. Для технологов, кроме указанных данных, также важны зависимости свойств бериллиевых бронз от температуры закалки (рис. 6). Оптимальная температура закалки $770 \pm 10^\circ\text{C}$, так как после такой закалки бронза характеризуется мелким зерном, хорошей пластичностью и высоким уровнем упрочнения после старения. Скорость охлаждения при за-

22. Химический состав (мас. доли, %) бериллиевых бронз (ГОСТ 18175—78)

| Бронза | Ве | Ni | Ti |
|---------------|-----------|---------|----------|
| БрБ2 | 1,8—2,1 | 0,2—0,5 | — |
| БрБНТ1,7 | 1,16—1,85 | 0,2—0,4 | 0,1—0,25 |
| БрБНТ1,9 | 1,85—2,1 | 0,2—0,4 | 0,1—0,25 |
| БрБ2,5 *1 | 2,3—2,6 | 0,2—0,5 | — |
| БрБНТ1,9Мг *2 | 1,85—2,1 | 0,2—0,4 | 0,1—0,25 |

*1 По ТУ 482196—72.

*2 Бронза содержит 0,07—0,13 % Mg.

Примечание. Все указанные бронзы содержат не более: 0,15 % Si, 0,15 % Al, 0,005 % Pb, 0,15 % Fe.

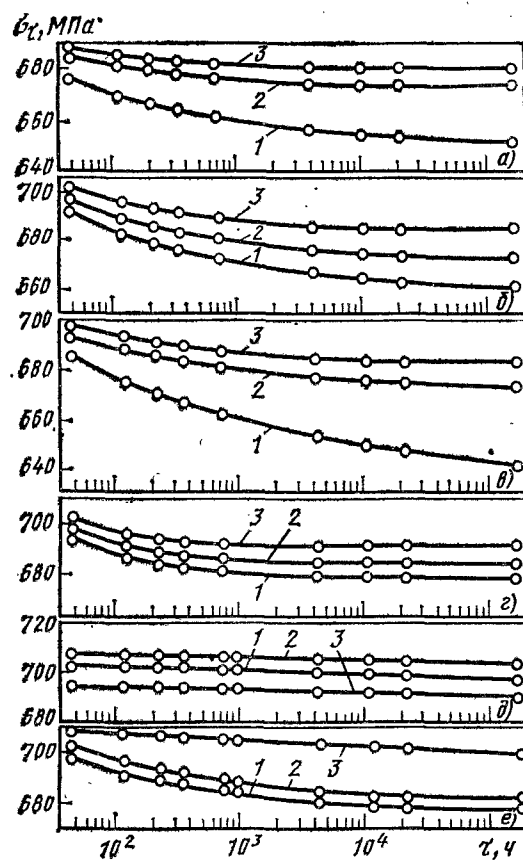
23. Свойства отечественных марок бериллиевых бронз (по ГОСТ 1789—70 и данным автора)

| Обработка (состояние) | Толщина полос, мм | σ_b | $\sigma_{0,002}$ | E *, ГПа | ϕ , % | HV | μ **, мм, не менее |
|------------------------------|-------------------|------------|------------------|------------|------------|------------|------------------------|
| | | | | | | | |
| Бронза БрБ2 | | | | | | | |
| Закалка (мягкое) | 0,15—0,25 | 400—600 | 120—150 | 110—120 | ≥ 20 | ≤ 130 | 8 |
| Закалка и старение | $\leq 0,25$ | 1100—1500 | 580—600 | — | ≥ 30 | ≥ 330 | — |
| Деформации 30—40 % (твердое) | $\leq 0,25$ | 600—900 | 440—500 | — | $\geq 2,0$ | ≥ 170 | 3 |
| | $\leq 0,25$ | 650—950 | 800—850 | — | $\geq 2,5$ | ≥ 360 | — |
| Деформации и старение | 0,15—0,25 | 1150—1600 | 800—850 | — | $\geq 1,5$ | — | — |
| | $\leq 0,25$ | 1200—1600 | — | — | — | — | — |
| Бронза БрБНТ1,7 | | | | | | | |
| Деформации 30—40 % (твердое) | 0,15—0,25 | 600—950 | 380—400 | 110—120 | $\geq 2,5$ | ≤ 150 | 3 |
| Деформации и старение | $\leq 0,25$ | 1100—1500 | 600—650 | 120—130 | $\geq 2,0$ | ≥ 340 | — |
| | 0,15—0,25 | — | — | — | — | — | — |
| Бронза БрБНТ1,9 | | | | | | | |
| Закалка (мягкое) | 0,15—0,25 | 400—600 | 120—150 | 120 | ≥ 20 | ≤ 120 | 8 |
| Закалка и старение | $\leq 0,25$ | 1100—1500 | 620—650 | 120—130 | ≥ 30 | ≥ 330 | — |
| Деформации 30—40 % (твердое) | $\leq 0,25$ | 600—900 | 450—500 | 110—120 | $\geq 2,0$ | ≥ 160 | 3 |
| | $\leq 0,25$ | 650—900 | 900—950 | 120—130 | $\geq 2,5$ | ≥ 360 | — |
| Деформации и старение | 0,15—0,25 | 1150—1600 | 900—950 | 120—130 | $\geq 1,5$ | — | — |
| | $\leq 0,25$ | 1200—1600 | — | — | — | — | — |

*1 Значения предела упругости $\sigma_{0,002}$ и модуля упругости E приведены по данным автора для полос толщиной 0,3 мм.
*2 Вытяжка по Эриксену для полос и лент толщиной 0,10—0,25 мм.

Примечание. Механические свойства бронзы БрБ2,5 согласно ТУ 482196—72 характеризуются следующими значениями: твердость HV ≥ 340 (после закалки и старения), предел упругости $\sigma_{0,002} \geq 600$ МПа (для полос толщиной 0,2—0,3 мм); HV ≥ 384 (после закалки, холодной пластической деформации с обжатием 30—40 % и старения).

Рис. 1. Релаксация напряжений в бронзах БрБ2 (1), БрБ2,5 (2) и БрБНТ1,9 (3) при 20 °С после закалки с 790 °С и старения по режимам:
а — $t = 300$ °С, 1 ч; б — $t = 320$ °С, 2 ч; в — $t = 320$ °С, 3 ч; г — $t = 350$ °С, 1 ч; д — $t = 370$ °С, 20 мин; е — после закалки и деформации с обжатием 30 %; $t = 350$ °С, 30 мин (1, 2) и 1 ч (3) (Б. И. Пучков, А. Г. Рахштадт, И. Л. Рогельберг); τ — время испытаний



калке должна быть значительной (в воде), поскольку при замедленном охлаждении происходит высокотемпературный распад твердого раствора с выделением, особенно по границам зерен, малодисперсных частиц. На рис. 7 представлены зависимости свойств бериллиевых бронз от продолжительности старения при 320 и 340 °С, которые позволяют выбрать оптимальные режимы старения по такому основному показателю, как предел упругости (табл. 24).

Уровень упрочнения бериллиевых бронз повышается при использовании ступенчатого старения сначала при более низкой (210 °С, 1 ч), затем при более высокой температуре (340 °С),

но после более кратковременного нагрева — 1,5 ч для бронзы БрБНТ1,9 и 2 ч для бронзы БрБНТ1,9Мг.

Такая обработка способствует получению более высокодисперсной структуры, чем при обычном старении, что и обеспечивает повышенный предел упругости. Так, если после обычного старения предел упругости бронзы БрБНТ1,9 $\sigma_{0,002} = 570$ МПа, то после ступенчатого $\sigma_{0,002} = 620$ МПа. Кроме того, после ступенчатого старения возрастает и релаксационная стойкость примерно на 5—7 %. Помимо ступенчатого старения для повышения уровня упрочнения (предела упругости) используют процесс динамического старения, т. е. старения под нагруз-

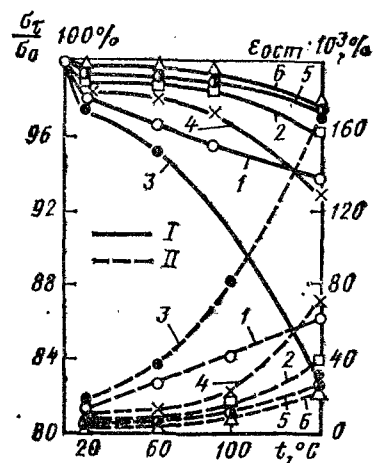


Рис. 2. Температурные зависимости релаксационной стойкости σ_r/σ_0 (I) и остаточной деформации (II) бериллиевых бронз БрБ2 (1), БрБ2Мг (2), БрБ2,5 (3), БрБНТ1,9 (4), БрБНТ1,9Мг (5), БрБНТ1,9МгФ (6) за 1000 ч при $\sigma_0 = 700$ МПа. Исходное состояние — закалка и старение по оптимальным режимам

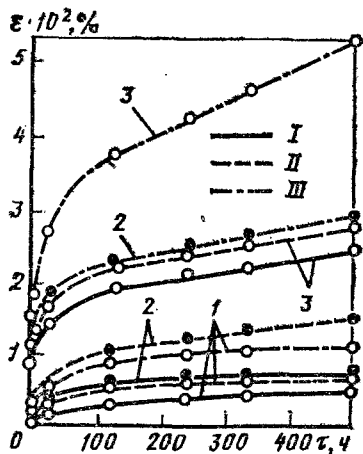


Рис. 3. Временные зависимости деформации ползучести ϵ бронзы БрБНТ1,9 при 20 (I), 100 (2) и 150 °C (3) после закалки и старения при 300 °C, 3 ч. Приложенные напряжения:
 I — $0,8\sigma_{0,002} = 500$ МПа;
 II — $\sigma_{0,002} = 620$ МПа;
 III — $1,2\sigma_{0,002} = 740$ МПа
 (В. А. Федорович и А. Г. Ражигадт)

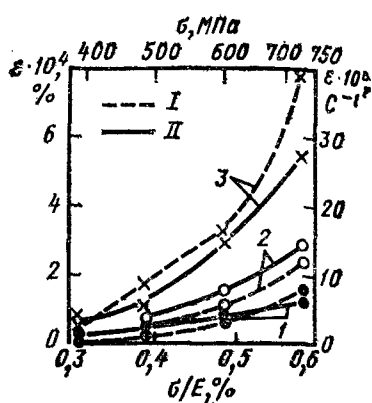


Рис. 4. Зависимости деформации ползучести ϵ за 500 ч (I) и скорости ползучести $\dot{\epsilon}$ (II) бронзы БрБНТ1,9 при 20 (1), 100 (2) и 150 °C (3) от приложенного напряжения (упругой деформации)

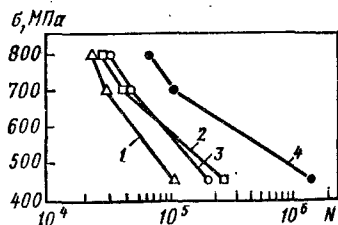


Рис. 5. Сопротивление усталости бериллиевых бронз после закалки и старения по оптимальным режимам:
 1 — БрБ2; 2 — БрБ2,5; 3 — БрБНТ1,9; 4 — БрБНТ1,9Мг

24. Оптимальные режимы старения бериллиевых бронз

| Бронза | Режим 1 | | Режим 2 | |
|------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | $T, ^\circ\text{C}$ | $\tau, \text{ч}$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $\tau, \text{ч}$ |
| БрБ2,5 | 320 | 3 | 340 | 2 |
| БрБ2 | 320 | 4-5 | 340 | 1,5-2 |
| БрБНТ1,9 | 320 | 4 | 340 | 2-3 |
| БрБНТ1,9Мг | 320 | 5 | 340 | 3-4 |
| БрБНТ1,7 | 320 | 5 | 340 | 3 |

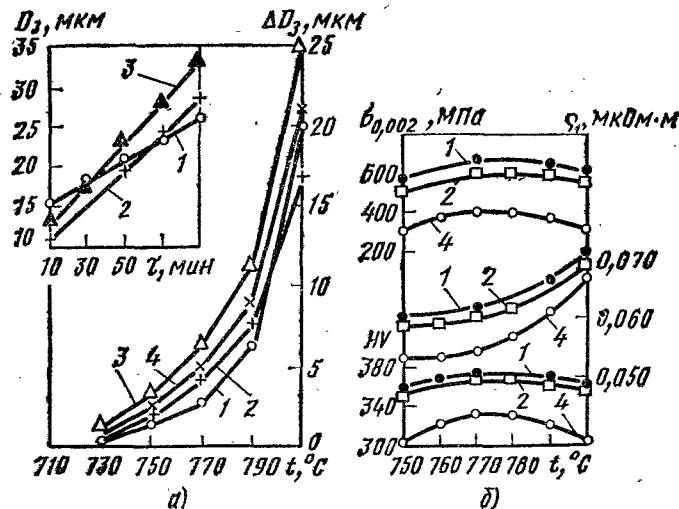


Рис. 6. Влияние режима закалки на структуру и свойства бериллиевых бронз:
 а — зависимость величины зерна α -твердого раствора от времени выдержки [и температуры закалки]; б — зависимость физико-механических свойств от температуры закалки (после старения при 320 °C, 4 ч);
 1 — БрБНТ1,9; 2 — БрБ2,5; 3 — БрБ2; 4 — БрБНТ1,7

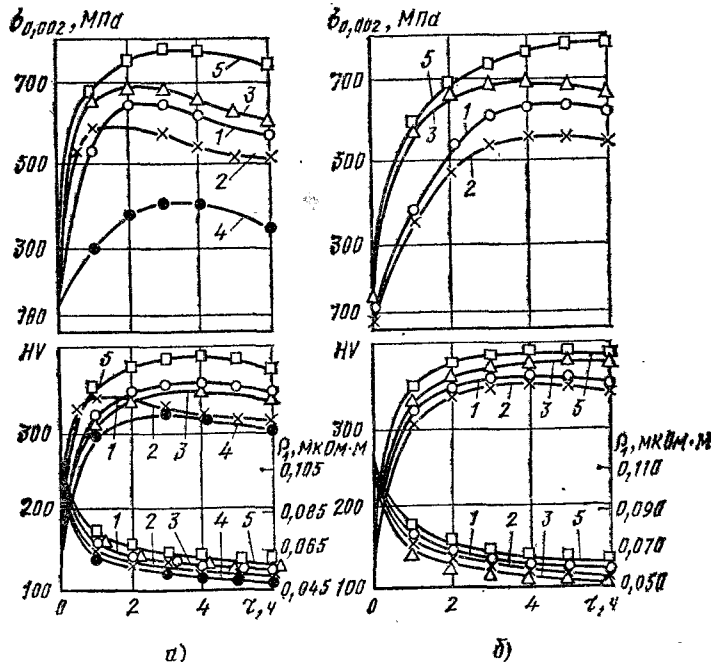


Рис. 7. Зависимость физико-механических свойств бериллиевых бронз БрБНТ1,9 (1); БрБ2 (2), БрБ2,5 (3), БрБНТ1,7 (4) и БрБНТ1,9Мг (5) от продолжительности старения при 340 (а) и 320 °C (б)

25. Влияние степени обжатия при холодной пластической деформации на свойства бериллиевых бронз (в числителе — бронзы БрБНТ1,9; в знаменателе — бронзы БрБ2)

| Состояние | $\sigma_{0,002}$, МПа | ρ_1 , мкОм·м | НВ |
|---|------------------------|-------------------|---------|
| После закалки при 770 °С + 10 °С, 15 мин | 120/120 | 0,098/0,098 | 100/100 |
| После закалки и деформации с обжатием, %: | | | |
| 10 | 240/220 | 0,101/0,101 | 150/140 |
| 15 | —/260 | 0,102/0,102 | —/165 |
| 33 | 460/440 | 0,103/0,102 | 230/230 |

кой, прилагаемой в том же направлении, что и в условиях службы изделия. Оно оказывается наиболее эффективным после основного старения и поэтому по существу является динамическим достариванием. В частности, если после полного старения бронзы БрБНТ1,9Мг при 340 °С, 3 ч провести достаривание при 200 °С, 1 ч под напряжением 1000 МПа предел упругости $\sigma_{0,002}$ возрастает от 750 до 1080 МПа при увеличении деформации ползучести, возникающей под действием нагрузки, что следует учитывать при назначении этого режима для упрочнения конкретных изделий. После динамического старения приблизительно в 2 раза возрастает релаксационная стойкость изделий из бронзы.

Максимальный уровень упрочнения бериллиевых бронз достигается в результате НТМО, технология которой заключается в закалке, холодной пластической деформации и старении. Пластическая деформация после закалки увеличивает прочностные характеристики, но при этом повышает удельное электрическое сопротивление в тем большей степени, чем выше степень обжатия (табл. 25). После деформации почти вдвое ускоряется процесс старения и возрастает уровень упрочнения тем больше, чем выше степень предшествующей деформации (рис. 8). Еще выше уровень упрочнения достигается при использовании в цикле НТМО ступенчатого и динамического старения, режимы которых

практически аналогичны тем, которые были указаны выше для недеформированных бронз.

В связи с дороговизной бериллиевых бронз и определенными трудностями их производства созданы безбериллиевые пружинные сплавы: камелин, № 156 (или ЛАНКМц)*1, камелон, № 538, 131, также упрочняемые в результате закалки и старения или НТМО, включая старение. Из этих безбериллиевых сплавов наиболее высокопрочные № 131, 538 и камелон, созданные в институте Гипроцветмет-обработка на базе систем Cu—Ni—Al и Cu—Zn, дополнительно легированные хромом, марганцем, кремнием, ванадием и магнием. После упрочняющей обработки, особенно в цикле НТМО, эти сплавы характеризуются ценным комплексом свойств, важнейшими из которых являются теплоустойчивость (табл. 26) и коррозионная стойкость (табл. 27). Сплавы № 131, 538 и камелон рекомендуются взамен бериллиевой бронзы в условиях службы упругих элементов при повышенной температуре (до 250 °С) и когда требуется лучшая коррозионная стойкость [1, 2]. Однако в том случае, когда упругие элементы должны рабо-

*1 У сплава № 156 (латунь ЛАНКМц ГОСТ 17527—86), по данным [7], после закалки и старения $\sigma_{0,002} = 400-410$ МПа, а после закалки, деформации с обжатием 40 % и старением $\sigma_{0,002} = 800$ МПа. Этот сплав также имеет более высокую релаксационную стойкость, чем Л62 в БрОФ4,5—0,25.

26. Физико-механические свойства *1 пружинных сплавов на основе меди [1, 2]

| Свойство | БрБ2 | № 131 | № 538 | Камелон | БрОФ4,5—0,15 | Камелин | № 156 | МНЦ15—20 | Нейзильбер 30 |
|---|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| σ_B , МПа | 1150—1600 | 1200—1250 | 1300 | 1500 | 700—920 | 1100 | 900—1000 | 800—940 | 1200—1250 |
| δ , % | 1,5 | 2,5 | 2 | 1,5 | 2 | 4 | 2 | 0,5—1,5 | 0,5—1,5 |
| НВ | 360 | 330—360 | 380 | 420 | 190—220 | 310 | 250—300 | 230—270 | 360—400 |
| $\sigma_{0,005}$, МПа | 900—1150 | 900—970 | 950 | 1100 | 450—550 | 800—900 | 800 | 650—700 | 1100 |
| E , ГПа | 120—130 | 140 | 140 | 145 | 100—110 | 125 | 120 | 110—125 | 140 |
| $\sigma_0 - \sigma_T$, 100 % за 100 ч** при температуре, °С: | 2,0 | 1,0 | 0 | 0 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 3,0 | 1,0 |
| 100 | 25,0 | 3,0 | 2,5 | 2,0 | 15,0** | 4,0** | 9,0** | 12,0** | 7,0** |
| 250 | 7·10 ⁴ | 10 ⁶ | 2·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 10 ⁵ | 10 ⁵ | 10 ⁵ | 3·10 ⁵ |
| N** | 0,07 | 0,13 | 0,23 | 0,35 | 0,15 | 0,22 | 0,1 | 0,26 | 0,22 |
| ρ_1 , мкОм·м | | | | | | | | | |

*1 Приведены свойства сплавов в максимально упрочненном состоянии: закалка + деформация с обжатием 30—40 % + старение (сплавы БрБ2, № 131, 538, камелин, № 156); отжиг + деформация с обжатием 60—80 %, дорекристаллизационный отжиг (сплавы БрОФ4,5—0,15, МНЦ15—20 и нейзильбер 30).

** При $\sigma_0 = 0,5\sigma_{0,005}$.

** При 150 °С.

** N — число циклов до разрушения при $\sigma_0 = 550-600$ МПа.

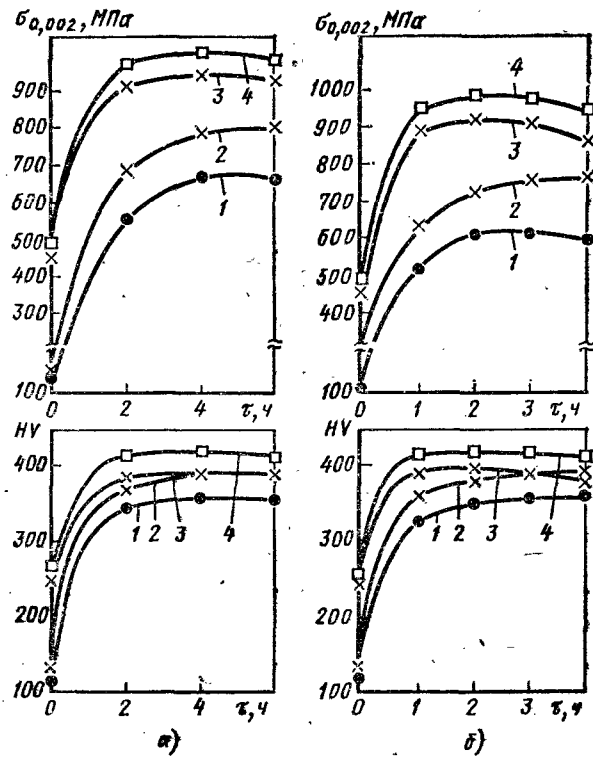


Рис. 8. Влияние продолжительности старения при 320 (а) и 350 °С (б) на свойства бериллиевой бронзы БрБНТ1,9 (1, 3) и БрБНТ1,9Мг (2, 4). Исходное состояние — после закалки (1, 2); после закалки и холодной пластической деформации с обжатием 35 % (3, 4)

27. Коррозионная стойкость пружинных сплавов меди в атмосфере повышенной влажности и в морском тумане [2]

| Среда коррозии | Коррозия (г/дм ² × сутки 10 ⁻⁴) сплавов | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|------------|------------|----------|------------|-------|------|------|-------|----------|
| | Камелон | БрБНТ1,9Мг | Нейзильбер | БрБНТ1,9 | БрОФ650,15 | № 156 | БрА7 | БрБ2 | № 131 | БрКМц3—1 |
| Атмосфера повышенной влажности | 5 | -1,5 | -1,5 | -2,5 | -3 | -3 | -3,5 | -3 | +1 | +2 |
| Морской туман | — | — | -3,5 | -11 | -22,5 | -5 | -6,5 | -11 | -3 | -9 |

28. Изменение свойств *1 пружинных сплавов ** в результате холодной пластической деформации

| Сплав | HV | ΔHV | ΔHV/HV × 100 % | σ _{0,005} , МПа | ρ _т , мкОм·м | Δρ _т /ρ _т × 100 % |
|----------|----------|-----|----------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Л85 | 50/164 | 114 | 192 | 90/445 | 0,045/0,0552 | 22,3 |
| Л80 | 58/174 | 116 | 200 | 90/375 | 0,052/0,062 | 19,3 |
| Л68 | 58/204 | 146 | 250 | 90/400 | 0,063/0,075 | 19,2 |
| БрОЦ4—3 | 67/230 | 163 | 270 | 105/535 | 0,081/0,0865 | 6,8 |
| БрА7 | 76,9/269 | 192 | 250 | 120/425 | 0,110/0,130 | 18,2 |
| БрКМц3—1 | 99,6/219 | 120 | 120 | 114/460 | 0,260/0,275 | 5,8 |
| МНЦ15—20 | 61/240 | 179 | 296 | 140/480 | 0,255/0,246 | -3,5 |

*1 В числителе указаны значения после отжига, в знаменателе — после прокатки с обжатием на 80 %.

**2 Составы сплавов указаны в ГОСТ 5017—74, ГОСТ 18175—78 и ГОСТ 492—73.

тать при более высоких температурах и в агрессивных средах, предпочтительно применять высоколегированные аустенитные пружинные сплавы.

К группе пружинных относятся латуни и бронзы, упрочняемые в результате применения холодной пластической деформации и последующего дорекристаллизационного отжига (табл. 28), во время которого в сплавах помимо преобразования субструктуры происходят процессы перераспределения атомов компонентов с образованием либо дисперсных частиц избыточных фаз, либо микрообластей с более высокой степенью упорядочения и концентрационными отклонениями от среднего состава.

В процессе холодной пластической деформации резко возрастает прочность сплавов, но при значительном снижении их пластичности. Поэтому из таких сплавов после пластической деформации можно изготавливать упругие элементы простой формы — это плоские пружины, получаемые чаще всего путем вырубки из листовых полуфабрикатов, или витые пружины, для которых используется проволока. В процессе последующего дорекристаллизационного отжига по оптимальным режимам (табл. 29) сильно возрастают релаксационная стойкость (табл. 30), предел упругости, сопротивление уста-

лости; значительно уменьшаются остаточные напряжения и анизотропия свойств, имеющиеся в исходном состоянии листовых полуфабрикатов, как следствие воздействия предшествующей холодной пластической деформации. В результате дорекристаллизационного отжига также резко уменьшается деформация прямого и обратного упругого последствия, что особенно важно для упругих элементов, используемых в приборостроении.

Учитывая весь комплекс свойств сплавов данной группы, можно определить область их применения. Это упругие элементы относительно несложной формы, работающие при воздействии относительно невысоких напряжений в обычных климатических условиях. Достоинство этих сплавов — малая склонность к хрупким разрушениям, относительно невысокий, как и для других сплавов меди, модуль упругости, что обеспечивает в них пониженный уровень напряжений даже при повышенной упругой деформации в условиях службы. Эти сплавы обладают более высокой электропроводностью по сравнению со сталями и поэтому часто используются для изготовления токоведущих упругих элементов.

Достоинством латуней и бронз также являются их технологические свой-

29. Оптимальные режимы отжига и свойства ^{*1} пружинных сплавов на основе меди

| Сплав | Режим отжига | $\sigma_{0,002}$ | $\sigma_{0,005}$ | $\sigma_{0,01}$ | HV | $\rho_{1, \text{мг/см}^3}$ |
|--------------|------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----|----------------------------|
| | | МПа | | | | |
| БрОЦ4—3 | 150 °С, 30 мин ^{*2} | 463 | 532 | 593 | 218 | 0,080 |
| БрОФ4—0,25 | 150 °С, 30 мин ^{*2} | 423 | 489 | 551 | 220 | — |
| БрОФ6,5—0,15 | 260 °С, 1 ч | 489 | 550 | 596 | 230 | — |
| БрКМц3—1 | 275 °С, 1 ч | 494 | 565 | 632 | 210 | 0,262 |
| БрА7 | 275 °С, 30 мин | 630 | 725 | 790 | 270 | 0,115 |
| Л68 | 200 °С, 1 ч | 452 | 519 | 581 | 190 | 0,086 |
| Л80 | 200 °С, 1 ч | 390 | 475 | 538 | 170 | 0,057 |
| Л85 | 200 °С, 30 мин | 349 | 405 | 538 | 170 | 0,057 |
| МНЦ15—20 | 300 °С, 4 ч | 548 | 614 | 561 | 230 | 0,256 |

^{*1} Исходное состояние — холодная прокатка с обжатием 60 %.

^{*2} Вместо указанного режима можно применять нагрев при 250 °С, 1 ч, обеспечивающий аналогичные свойства, но лучше стабилизирующий форму изделий.

30. Релаксации напряжений в пружинных сплавах на основе меди за 20 лет (178 тыс. ч) (Б. И. Пучков и др.)

| Сплав | Релаксация напряжений | | | |
|--------------|----------------------------|---|-------------------------------------|---|
| | в сплавах после деформации | | в сплавах после деформации и отжига | |
| | σ_0 , МПа | $\frac{\sigma_0 - \sigma_T}{\sigma_0} \times 100\%$ | σ_0 , МПа | $\frac{\sigma_0 - \sigma_T}{\sigma_0} \times 100\%$ |
| Л85 | 302 | 29,4 | 339 | 13,6 |
| Л80 | 294 | 20,4 | 332 | 11,1 |
| Л68 | 282 | 17,3 | 331 | 7,0 |
| БрОФ6,5—0,15 | 276 | 11,2 | 356 | 8,4 |
| БрОФ4—0,25 | 304 | 12,1 | 369 | 8,3 |
| БрОЦ4—3 | 321 | 12,4 | 35,8 | 5,6 |
| БрА7 | 308 | 15,6 | 341 | 6,2 |
| БрКМц3—1 | 311 | 14,8 | 334 | 4,3 |
| МНЦ15—20 | 331 | 10,5 | 389 | 5,6 |

Примечание. σ_0 — исходное напряжение при испытании; σ_T — напряжение после испытания за 20 лет.

ства — хорошая паяемость, возможность создания на их поверхности гальванических покрытий для повышения стойкости против коррозии или еще большего повышения электрической проводимости и др.

Список литературы

1. Дисперсионно-твердеющие пружинные сплавы на основе меди/В. М. Розенберг, А. В. Черникова, З. М. Иедлинская и др./Цветные металлы. 1976. № 6. С. 65—68.
2. Исследование свойств нового токоведущего пружинного сплава для работы при температурах 200—250 °С/В. М. Розенберг, А. В. Черникова, З. М. Иедлинская, В. М. Тульская//

Гипроцветметобработка. М.: Металлургия. 1978. Вып. 55. С. 47—59.

3. Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г., Каплун Ю. А. Динамическое старение сплавов. М.: Металлургия, 1985. 222 с.

4. Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г. Пружинные сплавы цветных металлов. М.: Металлургия, 1983. 364 с.

5. Прецизионные сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1974. 442 с.

6. Рахштадт А. Г. Пружинные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1980. 400 с.

7. Чипиженко А. И., Иедлинская З. М. Исследование влияния структурного состояния латуни Л62 на ее релаксационную стойкость//Гипроцветметобработка. М.: Металлургия, 1968. Вып. 27. С. 94—96.

Глава V МАТЕРИАЛЫ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ И ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

1. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Алюминий не имеет полиморфных превращений, обладает решеткой гранцентрированного куба с периодом $a = 0,4041$ нм. Атомный номер алюминия 13, атомная масса 26,9815, температура плавления 660°C , температура кипения 2270°C , плотность $2,7 \text{ т/м}^3$, модуль упругости 71 ГПа, удельное электросопротивление $\rho_1 = 2,6 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, коэффициент линейного расширения в интервале температур $20-100^\circ\text{C}$ составляет $\alpha = 23,9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Алюминий и его сплавы хорошо поддаются горячей и холодной деформации — прокатке, ковке, прессованию, волочению, гибке, листовой штамповке и другим операциям.

Все алюминиевые сплавы можно соединять точечной сваркой, а специальные сплавы можно сваривать плавлением и другими видами сварки.

Деформируемые алюминиевые сплавы разделяются на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой.

Все свойства сплавов определяют не только способом получения полуфабриката заготовки и термической обработкой, но главным образом химическим составом и особенно природой фаз — упрочнителей каждого сплава.

Свойства стареющих алюминиевых сплавов зависят от видов старения: зонного, фазового или коагуляционного.

На стадии коагуляционного старения (Т2 и Т3) значительно повышается коррозионная стойкость, причем обеспечивается наиболее оптимальное сочетание характеристик прочности, сопротивления коррозии под напряжением, расслаивающей коррозии, вязкости разрушения (K_{1c}) и пластичности (особенно в высотном направлении).

Химический состав, физические и механические свойства деформируемых сплавов на основе алюминия приведены в табл. 1—6.

Для массивных полуфабрикатов (табл. 7) основными характеристиками разрушения при однократно нагружении являются характеристики K_{1c} и КСТ [11, 23].

Состояние полуфабрикатов, характер плакировки и направление вырезки образцов обозначены следующим образом:

Условные обозначения

| | |
|-----|---|
| М | Мягкий, отожженный |
| Т | Закаленный и естественно состаренный |
| Т1 | Закаленный и искусственно состаренный |
| Т2 | Закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему более высокие значения вязкости разрушения и лучшее сопротивление коррозии под напряжением |
| Т3 | Закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему наиболее высокие сопротивления коррозии под напряжением и вязкость разрушения |
| Н | Нагартованный (нагартовка листов сплавов типа дуралюмин примерно 5—7%) |
| П | Полунагартованный |
| Н1 | Усиленно нагартованный (нагартовка листов примерно 20%) |
| ТПП | Закаленный и естественно состаренный, повышенной прочности |
| ГК | Горячекатаные (листы, плиты) |
| Б | Технологическая плакировка |

| | |
|----|--|
| А | Нормальная плакировка |
| УП | Утолщенная плакировка (8% на сторону) |
| Д | Продольное направление (вдоль волокна) |
| П | Поперечное направление |
| В | Высотное направление (толщина) |
| Х | Хордовое направление |
| Р | Радиальное направление |

ПД, ДП, ВД, ВП, ХР, РХ

Направление вырезки образцов, применяемое для определения вязкости разрушения и скорости роста усталостной трещины. Первая буква характеризует направление оси образца, вторая — направление плоскости, например: ПВ — ось образца совпадает с шириной полуфабриката, а плоскость трещины параллельна высоте или толщине.

Коррозионно-стойкие сплавы на основе систем Al—Mn и Al—Mg. Сплавы типа АМц, АМг2, АМг6 не упрочняются термической обработкой. Они отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью. Обрабатываемость резанием улучшается с увеличением степени легированности сплавов. Сплавы используются в отожженном, нагартованном и полунагартованном состояниях.

Применяются для изделий, получаемых глубокой вытяжкой, сваркой, от которых требуется высокая коррозионная стойкость (трубопроводы для масла и бензина, радиаторы тракторов и автомобилей, сварные бензобаки), а также для заклепок, корнусов и мачт судов, узлов лифтов и подъемных кранов, рам транспортных средств и др. [3, 25].

Сплавы системы Al—Cu—Mg. Дуралюмины Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17 упрочняются термической обработкой; характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности. Режимы термической обработки приведены в табл. 8.

Применяются: Д1 — для лопастей воздушных винтов, узлов креплений, строительных конструкций и др.;

Д16 — для силовых элементов конструкций самолетов (шпангоуты, нервюры, тяги управления, лонжероны), кузовов грузовых автомобилей, буровых труб и др.; Д19 — для тех же деталей, что и из сплава Д16, но работающих при нагреве до $200-250^\circ\text{C}$; В65, Д18 — для заклепок; ВД17 — для лопаток компрессора двигателей, работающих при температуре до 250°C . Дуралюмины хорошо свариваются точечной сваркой и практически не свариваются плавлением из-за высокой склонности к трещинообразованию.

Сплавы Д1, Д16 в искусственно состаренном состоянии имеют улучшенную коррозионную стойкость, которая не снижается при повышенных температурах эксплуатации деталей, и более высокие значения $\sigma_{0,2}$ и σ_B .

Появление склонности к межкристаллитной коррозии у закаленных и естественно состаренных сплавов системы Al—Cu—Mg при нагреве зависит от их фазового состава. Сплавы Д19, ВД17 менее склонны к межкристаллитной коррозии после нагрева, чем сплавы В65, Д18, Д1 и Д16.

Плакированные полуфабрикаты обладают повышенной коррозионной стойкостью.

Неплакированные детали следует защищать анодно-окисными, химическими и лакокрасочными покрытиями.

Все дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состояниях [3, 25, 45, 53].

Жаропрочные сплавы типа АК4-1 системы Al—Cu—Mg—Fe—Ni по химическому и фазовому составам весьма близки к дуралюминам, но вместо марганца в качестве легирующих элементов содержат железо и никель.

Сплавы хорошо деформируются в горячем состоянии; коррозионная стойкость удовлетворительная. Для защиты от коррозии детали подвергаются анодированию, оксидированию и покрываются лакокрасочными материалами.

Сплавы удовлетворительно соединяются точечной и шовной сваркой, хорошо обрабатываются резанием. Режимы термической обработки сплавов приведены в табл. 9.

1. Химический состав (в %) деформируемых сплавов (ГОСТ 4784—74)

| Сплав | Al | Cu | Mg | Mn | Ni | Fe | Si | Zn | Ti | Cr | Zr | Be | Прочие примеси | |
|-------|----------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|----|-----------------------|----------------------|-------------|
| | | | | | | | | | | | | | каждая в отдельности | сумма |
| АД0 | Не менее 99,50 | До 0,02 | До 0,05 | До 0,025 | — | До 0,3 | До 0,30 | До 0,1 | До 0,1 | — | — | — | 0,02 | — |
| АД1 | Не менее 99,30 | До 0,05 | До 0,05 | До 0,025 | — | До 0,3 | До 0,30 | До 0,1 | До 0,15 | — | — | — | 0,02 | — |
| АМц | Основа | До 0,15 | До 0,2 | 1,0—1,6 | — | До 0,7 | До 0,6 | До 0,1 | До 0,2 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АМг2 | » | До 0,1 | 1,8—2,6 | 0,2—0,6 | — | До 0,4 | До 0,4 | До 0,2 | До 0,1 | До 0,05 | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АМг3 | » | До 0,1 | 3,2—3,8 | 0,3—0,6 | — | До 0,5 | 0,5—0,8 | До 0,2 | До 0,1 | До 0,05 | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АМг4 | » | До 0,1 | 3,8—4,6 | 0,5—0,8 | — | До 0,5 | До 0,4 | До 0,2 | 0,02—0,10 | 0,05—0,25 | — | 0,00025—0,005 | 0,05 | 0,1 |
| АМг5 | » | До 0,1 | 4,8—5,8 | 0,3—0,8 | — | До 0,5 | До 0,5 | До 0,2 | 0,02—0,10 | — | — | 0,0002—0,005 | 0,05 | 0,1 |
| АМг5П | » | До 0,2 | 4,7—5,7 | 0,2—0,6 | — | До 0,4 | До 0,4 | — | — | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АМг6 | » | До 0,1 | 5,8—6,8 | 0,5—0,8 | — | До 0,4 | До 0,4 | До 0,2 | 0,02—0,10 | — | — | 0,0002—0,005 | 0,05 | 0,1 |
| Д18 | » | 2,2—3,0 | 0,2—0,5 | До 0,2 | — | До 0,5 | До 0,5 | До 0,1 | До 0,1 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| В65 | » | 3,9—4,5 | 0,15—0,30 | 0,3—0,5 | — | До 0,2 | До 0,25 | До 0,1 | До 0,1 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| Д1 | » | 3,8—4,8 | 0,4—0,8 | 0,4—0,9 | До 0,1 | До 0,7 | До 0,7 | До 0,3 | До 0,1 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| Д16 | » | 3,8—4,9 | 1,2—1,8 | 0,3—0,8 | До 0,1 | До 0,5 | До 0,5 | До 0,3 | До 0,1 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| Д16П | » | 3,8—4,5 | 1,2—1,6 | 0,3—0,7 | — | До 0,5 | До 0,5 | До 0,1 | До 0,1 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| Д19 | » | 3,8—4,3 | 1,7—2,3 | 0,5—1,0 | — | До 0,5 | До 0,5 | До 0,1 | До 0,1 | — | — | 0,0002—0,005 | 0,05 | 0,1 |
| ВД17 | » | 2,6—3,2 | 2,0—2,4 | 0,45—0,7 | — | До 0,3 | До 0,3 | До 0,1 | До 0,1 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АК4-1 | » | 1,9—2,7 | 1,2—1,8 | До 0,2 | 0,8—1,4 | 0,8—1,4 | До 0,35 | До 0,3 | 0,02—0,10 | До 0,1 | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АД31 | » | До 0,1 | 0,4—0,9 | До 0,1 | — | До 0,5 | 0,3—0,7 | До 0,2 | До 0,15 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АД33 | » | 0,15—0,40 | 0,8—1,2 | До 0,15 | — | До 0,7 | 0,4—0,8 | До 0,25 | До 0,15 | 0,15—0,35 | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АВ | » | 0,1—0,5 | 0,45—0,90 | 0,15—0,35 | — | До 0,5 | 0,5—1,2 | До 0,2 | До 0,15 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АК6 | » | 1,8—2,6 | 0,4—0,8 | 0,4—0,8 | До 0,1 | До 0,7 | 0,7—1,2 | До 0,3 | До 0,1 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| АК8 | » | 3,9—4,8 | 0,4—0,8 | 0,4—1,0 | До 0,1 | До 0,7 | 0,6—1,2 | До 0,3 | До 0,1 | — | — | — | 0,05 | 0,1 |
| В95 | » | 1,4—2,0 | 1,8—2,8 | 0,2—0,6 | — | До 0,5 | До 0,5 | 5,0—7,0 | — | 0,1—0,25 | — | — | — | — |
| В93 | » | 0,8—1,2 | 1,6—2,2 | — | — | 0,2—0,4 | До 0,2 | 6,5—7,3 | — | — | — | — | — | — |
| В96Ц1 | » | 2,0—2,6 | 2,3—3,0 | 0,3—0,8 | — | До 0,3 | До 0,3 | 8,0—9,0 | — | — | — | — | — | — |
| 1420 | » | — | 5,0—6,0 | До 0,3 | — | До 0,3 | 0,1—0,3 | — | До 0,1 | — | — | 0,1—0,16 0,09—0,15 | 1,9—2,3 Li | до 0,005 Na |

2. Физические свойства деформируемых сплавов [3, 25, 45]

| Сплав | $\rho, \text{т/м}^3$ | $\rho_1 \cdot 10^3, \text{Ом} \cdot \text{м}$, при 20 °С в зависимости от состояния полуфабриката | $\alpha \cdot 10^6, \text{°C}^{-1}$ | | $\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ | | $c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$ | |
|-------|----------------------|--|-------------------------------------|--------|--|-------|--|------|
| | | | при температуре °С | | | | | |
| | | | 20—100 | 20—400 | 100 | 400 | 100 | 400 |
| АД0 | 2,71 | М—2,92 | 24 | 25,6 | М—226 | — | — | — |
| | | Н—3,02 | — | — | Н—216 | — | — | — |
| АД1 | 2,71 | М—2,92 | 24 | 25,6 | М—226 | — | — | — |
| | | Н—3,02 | — | — | Н—216 | — | — | — |
| АМц | 2,73 | М—3,45 | М—23,2 | М—25,0 | М—180 | М—189 | 1,09 | 1,30 |
| | | П—4,20 | — | — | — | — | — | — |
| | | Н—4,32 | — | — | — | — | — | — |
| АМг2 | 2,68 | М—4,76 | 24,2 | 27,6 | 159 | 168 | 0,963 | 1,09 |
| АМг3 | 2,67 | М—4,96 | 23,5 | 26,1 | 151 | 159 | 0,88 | 1,05 |
| АМг4 | 2,67 | М—6,09 | 24,3 | 24,6 | 138 | 155 | 0,963 | 1,07 |
| АМг5 | 2,65 | М—6,40 | — | — | 126 | 147 | 0,922 | 1,09 |
| АМг5П | 2,65 | М—6,25 | 24,1 | 26,2 | 126 | 147 | 0,922 | 1,05 |
| АМг6 | 2,64 | М—6,73 | 24,7 | 27,4 | 122 | 138 | 0,922 | 1,09 |
| Д18 | 2,76 | Т—3,90 | 23,4 | 24,5 | 172 | 193 | 0,922 | 1,17 |
| В65 | 2,80 | Т—5,04 | — | — | 155 | 184 | 0,964 | 1,17 |
| Д1 | 2,80 | Т—5,4 | 22,9 | 25 | 130 | 174 | 0,922 | 1,05 |
| Д16 | 2,80 | Т—5,7 | 22,9 | — | 130 | 163 | 0,922 | 1,17 |
| | | Т1—4,76 | 22,9 | — | 146 | 167 | 0,879 | 1,21 |
| | | М—3,4 | — | — | — | — | — | — |

Продолжение табл. 2

| Сплав | $\rho, \text{т/м}^3$ | $\rho_1 \cdot 10^3, \text{Ом} \cdot \text{м}$, при 20 °С в зависимости от состояния полуфабриката | $\alpha \cdot 10^6, \text{°C}^{-1}$ | | $\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ | | $c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$ | |
|-------|----------------------|--|-------------------------------------|--------|--|----------------|--|-------|
| | | | при температуре °С | | | | | |
| | | | 20—100 | 20—400 | 100 | 400 | 100 | 400 |
| Д19 | 2,76 | Т—6,1 Т1—5,1 | 20,3 | — | 138 | 172 | 0,880 | 1,09 |
| ВД17 | 2,75 | Т1—5,5 | 23,6 | 25,4 | 142 | 172 | 0,838 | 0,964 |
| АК4-1 | 2,80 | Т1—5,5 | 20,8 | 23,0 | 146 | 163 | 0,797 | 0,964 |
| АД31 | 2,71 | Т1—3,44 | 23,4 | 26,7 | 188 | 188 | 0,921 | 1,05 |
| АД33 | 2,71 | Т1—4,38 | 23,2 | 25 | 151 | 172 | 0,945 | 1,05 |
| АВ | 2,70 | Т; Т1—3,70 | 23,5 | 25,4 | 180 | 188 | 0,797 | 1,09 |
| АК6 | 2,75 | Т1—4,10 | 21,4 | 23,8 | 180 | 189 | 0,838 | 1,00 |
| АК8 | 2,80 | Т1—4,3 | 22,5 | 24,5 | 168 | 180 | 0,838 | 1,09 |
| В95оч | 2,85 | Т1—4,2 | 22 | — | 178 | 179 | 0,92 | 1,090 |
| В93 | 2,84 | Т2—4,08 | 23,8 | — | 151 | 163 | 0,880 | 1,130 |
| В96ц1 | 2,89 | Т2—4,9 | 23,9 | — | 155 | 167 | 0,861 | 1,133 |
| 1420 | 2,47 | 10,5 | 22,2 | — | 80 | 83 (300 °С) | 1,070 | 1,240 |

3. Механические свойства деформируемых сплавов при температуре 20 °С [3, 45, 53, 61]

| Марка сплава | Вид полуфабриката | Состояние испытываемых образцов | Толщина или диаметр, мм | E | G | σ_{-1} на базе $2 \cdot 10^7$ циклов | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_{цц}$ | δ | ψ | $\sigma_{сж}$ | КСУ | КСТ |
|--------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------|-----|------|---|------------|----------------|---------------|----------|--------|---------------|-----|------|
| | | | | ГПа | | | | | | | | | | |
| АД0, АД1 | Лист | Отожженный | 2 | 71 | 27 | — | 80 | 40 | — | 35 | 80 | — | — | — |
| | Пруток | Без термической обработки | 20 | — | — | — | 150 | 100 | — | 6 | 60 | — | — | — |
| АМц | Лист | Отожженный | 0,7—10,5 | — | — | — | 110 | 60 | 35 | 25 | — | — | — | — |
| | | Полунагартованный | 0,7—10,5 | — | — | — | 170 | 130 | — | 10 | — | — | — | — |
| | | Нагартованный | 0,7—10,5 | — | — | — | 220 | 180 | — | 5 | — | — | — | — |
| | Пруток | Без термической обработки | 20 | 70 | 26,5 | — | 170 | 110 | 70 | 18 | 65 | — | — | — |
| | Плита | То же | 25 | — | — | — | 150 | 120 | — | 22 | — | — | — | — |
| АМг2 | Лист | Отожженный | 2 | 71 | 27 | 85 | 190 | 100 | — | 23 | — | 100 | — | 0,25 |
| | Пруток | Отожженный | 20 | — | — | — | 190 | 80 | — | 25 | 65 | 80 | 0,9 | — |
| | Труба | Отожженный | Ø50 | — | — | — | 180 | 100 | — | 12 | — | 100 | — | — |
| АМг3 | Лист | Отожженный | 2 | 71 | 27 | 90 | 230 | 120 | — | 25 | — | 120 | 0,4 | 0,25 |
| | Лист | Отожженный | 2 | 71 | 27 | 110 | 280 | 140 | 100 | 20 | — | 140 | 0,3 | 0,2 |
| | Пруток | Без термической обработки | 25 | — | — | — | 320 | 190 | 100 | 15 | 40 | 160 | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------|------------|----------|---------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|
| АМг5П | Пруток | Отожженный | 20 | — | — | — | 300 | 160 | — | 14 | — | 160 | — | — |
| | Штамповка и поковка | Отожженные | До 30 кг | — | — | — | 300 | 160 | — | 16 | — | — | — | — |
| АМг6 | Проволока | Отожженная | 10 | 71 | 27 | — | 270 | 150 | — | 23 | — | — | — | — |
| АМг6 | Лист плакированный | Отожженный | 2 | 71 | 27 | 100 | 340 | 170 | 130 | 20 | — | 180 | — | — |
| | | Нагартованный 20 % | — | — | — | — | 400 | 300 | 230 | 9 | — | 320 | — | — |
| | | То же 30 % | — | — | — | — | 420 | 320 | — | 10 | — | 330 | — | — |
| АМг6 | Плита | Нагартованная 16 % | 30 | 71 | 27 | — | 400 | 310 | 240 | 7 | — | 320 | 0,2 | 0,09 |
| | | Профиль горячекатаный | Отожженный | 6 | — | — | — | 345 | 170 | 100 | 20,5 | — | 170 | 0,2 |
| | | | Без термической обработки | 6 | — | — | — | 355 | 190 | — | 19,5 | — | 190 | — |
| АМг6 | Поковка | Отожженная | До 2500 кг | — | — | — | 300 | 150 | — | 14 | — | — | — | — |
| | | Д18 | Проволока | Отожженная | 1,4—10,0 | 71 | 27 | — | 160 | 60 | — | 25 | — | — |
| | | Закаленная и естественно состаренная | | 1,4—10,0 | — | — | — | 300 | 170 | — | 24 | 50 | — | — |
| Д1 | Пруток | То же | До 50 | 72 | 27 | — | — | 260 | 200 | — | — | — | — | — |
| | | Профиль прессованный | То же | До 10 | — | — | — | 360 | 220 | — | 12 | — | — | — |
| | | | | То же | Св. 20 | — | — | — | 410 | 250 | — | 10 | — | — |
| Д16 | Лист | То же | 2—4 | 72 | — | 130 | 450 | 320 | 190 | 19 | — | — | — | — |
| | | | | То же | 30—40 | — | — | — | 460 | 360 | — | 10 | — | — |
| | Профиль прессованный | Закаленный и искусственно состаренный | 5—10 | 72 | — | 140—150 | 480 | 350 | — | 12 | — | — | — | — |

| Марка сплава | Вид полуфабриката | Состояние испытываемых образцов | Толщина или диаметр, мм | E | G | σ_{-1} на базе $2 \cdot 10^7$ циклов | σ_b | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_{пц}$ | δ | ψ | $\sigma_{сж}$ | KCU | KCT |
|---------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----|------|---|------------|----------------|---------------|----------|--------|---------------|--------------------|---------|
| | | | | ГПа | | | МПа | | | % | | МПа | МДж/м ² | |
| Д19 | Лист лакированный | Закаленный и естественно состаренный | 2—4 | 70 | — | — | 440 | 310 | 250 | 16 | — | 330 | — | — |
| | | Закаленный и искусственно состаренный | 2—4 | — | — | — | 450 | 400 | 350 | 6,5 | — | 425 | — | 0,3—0,4 |
| | Панель | Закаленная и естественно состаренная | 7,5 (полотно) | — | — | — | 480 | 350 | 300 | 10 | — | 350 | — | — |
| | | Закаленная и искусственно состаренная | 7,5 (полотно) | — | — | — | 490 | 450 | 400 | 5,5 | — | 450 | — | — |
| | Профиль прессованный | Закаленный и естественно состаренный | До 5 | 72 | 27 | — | 460 | 340 | 300 | 12 | — | 340 | — | — |
| Пруток прессованный | 20 | | — | — | 160 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| ВД17 | Полоса прессованная | Закаленная и искусственно состаренная | 60 | 72 | 27 | 165 | — | — | — | — | — | — | — | |
| АД31 | Полоса, прутки прессованные | Закаленные и искусственно состаренные | 20—100 | 71 | 26,5 | 90 | 250 | 210 | 15 | 13 | — | 230 | 0,5 | — |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------|----------------------|---------------------------------------|------------------|----|------|-----|---------------|-----|----|------|----|-----|------|-----|
| АД33 | Лист неплакированный | Отожженный | 2—4 | 71 | 26,5 | 100 | 140 | 80 | — | 20 | — | — | — | — |
| | | Закаленный и естественно состаренный | — | — | — | — | 230 | 120 | — | 19 | — | — | — | — |
| | | Закаленный и искусственно состаренный | — | — | — | — | 310 | 260 | 18 | 14 | — | 260 | — | — |
| | Профиль прессованный | То же | 20 | — | — | 90 | 320 | 280 | 21 | 12 | 25 | 280 | 0,3 | — |
| АВ | Лист неплакированный | Закаленный и естественно состаренный | 0,5—10,5 | — | — | — | 250 | 160 | — | 23 | — | — | — | — |
| | Профиль | Закаленный и искусственно состаренный | 20 | 71 | 27 | 100 | 350 | 290 | — | 13 | — | 290 | 0,35 | — |
| | Штамповка | То же | До 150 кг | — | — | — | 310 | 260 | — | 10 | — | 270 | — | — |
| АК6 | Штамповка | То же | Св. 30 кг | 72 | — | — | Вдоль 447 | 378 | — | 12,5 | — | — | 0,19 | 1,1 |
| | | | | | — | — | Поперек 427 | 357 | — | 11,2 | — | — | 0,14 | 1,1 |
| | | | | | — | — | По высоте 400 | — | — | 8,5 | — | — | 0,08 | 0,3 |
| АК8 | Пруток | То же | 150—200 | — | — | — | 450 | 400 | — | 8 | — | — | — | — |
| | Профиль | То же | 30—50 | — | — | — | 490 | 450 | — | 7 | 15 | — | — | — |
| | Штамповка | То же | До 30 кг | 74 | — | — | 480 | 380 | — | 10 | 25 | — | — | — |
| | Поковка | То же | Крупногабаритная | — | — | 135 | 420 | 310 | — | 10 | — | — | — | — |

Продолжение табл. 3

| Марка сплава | Вид полуфабриката | Состояние испытательных образцов | Толщина или диаметр, мм | E | σ | σ _{0,2} на базе 2·10 ⁷ циклов | ГПа | | МПа | | δ | ψ | σ _{сж} | KCU | KCT | МДж/м ² | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------------|----|---|---|-----|------------------|----------------|------------------|---|---|-----------------|-----|-----|--------------------|-------|----------------------|-------|--------|---|---|---|---|-----|-----|---|----|---|---|---|---|
| | | | | | | | σ | σ _{0,2} | σ _в | σ _{0,2} | | | | | | | в ЦИВ | % | | | | | | | | | | | | | | |
| AK4-1 | Лист плакированный | Закаленный и искусственно состаренный | 0,5—0,8 | 72 | — | — | — | — | 380 | 310 | 6 | — | — | — | — | — | 0,2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | Профиль | То же | Св. 10 | — | — | — | — | 400 | 330 | 8 | — | — | — | — | — |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1420 | Лист | То же | 1,5—2 | 75 | — | — | — | 450 | 270 | 10 | — | — | — | — | — | 0,2—0,4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | B950ч | Профили прессованные | То же | 1,5—10 | — | — | — | — | 450 | 300 | 9 | — | — | — | — | — |
| B95лч | Листы, плиты | То же | — | 72 | — | — | — | 570 | 500 | 12 | — | — | — | — | — | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | B96Ц | Профили прессованные | То же | — | — | — | — | — | 660 | 630 | 8 | 14 | — | — | — | — |

4. Механические свойства деформируемых сплавов при высоких температурах [3, 23, 25, 45]

| Сплав | Полуфабрикат, толщина | t испытания, °C | σ _в | σ _{0,2} | δ | ψ | |
|-------|---|-----------------|----------------|------------------|-----|----|---|
| | | | МПа | | % | | |
| AMc | Лист отожженный, 3 мм | 20 | 110 | — | 30 | — | |
| | | 100 | 95 | — | 35 | — | |
| | | 200 | 70 | — | 41 | — | |
| | | 300 | 45 | — | 45 | — | |
| AMг2 | Лист, 1,5—3 мм: отожженный | 20 | 190 | 100 | 25 | — | |
| | | 100 | 180 | 90 | 25 | — | |
| | | 200 | 130 | 60 | 45 | — | |
| | | 300 | 70 | — | 75 | — | |
| | | нагартованный | 20 | 290 | 250 | 4 | — |
| | | | 100 | 270 | 230 | 6 | — |
| | Пруток отожженный, 20 мм | 200 | 210 | 150 | 15 | — | |
| | | 300 | 80 | — | 65 | — | |
| | | 20—100 | 190 | 80 | 30 | 65 | |
| | | 200 | 145 | 80 | 54 | 80 | |
| AMг3 | Лист отожженный, 2 мм | 200 | 75 | 65 | 56 | 90 | |
| | | 20 | 230 | 120 | 25 | — | |
| | | 100 | 220 | 110 | 27 | — | |
| | | 200 | 150 | 90 | 50 | — | |
| AMг4 | Лист отожженный, 2 мм | 250 | 100 | 60 | 60 | — | |
| | | 20 | 280 | 140 | 20 | — | |
| | | 100 | 250 | 130 | 25 | — | |
| | | 200 | 170 | 100 | 45 | — | |
| AMг5 | Лист отожженный, 2 мм | 300 | 100 | 50 | 60 | — | |
| | | 20 | 320 | 190 | 15 | 40 | |
| | | 100 | 260 | 120 | 22 | 70 | |
| | | 200 | 200 | 100 | 30 | 85 | |
| AMг5 | Пруток без термической обработки, 25 мм | 300 | 120 | 60 | 45 | 85 | |
| | | 20 | 300 | 150 | 20 | — | |
| | | 100 | 270 | 150 | 30 | — | |
| | | 200 | 180 | 120 | 45 | — | |
| AMг5 | Пруток отожженный (прессованный) и без термической обработки, 20 мм | 300 | 110 | 60 | 65 | — | |
| | | 20 | 310 | 160 | 14 | — | |
| | | 100 | 290 | 150 | 17 | — | |
| | | 200 | 210 | 130 | 27 | — | |
| AMг5 | Пруток отожженный (прессованный) и без термической обработки, 20 мм | 250 | 170 | 110 | 34 | — | |
| | | 200 | 210 | 130 | 27 | — | |

Продолжение табл. 4

| Сплав | Полуфабрикат, толщина | t испы- тания, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | |
|-------|---|---|------------|----------------|----------|--------|----|
| | | | МПа | | % | | |
| АМг6 | Лист, 2 мм: отожженный | 20 | 350 | 165 | 22 | — | |
| | | 100 | 320 | 160 | 34 | — | |
| | | 200 | 195 | 135 | 45 | — | |
| | | 300 | 130 | 60 | 55 | — | |
| | | нагартованный | 20 | 385 | 290 | 11 | — |
| | | | 100 | 335 | 285 | 15 | — |
| | 200 | | 250 | 185 | 25 | — | |
| | Профиль (все размеры) отожженный и без термиче- ской обработки | 20 | 350 | 180 | 18 | — | |
| | | 100 | 310 | 160 | 20 | — | |
| | | 200 | 200 | 140 | 30 | — | |
| | | 250 | 170 | 120 | 35 | — | |
| | Д18 | Проволока закаленная и состаренная | 20 | 300 | 200 | 25 | 50 |
| 100 | | | 260 | 180 | 24 | 60 | |
| 200 | | | 250 | 140 | 19 | 70 | |
| 300 | | | 20 | 60 | — | — | |
| Д16 | Лист лакированный: закаленный и естествен- но состаренный | 20 | 435 | 280 | 19 | — | |
| | | 100 | 410 | 270 | 18 | — | |
| | | 200 | 330 | 250 | 12 | — | |
| | | закаленный и естествен- но состаренный, нагарто- ванный | 20 | 465 | 350 | 13 | — |
| | | | 100 | 440 | 320 | 13 | — |
| | | | 200 | 360 | 270 | 9 | — |
| | закаленный и искус- ственно состаренный, 5—10 мм | 20 | 455 | 390 | 7 | — | |
| | | 100 | 440 | 390 | 7 | — | |
| | | 175 | 410 | 350 | 10 | — | |
| | 200 | 380 | 330 | 8 | — | | |
| | Профиль прессованный, закаленный и естественно состаренный, 5—10 мм | 20 | 460 | 410 | 9 | — | |
| | | 100 | 460 | 410 | 9 | — | |
| 175 | | 410 | 390 | — | — | | |
| 200 | | 380 | 360 | 10 | — | | |
| 250 | | 290 | 260 | — | — | | |
| Д19 | Лист лакированный, за- каленный и естественно со- старенный, 2 мм | 20 | 440 | 300 | 18 | — | |
| | | 100 | 420 | 280 | 16 | — | |
| | | 175 | 370 | 260 | 16 | — | |
| | | 200 | 340 | 250 | — | — | |
| | | 250 | 270 | 220 | — | — | |
| | | 300 | 180 | 150 | — | — | |

Продолжение табл. 4

| Сплав | Полуфабрикат, толщина | t испы- тания, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | |
|-------|---|---|------------|----------------|----------|--------|---|
| | | | МПа | | % | | |
| Д19 | Профиль прессованный до 5 мм: закаленный и искус- ственно состаренный | 20 | 450 | 400 | — | — | |
| | | 175 | 380 | 340 | 10 | — | |
| | | 200 | 330 | 300 | 14 | — | |
| | | закаленный и естествен- но состаренный | 20 | 460 | 340 | 12 | — |
| | | | 200 | 380 | 290 | 15 | — |
| | | | 250 | 280 | 240 | 15 | — |
| | | 300 | 180 | 150 | 18 | — | |
| ВД17 | Полоса прессованная, за- каленная и искусственно состаренная, 60 мм | 20 | 500 | 330 | 13 | — | |
| | | 100 | 450 | 290 | 15 | — | |
| | | 200 | 380 | 270 | 16 | — | |
| | | 250 | 240 | 170 | 16 | — | |
| | | 300 | 170 | 110 | 21 | — | |
| | | 350 | 110 | 60 | 27 | — | |
| АД31 | Пруток, профиль, закален- ный и искусственно соста- ренный, до 20 мм | 20 | 240 | 200 | 17 | 70 | |
| | | 100 | 210 | 180 | 17 | 70 | |
| | | 200 | 160 | 150 | 16 | 65 | |
| | | 250 | 120 | 100 | 16 | 65 | |
| | | 300 | 60 | 50 | 20 | 85 | |
| АД33 | Лист неплакированный, закаленный и искусствен- но состаренный, 2 мм | 20 | 300 | 250 | 15 | — | |
| | | 100 | 260 | 210 | 15 | — | |
| | | 200 | 190 | 170 | 17 | — | |
| | | 250 | 140 | 125 | 18 | — | |
| | | 300 | 80 | 70 | 11 | — | |
| | Профиль, прутки прессо- ванный, закаленный и искусственно состаренный, 20 мм | 20 | 330 | 270 | 12 | 30 | |
| | | 100 | 280 | 240 | 12 | 40 | |
| | | 200 | 200 | 180 | 11 | 55 | |
| | | 250 | 90 | 80 | 8 | 70 | |
| | | 300 | — | — | — | — | |
| АВ | Профиль, прутки прессо- ванный, закаленный и искусственно состаренный, 20 мм | 20 | 350 | 320 | 12 | — | |
| | | 100 | 320 | 290 | 12 | — | |
| | | 200 | 240 | 220 | 12 | — | |
| | | 250 | 160 | 130 | 12 | — | |
| | | 300 | — | — | — | — | |

Продолжение табл. 4

| Сплав | Полуфабрикат, толщина | t испы- тания, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|---|--|----------------------------|-------------|----------------|----------|--------|
| | | | МПа | | % | |
| АК6 | Поковка закаленная и искусственно состаренная, 110×415×1120 мм | 20 | Поперек 400 | — | 6 | — |
| | | 125 | » 360 | — | 7 | — |
| | | 200 | » 280 | — | 13 | 40 |
| | | 250 | » 180 | — | 16 | 46 |
| | | 300 | » 100 | — | 23 | 70 |
| | Штамповка, закаленная и искусственно состаренная, 300 кг | 20 | Вдоль 420 | — | 10 | — |
| | | 125 | » 390 | — | — | — |
| | | 200 | » 290 | — | — | — |
| АК8 | Лист, закаленный и искусственно состаренный, 2 мм | 20 | 430 | 370 | 11 | — |
| | | 200 | 310 | 240 | 12 | — |
| | | 250 | 200 | 170 | 12 | — |
| | Плита катаная, закаленная и искусственно состаренная, 25—50 мм | 20 | 460 | 410 | 10 | — |
| | | 100 | 440 | 390 | 15 | — |
| | | 200 | 320 | — | — | — |
| Поковка крупногабаритная, закаленная и искусственно состаренная | 20 | 480 | 380 | 11 | — | |
| | 150 | 380 | 290 | 16 | — | |
| | 200 | 300 | 230 | 18 | — | |
| | 250 | 200 | — | — | — | |

5. Механические свойства деформируемых сплавов при низких температурах [3, 25, 45]

| Сплав | Полуфабрикат, толщина | t испы- тания, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|-------|---|----------------------------|------------|----------------|----------|--------|
| | | | МПа | | % | |
| АД1 | Пруток без термической обработки, 20 мм | 20 | 60 | 40 | 35 | — |
| | | —70 | 105 | 45 | 45 | — |
| | | —196 | 160 | 50 | 50 | — |
| АМц | Плита без термической обработки, 25 мм | 20 | 150 | 120 | 24 | — |
| | | —196 | 300 | 155 | 34 | — |
| АМг2 | Лист отожженный, 2 мм | 20 | 190 | — | 25 | — |
| | | —70 | 200 | — | 40 | — |
| | | —196 | 310 | — | 50 | — |

Продолжение табл. 5

| Сплав | Полуфабрикат, толщина | t испы- тания, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|---|---|----------------------------|------------|----------------|----------|--------|
| | | | МПа | | % | |
| АМг2 | Пруток, 20 мм: без термической обработки отожженный | 20 | 180 | — | 30 | 60 |
| | | —70 | 190 | — | 40 | 60 |
| | | —196 | 310 | — | 50 | 60 |
| | | 20 | 200 | — | 30 | 65 |
| | | —196 | 300 | — | 50 | 60 |
| АМг3 | Лист отожженный, 2 мм | 20 | 230 | 120 | 25 | — |
| | | —70 | 250 | 120 | 30 | — |
| | | —196 | 330 | 130 | 45 | — |
| АМг4 | | 20 | 280 | 140 | 20 | — |
| | | —70 | 300 | 150 | 30 | — |
| | | —196 | 420 | 170 | 35 | — |
| АМг5 | | 20 | 300 | 150 | 20 | — |
| | | —70 | 310 | 160 | 24 | — |
| | | —196 | 400 | 190 | 28 | — |
| | Плита без термической обработки, 18 мм | 20 | 320 | 170 | 23 | — |
| | | —196 | 440 | 180 | 46 | — |
| | Пруток отожженный и без термической обработки, 22 мм | 20 | 310 | 160 | 14 | — |
| | | —70 | 320 | 170 | 20 | — |
| АМг6 | Лист отожженный, 2,5 мм | 20 | 365 | 160 | 22 | — |
| | | —196 | 470 | 185 | 24 | — |
| | Плита, 30 мм: нагартованная, 18% в продольном направлении | 20 | 395 | 345 | 10 | 22 |
| | | —196 | 505 | 380 | 22 | 32,5 |
| | полунагартованная | 20 | 405 | 330 | 9,5 | 14,5 |
| | | —196 | 515 | 350 | 16,5 | 16 |
| с повышенным качеством выкатки | 20 | 315 | 280 | 3,5 | 5 | |
| | —196 | 360 | 325 | 1,5 | 2 | |
| Профиль отожженный и без термической обработки, все размеры | 20 | 350 | 180 | 18 | — | |
| | —70 | 360 | — | 22 | — | |
| | —196 | 510 | — | 31 | — | |

Продолжение табл. 5

| Сплав | Полуфабрикат, толщина | t испы- тания, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|-------|--|----------------------------|------------|----------------|----------|--------|
| | | | МПа | | % | |
| Д1 | Штамповка закаленная и со- старенная, все размеры | 20 | 460 | 280 | 21 | — |
| | | -70 | 460 | 310 | 25 | — |
| | | -196 | 580 | 380 | 23 | — |
| Д16 | Лист плакированный, до 2 мм: закаленный и естественно состаренный | 20 | 440 | 350 | 17 | — |
| | | -70 | 470 | 370 | 19 | — |
| | | -196 | 590 | 470 | 24 | — |
| | закаленный и искусственно состаренный | 20 | 460 | 420 | 6 | — |
| | | -70 | 500 | 460 | 6 | — |
| | | -196 | 570 | 520 | 8 | — |
| | закаленный и искусственно состаренный, нагартованный | 20 | 460 | 360 | 13 | — |
| | | -70 | 510 | 370 | 16 | — |
| | | -196 | 620 | 490 | 20 | — |
| | Пруток прессованный, зака- ленный и естественно состаренный, 20—80 мм | 20 | 530 | 370 | 15 | 16 |
| | | -70 | 560 | 400 | 12 | 12 |
| | | -196 | 700 | 530 | 11 | 10 |
| Д19 | Лист плакированный, зака- ленный и естественно состаренный, 2 мм | 20 | 440 | 300 | 20 | — |
| | | -70 | 480 | 370 | 23 | — |
| | | -196 | 550 | 420 | 26 | — |
| ВД17 | Полоса прессованная, зака- ленная и искусственно состаренная, 60 мм | 20 | 490 | — | 10 | 19 |
| | | -40 | 500 | — | 12 | 23 |
| | | -70 | 520 | — | 12 | 21 |
| АД33 | Лист закаленный и искус- ственно состаренный, 2 мм | 20 | 300 | 250 | 15 | — |
| | | -70 | 330 | 270 | 16 | — |
| | | -196 | 400 | 290 | 22 | — |
| | Профиль прессованный, зака- ленный и искусственно состаренный, 20 мм | 20 | 330 | 270 | 12 | 30 |
| | | -70 | 350 | 290 | 14 | 30 |
| | | -196 | 430 | 310 | 16 | 25 |
| АВ | Лист неплакированный, зака- ленный и естественно состаренный, 1—2 мм | 20 | 250 | 160 | 23 | — |
| | | -196 | 370 | 200 | 30 | — |
| | Пруток, профиль закаленный и искусственно состаренный, 20 мм | 20 | 350 | 320 | 12 | — |
| | | -196 | 400 | 380 | 13 | — |

Продолжение табл. 5

| Сплав | Полуфабрикат, толщина | t испы- тания, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|--|---|----------------------------|------------|----------------|----------|--------|
| | | | МПа | | % | |
| АК6 | Пруток прессованный, зака- ленный и искусственно состаренный, 30 мм | 20 | 400 | 300 | 12 | 25 |
| | | -70 | 425 | 320 | 10 | 22 |
| | | -196 | 560 | 425 | 10 | 22 |
| АК8 | Лист закаленный и искус- ственно состаренный, 3 мм | 20 | 470 | 410 | 10 | — |
| | | -70 | 490 | 430 | 10 | — |
| | | -196 | 560 | 460 | 14 | — |
| | Пруток закаленный и искус- ственно состаренный, 50 мм | 20 | 540 | 460 | 12 | — |
| | | -70 | 550 | 490 | 12 | — |
| | | -196 | 660 | 580 | 14 | — |
| Профиль закаленный и искус- ственно состаренный, 30— 50 мм | 20 | 490 | 450 | 7 | 15 | |
| | -70 | 510 | 460 | 8 | 16 | |
| | -196 | 610 | 530 | 10 | 14 | |
| 1420 | Полуфабрикаты прессован- ные, закаленные и искусствен- но состаренные | 20 | 490 | 360 | 8 | — |
| | | -70 | 560 | 365 | 6 | — |
| | | -196 | 570 | 370 | 8 | — |
| | | -253 | 660 | 370 | 4 | — |
| В93 | Штамповки, поковки (П) зака- ленные и искусственно состаренные | 20 | 490 | 450 | 7 | — |
| | | -70 | 520 | 470 | 8 | — |
| | | -196 | 580 | 530 | 6 | — |
| В95 | Листы закаленные и искус- ственно состаренные | 20 | 520 | 440 | 14 | — |
| | | -70 | 560 | 470 | 12 | — |
| | | -196 | 640 | 520 | 9 | — |
| | Полуфабрикаты прессован- ные, закаленные и искус- ственно состаренные | 20 | 600 | 550 | 8 | — |
| | | -70 | 620 | 560 | 8 | — |
| | | -196 | 750 | 640 | 7 | — |
| В96 | Полуфабрикаты прессован- ные, закаленные и искус- ственно состаренные | 20 | 650 | 630 | 6 | — |
| | | -70 | 710 | 670 | 4 | — |
| | | -196 | 810 | 730 | 2 | — |
| АД31 | Пруток, профиль прессован- ный, закаленный и искус- ственно состаренный | 20 | 240 | 220 | 12 | 50 |
| | | -70 | 250 | — | 11 | 45 |

6. Длительная прочность и ползучесть деформируемых сплавов [1, 10, 11, 14, 15]

| Сплав | Полуфабрикаты, толщина или диаметр | t, испытания, °C | МПа | | | | | | |
|--|--|------------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| | | | σ_{10} | σ_{100} | σ_{1000} | σ_{10000} | $\sigma_{0,2/10}$ | $\sigma_{0,2/100}$ | $\sigma_{0,2/10000}$ |
| AMg2 | Лист отожженный, 1,5 мм | 100 | — | 140 | 110 | 100 | — | 80 | 75 |
| | | 150 | — | 100 | 70 | 50 | — | 55 | 35 |
| | | 200 | — | 60 | 40 | — | — | 20 | — |
| | | 250 | — | 30 | 20 | — | — | — | — |
| AMg3 | | 100 | — | 160 | 130 | 110 | — | 85 | 80 |
| | | 150 | — | 120 | 70 | — | — | 65 | 50 |
| | | 200 | — | 60 | 40 | 20 | — | 20 | — |
| AMg4 | Лист отожженный, 2,0 мм | 175 | 130 | 95 | — | — | 60 | — | — |
| | | 200 | 105 | 75 | — | — | 40 | — | — |
| AMg5 | | 175 | 120 | 100 | — | — | 85 | 55 | — |
| | | 200 | 90 | 65 | — | — | 40 | — | — |
| | Пруток без термической обработки, 20 мм | 175 | 140 | 120 | — | — | 80 | 50 | — |
| | | 200 | 100 | 70 | — | — | 40 | — | — |
| AMg6 | Лист отожженный, 1,5 мм | 20 | — | — | 300 | 280 | — | 155 | 150 |
| | | 50 | — | 290 | 250 | 230 | — | 150 | 145 |
| | | 100 | — | 220 | 180 | 120 | — | 130 | 110 |
| | | 150 | — | 140 | 100 | — | — | 60 | 20 |
| | | 200 | — | 70 | 45 | — | — | — | — |
| | | 250 | — | 35 | 25 | — | — | — | — |
| D16 | Лист закаленный и естественно состаренный, 1,5—3 мм | 100 | 400 | 390 | 380 | — | — | 280 | — |
| | | 150 | 350 | 300 | 240 | — | — | 180 | 120 |
| | | 200 | 240 | 180 | 120 | — | — | 80 | 45 |
| | Профиль закаленный и искусственно состаренный, 5—10 мм | 175 | 330 | 275 | 225 | — | 230 | 150 | 90 |
| | | 200 | 285 | 225 | 160 | — | 170 | 95 | 60 |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Профиль закаленный и искусственно состаренный, 50 мм | 100 | — | 390 | — | — | — | 340 | — | |
| | 150 | — | 320 | — | — | — | 260 | — | |
| | 175 | — | 270 | — | — | — | 210 | — | |
| D19 | Лист закаленный и естественно состаренный, 2 мм | 150 | — | 320 | 250 | — | — | 180 | — |
| | | 175 | — | 230 | 170 | — | — | 135 | — |
| | | 200 | 250 | 180 | 120 | — | 120 | 80 | — |

Продолжение табл. 6

| Сплав | Полуфабрикаты, толщина или диаметр | t, испытания, °C | МПа | | | | | | |
|-------|---|------------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| | | | σ_{10} | σ_{100} | σ_{1000} | σ_{10000} | $\sigma_{0,2/10}$ | $\sigma_{0,2/100}$ | $\sigma_{0,2/10000}$ |
| ВД17 | Полоса закаленная и искусственно состаренная, 60 мм | 200 | — | 190 | 160 | — | — | 160 | 120 |
| | | 230 | 160 | 130 | 110 | — | — | 90 | 80 |
| | | 270 | 110 | 80 | 55 | — | — | 50 | 35 |
| | | 300 | 70 | 55 | 42 | — | — | 32 | 20 |
| | | 320 | 50 | 35 | 20 | — | — | 20 | 15 |

7. Характеристики разрушения массивных полуфабрикатов [11, 45, 61]

| Сплав | Полуфабрикат | Режим старения | Направление вырезки образцов | Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа | Относительное удлинение δ , % | K_{1C} , МПа·м ^{1/2} | КСТ, МДж/м ² | |
|------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------|
| | | | | | | | Тип 15 | Тип 19 |
| | | | | | | | ГОСТ 9454—78 | |
| D16 B95 | Плита Штамповка | 190 °C, 12 ч | ПД | 340 | 16 | 26,7 | 0,58 | 0,42 |
| | | 115 °C, 8 ч + 180 °C, 8 ч | ДП | 461 | 12,8 | 51,0 | 1,1 | 0,81 |
| AK4-1 | Профиль прессованный | 195 °C, 12 ч | ПД | 410 | 8,0 | 23 | 0,21 | 0,22 |
| 1420 | Полоса прессованная | 120 °C, 5 ч | ПД | 243 | 10,5 | 21,3 | 0,35 | 0,24 |

8. Режимы упрочняющей термической обработки сплавов типа дуралюмин [25, 26, 45]

| Сплав | t нагрева под закалку, °C | Старение | |
|-------|-----------------------------------|---------------|------------------|
| | | t, °C | τ , ч |
| D1 | 495—510 (все виды полуфабрикатов) | 20 | ≥ 96 |
| D16 | 485—503 (прессованные изделия) | 20 185—195 | ≥ 96 68 |
| D19 | 500—510 (листы) | 20 185—195 | 120—240 12—14 |
| | | 20 185—195 | 120—240 8—10 |

Продолжение табл. 8

| Сплав | t нагрева под закалку, °C | Старение | |
|-------|--------------------------------|----------|-------|
| | | t, °C | τ, ч |
| ВД17 | 495—505 (прессованные изделия) | 165—175 | 15—17 |
| Д18 | 495—505 (проволока, заклепки) | 20 | ≥96 |

Примечание. t — температура нагрева; τ — время выдержки.

Сплавы отличаются высокой износостойкостью (низкий коэффициент трения).

Сплав АК4-1 используется для изготовления деталей реактивных двигателей (крыльчатые насосы, колеса, компрессоры, заборники, диски, лопатки). Сплавы АД31, АД33, АВ повышенной пластичности и коррозионной стойкости системы Al—Mg—Si упрочняются по единому режиму: температура нагрева под закалку 520—530 °C, температура искусственного старения 160—170 °C, время выдержки 10—12 ч. Для высоконагруженных деталей, работа-

9. Режимы термической обработки сплава АК4-1 [3, 45] (температура нагрева под закалку 525—535 °C)*1

| Полуфабрикат | Старение | |
|---------------------|----------|------|
| | t, °C | τ, ч |
| Листы плакированные | 185—195 | 9—12 |
| | 185—195 | 24 |
| Плиты горячекатаные | 190—200 | 7—9 |
| | 190—200 | 24 |
| Штамповки, поковки | 185—195 | 8—12 |
| | 195—200 | 24 |

*1 Для уменьшения коробления закалку деталей сложной формы можно проводить в кипящей воде.

ющих в условиях переменных нагрузок, старение проводят при 150—160 °C. Для достижения максимальной прочности старение полуфабрикатов следует проводить не позднее чем через 1 ч после закалки, иначе наблюдается снижение σ_B и $\sigma_{0,2}$ на 30—50 МПа.

Коррозионная стойкость сплавов высокая; они не склонны к коррозионному растрескиванию под коррозионным воздействием независимо от состояния материала. Наиболее прочный сплав АВ по коррозионной стойкости уступает сплавам АД31, АД33.

Сплавы удовлетворительно соединяются точечной, шовной и аргонодуговой сваркой. Обрабатываемость резанием в отожженном состоянии неудовлетворительная, в закаленном и состаренном — удовлетворительная.

Сплав АД31 применяется для деталей невысокой прочности, от которых требуется хорошая коррозионная стойкость и декоративный вид, работающих в интервале температур —70÷50 °C. Сплав применяется для отделки кабин самолетов и вертолетов с различными цветовыми покрытиями. Используется в строительстве для дверных рам, оконных переплетов, эскалаторов, а также в автомобильной, легкой и мебельной промышленности.

Сплав АД33 применяется для деталей средней прочности, работающих в интервале температур —70÷50 °C и обладающих коррозионной стойкостью во влажной атмосфере и морской воде (лопасты вертолетов, барабаны колес гидросамолетов). Применяется в судостроении и строительстве.

10. Режимы термической обработки сплавов АК6 и АК8 [3, 45]

| Сплав | Полуфабрикат | t нагрева под закалку, °C | Старение | |
|-------|----------------------------|---------------------------|--------------------|----------------|
| | | | t, °C | τ, ч |
| АК6 | Все виды | 505—525 | 20 | ≥96 |
| | | | 160—165 | 10—15 |
| АК8 | Поковки, штамповки | 495—505 | 20 | ≥96 |
| | | | 150—165 195—205 | 10—15 11—13 |
| | Прессованные полуфабрикаты | 495—505 | 20 | ≥96 |
| | | | 165—175 | 10—12 |

Сплав АВ применяется для деталей, от которых при изготовлении требуется высокая пластичность в холодном и горячем состоянии (лопасты вертолетов, штампованные и кованные детали сложной конфигурации).

Ковочные сплавы АК6, АК8 системы Al—Mg—Si—Cu обладают хорошей пластичностью и стойкостью к образованию трещин при горячей пластической деформации. По химическому составу близки к дуралюминам, отличаясь более высоким содержанием кремния.

Режимы термической обработки сплавов АК6 и АК8 приведены в табл. 10.

Сплавы склонны к коррозии под напряжением. Детали следует анодировать или защищать лакокрасочными покрытиями.

Сплавы удовлетворительно соединяются точечной и шовной сваркой, а сплав АК8 — аргонодуговой. Прочность сварного шва составляет 0,6—0,7 σ_B основного материала. Сплавы хорошо обрабатываются резанием.

Сплав АК6 применяют для изготовления сложных штамповок (крыльчатки вентилятора для компрессоров реактивных двигателей, корпусные агрегатные детали, крепежные детали и др.).

Сплав АК8 применяют для высоконагруженных деталей самолетов, изготовленных ковкой и штамповкой (рамы, фитинги, пояса лонжеронов и др.). Сплав можно использовать для дета-

лей, работающих в условиях криогенных температур [57, 61].

Высокопрочные сплавы В95, В93, В96Ц1 системы Al—Zn—Mg—Cu отличаются высоким временным сопротивлением (600—700 МПа) и близким к нему по значению пределом текучести.

Высокопрочные сплавы не являются теплопрочными, и при длительной эксплуатации их можно использовать до температур не выше 100—120 °C.

Режим Т1, соответствующий фазовой стадии старения, не обеспечивает достаточное сопротивление расслаивающей коррозии (РК) и коррозионному растрескиванию (КР). Сплавы, обработанные по такому режиму, имеют низкие характеристики пластичности и вязкости разрушения [11, 23, 61].

Режимы коагуляционного ступенчатого старения Т2 и Т3, а также использование сплавов повышенной и особой чистоты позволяют повысить пластичность, трещиностойкость и сопротивление коррозии РК и КР. По коррозионной стойкости сплавы В95пч, В95оч и В93пч в состоянии Т2 и Т3 значительно превосходят сплавы типа дуралюмина (табл. 11—13).

Сплавы применяют для высоконагруженных конструкций, работающих в основном в условиях напряжений сжатия (детали обшивки, стрингеры, шпангоуты, лонжероны самолетов и другие детали).

Снижение плотности — наиболее эффективный путь повышения удельной

11. Режимы термической обработки сплавов системы Al—Zn—Mg—Cu [45, 61, 62]

| Сплав | Полуфабрикат | t, °C | Режим термической обработки | t и t старения |
|---------------------|----------------------|---------|--|--|
| В95пч, В95оч | Листы | 465—475 | T1 | 115—125 °C, 23—25 ч |
| | | | T2 | 110—120 °C, 5—10 ч+160—170 °C, 14—18 ч |
| | | | T3 | 110—120 °C, 5—10 ч+160—170 °C, 25—35 ч |
| | Плиты | 465—475 | T2 | 110—120 °C, 5—10 ч+160—170 °C, 10—20 ч |
| T3 | | | 110—120 °C, 5—10 ч+160—170 °C, 15—25 ч | |
| Панели прессованные | 465—475 | T1 | 135—145 °C, 15—17 ч | |
| | | T2 | 110—120 °C, 5—10 ч+160—170 °C, 10—14 ч | |
| | | T3 | 110—120 °C, 5—10 ч+175—185 °C, 8—13 ч | |
| Штамповки, поковки | 465—475 | T2 | 110—120 °C, 5—10 ч+175—185 °C, 4—10 ч | |
| | | T3 | 110—120 °C, 5—10 ч+175—185 °C, 8—18 ч | |
| В93пч | То же | 450—465 | T1 | 115—125 °C, 3—10 ч+160—170 °C, 4—18 ч |
| | | | T2 | 115—125 °C, 3—10 ч+170—180 °C, 6—12 ч |
| | | | T3 | 115—125 °C, 3—10 ч+180—190 °C, 3—10 ч |
| В96Ц1 | Профили прессованные | 465—475 | T1 | 135—145 °C, 15—17 ч |
| | | | T2 | 110—120 °C, 3—10 ч+170—180 °C, 3—20 ч |

12. Влияние режимов старения на свойства полуфабрикатов из сплавов системы Al—Zn—Mg—Cu [3, 25, 45, 61]

| Сплав | Полуфабрикат | Режим термической обработки | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | $K_{1c},$ МПа·м ^{1/2} | Балл РК |
|-------|---------------------|-----------------------------|------------|----------------|--------------|-----------------------------------|------------|
| | | | МПа | | | | |
| В93пч | Поковки, штамповки | T1 | 500/500 | 460/460 | 7/3 | 26,7/22,0 | 3—4 |
| | | T2 | 460/460 | 420/420 | 8/4 | 33,0/23,6 | — |
| | | T3 | 430/430 | 360/360 | 9/5 | 37,8/33,6 | 1—2 |
| В95пч | Плиты | T1 | 580/580 | 500/500 | 9/9 | 34,7/31,4 | 5—6 |
| | | T2 | 520/520 | 460/460 | 9/9 | 34,7/31,4 | 1—2 |
| | | T3 | 490/490 | 410/410 | 11/— | 40,9/34,6 | — |
| В96Ц1 | Прессованная полоса | T1 | 730/675 | 690/635 | 5/4 | 26,7/19,5 | 8—9 |
| | | T2 | 660/620 | 630/575 | 8/8 | 26,7/21,4 | 2—3 |

Примечание. В числителе приведены значения для полуфабрикатов в продольном направлении, в знаменателе — в поперечном (сплавы В95пч, В96Ц1) и в высотном (сплав В93пч).

прочности и удельного модуля упругости, что достигается путем легирования алюминия литием и магнием.

Сплав 1420 системы Al—Mg—Li отличается от сплава Д16 пониженной на 11 % плотностью и повышенным на 4 % модулем упругости.

Термическая обработка сплава 1420: закалка от 450 °C (на воздухе), старение при 170 °C, 8—24 ч — обеспечивает максимальные прочностные свойства, а при 120 °C, 12—48 ч — приводит к получению повышенной пластичности.

Коррозионная стойкость полуфабрикатов из сплава 1420 в состоянии Т1 такая же, как и у сплава АМг6М. Закалка на воздухе и в горячих средах повышает стойкость к коррозии под напряжением.

Сплав 1420 может быть использован для деталей транспортного машиностроения.

Применение сплава 1420 в конструкциях вместо изделий из сплава Д16 позволяет снизить массу на 10—15 % [45, 61].

Сварные соединения из сплава 1420 отличаются высокой коррозионной стойкостью.

Литейные алюминиевые сплавы. Для изготовления фасонных деталей применяют литейные алюминиевые сплавы, которые имеют низкую плотность и высокую удельную прочность.

По назначению конструкционные литейные алюминиевые сплавы можно условно разбить на следующие группы: 1) сплавы, отличающиеся высокой герметичностью [АЛ2, АЛ4, АЛ9, ВАЛ8, АЛ9-1, АЛ34 (ВАЛ5), АЛ4М, АЛ32];

2) высокопрочные жаропрочные сплавы [АЛ19, АЛ3, АЛ5, АЛ5-1, АЛ33 (ВАЛ1)];

3) коррозионно-стойкие сплавы (АЛ18, АЛ22, АЛ24, АЛ27, АЛ27-1). Прочность большинства литейных алюминиевых сплавов можно повысить термической обработкой. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов зависят не только от содержания легирующих компонентов, но и от содержания примесей. Важное значение в технологии приготовления и в повышении свойств сплавов на основе системы Al—Si имеет процесс модифи-

13. Вязкость разрушения прессованных панелей из сплавов В95, В95пч и В95оч [3, 25, 53]

| Сплав | Режим термической обработки | $K_{1c},$ МПа·м ^{1/2} |
|-------|-----------------------------|-----------------------------------|
| В95 | T1 | 24,8—28 |
| В95пч | T1 | 30,3—32,3 |
| | T2 | 37,2—40,4 |
| | T3 | 42—43,5 |
| В95оч | T1 | 31—34,2 |
| | T2 | 41,8—45 |
| | T3 | 46,8—49,6 |

цирования, вызывающий повышение прочностных и особенно пластических свойств сплавов.

Качество литейных алюминиевых сплавов определяется не только механическими свойствами, но и технологическими характеристиками: жидкотекучестью, степенью изменения механических свойств в зависимости от сечения отливки, герметичностью, склонностью к горячим трещинам и др.

Химический состав, физические и механические свойства сплавов представлены в табл. 14—18.

Способы литья и виды термической обработки обозначаются следующим образом:

Способ литья:

- З В песчаную форму
- В По выплавляемым моделям
- О В оболочковые формы
- К В кокиль
- Д Под давлением
- М Сплав при литье подвергался модифицированию
- T1 Старение
- T2 Отжиг
- T4 Закалка
- T5 То же и частичное старение
- T6 » и полное старение
- T7 » и стабилизирующий отпуск
- T8 » и смягчающий отпуск

При определении механических свойств на образцах, вырезанных из

14. Химический состав (в %) литейных сплавов (основа — алюминий) (ГОСТ 2685-75)

| Сплав | Mg | Si | Mn | Cu | Ni | Ti | Fe | Zr | Zn | Другие элементы | Железо*1, не более | | | Сумма учитываемых примесей, не более | | |
|-------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|---------|------------------------------------|--------------------|------|------|--------------------------------------|------|------|
| | | | | | | | | | | | З, О, В | К | Д | З, О, В | К | Д |
| АЛ2 | До 0,10 | 10,0—13,0 | До 0,50 | До 0,60 | — | До 0,10 | — | До 0,10 | До 0,30 | — | 0,70 | 1,00 | 1,50 | 2,10 | 2,20 | 2,70 |
| АЛ4 | 0,17—0,3 | 8,0—10,5 | 0,2—0,5 | До 0,30 | — | — | До 0,10 | Сумма Ti и Zr до 0,15 | До 0,30 | До 0,01 Sn, до 0,05 Pb | 0,60 | 0,90 | 1,00 | 1,10 | 1,40 | 1,50 |
| АЛ9 | 0,2—0,4 | 6,0—8,0 | До 0,50 | До 0,20 | — | — | До 0,10 | Сумма Ti и Zr до 0,15 | До 0,30 | До 0,01 Sn, до 0,05 Pb | 0,60 | 1,00 | 1,50 | 1,10 | 1,50 | 2,0 |
| АЛ9-1 | 0,25—0,4 | 7,0—8,0 | До 0,10 | До 0,10 | — | 0,08—0,15 | До 0,10 | До 0,10 | До 0,20 | До 0,005 Sn, до 0,03 Pb, до 0,10 В | 0,30 | 0,30 | — | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| АЛ34 | 0,35—0,55 | 6,5—8,5 | До 0,10 | До 0,30 | — | 0,1—0,3 | 0,15—0,4 | До 0,20 | До 0,30 | До 0,10 В | 0,60 | 0,60 | — | 1,00 | 1,00 | — |
| АЛ4М | 0,3—0,6 | 8,5—10,5 | До 0,10 | 1,3—2,5 | — | 0,1—0,3 | — | До 0,30 | — | 0,01—0,1 В | 0,12 | 0,25 | — | 0,6 | — | — |
| АЛ32 | 0,3—0,5 | 7,5—8,5 | 0,3—0,5 | 1,0—1,5 | — | 0,1—0,3 | — | До 0,10 | До 0,30 | — | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 0,90 | 1,0 | 1,10 |
| АЛ27 | 9,5—10,5 | До 0,2 | До 0,1 | До 0,15 | — | 0,05—0,15 | 0,05—0,15 | 0,05—0,2 | До 0,1 | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | — | — | — |
| ВАЛ18 | 0,2—0,45 | 7,0—8,5 | — | 2,5—3,0 | — | 0,1—0,25 | 0,1—0,25 | — | 0,5—1,0 | — | 0,4 | — | — | — | — | — |
| АЛ19 | До 0,05 | До 0,30 | 0,6—1,0 | 4,5—5,3 | До 0,10 | 0,15—0,35 | — | До 0,20 | До 0,20 | — | 0,20 | 0,30 | — | 0,90 | 0,90 | — |
| АЛ3 | 0,35—0,6 | 4,5—5,5 | 0,6—0,9 | 1,5—3,0 | — | — | — | Сумма Zr и Се до 0,50 | До 0,30 | До 0,01 Sn, до 0,05 Pb | 0,60 | 1,20 | 1,60 | 1,10 | 1,70 | 1,90 |
| АЛ5 | 0,35—0,6 | 4,5—5,5 | До 0,50 | 1,0—1,5 | — | — | До 0,10 | Сумма Zr и Ti до 0,15 | До 0,30 | До 0,01 Pb | 0,60 | 1,00 | 1,50 | 1,00 | 0,30 | 1,70 |
| АЛ5-1 | 0,40—0,55 | 4,5—5,5 | До 0,10 | 1,0—1,5 | До 0,10 В | 0,08—0,15 | — | До 0,10 | До 0,30 | До 0,01 Pb | 0,30 | 0,30 | 0,80 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| АЛ33 | До 0,05 | До 0,30 | 0,6—1,0 | 5,5—6,2 | 0,8—1,2 | — | — | 0,05—0,20 | — | 0,15—0,30 Се | 0,30 | 0,30 | — | 0,50 | 0,50 | — |
| АЛ8 | 9,3—10,0 | До 0,30 | До 0,10 | До 0,10 | — | До 0,07 | До 0,07 | До 0,20 | До 0,10 | — | 0,30 | 0,30 | — | 1,00 | 1,00 | — |
| АЛ22 | 10,5—13,0 | 0,8—1,2 | — | — | — | 0,05—0,15 | 0,03—0,07 | До 0,20 | До 0,19 | — | 0,50 | 1,00 | 1,20 | 0,60 | 1,10 | 1,30 |
| АЛ24 | 1,5—2,0 | До 0,30 | 0,2—0,5 | До 0,20 | — | 0,1—0,2 | До 0,10 | До 0,10 | 3,5—4,5 | — | 0,50 | — | — | 0,90 | — | — |

*1 В зависимости от способа литья.

Примечания: 1. При применении сплава АЛ2 для деталей, работающих в морской воде, содержание меди не должно превышать 0,30 %.
2. При применении сплава АЛ22 для литья под давлением допускается содержание меди до 0,10 %.
3. Для повышения механических свойств на 15—20 % необходимо в сплавы АЛ2 и АЛ9 вводить иттрий в пределах 0,08—0,20 %, при этом содержание меди не должно превышать 0,30 %.

в морской воде, содержание меди не должно превышать 0,30 %.
2. При применении сплава АЛ22 для литья под давлением допускается содержание меди до 0,10 %.
3. Для повышения механических свойств на 15—20 % необходимо в сплавы АЛ2 и АЛ9 ограничить содержание примесей железа и кремния до 0,03 % каждого; в сплавы АЛ2 и АЛ9 вводить иттрий в пределах 0,08—0,20 %, при этом содержание меди не должно превышать 0,30 %.

15. Физические свойства литейных сплавов [3, 45, 54]

| Сплав | $\rho, \text{т/м}^3$ | $\rho_l \cdot 10^3, \text{Ом} \cdot \text{м}, \text{при } 20^\circ \text{C}$ | $\alpha \cdot 10^6, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ | | $\lambda, \text{Вт (м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ | | $\kappa \text{Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ | |
|------------|----------------------|--|--|---------|---|---------|--|--------|
| | | | при температуре, $^\circ\text{C}$ | | | | | |
| | | | 20—100 | 20—300 | 100 | 400 | 100 | 400 |
| АЛ2 | 2,65 | 5,48 | 21,1 | 23,3 | 168 | 168 | 0,838 | 1,00 |
| АЛ4 | 2,65 | 4,68 | 21,7 | 23,5 | 155 | 155 | 0,755 | 0,922 |
| АЛ9, АЛ9-1 | 2,66 | 4,57 | 21,8 | 23,8 | 155 | 168 | 0,880 | 1,05** |
| АЛ34 | 2,63 | 4,62 | 20,7 | 24,4 | 155 | 163 | 0,840 | — |
| АЛ4М | 2,72 | 5,09 | 22,2 | 23,7 | 150 | 167 **2 | 0,837 | 1,00** |
| АЛ32 | 2,65 | — | 20,4 | 23,3 | — | — | — | — |
| АЛ19 | 2,78 | 5,95 | 19,5 | 22,3 *1 | 130 | 158 | 0,838 | 1,13 |
| АЛ3 | 2,70 | 4,49 | 22 | 24 | 163 | 159 | 0,920 | 1,17 |
| АЛ5 | 2,68 | 4,62 | 23,1 | 23,9 | 163 | 176 **2 | 0,838 | 1,13 |
| АЛ5-1 | 2,68 | 4,62 | 23,1 | 23,9 | 163 | 176 **2 | 0,838 | 1,13 |
| АЛ33 | 2,89 | 5,68 | 23,4 | 28,5 *1 | 134 | 163 | 0,922 | 1,05 |
| АЛ8 | 2,55 | 9,12 | 24,5 | 27,3 | 96,4 | 113 | 1,05 | 1,13 |
| АЛ22 | 2,50 | 10,3 | 24,5 | 27,3 | 88,0 | 105 | 0,880 | 1,0 |
| АЛ24 | 2,74 | 6,70 | 23,2 | 25,2 | — | 117 *1 | — | — |
| АЛ27 | 2,55 | — | 24,5 | — | 89 | 113 | 1,050 | 1,13 |
| ВАЛ8 | 2,73 | — | 22,9 | — | 130 | — | 0,920 | — |

*1 20—400 $^\circ\text{C}$.*2 300 $^\circ\text{C}$.*3 350 $^\circ\text{C}$.

отливков, допускается снижение временного сопротивления на 25 % и относительного удлинения до 50 %.

Конструкционные герметичные сплавы. Сплавы АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ34 (ВАЛ5) на основе систем Al—Si и Al—Si—Mg (силумины) отличаются высокими литейными свойствами и герметичностью изготовленных из них отливок. Двойные сплавы Al—Si (АЛ2) не упрочняются термической обработкой; единственным способом повышения механических свойств является модифицирование. Легированные силумины (АЛ4, АЛ9) подвергаются термической обработке по режимам, приведенным в табл. 19 [28, 54].

У силуминов удовлетворительная коррозионная стойкость. Детали защищают анодированием и лакокрасочными покрытиями. Обрабатываемость резанием в отожженном состоянии неудовлетворительная, в термически обработанном состоянии — удовлетворительная.

Сплав АЛ2 рекомендуется для изготовления герметичных деталей, однако образование концентрированных усадочных раковин, характерных для сплавов с малым интервалом кристаллизации, вызывает трудности при литье крупногабаритных и сложных по форме деталей.

Сплавы АЛ4, АЛ9 применяют для средних и крупных литых деталей ответственного назначения: корпусов компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания, турбинных колес турбохолодильников, вентиляторов и т. п.

Ответственные детали следует отливать с использованием ультразвуковой обработки, что позволяет повысить уровень гарантируемых механических свойств на 30 %.

Сплав АЛ9-1 отличается от сплава АЛ9 наличием титана и пониженным содержанием примеси железа (до 0,3 %). По сравнению со сплавом АЛ9 он отличается более высокими механическими свойствами (σ_B на 25—35 % и δ выше более чем в 2 раза) и лучшей коррозионной стойкостью.

Сплав АЛ9-1 предназначен для изготовления сложных по конфигурации деталей агрегатов и приборов, испыты-

вающих средние нагрузки и работающих при температурах до 200 $^\circ\text{C}$.

Сплав АЛ34 (ВАЛ5), относящийся, как и сплавы АЛ4 и АЛ9, к системе Al—Si—Mg, превосходит их по прочности на 25—50 %, имеет хорошие литейные свойства и отличается высокой герметичностью. Коррозионная стойкость удовлетворительная. Недостатки сплава АЛ34 — сравнительно плохая обрабатываемость резанием, низкая жаропрочность (рабочие температуры ниже 200 $^\circ\text{C}$). Термическая обработка сплава АЛ34: закалка с 535 \pm 5 $^\circ\text{C}$, время выдержки 10—16 ч, старение при 75 \pm 5 $^\circ\text{C}$, время выдержки 6 ч (Т5). Сплав АЛ34 предназначен для литья крупных корпусных деталей, сложных по конфигурации и работающих под большим внутренним давлением газа или жидкости.

Сплав АЛ32 предназначен для литья под давлением; обладает хорошими литейными свойствами, обрабатываемостью резанием, свариваемостью и коррозионной стойкостью; герметичность сплава близка к герметичности сплава АЛ2. Марганец и титан, а также большая скорость кристаллизации при литье под давлением способствуют получению метастабильной структуры при литье деталей. Это дает возможность упрочнять отливки путем искусственного старения без предварительной закалки.

Режимы термической обработки сплава АЛ32 приведены в табл. 20.

Применяется для нагруженных деталей, например блоков, цилиндров, головок блоков и других деталей автомобильных двигателей.

Сплав ВАЛ8 обладает хорошими литейными свойствами, является одним из наиболее прочных и герметичных сплавов, что достигается многокомпонентным макро (медь, цинк)- и микролегированием (титан, бериллий). Сплав хорошо обрабатывается резанием, коррозионные свойства и свариваемость аналогичны сплавам АЛ4М и АЛ32. Режимы термической обработки представлены в табл. 21.

Сплав ВАЛ8 рекомендуется для производства силовых и герметичных деталей с рабочими температурами до 250 $^\circ\text{C}$, изготавливаемых литьем под давлением методами точного литья.

16. Механические свойства литейных сплавов при температуре 20 °С [53, 54, 55]

| Сплав | Полуфабрикат | Способ литья | Состояние испытываемых образцов | E | G | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | НВ, МПа | КСУ, МДж/м ² | σ_{*1} , МПа |
|-------|--|--------------|---------------------------------|-----|-----|------------|----------------|--------------|---------|-------------------------|---------------------|
| | | | | ГПа | | | | | | | |
| АЛ2 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | ЗМ | Без т/о | 70 | — | 170 | 80 | 6 | 550 | — | 42 |
| | | Д | Без т/о | — | — | 190 | 120 | 1,8 | — | — | — |
| | | ЗМ | T2 | — | — | 160 | 90 | 5 | 550 | — | 45 |
| АЛ4 | Образец диаметром 12 мм | ЗМ | T6 | 70 | — | 260 | 200 | 4 | 700 | 0,5 | 75 |
| | Плоский образец толщиной 3 мм | Д | Без т/о | 70 | — | 290 | 160 | 2,0 | — | — | — |
| | Отдельно отлитый образец диаметром 6 мм | ВМ | T6 | — | — | 260 | — | 4 | — | — | — |
| АЛ9 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З, О, В | T2 | — | — | 170 | 120 | 2 | 600 | — | — |
| | | ЗМ, ОМ, ВМ | T4 | 70 | — | 200 | 110 | 4 | 500 | — | 45 |
| | | | T5 | — | — | 220 | 120 | 4 | 650 | — | — |
| | | | T6 | — | — | 230 | 180 | 2 | 750 | — | — |
| К | T7 | — | — | 210 | 160 | 3 | 650 | — | — | | |
| АЛ9-1 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З, О, В | T4 | — | — | 220 | — | 5 | 550 | — | — |
| | | З, О, В | T5 | — | — | 260 | — | 5 | 700 | — | — |
| | | ЗМ, ОМ, ВМ | T5 | — | — | 280 | — | 6 | 700 | — | — |
| | | К, КМ | T5 | — | — | 300 | 240 | 6 | 700 | — | — |
| | | ЗМ, ОМ, ВМ | T6 | 70 | — | 300 | 230 | 3 | 750 | 0,36 | 75 |
| | | К, КМ | T6 | — | — | 320 | 250 | 5 | 750 | — | — |
| | | Д | Без т/о | — | — | 210 | — | 2 | 550 | — | — |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | |
|--------|--|------------|------------|----------|--------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------|
| АЛ32 | Выточенный образец диаметром 10 мм | З | Без т/о T1 | 71 71 | — — | 180 200 | 120 180 | 1,5 1,0 | 600 700 | 0,20 0,15 | — — |
| АЛ34 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З | T4 | — | — | 280 | — | 5,0 | 750 | — | — |
| | | З | T5 | 76 | — | 330 | 280 | 3,0 | 900 | 0,25 | — |
| | | К | T4 | — | — | 300 | — | 7,0 | 850 | — | — |
| | | К | T5 | — | — | 360 | — | 5,0 | 950 | — | — |
| | | К | T6 | 73 | — | 280 | 220 | 2,0 | 1000 | — | — |
| | | К | T7 | 71 | — | 240 | 190 | 3,0 | 750 | — | — |
| | | К | Без т/о | 71 | — | 200 | 130 | 3,0 | 700 | 0,30 | — |
| | | К | T1 | 71 | — | 220 | 170 | 2,0 | 800 | 0,20 | — |
| | | К | T6 | 71 | — | 300 | 260 | 2,5 | 1100 | — | — |
| | | К | T7 | 73 | — | 260 | 240 | 2,5 | 1000 | — | — |
| АЛ34 | Плоский образец толщиной 3 мм | Д | Без т/о | — | — | 270 | 160 | 3,0 | 740 | — | — |
| | | Д | T1 | — | — | 290 | 200 | 1,0 | 900 | — | — |
| АЛ27 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З | T4 | — | — | 360 | — | 18 | 750 | 0,15 | 70 |
| АЛ27-1 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З | T4 | — | — | 380 | — | 20 | 750 | 0,3 | — |
| АЛ3 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З | T5 | 70 | — | 250 | 170 | 1,0 | 800 | — | — |
| | | К | T5 | 70 | — | 270 | 200 | 1,5 | 850 | — | — |
| АЛ5 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З | T5 | 70 | — | 250 | 180 | 1,0 | 750 | 0,2 | — |
| | Отдельно отлитый образец диаметром 6 мм | В | T5 | — | — | 310 | — | 1,9 | — | — | — |
| АЛ5-1 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З, О, В, К | T1 | — | — | 190 | — | 1 | 700 | — | — |
| | | З, О, В | T5 | 70 | — | 300 | 200 | 1 | 750 | — | — |
| | | К, КМ | T5 | — | — | 320 | 220 | 2 | 750 | — | — |
| | | З, О, В, К | T7 | — | — | 220 | — | 2 | 700 | — | — |

Продолжение табл. 16

| Сплав | Полуфабрикат | Состояние испытываемых образцов | Способ литья | Состояние испытываемых образцов | E | | G | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | | δ , % | НВ, МПа | $\frac{K_{IC}}{M.K.}$ | $\frac{K_{IIV}}{1-\beta}$ |
|-------|--|---------------------------------|--------------|---------------------------------|-----|-----|-----|------------|----------------|------|--------------|---------|-----------------------|---------------------------|
| | | | | | ГПа | ГПа | | | МПа | МПа | | | | |
| АЛ33 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | Т4 Т6 Т7 | З З З | Т4 Т6 Т7 | 70 | 26 | 250 | 150 | 3,0 | 850 | 0,3 | — | — | — |
| | | | | | | | | 500 | 1,0 | 1000 | — | | | |
| | | | | | | | | 250 | 2,0 | 800 | — | | | |
| АЛ8 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | Т4 Т4 | З В | Т4 Т4 | 70 | — | 320 | 11 | 700 | 1 | — | — | 75 | |
| | | | | | | | 310 | 10 | — | — | | | | |
| АЛ19 | Отдельно отлитый образец | Т4 Т7 Т4 | З З К | Т4 Т7 Т4 | 70 | 25 | 200 | 10,0 | 800 | 1,0 | — | — | 70 | |
| | | | | | | | 200 | 3,0 | 900 | — | | | | |
| | | | | | | | 220 | 12,0 | 900 | — | | | | |
| АЛ22 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | Т4 | З | Т4 | 70 | 27 | 240 | 3 | 950 | 0,2 | — | — | — | |
| | | | | | | | — | — | — | — | | | | |
| АЛ24 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | Без т/о Т1 Т5 | З З З | Без т/о Т1 Т5 | 69 | — | 240 | 4 | 750 | 0,2 | — | — | 65 | |
| | | | | | | | 240 | 3 | 700 | — | | | | |
| | | | | | | | 310 | 3 | 900 | — | | | | |
| ВАЛ8 | Образец диаметром 5 мм | Т4 Т5 Т6 | К К К | Т4 Т5 Т6 | 72 | — | 382 | 7 | 900 | — | — | — | 110 | |
| | | | | | | | 400 | 4 | 1000 | — | | | | |
| | | | | | | | 410 | 6,0 | — | — | | | | |

*1 На базе 2·10⁷ циклов.

17. Механические свойства литейных сплавов при повышенных температурах [45, 54, 55]

| Сплав | Полуфабрикат | Способ литья | Состояние испытываемых образцов | t испывания, °С | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ , % | σ_{100} , МПа |
|-------|--|--|---------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | | | МПа | | | |
| АЛ4 | Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм | ЗМ | Т6 | 300 | — | — | — | — |
| АЛ9 | Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм | З | Т4 | 20 | 200 | 110 | 5 | — |
| | | З | Т4 | 150 | 160 | — | 18 | — |
| | | З | Т4 | 250 | 150 | — | 23 | — |
| | | ЗМ | Т4 | 150 | 170 | — | 17 | — |
| | | | | 250 | 130 | — | 36 | — |
| АЛ32 | Выточенные образцы диаметром 10 мм | З | Без т/о | 200 | 150 | 100 | 2,0 | — |
| | | З | Т1 | 200 | 170 | 140 | 1,0 | — |
| | | З | Т2-1*1 | 200 | 130 | 90 | 3,0 | — |
| | | З | Т5 | 200 | 210 | 160 | 4,0 | 130 |
| | | | | 250 | 150 | 130 | 4,0 | 55 |
| | | З | Т6 | 200 | 210 | 180 | 4,0 | 130 |
| | | | | 250 | 140 | 120 | 4,0 | 55 |
| | | З | Т7 | 200 | 170 | 150 | 3,0 | 130 |
| | | | | 250 | 130 | 110 | 4,0 | 55 |
| | | | | К К К | Без т/о Т1 Т5 | 200 200 200 250 | 220 210 230 200 | 140 150 210 190 |
| АЛ32 | Выточенные образцы диаметром 10 мм | Д | Т6 Т7 | 200 200 | 250 220 | 220 190 | 1,5 3,0 | — — |
| | | Д | Без т/о | 200 300 | 230 170 | — — | 4,0 3,0 | — — |
| | Д Д Д | Т1 Т2-1*1 Т2*2 | 200 200 200 | 250 250 210 | — — — | 2,5 3,5 3,5 | — — — | |
| | АЛ19 | Отдельно отлитые образцы диаметром 12 мм | З | Т4 | 20 | 300 | 200 | 8,0 |
| 200 | | | | | 270 | 180 | 3,0 | 150 |
| 300 | | | | | 140 | 70 | 5 | 60 |
| 350 | | | | | 80 | 50 | 8 | 35 |
| З | | | Т5 | 20 | 340 | 260 | 4,0 | — |
| | | 200 | 280 | 220 | 3,0 | 155 | | |

Продолжение табл. 17

| Сплав | Полуфабрикат | Способ литья | Состояние испытываемых образцов | l, мм | σ , МПа | | δ , % | $\sigma_{0,2}$, МПа | | |
|-------|--|--------------|---------------------------------|-------|----------------|----------------|--------------|----------------------|----|-----|
| | | | | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | | | | |
| АЛ34 | Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм | З | Т5 | 20 | 330 | 270 | 2,5 | — | | |
| | | | | 100 | 280 | — | 4,0 | — | | |
| | | | | 200 | 230 | — | 5,0 | 120 | | |
| | | | | 300 | 110 | — | 5,5 | 20 | | |
| АЛ4М | Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм | К | Т5 | 200 | 260 | — | 3,0 | 130 | | |
| | | | | 250 | 200 | — | 4,0 | 55 | | |
| | | | | 300 | 145 | — | 6,0 | 32 | | |
| АЛ5 | Отдельно отлитые образцы диаметром 12 мм | З | Т5 | 20 | 250 | 180 | 0,8 | — | | |
| | | | | 200 | 220 | — | 1,5 | 90 | | |
| | | | | 300 | 130 | — | 4,0 | 35 | | |
| | | К | Т7 | 20 | 240 | 180 | 1,5 | — | | |
| | | | | 200 | 180 | 140 | 2,5 | — | | |
| | | | | 300 | 100 | 80 | 6,0 | — | | |
| АЛ5-1 | Отдельно отлитые образцы диаметром 12 мм | З | Т5 | 100 | 290 | — | 1,0 | — | | |
| | | | | 200 | 240 | — | 1,5 | 140 | | |
| | | | | 250 | 180 | — | 1,5 | 70 | | |
| АЛ33 | Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм | З | Т4 | 150 | 250 | — | 3,0 | 200 | | |
| | | | | 200 | 220 | — | 5,0 | 160 | | |
| | | | | 250 | 180 | 110 | 5,0 | 140 | | |
| | | | | 300 | 150 | 90 | 4,5 | 90 | | |
| | | | | 350 | 80 | 50 | 8,0 | 45 | | |
| | | З | Т5 | 300 | 160 | 100 | 2,5 | 90 | | |
| | | | | 350 | 100 | 70 | 5,0 | 45 | | |
| | | | | К | Т5 | 150 | 340 | — | 8 | — |
| | | | | | | 200 | 300 | — | 9 | 140 |
| | | | | | | 250 | 220 | 210 | 10 | 60 |
| 300 | 130 | — | 11 | | | 35 | | | | |

*1 Режим старения Т2-1 для сплава, отлитого под давлением, $245 \pm 5^\circ\text{C}$; 5—8 ч.

*2 Режим старения для сплава, отлитого под давлением, $280 \pm 10^\circ\text{C}$, 5—8 ч.

18. Механические свойства литейных сплавов при низких температурах [45, 53, 54, 55]

| Сплав | Полуфабрикат | Способ литья | Состояние испытываемых образцов | Температура испытания, $^\circ\text{C}$ | σ , МПа | | δ , % | ψ , % | K_{CU} , МДж/м ² |
|-------|--|--------------|---------------------------------|---|----------------|----------------|--------------|------------|-------------------------------|
| | | | | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | | | |
| АЛ2 | Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм | ЗМ, ОМ | Без т/о | -70 | 220 | — | 4 | — | 0,5 |
| АЛ9 | Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм | ЗМ | Т5 | -70 | 180 | 130 | 3,5 | — | — |
| | | | | -196 | 220 | 150 | 2,5 | — | — |
| | | | Т6 | -70 | 230 | 210 | 1,5 | — | — |
| | | | | -196 | 250 | 230 | 1,0 | — | — |
| АЛ9-1 | Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм | З | Т6 | -70 | 300 | 250 | 2 | — | — |
| | | | | -196 | 340 | 280 | 2 | — | — |
| АЛ34 | Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм | З | Т5 | -70 | 340 | 290 | 2 | — | — |
| | | | | -196 | 390 | 330 | 2 | — | — |
| АЛ19 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З | Т4 | -70 | 340 | — | 8,5 | — | — |
| | | | | Т5 | -70 | 400 | — | 4,0 | — |
| АЛ5 | Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм | З | Т1 | -70 | 270 | — | 0,5 | — | — |
| | | | | -196 | 295 | — | 0,8 | — | — |
| АЛ33 | Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм | З | Т4 | -70 | 215—230 | — | 1,0 | — | — |
| АЛ8 | Выточенный образец диаметром 10 мм | З | Т4 | -70 | 300 | 210 | 8,0 | 7,1 | 0,71 |
| | | | | -196 | 250 | 230 | 1,0 | 1,7 | 0,23 |
| ВАЛ8 | Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм | К | Т5 | -70 | 430 | — | 4,0 | — | — |
| | | | | -196 | 480 | — | 3,5 | — | — |

19. Режим термической обработки конструкционных герметичных сплавов [25, 28]

| Сплав | Режим термической обработки | Закалка | | Старение | |
|-------|-----------------------------|---------|---------------|----------|---------------|
| | | t, °C | τ выдержки, ч | t, °C | τ выдержки, ч |
| АЛ4 | T1 | — | — | 175±5 | 5—17 |
| | T6 | 535±5 | 2—6 | 175±5 | 10—15 |
| АЛ9 | T2 | — | — | 300±10 | 2—4 |
| | T5 | 535±5 | 2—6 | 150±5 | 1—3 |
| | T6 *1 | 535±5 | 2—6 | 200±5 | 2—5 |
| | T7 *1 | 535±5 | 2—6 | 225±5 | 3—5 |
| | T8 *1 | 535±5 | 2—6 | 250±5 | 3—5 |
| АЛ2 | T2 | — | — | 300±10 | 2—4 |

*1 Закалка в воде с 80—100 °C.

20. Режим термической обработки сплава АЛ32 [45, 55]

| Способ литья | Режим термической обработки | Закалка | | Старение | |
|--------------|-----------------------------|-------------|------|----------|-------|
| | | t, °C | τ, ч | t, °C | τ, ч |
| Д | T1 | — | — | 180±5 | 5—8 |
| | T2-1 | — | — | 245±5 | 5—8 |
| | T2 | — | — | 280±10 | 5—8 |
| З | T1 | — | — | 200±10 | 5—8 |
| К | T6 | 515±5 | 4—8 | 175±5 | 8—16 |
| | T5 | 505±5+515±5 | 4—6 | 150±5 | 10—15 |
| | T7 | 515±5 | 4—8 | 230±5 | 3—5 |

21. Режимы термической обработки сплава ВАЛ8 [45, 54, 55]

| Режим термической обработки | Закалка | Старение |
|-----------------------------|---|-----------------|
| T4 | 450 °C, 4 ч + 500 °C, 4 ч + 510 °C, 6 ч | — |
| T5 | | 160 °C, 6—8 ч |
| T6 | | 160 °C, 10—12 ч |
| T7 | | 200 °C, 4 ч |

22. Режимы термической обработки сплава АЛ4М [45, 54, 55]

| Способ литья | Закалка | Охлаждение | Старение |
|------------------|---|----------------|---------------------|
| В песчаную форму | 490±5 °C, 4 ч + + 500±5 °C, 4 ч + 510±5 °C, 6 ч | Вода 20—100 °C | 160±5 °C, 8—15 ч |
| В кокиль | 515±5 °C, 4 ч + + 525±5 °C, 8 ч | | |

Сплав АЛ4М относится к системе Al—Si—Cu—Mg с добавками титана (до 0,3 %) и бора (до 0,1 %). Титан и бор, каждый в отдельности, но особенно вводимые совместно, являются эффективными модификаторами, способствующими измельчению зерен твердого раствора и эвтектических составляющих [55]. Сплав АЛ4М отличается высокой прочностью при температуре 20 °C и повышенной жаропрочностью. Герметичность высокая, коррозионная стойкость пониженная. Сплав АЛ4М подвергается упрочняющей термической обработке с применением ступенчатого нагрева под закалку из-за наличия в структуре сплава легкоплавких эвтектик с различными температурами плавления. Режимы термической обработки приведены в табл. 22.

Сплав АЛ4М предназначен для отливок, полученных методами литья в песчаную форму и в кокиль и работающих в условиях высоких давлений и температур (до 250 °C).

Конструкционные высокопрочные и жаропрочные сплавы. Сплав АЛ19 относится к системе Al—Cu—Mn с добавкой титана до 0,35 %. Сплав характеризуется высокими механическими свойствами при температуре 20 °C и хорошей жаропрочностью, которая может быть повышена одновременным легированием церием (0,2 %) и цирконием (0,2 %). Сплав АЛ19 обладает высокими механическими свойствами при низких температурах, хорошей обрабатываемостью резанием и свариваемостью.

Отливки из сплава АЛ19 применяют в термически обработанном состоянии;

после закалки (если требуется повышенная пластичность) Т4; после закалки и искусственного старения (обработка на максимальную прочность) Т5, Т7.

Режим Т4 — двухступенчатый нагрев под закалку (чтобы исключить возможность пережога отливок): I ступень: 530 ± 5 °C, 5—9 ч; II ступень: 545 ± 3 °C, 5—9 ч; охлаждение в воде с температурой 20—100 °C.

В печах, обеспечивающих перепад температур не более ±3 °C, можно применять одноступенчатый нагрев под закалку: 545 ± 3 °C, 10—12 ч, охлаждение в водостемпературой 20—100 °C.

Режим Т5 — закалка по режиму Т4, старение 175 ± 5 °C, 3—6 ч.

Режим Т7 — закалка по режиму Т4, старение 250 ± 10 °C, 3—10 ч.

Коррозионная стойкость сплава АЛ19 пониженная [45, 55].

Сплав АЛ19 предназначен для крупногабаритных отливок, получаемых в основном литьем в песчаные формы, а также для изготовления ответственных деталей, работающих в условиях повышенных статических и ударных нагрузок при низких температурах и повышенных до 300 °C.

Сплав АЛ33 системы Al—Cu—Mn—Ni характеризуется высокой жаропрочностью при 300 °C, значительно превышающей жаропрочность отечественных и зарубежных литейных алюминиевых сплавов ($\sigma_{100}^{300} = 90$ МПа). Недостатки — пониженные литейные свойства и коррозионная стойкость.

Термическая обработка — режим Т4: I ступень: 535 ± 5 °C, 5—9 ч; II ступень: 545 ± 3 — 5 °C, 5—9 ч.

23. Режимы термической обработки сплавов АЛ3 и АЛ5 [28, 45]

| Сплав | Режимы термической обработки | Закалка двухступенчатая | Старение | |
|-------|------------------------------|-----------------------------------|----------|------|
| | | | t, °C | τ, ч |
| АЛ3 | T1 | — | 175±5 | 3—5 |
| | T5 | 515±5 °C, 2—4 ч + 525±5 °C, 2—4 ч | 175±5 | 3—5 |
| | T7 | 515±5 °C, 2—4 ч + 525±5 °C, 2—4 ч | 230±10 | 3—5 |
| | T8 | 515±5 °C, 2—4 ч + 525±5 °C, 2—4 ч | 330±5 | 3—5 |
| АЛ5 | T1 | — | 180±5 | 5—10 |
| | T5 | 515±5 °C, 3—5 ч + 525±5 °C, 1—3 ч | 175±5 | 5—10 |
| | T6 | 515±5 °C, 3—5 ч + 525±5 °C, 1—3 ч | 200±5 | 3—5 |
| | T7 | 515±5 °C, 3—5 ч + 525±5 °C, 1—3 ч | 230±5 | 3—5 |

В печах, обеспечивающих перепад температур ±3 °C — одноступенчатый нагрев до 545 °C, 12 ч. После закалки старение по режимам: T5: 175 °C, 3—6 ч; T6: 225 °C, 3—10 ч; T7: 250 °C, 3—6 ч.

Обрабатываемость сплава АЛ33 резанием хорошая; сплав предназначен для изготовления деталей, длительно работающих при температурах до 350 °C [45, 55].

Сплавы АЛ3, АЛ5 системы Al—Si—Cu—Mg отличаются повышенной жаропрочностью; детали из них могут работать длительно при температурах до 250—270 °C.

Коррозионная стойкость пониженная, детали следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями.

Режимы термической обработки сплавов АЛ3 и АЛ5 приведены в табл. 23.

При использовании режимов T5, T6, T7, T8 для деталей, не имеющих массивных участков, можно применять

одноступенчатый нагрев до 525 ± 5 °C, 3—5 ч [45].

Сплав АЛ3 используется для корпусов арматуры и приборов, работающих до 275 °C, а сплав АЛ5 — для головок цилиндров двигателей воздушного охлаждения, деталей агрегатов и приборов, работающих при температуре не выше 250 °C.

Конструкционные коррозионно-стойкие сплавы. Сплавы АЛ8, АЛ27, АЛ27-1 на основе системы Al—Mg обладают малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, морской воде, в щелочных растворах, агрессивных средах на основе азотной кислоты, в растворах хлористых солей. Коррозионная стойкость этих сплавов выше, чем других литейных алюминиевых сплавов (табл. 24).

Сплавы Al—Mg хорошо обрабатываются резанием и полируются; литейные свойства сплавов невысокие, кроме

24. Скорость коррозии сплавов системы Al—Mg [55]

| Сплав | Скорость коррозии, г/(м ² ·ч) | | | | |
|--------|--|------------|---------------|---------------------------|-----------------|
| | при постоянном погружении | | | при переменном погружении | в камере тумана |
| | один месяц | два месяца | шесть месяцев | один месяц | три месяца |
| АЛ8 | 0,0969 | — | — | 0,0218 | 0 |
| АЛ27 | 0,479 | 0,0364 | 0,0228 | 0,0076 | 0,001 |
| АЛ27-1 | 0,0098 | 0,0031 | 0,0029 | 0,0015 | 0 |

того, они отличаются повышенной чувствительностью к примесям Fe и Si.

Легирование сплавов Be, Ti, Zr устраняет их склонность к окислению в процессе плавки и литья, способствует измельчению зерна и тормозит естественное старение, вызывающее у сплавов Al—Mg снижение вязкости, пластичности и повышение склонности к межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением из-за неравномерного распада пересыщенного твердого раствора по объему зерна, поэтому эти сплавы упрочняются только закалкой без последующего старения (табл. 25).

Недостатком сплавов АЛ8, АЛ27 и АЛ27-1 является их низкая жаропрочность — уровень рабочих температур не должен превышать 80 °C. Сплавы удовлетворительно свариваются аргодуговой сваркой. Прочность сварных соединений составляет 80—90 % прочности основного материала.

Сплавы АЛ8, АЛ27, АЛ27-1 применяются для изготовления силовых деталей, работающих при температурах от —60 до +60 °C, а в ряде случаев они могут быть использованы вместо дефицитных бронз, латуней, коррозионно-стойких сталей, для деталей, работающих в различных климатических условиях, включая воздействие морской воды и тумана.

Для снижения склонности к образованию трещин в отливках из этих

сплавов в процессе длительной эксплуатации необходимо содержание магния в сплавах ограничивать 10 %, а закалку деталей производить в нагретое до 50—60 °C масло (табл. 25).

Весьма перспективной системой для получения коррозионно-стойких сплавов с высокими и стабильными во времени механическими свойствами является система Al—Mg—Zn.

Сплав АЛ24 на основе этой системы обладает способностью самозакаливанию, может подвергаться старению — естественному или искусственному при +200 °C без предшествующей закалки (T1). Сплавы Al—Mg—Zn могут работать при температурах до 150 °C. Для достижения наиболее высоких прочностных характеристик отливки из

25. Режимы закалки сплавов системы Al—Mg [45, 54, 55]

| Сплав | Режим закалки (T4) | | |
|-------|--------------------|-------|--|
| | t, °C | τ, ч | Охлаждающая среда и ее температура, °C |
| АЛ8 | 430±5 | 12—20 | Масло, 50—60 |
| АЛ27 | 435±5 | 10 | |

сплава АЛ24 закалывают с температуры 540—560 °С (охлажденные в кипящей воде или на воздухе) и подвергают старению при 160—170 °С (20—24 ч).

Сплав АЛ24 сочетает высокую прочность с удовлетворительными литейными свойствами, лучшими, чем у сплавов Al—Mg, отличается высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью.

2. МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Свойства магния. Малая плотность магниевых сплавов в сочетании с довольно высокой удельной плотностью и целым рядом физико-химических свойств делает их ценными для различных областей народного хозяйства — в машиностроении, в том числе в сельскохозяйственном, автомобильном, приборостроении, самолетостроении, космической технике, радиотехнике, полнграфической, текстильной промышленности и т. д. Магниевые сплавы хорошо поглощают вибрации, что важно для авиации, транспорта и машиностроения. Удельная вибрационная прочность магниевых сплавов с учетом демпфирующей способности почти в 100 раз больше, чем у дуралюмина, и в 20 раз больше, чем у легированной стали. Магниевые сплавы обладают хорошей обрабатываемостью резанием. При механической обработке этих сплавов допускается скорость резания в 7 раз выше, чем для сталей, и в 2 раза выше, чем для алюминиевых сплавов. Магниевые сплавы немагнитны и не дают искры при ударах и трении. Большую выгоду дает применение магниевых сплавов в деталях, работающих на продольный или поперечный изгиб. По удельной жесткости при изгибе и кручении магниевые сплавы превосходят алюминиевые на 20 % и стали на 50 %.

Магниевые сплавы в горячем состоянии хорошо прессуются, куются и прокатываются. Они широко применяются в виде поковок, штампов, листов, профилей, прутков, труб и т. д.

Наша промышленность располагает магниевыми сплавами, пригодными для работы в интервале температур от

—253 до 350—400 °С. Методы защиты магниевых сплавов оксидными пленками и лакокрасочными покрытиями обеспечивают нормальную работу изделий из них в различных эксплуатационных условиях.

Магний имеет значение не только как ценный технический материал, но и как заменитель дефицитных и дорогостоящих металлов.

В зависимости от химического состава магний выпускается трех марок: Mg96 (99,96 % Mg), Mg95 (99,95 % Mg) и Mg90 (99,95 % Mg). Магний поставляется в чушках массой $8,0 \pm 1$ кг.

В СССР освоено производство магния повышенной (99,99 % Mg) и высокой чистоты (99,9999 % Mg), а также гранулированного магния.

Физико-химические и механические свойства магния [30] приведены ниже.

| | |
|--|-----------------------|
| Атомный номер | 12 |
| Валентность | 2 |
| Атомная масса | 24, 32 |
| Плотность, кг/м ³ | 1740 |
| Температура, °С: | |
| плавления | 651 |
| кипения | 1107 |
| Удельная теплота плавления, кДж/кг | 357 |
| Удельная теплоемкость при 20—100 °С, Дж/(кг×°С) | 1047,6 |
| Теплопроводность, Вт/(м·°С) | 167 |
| Удельное электрическое сопротивление (при 20 °С), Ом·м | $0,047 \cdot 10^{-9}$ |
| Температурный коэффициент линейного расширения (при 25 °С), °С ⁻¹ | $26 \cdot 10^{-6}$ |
| Электрохимический эквивалент, мг/Кл | 0,12601 |
| Нормальный электродный потенциал по водороду, В | —1,55 |
| Временное сопротивление, МПа: | |
| в литом состоянии | 120 |
| в деформированном состоянии | 200 |
| Предел текучести, МПа: | |
| в литом состоянии | 30 |

| | |
|---|------|
| в деформированном состоянии | 90 |
| Твердость НВ, МПа: | |
| в литом состоянии | 300 |
| в деформированном состоянии | 360 |
| Относительное удлинение, %: | |
| в литом состоянии | 8 |
| в деформированном состоянии | 12 |
| Модуль нормальной упругости, ГПа | 45 |
| Ударная вязкость, МДж/м ² | 6,12 |
| Предел выносливости отожженного магния на базе $5 \cdot 10^8$ циклов, МПа | 61,8 |

Сплавы магния. Промышленные магниевые сплавы принято делить на литейные для получения деталей методом фасонного литья (МЛ) и деформируемые для получения полуфабрикатов и изделий путем пластической деформации (МА). По применению их классифицируют на конструкционные и со специальными свойствами.

Состав, свойства (механические, физические и технологические), режимы обработки и области применения литейных магниевых сплавов приведены в табл. 26—32.

Химический состав, свойства, методы обработки и области применения деформируемых магниевых сплавов даны в табл. 33—41.

Термомеханическая обработка (ТМО) является одним из методов повышения прочности стареющих деформируемых магниевых сплавов. В практике используют три вида ТМО: низкотемпературную (НТМО), высокотемпературную (ВТМО) и комбинированную (КТМО).

При НТМО деформация осуществляется в температурной области ниже порога рекристаллизации. Она заключается в закалке с температуры твердого раствора, холодной (или теплой) деформации (10—15 %) с последующим старением. ВТМО — нагрев до температуры образования перенасыщенного твердого раствора, горячая пластическая деформация и старение.

КТМО — нагрев при температуре 490—530 °С (для сплава МА11) в течение 2 ч, подсуживание на воздухе до 300—350 °С, деформирование при этой температуре (50—90 %), деформация в холодную (5—10 %), последующее искусственное старение при 175 °С в течение 2,5 ч. Полученное упрочнение сохраняется до 300 °С.

В табл. 42 приведены данные о влиянии ТМО на свойства некоторых высокопрочных магниевых сплавов.

Сверхлегкие сплавы (магневолитиевые сплавы). Особенности сверхлегких сплавов являются низкая плотность (1,350—1,600 т/м³), повышенная пластичность и обрабатываемость давлением при температурах, значительно более низких, чем обычных магниевых сплавов, высокая удельная жесткость и высокий предел текучести при сжатии, отсутствие чувствительности к надрезу, незначительная анизотропия механических свойств, высокая теплоемкость, хорошие механические свойства при криогенных температурах. В табл. 43 приведены состав и свойства двух сплавов, используемых в технике.

Магневолитиевые сплавы могут быть также использованы для создания легких композиционных сплавов. Например, магневолитиевый сплав, армированный проволокой из стали У8А, имеет временное сопротивление 600 МПа, модуль упругости 64 ГПа при плотности 2,4 т/м³.

Магниевые сплавы со специальными физическими и химическими свойствами. Свойства этих сплавов приведены в табл. 44 и 45. Сплав МА18 применяют для малонагруженных деталей, работающих при температуре —253 + 60 °С, когда требуются высокая жесткость и малая масса. Сплав МА21 применяют для средненагруженных деталей, работающих при температуре до 100—125 °С и криогенных температурах, когда требуются высокая жесткость и повышенная прочность при сжатии. Сплав МА17 находят применение в радиотехнической промышленности для изготовления звукопроводов ультразвуковых линий задержки. Физические свойства сплава МА17, характеризующие его как материал для звукопроводов, приведены ниже.

26. Литейные магниевые сплавы, их состав и свойства [2, 30, 52]

| Сплав | Химический состав, % (основа—магний) | | | | Вид термической обработки, кн *1 | Испытание при растяжении | | | | Испытание при сжатии | | | НВ, МПа | КСУ, кДж/м ² | σ ₁₀₀ | 001/2σ _{0,2} |
|---------|---|----------|---------|---------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------|------------|-------------|----------------------|------------------|--------|---------|-------------------------|------------------|-----------------------|
| | Al | Mn | Zn | Другие элементы | | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ | σ _B | σ _{0,2} | δ, % | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| МЛ3 | 2,5—3,5 | 0,15—0,5 | 0,5—1,5 | — | — | 180 | 55 | 8,0 | 11,0 | 280 | — | 20 | — | — | — | — |
| МЛ4 | 5,0—7,0 | 0,15—0,5 | 2,0—3,5 | — | Т4 Т6 | 250 | 85 | 9,0 | 13,0 | 370 | — | 16 | — | — | — | — |
| | | | | | | 255 | 115 | 6,0 | 8,0 | 390 | — | 14 | — | — | — | — |
| МЛ5 | 7,5—9,0 | 0,15—0,5 | 0,2—0,8 | — | Т4 Т6 | 250 | 90 | 9,0 | 15,0 | 365 | — | 16,5 | 250 | 50 | — | 90 |
| | | | | | | 255 | 120 | 4,0 | 8,5 | 340 | — | — | — | — | — | — |
| МЛ5пч*2 | 7,5—9,0 | 0,15—0,5 | 0,2—0,8 | — | Т4 Т6 | 250 255 | 95 120 | 6,5 5,0 | 16,0 8,5 | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — |
| МЛ6 | 9,0—10,2 | 0,1—0,5 | 0,6—1,2 | — | Т4 Т6 | 250 | 100 | 5,0 | 12,0 | 320 | — | — | — | — | — | — |
| | | | | | | 260 | 140 | 1,0 | 3,0 | 380 | — | — | — | 150 | — | — |
| МЛ8 | — | — | 5,5—6,6 | 0,7—1,1 Zr, 0,2—0,8 Cd | Т6 Т61 | 290 | 190 | 6,0 | 13,0 | 430 | 190 | — | — | — | — | — |
| | | | | | | 300 | 200 | 7,0 | 8,0 | 430 | 190 | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---|---|---------|--|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|----|---|---|
| МЛ9 | — | — | — | 1,9—2,6 Nd, 0,4—1,0 Zr, 0,2—0,8 In | Т6 | 250 | 120 | 6 | — | — | 120 | — | — | 70 | — | — |
| МЛ10 | — | — | 0,1—0,7 | 0,4—1,0 Zr, 2,2—2,8 Nd | Т6 Т61 | 226 | 137 | 3 | — | — | 140 | — | 260 | 50 | — | — |
| | | | | | | 235 | 137 | 3 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| МЛ11 | — | — | 0,2—0,7 | 0,4—1,0 Zr, 2,5—4,0 РЗМ*3 | Т4 Т6 | 137 | 85 | 3 | — | 315 | 90 | — | — | — | — | — |
| | | | | | | 137 | 98 | 2 | — | 320 | 105 | — | — | 50 | — | — |
| МЛ12 | — | — | 4,0—5,0 | 0,6—1,1 Zr | Без т/о Т1 | 220 | 180 | 7 | 8,0 | — | — | — | — | 40 | — | — |
| | | | | | | 250 | 150 | 6 | 7,0 | 360 | 140 | — | — | 40 | — | — |
| МЛ15 | — | — | 4,0—5,0 | 0,7—1,1 Zr, 0,6—1,2 La | Т1 | 220 | 150 | 4,0 | 5,0 | 380 | 150 | 2 | 280 | 50 | — | — |
| МЛ19 | — | — | 0,1—0,6 | 0,4—1,0 Zr, 1,6—2,3 Nd, 1,4—2,2 Y | Т6 | 220 | 120 | 4—7 | — | — | 120 | — | 280 | 50 | — | — |
| | | | | | | 260 | 170 | — | — | — | — | — | — | — | — | |

*1 Виды термической обработки указаны в табл. 28.

*2 пч — повышенной чистоты.

*3 РЗМ — элементы, входящие в состав цериевого магнеталла, содержащего не менее 45 % церия.

Примечания: 1. Статический модуль упругости магниевых сплавов составляет 42 000—44 000, динамический—45 000—45 500 МПа.

2. σ_{0,2/100} — напряженне, вызывающее 0,2 остаточной деформации за 100 ч.

27. Свойства литейных магниевых сплавов при повышенных и низких температурах [30, 48]

| Сплав | Вид термической обработки | Температура испытания, °С | | | | | | | | | |
|-------|---------------------------|---------------------------|----------------|--------------|--------------------|----------------|------------|----------------|--------------|----------------|--------------------|
| | | 100 | | | | | 150 | | | | |
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{100} | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ |
| | | МПа | | МПа | | | МПа | | МПа | | |
| МЛ2 | — | 105 | 45 | 4 | 18 | 80 | 30 | 11 | — | 16 | |
| МЛ3 | — | 160 | 50 | 10 | 39 | 145 | 45 | 11 | — | 35 | |
| МЛ4 | T4 | 240 | 80 | 7 | 66 | 210 | 75 | 15 | — | 29 | |
| МЛ5 | T4 | 230 | 80 | 10 | 70 | 185 | 60 | 12 | 85 | 25 | |
| МЛ6 | T4 | 220 | — | 5 | 72 | 210 | 85 | 18 | — | 24 | |
| МЛ9 | T6 | — | — | — | — | 250 | — | — | — | — | |
| МЛ10 | T6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| МЛ11 | T6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| МЛ12 | T1 | — | — | — | 56 | 160 | 110 | 8 | 80 | 40 | |
| МЛ15 | T1 | — | — | — | — | 145 | 105 | 5 | 100 | 65 | |

| Сплав | Температура испытания, °С | | | | | | | | | |
|-------|---------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------------|-------------|----------------|--------------|----------------|--------------------|
| | 200 | | | | | 250 | | | | |
| | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ |
| | МПа | | МПа | | | МПа | | МПа | | |
| МЛ2 | 70 | 25 | 12,5 | — | 13 | — | — | — | — | — |
| МЛ3 | 10,5 | 40 | 12 | — | 25 | 75 | 40 | 11 | — | — |
| МЛ4 | 150 | 68 | 25 | — | 12 | 75 | — | 26 | — | — |
| МЛ5 | 155 | 50 | 15 | 5 | 8 | 120 | 40 | 15 | 25 | — |
| МЛ6 | 150 | — | 20 | — | 7 | 110 | 70 | — | — | — |
| МЛ9 | 200— 220 | 130— 140 | 5 | — | 95 | 160— 180 | 120 | 5 | — | 45 |
| МЛ10 | 190 | 140 | 8 | 13 | 110 | 165 | 130 | 13 | 70 | 38 |
| МЛ11 | 140 | 80 | 6 | 11,5 | 65 | 130 | 75 | 8,5 | 55 | 30 |
| МЛ12 | 140 | 85 | 10 | 5 | 25 | 100 | 60 | 12 | 20 | — |
| МЛ15 | 125 | 85 | 13 | 6,5 | 40 | 100 | 65 | 16 | 40 | 20 |

Продолжение табл. 27

| Сплав | Температура испытания, °С | | | | | | | |
|-------|---------------------------|----------------|--------------|----------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | 300 | | | | -70 | | -196 | |
| | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | σ_{100} | σ_B | $\delta, \%$ | σ_B | $\delta, \%$ |
| | МПа | | МПа | | МПа | | МПа | |
| МЛ2 | 60 | — | — | — | — | — | — | — |
| МЛ3 | 60 | 30 | 10,5 | — | — | — | — | — |
| МЛ4 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| МЛ5 | 90 | — | — | — | 290 | 12 | 290 | 7,0 |
| МЛ6 | 80 | — | — | — | 270 | 5 | — | — |
| МЛ9 | 120 | 100 | 20 | 18 | — | — | 320 | 4,5 |
| МЛ10 | 135 | 110 | 17 | 25 | 300 | 5 | 320 | 4 |
| МЛ11 | 105 | 60 | 30 | 22 | — | — | — | — |
| МЛ12 | 70 | 45 | 12 | — | 250 | 2 | 250 | 2 |
| МЛ15 | 75 | 50 | 16 | 40 | 210 | 1 | 220 | 1 |

28. Режим термической обработки литейных магниевых сплавов [30]

| Сплав | Вид термической обработки | Закалка | | | Старение | |
|-------|---------------------------|------------|--------------------|-------------------|-------------|--------------------|
| | | t, °С | τ выдержки, ч | Охлаждающая среда | t, °С | τ выдержки, ч |
| МЛ2 | T2 | — | — | — | 340 | 2—3 |
| МЛ3 | T2 | — | — | — | 340 | 2—3 |
| МЛ4 | T4 | 380 | 8—16 | Воздух | — | — |
| МЛ4пч | T6 | 380 | 8—16 | » | 175 | 16 |
| МЛ5 | T4 | 415 | 8—32 | » | — | — |
| МЛ5пч | T6 | 415 | 8—32 | » | 175 или 200 | 16 или 8 |
| МЛ5он | T4 | 410 | 8—16 | » | — | — |
| МЛ5 | T4 | 360+410 *1 | 3—21—29 | » | — | — |
| МЛ6 | T6 *2 | 360+410 | 3—21—29 | Вода при 90 °С | 190 | 4—6 |
| МЛ10 | T6 | 540 | 8—12 | Воздух | 205 | 12—15 |
| МЛ10 | T4 | 570 | 4—6 | » | — | — |
| МЛ11 | T6 | 570 | 4—6 | » | 200 | 16 |
| МЛ11 | T1 | — | — | — | 300 | 4—6 |
| МЛ12 | T6 | 400+490 | 2—3 | Воздух | 165 или 150 | 24 или 50 |
| МЛ14 | T1 | — | — | — | 315 | 16 |
| МЛ15 | T1 | — | — | — | 300 | 2—6 |
| МЛ19 | T6 | 535 | 4—8 | Воздух | 205 | 8 |

*1 Знак плюс указывает на ступенчатый нагрев.

*2 Для получения повышенного удлинения.

Примечания: 1. Условные обозначения видов термической обработки: T1 — старение; T2 — отжиг (охлаждение с печью); T4 — гомогенизация и закалка на воздухе; T6 — гомогенизация, закалка на воздухе и старение; T61 — гомогенизация, закалка в воде и старение.
 2. Охлаждающая среда при старении — воздух.
 3. Температура нагрева должна выдерживаться в пределах $\pm 5^\circ$.
 4. Время выдержки указано без учета времени, необходимого для нагрева до заданной температуры закалки и старения.

29. Физические свойства литейных магниевых сплавов [30]

| Сплав | ρ , т/м ³ | $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ (при 20—200 °С) | λ , Вт/(м·°С) | C_p , Дж/(кг·°С) | $\rho_1 \cdot 10^6$, мкОм·м |
|-------------------|---------------------------|---|-----------------------|--------------------|------------------------------|
| МЛ2 | 1,80 | 27,3 | 133,9 | 1046,7 | — |
| МЛ3 | 1,78 | 27,0 | 104,7 | 1046,7 | — |
| МЛ4, МЛ4пч | 1,83 | 27,6 | 79,5 | 1046,7 | — |
| МЛ5, МЛ5пч, МЛ5он | 1,81 | 28,1 | 78,9 | 1046,7 | 0,134 |
| МЛ6 | 1,81 | 27,3 | 78,9 | 1046,7 | — |
| МЛ7-1 | 1,76 | 27,7 | 78,3 | 1046,7 | — |
| МЛ8 | 1,82 | 27,2 | 120,5 | 1004,8 | — |
| МЛ9 | 1,76 | 27,1 | 117,2 | — | 0,072 |
| МЛ10 | 1 780 | 28,0 | 113,0 | 1046,7 | 0,084 |
| МЛ11 | 1 800 | — | 117,2 | 1046,7 | 0,073 |
| МЛ12 | 1 810 | 27,3 | 133,9 | 962,9 | 0,066 |
| МЛ15 | 1 830 | 26,9 | 138,1 | 921,1 | 0,068 |
| МЛ19 | 1 790 | 27,7 | 87,9 | 1130,4 | 0,096 |

30. Технологические свойства литейных магниевых сплавов [30]

| Сплав | Температурный интервал кристаллизации, °С | t литья, °С | Линейная усадка, % | Горячеломкость (по ширине кольца), м | Жидкотекучесть (по длине прутка), м |
|-------------------|---|---------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| МЛ2 | 650—645 | 750—800 | 1,6—1,9 | 0,500 | — |
| МЛ3 | 630—560 | 720—800 | 1,4—1,6 | 0,425 | 2,15 |
| МЛ4, МЛ4пч | 610—400 | 720—800 | 1,2—1,4 | 0,375 | 2,35 |
| МЛ5, МЛ5он, МЛ5пч | 600—430 | 720—800 | 1,1—1,3 | 0,300 | 2,90 |
| МЛ6 | 600—440 | 720—800 | 1,1—1,2 | 0,275 | 3,35 |
| МЛ7-1 | 610—505 | 720—780 | 1,2—1,3 | 0,375 | 2,50 |
| МЛ10 | 640—550 | 720—800 | 1,2—1,5 | 0,300 | 2,50 |
| МЛ11 | 645—590 | 720—800 | 1,2—1,5 | 0,200 | 2,90 |
| МЛ12 | 640—550 | 730—800 | 1,3—1,4 | 0,300—0,325 | 2,80 |
| МЛ14 | 648—560 | 720—800 | 1,3—1,4 | — | — |
| МЛ15 | 630—539 | 720—800 | 1,3—1,6 | 0,275—0,300 | 3,20 |
| МЛ19 | — | — | 1,2—1,5 | 0,275—0,300 | 3,15 |

31. Характеристики свариваемости литейных магниевых сплавов (аргодуговая сварка) [31]

| Сплав | Вид термической обработки | Присадка | Условия заварки дефектов отливок (деталей) |
|-------|---------------------------|--------------------------|--|
| МЛ5 | — | Основной материал | Без подогрева и с подогревом в интервале 350—380° в зависимости от жесткости детали *1 |
| МЛ5пч | — | То же | То же |
| МЛ10 | — | » | То же в интервале 380—430° *3 |
| МЛ11 | T6 | » | С подогревом в интервале 380—430° *2 |
| МЛ12 | T1 | Проволока марки СВ122 *1 | С подогревом (общий + местный) в интервале 400—430° |
| МЛ8 | T6 | Основной материал | С созданием теплового барьера в зоне плавки *2 |
| МЛ12 | — | Проволока марки СВ122 *1 | Без подогрева (сплавы склонны к образованию трещин в шве, зоне сплавления и околошовной зоне *4) |
| МЛ8 | — | То же | |
| МЛ15 | — | » | |
| МЛ9 | — | Основной материал | Без подогрева и с местным подогревом *2 в интервале 380—470° в зависимости от жесткости детали |

*1 Для получения более высокого качества мест заварки следует использовать проволоку, полученную прессованием.

*2 Сплав сваривается удовлетворительно, несколько склонен к образованию микрорыхлот при сварке. Коррозионная стойкость в местах заварки удовлетворительная.

*3 Сплав сваривается хорошо, не склонен к образованию микрорыхлот. Коррозионная стойкость в местах заварки удовлетворительная.

*4 Заварка дефектных мест невозможна без трещин; склонен к образованию микрорыхлот. Коррозионная стойкость в местах заварки неудовлетворительная.

34. Деформируемые магниевые сплавы и область их применения [15, 30, 51]

| Сплав | Химический состав, % (основа магний) | | | | | | Свойства при температуре | |
|-------|--------------------------------------|----------|---------|----------|---------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| | Al | Mg | Zn | Zr | Nd | Другие элементы | σ_B | $\sigma_{0,2}$ |
| | | | | | | | МПа | |
| МА1 | — | 1,3—2,5 | — | — | — | — | 190—220 | 120—140 |
| МА2 | 3,0—4,0 | 0,15—0,5 | 0,2—0,8 | — | — | — | 260—280 | 160—180 |
| МА2-1 | 3,8—5,0 | 0,2—0,6 | 0,6—1,5 | — | — | — | 270—310 | 160—230 |
| МА5 | 7,8—9,2 | 0,15—0,5 | 0,2—0,8 | — | — | — | 300—330 | 220—240 |
| МА8 | — | 1,5—2,5 | — | — | — | — | 220—250 | 140—160 |
| МА11 | — | 1,5—2,5 | — | — | 2,5—3,5 | 0,13—0,25 Ni | 260—280 | 130—160 |
| МА12 | — | — | — | 0,3—0,8 | 2,5—3,5 | — | 230—280 | 130—180 |
| МА14 | — | — | 5,0—6,0 | 0,3—0,9 | — | — | 320—340 | 220—290 |
| МА15 | — | — | 2,5—3,5 | 0,45—0,9 | — | 0,7—1,0 La 1,2—2,0 Cd | 300—320 | 250—260 |
| МА19 | — | — | 5,5—7,0 | 0,5—0,9 | 1,4—2,0 | — | 380—400 | 330—360 |

*1 Хорошо сваривается контактной, шовной и точечной сваркой.

Примечание. Модуль нормальной упругости деформируемых магниевых

| Комнатной температуре | | | Вид полуфабриката | Предельная рабочая температура, °С | | Область применения |
|-----------------------|---------|-------------------------|-------------------|------------------------------------|--|--------------------|
| δ , % | НВ, МПа | КСУ, кДж/м ² | | Длительная | Кратковременная | |
| | | | | | | |
| 5—15 | 450 | 120 | 150 | 200 | Кованые и штампованные детали сложной конфигурации для сварных конструкций | |
| 8—12 | 420 | 70 | 150 | 200 | Панели, штамповки сложной конфигурации для сварных конструкций | |
| 8—14 | 550 | — | 150 | 200 | Нагруженные детали | |
| 7—12 | 400 | 50 | 200 | 250 | Листы, плиты, штамповки сложной конфигурации для сварных конструкций | |
| 5—14 | — | 35 | 250 | 300 | Прутки, штамповки, листы | |
| 9—12 | — | 130 | 250 | 300 | Прутки, листы, плиты, профили | |
| 6—14 | 600 | 60 | 150 | 200 | То же | |
| 5—14 | 600 | 100 | 150 | 200 | Прутки, профили, листы | |
| 5—8 | 800 | 50 | 150 | 200 | Прессованные, поковки, штамповки | |

Вых сплавов составляет 41 000—43 000 МПа.

35. Режимы термической обработки деформируемых магниевых сплавов [6, 14, 30, 65]

| Сплав | Вид термической обработки | Закалка | | | Старение | | Отжиг | |
|-------|---------------------------|---------------------|------------------|-------------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | | $t, ^\circ\text{C}$ | $\tau, \text{ч}$ | Охлаждающая среда | $t, ^\circ\text{C}$ | $\tau, \text{ч}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\tau, \text{ч}$ |
| MA1 | M | — | — | — | — | — | 320—350 | 0,5 |
| MA1 | H | — | — | — | — | — | 260—290 | 0,5 |
| MA2-1 | M | — | — | — | — | — | 250—280 | 0,5 |
| MA2-1 | H | — | 4 | — | — | — | 150—200 | 1,0 |
| MA5 | T4 | 410—425 | 6—2 | Воздух | — | 12—24 | — | — |
| MA5 | T5 | — | — | — | 175—200 | 16—8 | — | — |
| MA5 | T6 | 410—425 | 6—2 | Воздух | 175—200 | 16—2 | — | — |
| MA8 | M | — | — | — | — | — | 320—350 | 0,5 |
| MA11 | T6 | 480—500 | 4 | Струя холодного воздуха | 175±5 | 24 | — | — |
| MA11 | T4*1 | 480—500 | 4 | — | 175±5 | 24 | — | — |
| MA11 | T6 | 530 | 1 | Вода | 200 | 16 | — | — |
| MA14 | T5 | — | — | — | 170±5 | 10—24 | — | — |
| MA15 | M | — | — | — | — | — | 260±20 | 0,5—10 |

*1 Между закалкой и старением — холодная деформация 3—10%.

Обозначения: M — отжиг после деформации; H — полунагартованное состояние (низкотемпературный отжиг после деформации); T4 — закалка после деформации; T5 — искусственное старение после деформации; T6 — закалка и искусственное старение после деформации.

37. Режимы обработки давлением магниевых сплавов [31, 48]

| Сплав | $t, ^\circ\text{C}$, при обработке | | | |
|-------|-------------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|
| | прессованием | прокаткой (листов) | ковкой и горячей штамповкой | листовой штамповкой |
| MA1 | 320—380 | 360—400 | 350—440 | 250—350 |
| MA2 | 320—360 | — | 440—320 | 420—320 |
| MA2-1 | 320—360 | 360—400 | 390—350 | 250—320 |
| MA8 | 380—420 | 400—450 | 420—350 | 230—350 |
| MA11 | 410—430 | 390—440 | 460—350 | 350—400 |
| MA14 | 300—360 | — | 420—300 | 200—250 (профили) |
| MA15 | 330—380 | 300—350 | 380—250 | 200—300 |

36. Механические свойства высокопрочных деформируемых магниевых сплавов при нормальной и повышенной температуре после термомеханической обработки [30]

| Сплав | Вид термической обработки | 20 °C | | | KCU, кДж/м ² | 250 °C | | | 300 °C | | | |
|-------|---------------------------|------------|----------------|-----|-------------------------|--------------|------------|----------------|--------|------------|----------------|------|
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | | | $\delta, \%$ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | |
| | | | МПа | | | | | МПа | | | МПа | |
| MA11 | T6 | 260 | 130 | 120 | 52 | 205 | 115 | 18,5 | 100 | 140 | 100 | 27 |
| | HTMO*1 | 320 | 290 | 183 | 9,5 | 250 | 215 | 9 | 120 | 165 | 150 | 20 |
| | BTMO*2 | 330 | 300 | 245 | 8,5 | 220 | 160 | 21,5 | 80 | 160 | 135 | 20,5 |
| | KTMO*3 | 350 | 330 | — | 7 | 250 | 220 | 18 | 80 | — | — | — |
| MA12 | T6 | 280 | 150 | 140 | 58 | 190 | 130 | 19 | 65 | 120 | 110 | 29 |
| | HTMO | 285 | 250 | — | 7 | 195 | 190 | 11 | 80 | 140 | 135 | 27 |
| | BTMO | 300 | 280 | 235 | 13 | 180 | 150 | 22 | 55 | 95 | 80 | 40,5 |
| | KTMO | 330 | 300 | — | 6 | 190 | 165 | 17 | 50 | — | — | — |
| MA14 | T5 | 340 | 300 | 245 | 70 | 200 | 175 | 27,5 | — | — | — | — |
| | HTMO | 360 | 325 | — | 10,5 | 200 | 190 | 31,5 | — | — | — | — |
| | BTMO | 380 | 350 | 280 | 11,5 | 190 | 165 | 36 | — | — | — | — |
| | BTMO + старение | 380 | 365 | 280 | 12 | 205 | 190 | 34 | — | — | — | — |
| MA5 | T5 | 335 | 245 | 240 | 22 | — | — | — | — | — | — | — |
| | HTMO | 410 | 325 | — | 9,5 | — | — | — | — | — | — | — |
| | BTMO | 404 | 320 | 290 | 10,5 | — | — | — | — | — | — | — |
| | BTMO + старение | 335 | 245 | 240 | 11,5 | — | — | — | — | — | — | — |

*1 HTMO (низкотемпературная термомеханическая обработка) — закалка с температуры твердого раствора + холодная (или теплая) пластическая деформация 10—15% + старение.

*2 BTMO (высокотемпературная термомеханическая обработка) — нагрев до температуры образования пересыщенного твердого раствора, горячая пластическая деформация + старение.

*3 KTMO (комбинированная термомеханическая обработка) — нагрев при температуре 490—530 °C для сплава MA11 в течение 2 ч, подсуживание на воздухе до 300—350 °C, деформирование (50—90%) при этой температуре, холодная деформация (5—10%) + старение при 175 °C в течение 24 ч.

38. Режимы вытяжки и гибки магниевых сплавов [31, 48]

| Сплав | t, °C | Вытяжка | | Давление прижима, МПа | Минимально допустимый радиус изгиба, мм | |
|-------|---------|----------|---------|-----------------------|---|------------|
| | | первая | вторая | | без нагрева | с нагревом |
| MA1 | 250—350 | 2,2—2,4 | 1,5—1,6 | 35—45 | 6—8 | 1,5—2,5 |
| MA8-M | 250—350 | 2,3—2,6 | 1,7—1,8 | 40—55 | 4,5—6 | 1,5—2,5 |
| MA8-H | 230—280 | 1,8—2,0 | — | 70—80 | — | — |
| MA2-1 | 250—320 | 2,2—2,4 | 1,6—1,7 | 50—65 | 5—7 | 1,5—2,5 |
| MA11 | 250—420 | 2,0—2,1 | 1,5—1,7 | 50—80 | 5,5—6 | 2—3 |
| MA15 | 200—300 | 2,1—2,15 | 1,6—1,7 | 40—60 | 6—8 | 2—3 |

39. Физические свойства деформируемых магниевых сплавов [31]

| Сплав | ρ, г/м³ | α · 10⁶, °C⁻¹, при температуре, °C | | | λ, Вт/(м · °C) | C _p , Дж/(кг · °C) | ρ _с · 10⁶, мкОм · м |
|---------------|---------|------------------------------------|--------|---------|----------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | | 20—100 | 20—200 | 200—300 | | | |
| MA1 | 1,76 | 26 | 26,5 | — | 125,6 | 1004,8 | 0,061 |
| MA2 | 1,78 | 26 | 26 | — | 96,3 | 1130,4 | 0,120 |
| MA2-1 | 1,79 | 26 | 26,3 | — | 96,3 | 1088,5 | 0,120 |
| MA5 | 1,80 | 26 | 26,0 | — | 75,3 | 1130,4 | 0,130 |
| MA8 | 1,78 | 23,7 | 24,9 | 27,3 | 133,9 | 1046,7 | 0,051 |
| MA11 | 1,80 | 25,7 | 27,5 | — | 108,8 | — | 0,062 |
| MA12 | 1,83 | — | — | — | — | — | — |
| MA14 (BM65-1) | 1,80 | 20,9 | 26,0 | 28,3 | 117,2 | 1046,7 | 0,056 |
| MA15 | 1,83 | 25,9 | 26,8 | — | 113,0 | 1004,8 | 0,065 |
| MA19 | 1,88 | 26,2 | — | — | — | — | 0,061 |

40. Технологические свойства деформируемых магниевых сплавов [31, 48]

| Свойства | Сплавы | | | | | |
|---|----------|-----|-------|------|------|------|
| | MA1, MA8 | MA2 | MA2-1 | MA5 | MA14 | MA15 |
| Температура, °C: | | | | | | |
| ликвидуса | 650 | 630 | 620 | 605 | 635 | 640 |
| солидуса | 646 | 665 | 645 | 430 | 515 | 540 |
| Жидкотекучесть по длине спирали, мм | 680 | 600 | 640 | 750 | 575 | 580 |
| Объемная усадка (между ликвидусом и солидусом), % | 1,8 | 1,6 | 1,25 | 1,25 | 1,4 | 1,35 |
| Линейная усадка, % | 5,4 | 5,0 | 4,2 | 3,8 | 3,2 | 3,2 |

41. Характеристики свариваемости деформируемых магниевых сплавов (аргодуговая сварка) [31, 48]

| Сплав | Присадка | Коэффициент прочности сварного соединения | Угол загиба шва Δ° | Коэффициент трещинообразования | Коррозионная стойкость сварного соединения | Свариваемость |
|---------|-------------------------|---|--------------------|--------------------------------|--|---|
| MA1 | Основной материал | 0,86 | 70 | ∇15 | Удовлетворительная | Сплав сваривается хорошо, не склонен к образованию зон микрорыхлоты при сварке |
| MA8 MA8 | Основной материал MA2-1 | 0,60 0,75 | 40 60 | ∇45 ∇35 | То же | Сплав сваривается удовлетворительно, склонен к образованию зон микрорыхлоты |
| MA2-1 | Основной материал | 0,80 | 65 | ∇35 | * | То же |
| MA14 | Проволока марки СВ122 | — | — | ∇70 | Неудовлетворительная | Сплав сваривается плохо, имеет большую склонность к образованию зон микрорыхлоты |
| MA15 | Основной материал | 0,82 | 60 | ∇35 | Удовлетворительная | Сплав сваривается удовлетворительно, несколько склонен к образованию зон микрорыхлоты |
| MA11—T6 | Проволока марки СВ27 | 0,76 | — | ∇60 | Неудовлетворительная | Сплав сваривается плохо, имеет большую склонность к образованию зон микрорыхлоты |

42. Механические свойства сплавов после различных обработок [31, 48]

| Вид термической обработки | Температура испытания, °С | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|------|-------------------------|------|----------------|------|------------------|------|----------------|------|------------------|------|
| | 20 | | | | 200 | | | | 300 | | | |
| | σ _B | | σ _{0,2} | | σ _B | | σ _{0,2} | | σ _B | | σ _{0,2} | |
| | МПа | δ, % | КСУ, кДж/м ² | δ, % | МПа | δ, % | МПа | δ, % | МПа | δ, % | МПа | δ, % |
| | Сплав МА11 | | | | | | | | | | | |
| T6 | 260 | 130 | 120 | 9,5 | 52 | 20,5 | 11,5 | 18,5 | 10,0 | 14,0 | 10,0 | 27,0 |
| HTMO | 320 | 290 | 183 | 8,5 | — | 25,0 | 21,5 | 9,0 | 12,0 | 16,5 | 15,0 | 20,0 |
| BTMO | 330 | 300 | 245 | 10,0 | 47 | 22,0 | 16,0 | 21,5 | 8,0 | 16,0 | 13,5 | 20,5 |
| KTMO | 350 | 330 | — | 7,0 | — | 25,0 | 22,0 | 18,0 | 8,0 | — | — | — |
| | Сплав МА12 | | | | | | | | | | | |
| T6 | 280 | 150 | 140 | 14,0 | 58 | 19,0 | 13,0 | 19,0 | 6,5 | 12,0 | 11,0 | 29,0 |
| HTMO | 285 | 250 | — | 7,0 | — | 19,5 | 19,0 | 11,0 | 8,0 | 14,0 | 13,5 | 27,0 |
| BTMO | 300 | 280 | 235 | 13,0 | 40 | 18,0 | 15,0 | 22,0 | 5,5 | 9,5 | 8,0 | 40,5 |
| KTMO | 330 | 300 | — | 6,0 | — | 19,0 | 16,5 | 17,0 | 5,0 | — | — | — |
| | Сплав МА14 *1 | | | | | | | | | | | |
| T5 | 340 | 300 | 245 | 13,5 | 70 | 200 | 175 | 27,5 | — | — | — | — |
| HTMO | 360 | 325 | — | 10,5 | 70 | 200 | 190 | 31,5 | — | — | — | — |
| BTMO | 380 | 350 | 280 | 11,5 | 55 | 190 | 165 | 36,0 | — | — | — | — |
| BTMO + старение | 380 | 365 | 280 | 12,0 | 51 | 205 | 190 | 34,0 | — | — | — | — |
| | Сплав МА5 | | | | | | | | | | | |
| T5 | 335 | 245 | 240 | 9,5 | 22 | — | — | — | — | — | — | — |
| HTMO | 410 | 325 | — | 10,5 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BTMO | 405 | 320 | 290 | 11,5 | 21 | — | — | — | — | — | — | — |
| BTMO + старение | 335 | 245 | 240 | 9,5 | 22 | — | — | — | — | — | — | — |

*1 При 20 и 150 °С.

Коэффициент затухания ультразвука на продольных волнах, дБ/м, при частоте, МГц:

| | |
|----|-----|
| 10 | 2-3 |
| 15 | 3-5 |
| 20 | 5-8 |

Скорость распространения волн, м/с:

| | |
|------------|-----------|
| продольных | 5760-5840 |
| поперечных | 3040-3150 |

Температурный коэффициент задержки, °С⁻¹:

| | |
|---------------------|----------------------------|
| для продольных волн | 1,3-1,6 · 10 ⁻⁴ |
| для поперечных волн | 2,2-2,4 · 10 ⁻⁴ |

Плотность, кг/м³ 1750-1760

Удельное электрическое сопротивление, мкОм · м (5,32-5,34) · 10⁻³

Механические свойства сплава МА17 при 20 °С:

| | |
|------------------------|-------------|
| σ _B , МПа | 190-210 |
| σ _{0,2} , МПа | 110-140 |
| δ, % | 12-14 |
| ψ, % | 14-22 |
| НВ, МПа | 400,0-520,0 |

Изготовление приборов из этого сплава позволяет повысить надежность их работы, а также снизить трудоемкость изготовления и уменьшить себестоимость.

Сплав МА2-2 используется в полиграфической промышленности для изготовления клише. Внедрение его повышает прочность клише, увеличивает ихтиражестойчивость, сокращает время травления и повышает производительность машин. Для улучшения качества поверхности клише следует применять фильтрацию расплава через стальную сетку с ячейками 1,2X X1,2 мм.

Сплавы МЛ16, МЛ16пч, МЛ16вч, МЛ4вч используются в качестве протекторов с высокой коррозионной стойкостью, которая обеспечивается путем глубокой очистки магния от вредных примесей железа, никеля, меди и кремния. Применение их в магистральных газо- и нефтепроводах, а также для защиты подводной части корпусов судов значительно удлиняет срок службы защищаемых объектов.

10 Б. Н. Арзамасов и др.

43. Состав и механические свойства сверхлегких сплавов [14, 16, 30]

| Сплав | Химический состав, % (основа магний) | | | | | | НВ | σ _B | σ _{0,2} | ψ | δ | КСУ, кДж/м ² | E, ГПа |
|-------|--------------------------------------|---------|---------|---------|-----------------|--|-----|----------------|------------------|----|------|-------------------------|--------|
| | Li | Al | Zn | Mn | Другие элементы | | | | | | | | |
| МА18 | 10-11,5 | 0,5-1,0 | 2,0-2,5 | 0,1-0,4 | 0,15-0,35 Ce | | 600 | 185 | 150 | 60 | 30,5 | 280 | 45 |
| МА21 | 7,0-10,0 | 4,0-6,0 | 0,8-2,0 | 0,1-0,5 | 3,0-5,0 Cd | | 750 | 240 | 190 | 26 | 18,5 | 70 | 46 |

44. Магниевые сплавы со специальными физическими и химическими свойствами [14, 15, 52, 59]

| Сплав | Химический состав (основа магния), мас. доля, % | | | | | | | Полу-фабрикат | Назначение |
|----------|---|---------|-----------|---------|---------|----------|-----------|-----------------------------------|--|
| | Al | Zn | Mn | Ce | Zr | Cd | Y | | |
| | | | | | | | | | |
| Si | | Fe | | Cu | | Ni | | | |
| МА17 | — | — | 0,2—0,7 | 0,7—1,5 | — | — | — | Плиты катаные | Для изготовления про- водов ультразвуковых линий задержки Для изготовления клише в полиграфической про- мышленности |
| МА2-2 *1 | 2—2,5 | 0,7—1,2 | 0,15—0,35 | — | — | — | — | Плиты, листы | |
| МЛ16 | 7,5—9,0 | 2,0—3,0 | 0,15—0,50 | 0,2 | 0,03 | 0,15 | 0,01 | Отливки и прес- сован- ные прутки | Для защиты от коррозии газонефтепроводов и дру- гих подземных металл- ческих сооружений То же |
| МЛ16пч | 7,5—9,0 | 2,0—3,0 | 0,15—0,50 | 0,06 | 0,005 | 0,01 | 0,001 | То же | |
| МЛ16вч | 7,5—9,0 | 2,0—3,0 | 0,15—0,50 | 0,04 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | То же | Протекторный сплав для защиты от корро- зии морских судов |
| МЛ14вч | 5,0—7,0 | 2,0—3,0 | 0,15—0,50 | 0,05 | 0,003 | 0,004 | 0,001 | Отливки | |
| МЦИ | — | 0,1—0,3 | — | — | 0,4—0,7 | 0,4—0,75 | 0,02—0,05 | Отливки | Для изготовления дета- лей, работающих в усло- виях вибрационных на- грузок |

*1 Окончательный отжиг листов рекомендуется проводить при 200—230 °С в течение 30 мин, затем охлаждение на воздухе.

45. Электрохимические свойства протекторных сплавов [30, 48, 56]

| Сплав | Потенциал, В | Электрохимический эквивалент, мг/Кл | Токоотдача $\times 10^{-4}$, Кл/кг | Коэффициент полезного использова- ния, % |
|-------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| МЛ4 | -1,275 | 0,1125 | 3,20 | 40 |
| МЛ4пч | -1,225 | 0,075 | 4,79 | 60 |
| МЛ16 | -1,590 | 0,085 | 4,15 | 52 |

Сплав МЦИ предназначен для литья деталей, работающих в условиях воздействия вибрационных нагрузок. Демпфирующая способность сплава МЦИ в несколько десятков раз выше, чем магниевых сплавов, используемых в качестве конструктивных сплавов. Использование сплава МЦИ в конструкциях, подвергающихся вибраци- ям, позволит уменьшить массу, уве- личить надежность и срок службы из- делий, а также существенно снизить шум. Сплав хорошо сваривается арго- нодуговой сваркой, отлично обрабаты- вается резанием и обладает довольно хорошей коррозионной стойкостью.

Механические свойства сплава МЦИ при растяжении, МПа:

| | |
|------------------|---------|
| σ_B | 170—180 |
| $\sigma_{0,2}$ | 60—70 |
| $\delta, \%$ | 15—30 |
| При сжатии, МПа: | |
| σ_B | 280—300 |
| $\sigma_{0,2}$ | 60—70 |
| При изгибе, МПа: | |
| σ_B | 420—450 |
| $\sigma_{0,2}$ | 90—100 |

3. ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

Титан — элемент IV группы Пери- одической системы Д. И. Менделеева. Физические свойства титана [7, 10, 32, 43, 57, 63]

| | |
|----------------------|-------|
| Атомный номер | 22 |
| Атомная масса | 47,9 |
| Плотность, t/m^3 : | |
| при 20 °С | 4,505 |
| при 900 °С | 4,32 |

Кристаллическая решет- ка Ti_α ($t < 882$ °С) ОЦК (К8)
Период решетки при 20 °С a , нм 0,3283
Кристаллическая решет- ка Ti_β ($t > 882$ °С) ГПУ (Г12)
Периоды решетки при 900 °С, нм:

| | |
|----------------------------|---------|
| a | 0,29503 |
| c | 0,48631 |
| c/a | 1,5873 |
| Температура, °С: | |
| плавления | 1668 |
| кипения | 3260 |
| Удельная теплота, кДж/кг: | |
| плавления | 358 |
| испарения | 8 970 |
| полиморфного превра- щения | 67 800 |

Удельная теплоемкость при 20 °С, кДж/(кг·°С) 0,54
Коэффициент теплопере- дачи при 20 °С, Вт/(м·°С) 18,85
Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м·10⁸:

| | |
|------------------------------------|----|
| иодидного титана | 42 |
| магнетермического титана | 55 |

Коэффициент линейного расширения $\alpha \times 10^6$, °С⁻¹, при температуре, °С:

| | |
|------------------|-----|
| 20—100 | 8,2 |
| 20—200 | 8,6 |
| 20—300 | 8,8 |
| 20—400 | 9,1 |
| 20—500 | 9,3 |
| 20—600 | 9,5 |

| | |
|----------------------|-----------|
| Модуль, ГПа: | |
| упругости | 112 |
| сдвига | 39,2 |
| Коэффициент Пуассона | 0,35—0,38 |

46. Промышленные марки титановой губки (ГОСТ 17746—79) (основа — титан)

| Губка | НВ, МПа | Примеси, % не более | | | | | | |
|-------|---------|---------------------|------|------|------|------|-------|------|
| | | Fe | Si | C | Cl | N | O | Ni |
| ТГ90 | 900 | 0,06 | 0,01 | 0,02 | 0,08 | 0,02 | 0,04 | 0,05 |
| ТГ100 | 1000 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,08 | 0,02 | 0,04 | 0,05 |
| ТГ110 | 1100 | 0,09 | 0,05 | 0,03 | 0,08 | 0,03 | 0,05 | 0,05 |
| ТГ120 | 1200 | 0,11 | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,03 | 0,065 | 0,05 |
| ТГ130 | 1300 | 0,13 | 0,05 | 0,04 | 0,10 | 0,03 | 0,08 | 0,05 |
| ТГ150 | 1500 | 0,20 | 0,04 | 0,05 | 0,12 | 0,04 | 0,10 | 0,05 |
| ТГ—ТВ | 1700 | 2,00 | — | 0,15 | 0,3 | 0,03 | — | — |

47. Химический состав технического титана (ГОСТ 19807—74) (основа — титан)

| Титан | Примеси, % не более | | | | | | |
|--------|---------------------|------|------|------|------|-------|--------|
| | Fe | Si | C | O | N | H | Прочие |
| BT1-00 | 0,12 | 0,08 | 0,05 | 0,10 | 0,04 | 0,008 | 0,1 |
| BT1-0 | 0,18 | 0,10 | 0,07 | 0,12 | 0,04 | 0,010 | 0,3 |

Отличительными особенностями титана являются высокие механические свойства, небольшая плотность и поэтому высокая удельная прочность при 20—25 °С и криогенных температурах, хорошая коррозионная стойкость.

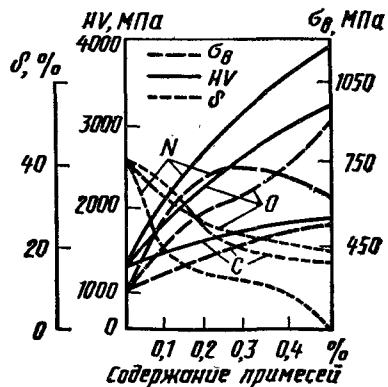


Рис. 1. Влияние содержания примесей на механические свойства титана

Промышленный способ производства состоит в обогащении и хлорировании титановой руды с последующим восстановлением из четыреххлористого титана металлическим магнием. Полученная при этом титановая губка маркируется по твердости специально выплавленных из нее образцов (табл. 46).

Полученный в результате последовательного дробления губки, прессования, спекания и переплавки брикетов технический титан маркируется в зависимости от содержания примесей (табл. 47).

Механические свойства титана в большой степени зависят от содержания примесей, особенно H, O, N и C, образующих с титаном твердые растворы внедрения и промежуточные фазы: гидриды, оксиды, нитриды и карбиды. Небольшое содержание кислорода, азота, углерода повышает твердость и прочность, но при этом значительно уменьшается пластичность (рис. 1), снижается коррозионная стойкость, ухудшается свариваемость, способность к пайке и штампуемость. Поэтому со-

48. Влияние водорода на механические свойства технического титана и титановых сплавов [17]

| Сплав | Термическая обработка | Мас. доля H ₂ , % | Механические свойства | | | | | |
|-------|--|--|-----------------------|----------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| | | | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | KCU, МДж/м ² | KCT, МДж/м ² | |
| BT1-0 | Отжиг | 0,005 | 345 | 265 | 51 | 1,50 | 1,90 | |
| | | 0,01 | 320 | 268 | 54 | 1,80 | 1,57 | |
| | | 0,02 | 355 | 290 | 48 | 1,60 | 1,53 | |
| | | 0,05 | 350 | 293 | 44,5 | 1,30 | 0,85 | |
| OT4-0 | Отжиг | 0,005 | — | — | — | 1,55 | 1,88 | |
| | | 0,01 | — | — | — | 1,78 | 0,27 | |
| | | 0,015 | — | — | — | 2,03 | 0,29 | |
| | | 0,05 | — | — | — | 0,53 | 0,05 | |
| BT14 | Отжиг | 0,005 | 850 | 830 | 22 | 0,45 | 0,75 | |
| | | 0,02 | 880 | 880 | 11 | 0,50 | 0,75 | |
| | Закалка (880 °С, 15 мин, вода) + старение (510 °С, 16 ч) | 0,005 | 1070 | 990 | 7,7 | 0,07 | 0,33 | |
| | | 0,01 | 955 | 950 | — | 0,16 | 0,35 | |
| | | 0,015 | 1060 | 1000 | — | 0,18 | 0,30 | |
| | | 0,02 | 1160 | 1080 | 6,5 | 0,03 | 0,16 | |
| | | 0,05 | 1350 | 1240 | 4,5 | 0,03 | 0,10 | |
| | | 0,05 | 1350 | 1240 | 4,5 | 0,03 | 0,10 | |
| | BT22 | Закалка (700 °С, 18 мин, вода) + старение (450 °С, 24 ч) | 0,605 | — | — | — | — | 0,075 |
| | | | 0,02 | — | — | — | — | 0,074 |
| 0,05 | | | — | — | — | — | — | |
| BT6 | Закалка (900 °С, 18 мин, вода) + старение (450 °С, 24 ч) | 0,005 | 1080 | 990 | 8 | 0,07 | 0,28 | |
| | | 0,01 | 955 | 950 | — | 0,16 | 0,27 | |
| | | 0,015 | 1060 | 1000 | — | 0,18 | 0,30 | |
| | | 0,02 | 1160 | 1090 | 7 | 0,035 | 0,16 | |
| | | 0,05 | 1360 | 1240 | 4,5 | 0,03 | 0,10 | |

Держание каждой из этих примесей ограничивается ~0,02—0,06 %. Аналогично, но в меньшей степени, на свойства влияют железо и кремний. Особо вредная примесь в титане и однофазных α -сплавах титана — водород. При наличии водорода по границам зерен выделяются тонкие хрупкие пластины гидридной фазы, вызывая значительную хрупкость (табл. 48). Водородная хрупкость наиболее опасна в сварных конструкциях из-за наличия в них внутренних напряжений. Допустимое содержание водорода в техническом титане и однофазных сплавах находится в пределах 0,008—0,012 % (табл. 49).

Наиболее чистый иодидный титан получают методом термического диссоциации из четырехиодистого титана

или методом зонной плавки. Механические свойства иодидного и технического титана приведены в табл. 50, механические свойства полуфабрикатов из технического титана — в табл. 51. Размеры полуфабрикатов из технического титана влияют на механические свойства, особенно на характеристики пластичности (табл. 52).

Модуль упругости титана почти в 2 раза меньше, чем у железа и никеля, что затрудняет изготовление жестких конструкций.

Несмотря на высокую температуру плавления, чистый титан не обладает жаропрочностью (рис. 2). Он склонен к ползучести даже при 20—25 °С. Кислород, азот, а также пластическая деформация повышают сопротивление ползучести.

49. Допустимое содержание водорода в титане и сплавах на основе титана [64]

| Сплав | Класс по структуре | Мас. доля Н, % |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| BT1-00 BT1-0 BT5-1 BT-5 | α -сплавы | 0,008 0,01 0,012 0,012 |
| OT4 OT4-1 BT20 | Псевдо- α -сплавы | 0,01 0,008 0,02 |
| BT3-1, BT6, BT8, BT16, BT14 | $\alpha+\beta$ -сплавы | 0,03 |
| BT22 | | 0,05 |
| BT15 | Псевдо- β -сплавы | 0,15 |

50. Механические свойства технического и иодидного титана [43]

| Сплав | Механические свойства | | | | | |
|----------|-----------------------|-------------------------|------------|--------------|----------------------|------------------|
| | НВ, МПа | KCU, МДж/м ² | ψ , % | δ , % | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа |
| BT1-00 | 1160—1430 | 1,2—1,5 | ≥ 60 | ≥ 30 | 250—380 | 300—450 |
| BT1-0 | 1310—1630 | 1,0—2,0 | ≥ 60 | ≥ 30 | 300—420 | 400—550 |
| Иодидный | 1070 | 2,5 | 70—80 | 50—60 | 120—170 | 220—260 |

51. Механические свойства полуфабрикатов из технического титана [10]

| Сплав | Полуфабрикаты | Механические свойства | | | | |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|--------------|------------|---------------------|-------------------------|
| | | σ_B , МПа | δ , % | ψ , % | σ_{-1} , МПа | KCU, МДж/м ² |
| BT1-00 BT1-0 | Отожженные листы | 300—450 400—550 | 25 25 | — — | 160 230 | — — |
| BT1-00 BT1-0 | Кованые, отожженные прутки | 300—450 400—550 | 25 20 | 55 50 | — — | 1,2 1,0 |
| BT1-00 BT1-0 | Отожженные трубы | 300—450 400—550 | 20 15 | — — | — — | — — |

52. Механические свойства листа из технического титана различной толщины [43]

| Сплав | Толщина листа, мм | Механические свойства | |
|--------|-------------------|-----------------------|--------------|
| | | σ_B , МПа | δ , % |
| BT1-0 | 0,3—0,4 | 400—550 | 25 |
| | 0,5—1,8 | | 30 |
| | 2,0—6,0 | | 25 |
| | 6,5—10,0 | | 20 |
| BT1-00 | 0,3—0,4 | 300—450 | 25 |
| | 0,5—1,8 | | 30 |
| | 2,0—6,0 | | 25 |
| | 6,5—10,0 | | 20 |

53. Механические свойства технического титана марки BT1-0 при низких и высоких температурах [10, 27]

| Температура, °C | Механические свойства | | | | |
|-----------------|-----------------------|----------------------|--------------|------------|-------------------------|
| | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % | KCU, МДж/м ² |
| -196 | 970 | 750 | 20 | 48 | 0,8 |
| -253 | 1200 | 1100 | 10 | 35 | 0,6 |
| -269 | 1210 | 870 | 35 | 58 | — |
| 20 | 500 | 380 | 30 | 55 | 1,0 |
| 100 | 420 | — | 30 | 55 | — |
| 150 | 350 | — | 30 | 55 | — |
| 200 | 300 | — | 30 | 55 | — |
| 250 | 280 | — | 30 | 55 | — |

Рис. 3. Влияние холодной пластической деформации на механические свойства:
а — иодидного титана; б — технического титана

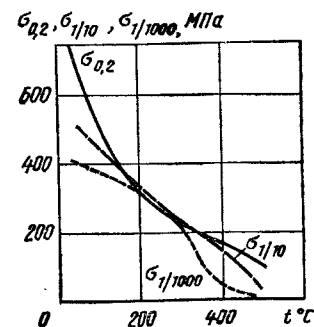
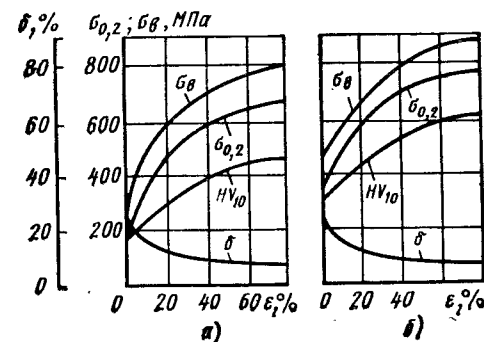


Рис. 2. Изменения пределов текучести и прочности технического титана в зависимости от температуры испытания

Титан обладает высокими прочностью и удельной прочностью в условиях глубокого холода (табл. 53).

Пластическая деформация значительно повышает прочность титана (рис. 3). Для снятия наклепа проводят рекристаллизационный отжиг. Температура рекристаллизации титана понижается с 600 до 500 °C при увеличении степени предшествующей деформации с 10 до 60 %, после чего не меняется. Наилучшее сочетание механических свойств титан имеет после отжига при 650—750 °C.

При повышении температуры титан активно поглощает газы: начиная с 50—70 °C — водород, свыше 400—500 °C — кислород, с 600—700 °C — азот, окись углерода и углекислый газ. Высокая химическая активность расплавленного титана вызывает необходимость применения при плавке и ду-



Продолжение табл. 54

| Сплав | Si | Fe | Примеси, %, не более | | | | | | | Сумма прочих |
|-------|-----------|---------|----------------------|------|------|------|------|------|-------|-----------------|
| | | | C | Fe | Si | Zr | O | N | H | |
| OT4-0 | — | — | 0,10 | 0,30 | 0,15 | 0,30 | 0,15 | 0,05 | 0,012 | 0,30 |
| OT4-1 | — | — | 0,10 | 0,30 | 0,15 | 0,30 | 0,15 | 0,05 | 0,012 | 0,30 |
| OT4 | — | — | 0,10 | 0,30 | 0,15 | 0,30 | 0,15 | 0,05 | 0,012 | 0,30 |
| BT20 | — | — | 0,10 | 0,30 | 0,15 | — | 0,15 | 0,05 | 0,012 | 0,30 |
| ПТ7М | — | — | 0,10 | 0,25 | 0,12 | — | 0,15 | 0,04 | 0,006 | 0,30 |
| ПТЗВ | — | — | 0,10 | 0,25 | 0,12 | 0,30 | 0,15 | 0,04 | 0,008 | 0,30 |
| BT3-1 | 0,15—0,40 | 0,2—0,7 | 0,10 | — | — | 0,50 | 0,18 | 0,05 | 0,015 | 0,30 |
| BT6 | — | — | 0,10 | 0,3 | 0,15 | 0,30 | 0,20 | 0,05 | 0,015 | 0,30 |
| BT9 | 0,2—0,35 | — | 0,10 | 0,25 | — | 0,30 | 0,15 | 0,05 | 0,015 | 0,30 |
| BT14 | — | — | 0,10 | 0,3 | 0,15 | 0,30 | 0,15 | 0,05 | 0,015 | 0,30 |
| BT16 | — | — | 0,10 | 0,25 | 0,15 | 0,30 | 0,15 | 0,05 | 0,015 | 0,30 |
| BT22 | — | 0,5—1,5 | 0,10 | — | 0,15 | 0,30 | 0,2 | 0,05 | 0,015 | 0,30 |

В сплаве BT5 содержание V \leq 1,2 %, а содержание Mo \leq 0,8 %.

В сплаве BT5-1 содержание V \leq 1 %.

В сплаве BT6, предназначенном для изготовления баллонов, работающих под давлением, содержится 5,3—6,5 % Al; 3,5—4,5 % V; \leq 0,15 % O; \leq 0,25 % Fe. Сплав такого состава маркируется дополнительно буквой С (BT6С).

В плоском прокате из сплава BT14 (толщина до 10 мм) должно быть 3,5—4,5 % Al, а в остальных видах полуфабрикатов 4,5—6,3 % Al.

Во всех сплавах, содержащих Mo, допускается его замена W в количестве \leq 0,3 %.

Во всех сплавах, не содержащих Cr и Mn, последние допускаются как примеси в количестве \leq 0,15 (в сумме).

Дополнительное ужесточение содержания примесей, а также сужение пределов содержания легирующих элементов рассматриваются для конкретных видов полуфабрикатов.

55. Составы (в %) некоторых титановых сплавов [10, 12, 43]

| Сплав (СССР) | Зарубежный аналог | Al | Sn | V | Mo | Примечание |
|--------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|------------|
| BT5-1 | — | 4,3—6,0 | 2,0—3,0 | — | — | — |
| — | Ti317 | 5,0 | 2,5 | — | — | Англия |
| | Hylite-20 | 5,0 | 2,5 | — | — | Англия |
| | TA5E | 5,0 | 2,5 | — | — | Франция |
| | LT32 | 5,0 | 2,5 | — | — | ФРГ |
| | MST5AL2,5Sn | 5,0 | 2,5 | — | — | США |
| BT6 | — | 5,3—6,8 | — | 3,5—5,3 | — | — |
| ПТЗВ | — | 3,5—5,0 | — | 1,2—2,5 | — | — |
| — | Ti6Al4V | 6,0 | — | 4,0 | — | США |
| | Ti318A | 6,0 | — | 4,0 | — | Англия |
| | Hylite-45 | 6,0 | — | 4,0 | — | Англия |
| | Ta6V | 6,0 | — | 4,0 | — | Франция |
| | LT31 | 6,0 | — | 4,0 | — | ФРГ |
| BT16 | — | 1,8—3,8 | — | 4,0—5,5 | 4,5—6,5 | — |
| — | Ti4Al4Mo4V | 4,0 | — | 4,0 | 4,0 | США |
| OT4-1 | — | 1,0—2,5 | — | — | 0,7—2,0 | — |
| — | Hylite-30 | 2,0 | — | — | 2,0 | Англия |

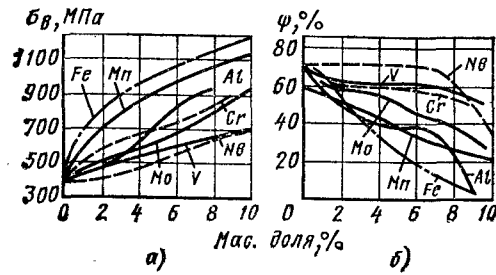


Рис. 5. Влияние легирующих элементов на механические свойства титана при 20—25 °С [25]

ющихся от равновесных, эвтектичного распада не происходит, а превращение идет по штриховой линии (рис. 4, в).

Большинство β-стабилизаторов, особенно V, Mo, Mn, Cr, повышают прочность при 20—25 °С и отрицательных температурах (рис. 5, 6), жаропрочность и термическую стабильность титановых сплавов, несколько снижая их пластичность (рис. 5).

Нейтральные элементы (Sn, Zr, Hf) мало влияют на температуру полиморфного превращения (рис. 4, г). Наибольшее практическое значение имеют олово и цирконий. Олово упрочняет титановые сплавы без заметного снижения пластичности, повышает жаропрочность; цирконий увеличивает предел ползучести и длительную прочность.

По технологии изготовления титановые сплавы подразделяются на деформируемые, литейные и порошковые, по механическим свойствам — на сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности. По способности упрочняться с помощью термической обработки они делятся на упрочняемые и неупроч-

няемые термической обработкой; по структуре в отожженном состоянии они классифицируются на α-, псевдо-α, α + β, псевдо-β и β-сплавы.

Сплавы с α-структурой. Физические свойства сплавов приведены в табл. 56, механические — в табл. 57. К этой группе сплавов относят и технический титан. Это сплавы нормальной прочности при 20—25 °С, обладающие высоким сопротивлением разрушению при повышенных (350—500 °С) и криогенных температурах (табл. 58, 59). Сплавы имеют высокую термическую стабильность свойств и обладают отличной свариваемостью. Они свариваются аргонодуговой, всеми видами контактной и электронно-лучевой сварки. При этом прочность сварного шва составляет 90 % прочности основного сплава. Обрабатываемость резанием удовлетворительная.

α-сплавы не упрочняются термической обработкой и применяются в отожженном состоянии. Режимы отжига представлены в табл. 60. Сплавы с цирконием наиболее технологичны, но это самые дорогие из α-сплавов. В горячем состоянии сплавы куют, прокатывают

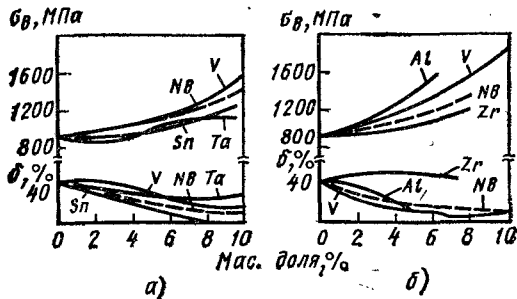


Рис. 6. Влияние легирующих элементов на механические свойства титана:
а — при -196 °С; б — при -253 °С [26]

56. Физические свойства титановых α- и псевдо-α-сплавов [32, 43]

| Свойства | Сплав | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | BT5 | BT5-1 | ПТ7М | OT4-1 | BT20 |
| ρ , г/см ³ | 4,4 | 4,46 | 4,49 | 4,55 | 4,45 |
| c , кДж/(кг·°С), при температуре, °С: | | | | | |
| 20 | — | 0,502 | — | — | — |
| 200 | 0,586 | 0,544 | 0,625 | 0,565 | 0,587 |
| 300 | 0,628 | 0,565 | 0,659 | 0,628 | 0,628 |
| 400 | 0,670 | 0,586 | 0,690 | 0,670 | 0,670 |
| 500 | 0,712 | 0,628 | — | 0,754 | 0,712 |
| 600 | 0,754 | 0,670 | — | — | 0,755 |
| λ , Вт/(м·°С), при температуре, °С: | | | | | |
| 20 | 3,79 | 2,51 | — | 9,63 | 8,0 |
| 100 | 2,63 | 2,63 | 9,3 | 10,47 | 8,8 |
| 200 | 10,47 | 10,88 | 10,5 | 11,30 | 10,2 |
| 300 | 11,30 | 12,14 | 11,9 | 12,14 | 10,9 |
| 400 | 12,56 | 13,14 | 13,3 | 14,24 | 12,2 |
| 500 | 14,24 | 14,65 | — | 14,65 | 13,8 |
| 600 | 15,49 | 15,91 | — | 16,32 | 15,1 |
| ρ_t , мкОм·м, при температуре, °С: | | | | | |
| 20 | 1,08 | 1,38 | 1,08 | 1,01 | 1,11 |
| 200 | 1,15 | — | 1,27 | — | — |
| 300 | 1,18 | — | 1,40 | — | — |
| 500 | 1,20 | — | 1,52 | — | — |
| 600 | 1,23 | — | — | — | — |
| $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ при температуре, °С: | | | | | |
| 20—100 | 8,3 | 8,3 | 8,8 | 8,0 | 8,3 |
| 100—200 | 8,9 | 9,3 | 8,9 | 8,0 | 8,3 |
| 200—300 | 9,5 | 9,7 | 9,2 | 9,1 | 9,0 |
| 300—400 | 10,4 | 10,0 | 9,4 | 9,6 | 9,2 |
| 400—500 | 10,6 | 10,3 | — | 9,7 | 9,3 |
| 500—600 | 10,8 | 10,4 | — | 9,8 | 9,5 |

57. Механические свойства α - и псевдо- α -титановых сплавов в отожженном состоянии [10, 12, 27, 43]

| Сплав | σ_b | | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | E, ГПа | σ_{10}^* | КСУ | КСТ | НВ, МПа |
|--------|------------|---------|----------------|----------|---------|---------|-----------------|-----|-----|-----------|
| | МПа | | | | | | | | | |
| BT5 | 750—950 | 700—800 | 10—14 | 25—40 | 105 | 450 | 0,3—0,5 | — | — | 2290—3210 |
| BT5-1 | 800—1000 | 700—850 | 10—15 | 25—40 | 105 | 420 | 0,45 | — | — | 2410—3210 |
| OT4-0 | 500—650 | 400 | 15 | 35 | 115 | 320 | 0,8 | — | — | 1560—2070 |
| OT4-1 | 600—750 | 500—600 | 20 | 30 | 110 | 340—360 | 0,5 | — | — | 1970—2550 |
| OT4 | 700—900 | 600—650 | 10—12 | 25 | 120 | 380—420 | 0,5 | — | — | 2070—2050 |
| BT20 | 950—1150 | 840 | 10 | 25 | 105—110 | 410 | 0,4—0,5 | — | — | 2550—3410 |
| ПТ7М*1 | 480—680 | 380—550 | 15—25 | 30—50 | 112 | — | 0,8—1,0 | — | — | — |
| ПТЗВ | 700—900 | 600 | 11 | — | 117—119 | 400 | 0,6—0,7 | — | — | — |

*1 То же для труб.

Примечание. В числителе приведены значения свойств для поковок, штампов, прутков, в знаменателе — листов (1—2 мм).

58. Пределы длительной прочности, выносливости и ползучести (в МПа) титановых сплавов [10, 12, 27, 43, 50]

| Сплав | при 300 °С | | | при 350 °С | | | при 400 °С | | |
|---------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|
| | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{*1} | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{*1} | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{*1} |
| | BT5 | 470 | — | — | 440 | 200 | — | 260 | 120 |
| BT5-1 | 560 | — | — | 540 | 380 | 350 | 460 | 180 | — |
| OT4 | — | 440 | — | 490 | 330 | 340 | 470 | 200 | 260 |
| OT4-1 | 440 | 230 | 300 | 340 | 260 | 260 | 290 | 190 | 200 |
| BT20 | — | — | — | 750 | 550 | 380 | — | — | — |
| ПТ7М | — | — | — | 290 | 240 | — | 230 | 180 | — |
| BT6 | 620 | 490 | — | 610 | 540 | 430 | 590 | 360 | 420 |
| BT3-1 | 800 | 635 | — | — | — | — | 600 | 500 | — |
| BT3-1*2 | 1020 | 785 | — | — | — | — | 930 | 588 | 390 |
| BT16 | 1000 | 490 | 330 | 600 | — | 460 | 470 | — | — |
| BT14*2 | — | — | — | 630 | 480 | 370 | 680 | 350 | — |
| BT9 | — | — | — | 790—820 | 590—620 | — | 780—800 | — | — |
| BT22 | 820 | 780 | 500 | 800 | 410 | — | 710 | 320 | — |

| Сплав | при 450 °С | | | при 500 °С | | | при 550 °С | | при 600 °С | |
|---------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{*1} | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{*1} | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ |
| | BT5 | 370 | — | — | 255 | 118 | — | — | — | — |
| BT5-1 | — | 196 | — | 200 | 78 | — | — | — | — | — |
| OT4 | 325 | 50 | — | 245 | — | — | — | — | — | — |
| OT4-1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT20 | 630 | 200 | — | 490 | 150 | 300 | 200 | — | — | — |
| ПТ7М | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT6 | 420 | 140 | 390 | 250 | 53 | — | — | — | — | — |
| BT3-1 | 550 | — | — | 360 | 75 | — | — | — | — | — |
| BT3-1*2 | 600 | 250 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT16 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT14*2 | 540 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT9 | 740—800 | 50 | — | 600—680 | 350—400 | 440 | 400 | 16 | 230 | 5,5 |
| BT22 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

*1 На базе 10^7 циклов.

*2 Закалка + старение.

59. Механические свойства титановых сплавов при низких температурах [12, 27, 32, 50, 57]

| Сплав | σ_B , МПа | | | | $\sigma_{0,2}$, МПа | | | | δ , % | | | | КСУ, мДж/м ² | | | |
|-------|------------------|---------|-----------|---------|----------------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|
| | 0 °С | -196 °С | -253 °С | -269 °С | 0 °С | -196 °С | -253 °С | -269 °С | 0 °С | -196 °С | -253 °С | -269 °С | 0 °С | -196 °С | -253 °С | -269 °С |
| BT5-1 | 950 | 1350 | 1350—1600 | 1700 | — | 1180 | 1370 | — | 15 | — | — | — | 0,6 | — | — | — |
| BT5 | 880 | 1225 | — | — | 685 | 980 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| OT4-0 | 775 | 1050 | — | — | 660 | 920 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| OT4-1 | 804 | 1128 | — | — | 755 | 1030 | — | — | 17,5 | — | — | — | — | — | — | — |
| OT4 | 853 | 1128 | — | — | 755 | 1033 | — | — | 16 | — | — | — | — | — | — | — |
| BT3-1 | 1180 | 1610 | 2050 | 2060 | 1030 | 1470 | — | — | 7,5 | — | — | — | — | — | — | — |
| BT6 | — | 1510 | 1860 | — | — | 1470 | 1910 | — | 3 | — | — | — | — | — | — | — |
| BT14 | — | 1650 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT20 | 1270 | 1410 | 1470 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT22 | 1270 | — | — | 1080 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT9 | 1410 | 1810 | 1225 | 1570 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

60. Температура отжига титана и деформируемых α - и псевдо- α -титановых сплавов [10, 26]

| Сплав | Температура полного отжига, °С | | Температура неполного отжига, °С |
|--------|---|-----------------------|----------------------------------|
| | Прутки, поковки, штамповки, трубы, профили и изделия из них | Листы и детали из них | |
| BT1-00 | 670—690 | 520—540 | 445—485 |
| BT1-0 | 670—690 | 520—540 | 445—485 |
| BT5 | 800—850 | — | 550—600 |
| BT5-1 | 800—850 | 700—750 | 550—600 |
| OT4-0 | 690—710 | 590—610 | 480—520 |
| OT4-1 | 740—760 | 640—660 | 520—560 |
| OT4 | 740—760 | 660—680 | 545—585 |
| BT20 | 700—850 | 700—800 *1 | 600—650 |
| PT7M | 700—750 | 650—700 | — |

*1 Допускается отжиг листовых деталей при 650—750 °С.

и штампуют. Из сплава ПТ7М изготовляют горяче- и холоднокатанные трубы. Сплавы поставляют в виде прутков сортового проката, поволоки, труб, проволоки. Они предназначены для изготовления деталей, работающих в широком диапазоне температур: от криогенных до 500 °С (табл. 59, 61, 76).

Псевдо- α -сплавы имеют преимущественно α -структуру и, вследствие дополнительного легирования β -стабилизаторами (Mn, V, Nb, Mo), — 1—5 % β -фазы. Благодаря наличию β -фазы они обладают хорошей технологической пластичностью при сохранении достоинств α -сплавов. Сплавы с низким содержанием алюминия (2—3 %) обрабатываются давлением в холодном состоянии и только при изготовлении деталей сложной формы подогреваются до 500—700 °С (OT4, OT4-1). Сплавы с большим содержанием алюминия при обработке давлением требуют подогрева до 600—800 °С. На жаропрочность сплавов помимо алюминия благоприятно влияют цирконий и кремний. Цирконий способствует увеличению растворимости β -стабилизаторов в α -фазе и повышает температуру рекристаллизации. Кремний повышает жаропрочность вследствие образования тонкодисперсных силицидов, трудно раство-

римых в α -фазе. Поэтому псевдо- α -сплавы с повышенным содержанием алюминия (7—8 %), легированные Zr, V, Mo, Nb, Si, используются в изделиях, работающих при наиболее высоких температурах.

Недостатком этих сплавов является склонность к водородной хрупкости. Водород мало растворим в α -фазе и присутствует в структуре в виде гидридной фазы, снижающей пластичность, особенно при медленном нагружении, и вязкость сплавов (см. табл. 48). Допустимое содержание водорода находится в пределах 0,01—0,005 % (табл. 49).

Двухфазные ($\alpha + \beta$)-сплавы. Физические свойства сплавов приведены в табл. 62, механические — в табл. 63 и на рис. 7—10. Сплавы легированы алюминием и β -стабилизаторами. Алюминий значительно упрочняет α -фазу при 20—25 °С и повышенных температурах, увеличивает термическую стабильность β -фазы, снижает плотность ($\alpha + \beta$)-сплавов, что позволяет удерживать ее на уровне титана, несмотря на присутствие элементов высокой плотности V, Mo, Cr, Fe, Nb. Наибольшее упрочнение достигается при легировании титана эвтектоидообразующими β -стабилизаторами Fe, Cr, Mn

61. Кратковременная прочность деформируемых сплавов и предельные температуры их эксплуатации [10, 32, 43, 63, 64]

| Сплав | Предельная температура эксплуатации, °C | | Кратковременная прочность, МПа | | | | | | | |
|----------|---|-----------------|--------------------------------|----------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--|
| | длительная | кратковременная | 200 °C | 300 °C | 400 °C | 500 °C | 600 °C | 700 °C | 800 °C | |
| | | | (при 350 °C) | | (при 350 °C) | | (при 350 °C) | | (при 350 °C) | |
| BT5 | 400 | 750 | 680 | 580 | 520 | 480 | 460 | 330 | 200 | |
| BT5-1 | 500 | 800 | 680 | 590 | 530 | 500 | 350 | — | — | |
| BT20 | 500 | 800 | 780 | 730 | 700 | 650 | 470 | — | — | |
| OT4 | 350 | 500 | 530 | 510 | 490 | 430 | 370 | — | — | |
| ПТ7М | 350 | 400 | 360 | 320 | 300 | — | — | — | — | |
| BT3-1 | 400 | 500 | 870 | 800 | 780 | 650 | 430 | — | — | |
| BT3-1 *1 | 450 | — | 1079 | 1030 | 930 | 830 | 520 | — | — | |
| BT9 | 550 | 700 | 1030 | 990 | 850 | 750 | 700 | 400 | 200 | |
| BT14 | 400 | 750 | 1050 | 1000 | 900 | 840 | 380—430 | 150 | — | |
| BT14 *1 | 400 | — | — | 940—1070 | 900— | — | — | — | — | |
| BT22 | 400 | 800 | 1280 | 1200 | 1150 | 1000 | 600 | — | — | |
| BT6 | 450 | — | 750 | 680 | 630 | 535 | — | — | — | |

*1 Закалка + старение.

и изоморфными Mo, V, Nb стабилизаторами. Ванадий и ниобий упрочняют сплавы слабее других, но и меньше

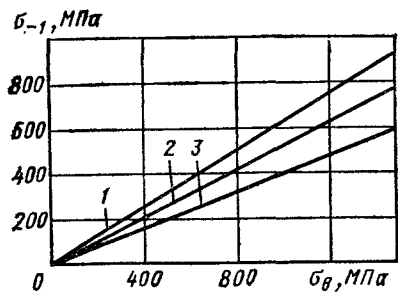


Рис. 7. Зависимость предела выносливости от временного сопротивления титановых сплавов:
1 — $\sigma_{-1} = 0,5\sigma_B$; 2 — $\sigma_{-1} = 0,6\sigma_B$; 3 — $\sigma_{-1} = 0,4\sigma_B$ [21]

снижают пластичность. Двухфазные сплавы упрочняются с помощью термической обработки — закалки и старения. В отожженном и закаленном состоянии они имеют хорошую пластичность, а после старения — высокую

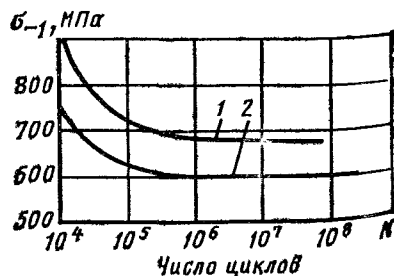


Рис. 8. Выносливость сплава BT6:
1 — в закаленном состоянии; 2 — в отожженном состоянии [2]

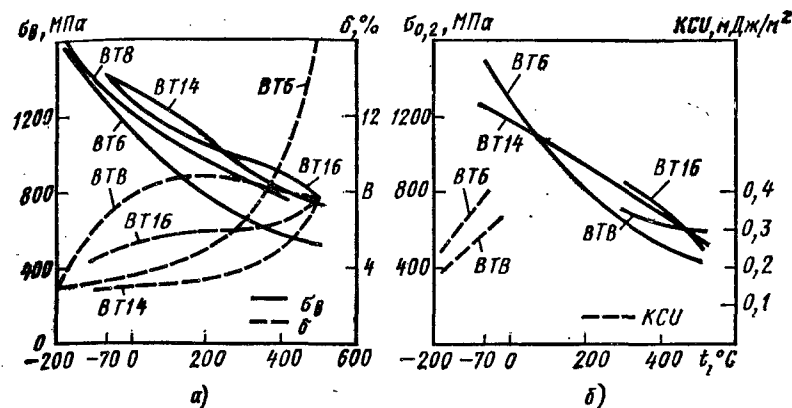


Рис. 9. Зависимость механических свойств титановых сплавов после закалки и старения от температуры испытания:
а — σ_B и δ ; б — $\sigma_{0,2}$ и KCU

прочность и жаропрочность. Режимы отжига этих сплавов приведены в табл. 64; режимы закалки и старения — в табл. 65; влияние температуры деформирования на свойства после термической обработки — в табл. 66; анизотропия механических свойств после различных видов термической обработки представлена в табл. 67. Чем больше β -фазы содержится в структуре сплава, тем он прочнее в отожженном состоянии и сильнее упрочняется при термической обработке.

По структуре после закалки двухфазные сплавы подразделяют на два класса: мартенситный и переходный. Сплавы мартенситного класса менее легированы и в равновесном состоянии содержат сравнительно немного β -фазы (5—25%). В результате закалки образуется структура мартенсита α' (или α'' — в более легированных сплавах). К этому классу относятся высокопрочные сплавы BT6, BT14, BT16 и жаропрочные сплавы BT8, BT9, BT3-1. Сплавы переходного класса содержат больше легирующих элементов и соответственно больше β -фазы (25—50%) в равновесной структуре, чем сплавы мартенситного класса. Структура этих сплавов чувствительна к колебаниям химического состава и режимам термической обработки (табл. 68). Так, после закалки в этих сплавах

можно получить однофазную структуру переохлажденной β -фазы или структуру, состоящую из этой фазы и мартенсита α'' . Наличие большого количества β -фазы обеспечивает сплавам переходного класса самую высокую прочность среди $(\alpha + \beta)$ -сплавов. Например, сплав BT22 (50% β -фазы) имеет после отжига такое же временное сопротивление, как сплав BT6 после закалки и старения.

Двухфазные сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием и

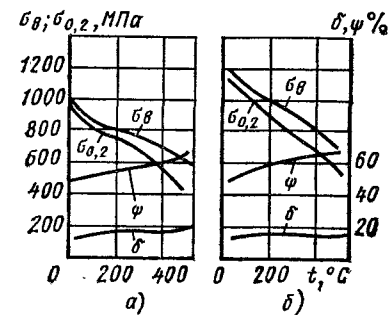


Рис. 10. Механические свойства сплава BT6 после различных режимов термической обработки в зависимости от температуры испытания:
а — отжиг при 700 °C, охлаждение на воздухе; б — закалка с 950 °C (охлаждение в воде + старение при 500 °C, 8 ч) [2]

62. Физические свойства ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов [32, 43]

| Свойства | Сплав | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| | BT6 | BT14 | BT3-1 | BT8 | BT22 |
| ρ , г/м ³ | 4,43 | 4,52 | 4,5 | 4,48 | 4,6 |
| α , кДж/(кг·°C), при температуре, °C: | | | | | |
| 20 | — | — | — | — | — |
| 200 | 0,586 | 0,544 | 0,502 | 0,502 | 0,565 |
| 300 | 0,670 | 0,586 | 0,544 | 0,586 | 0,586 |
| 400 | 0,712 | 0,628 | 0,628 | — | 0,649 |
| 500 | 0,795 | 0,670 | 0,670 | 0,628 | 0,712 |
| 600 | 0,879 | 0,712 | 0,712 | 0,670 | — |
| λ , Вт/(м·°C), при температуре, °C: | | | | | |
| 20 | 8,37 | 8,37 | 8,01 | 1,12 | 8,32 |
| 100 | 9,21 | 9,21 | 8,79 | 8,37 | 9,21 |
| 200 | 10,88 | 10,47 | 10,04 | 2,63 | 10,5 |
| 300 | 11,70 | 11,72 | 11,3 | 11,3 | 11,7 |
| 400 | 12,56 | 12,92 | 12,92 | 12,56 | 13,4 |
| 500 | 13,82 | 13,82 | 14,24 | 14,24 | 14,6 |
| 600 | 15,49 | — | 15,49 | 15,49 | 15,9 |

63. Механические свойства полуфабрикатов из ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов [10,

| Сплав | Полуфабрикат | После отжига | | | | | |
|-------|--------------|------------------|----------|--------|-----------|---------------|---------|
| | | σ_B , МПа | δ | ψ | НВ | σ_{-1} | КСУ |
| | | | % | | | | |
| BT3-1 | Штамповка | 1040—1118 | 14—20 | 45—60 | 2690—3630 | 400—500 | 0,3—0,4 |
| | Пруток | 1000—1250 | 12 | 32—35 | — | — | 0,3 |
| BT6 | Штамповка | 950—1100 | 10—13 | 35—60 | 2550—3410 | 300 | 0,4—0,8 |
| | Пруток | 900—1100 | 8—20 | 20—45 | — | 400 | 0,4 |
| BT9 | Штамповка | 1100—1300 | 8—14 | 25—45 | — | 540 | 0,2—0,5 |
| | Пруток | 1050—1250 | 12 | 28—30 | — | — | 0,3 |
| BT14 | Штамповка | 850—900 | 10—15 | 35—60 | 2550—3410 | 400 | 0,5—0,9 |
| | Лист, 1—2 мм | 900—1070 | 8—10 | — | — | — | — |
| BT16 | Лист, 1—2 мм | 840—1250 | 12—22 | — | — | — | — |
| BT22 | Пруток | 1100 | 10 | 20 | 2850 | 530 | 0,4 |

Продолжение табл. 62

| Свойства | Сплав | | | | |
|---|-------|------|-------|------|------|
| | BT6 | BT14 | BT3-1 | BT8 | BT22 |
| ρ_i , мкОм·м, при температуре, °C: | | | | | |
| 20 | 1,6 | — | 1,36 | 1,61 | 1,53 |
| 200 | 1,82 | — | — | — | — |
| 300 | 2,02 | — | — | — | — |
| 500 | 2,12 | — | — | — | — |
| 600 | 2,14 | — | — | — | — |
| $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻² , при температуре, °C: | | | | | |
| 20—100 | 8,4 | 8,0 | 8,6 | 8,3 | 8,0 |
| 100—200 | 8,7 | 8,2 | 9,8 | 8,6 | 8,2 |
| 200—300 | 9,0 | 8,5 | 10,3 | 8,7 | 8,4 |
| 300—400 | 10,0 | 8,8 | 10,9 | 8,8 | 8,6 |
| 400—500 | — | 8,9 | 11,4 | 9,0 | 8,8 |
| 500—600 | — | 8,7 | — | 9,1 | — |

12, 27, 43, 63]

| Сплав | Полуфабрикат | После закалки и старения | | | | | | | | |
|-------|--------------|--------------------------|---------------------------------|------------------|----------|--------|--------|-----------|---------|------|
| | | КСУ | K_{1c} , МПа·м ^{1/2} | σ_B , МПа | δ | ψ | E, ГПа | НВ, МПа | КСУ | КСУ |
| | | | | | % | | | | | |
| BT3-1 | Штамповка | 0,75 | — | 1150—1220 | 10—12 | 32—48 | 115 | 3020—4150 | — | 0,1 |
| | Пруток | 0,35 | 55—67 | — | — | — | — | — | — | 0,25 |
| BT6 | Штамповка | 0,2 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Пруток | 0,35—0,4 | 80,5—90,0 | 1100—1250 | 6 | 20 | 115 | 2930—3610 | 0,3 | 0,25 |
| BT9 | Штамповка | 0,15 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Пруток | — | 80,0—81,5 | 1200 | 6 | 20 | 118 | — | 0,3—0,5 | — |
| BT14 | Штамповка | 0,20 | — | 1250—1300 | 6—15 | 20—40 | 110 | 3020—3880 | 0,5 | 0,2 |
| | Лист, 1—2 мм | — | — | 1200—1400 | — | — | 110 | — | — | — |
| BT16 | Лист, 1—2 мм | — | — | 1300—1400 | 5—6 | — | 110 | 3020—4150 | 0,4—0,6 | — |
| | Пруток | 0,3 | 69,5 | 1400 | — | — | — | — | — | — |

64. Режимы отжига ($\alpha + \beta$)-сплавов (прутки, поковки, штамповки, профили, трубы и изделия из них) [10, 26]

| Сплав | t отжига, °C | | Изотермический отжиг | | |
|-------|----------------|-----------|----------------------|-------------|-----------------------|
| | полного | неполного | t_1 , °C | t_2 , °C | τ , ч, при t_2 |
| BT6 | 750—800 | 600—650 | 800—850 | 750 или 500 | 0,5 |
| | 750—800 | 600—650 | — | — | — |
| BT9 | 950—980 | 530—620 | 950—980 | 530—580 | 6 |
| BT3-1 | 800—850 | 530—620 | 870—920 | 600—650 *1 | 2 |
| BT14 | 740—760 | 550—650 | 790—810 | 640—660 | 0,5 |
| | 740—760 | 550—650 | — | — | — |
| BT16 | 770—790 | 550—650 | 770—790 | 500 *2 | — |
| | 730—770 | 550—650 | — | — | — |
| BT22 | 720—780 | 550—650 | 650—750 | 350 *3 | — |
| | 740—760 | 550—650 | — | — | — |

*1 Охлаждение на воздухе.

*2 То же с t_1 до t_2 со скоростью 2—4 °C/мин, далее на воздухе.

*3 То же с t_1 до t_2 с печью, далее на воздухе.

Примечание. В знаменателе — режим отжига листов.

65. Режимы упрочняющей термической обработки (среда охлаждения — вода) ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов (прутки, поковки, штамповки, трубы, профили и изделия из них) [26]

| Сплав | t закалки, °C | Старение | | Сплав | t закалки, °C | Старение | |
|-------|-----------------|----------|------------|-------|-----------------|----------|------------|
| | | t , °C | τ , ч | | | t , °C | τ , ч |
| BT3-1 | 860—900 | 500—620 | 1—6 | BT14 | 870—910 | 480—560 | 8—16 |
| BT6 | 900—950 | 450—550 | 2—4 | BT16 | 810—830 | 560—580 | 8—10 |
| BT9 | 920—940 | 500—600 | 1—6 | BT22 | 690—750 | 480—540 | 8—16 |

66. Влияние температуры деформирования на механические свойства титановых сплавов BT3-1 и BT22 [17]

| Сплав | Термическая обработка после деформирования | Температура деформирования, °C | Механические свойства | | | | | | |
|-------|---|--------------------------------|-----------------------|----------------|----------|--------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| | | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCT , МДж/м ² | K_{100} , МПа·мм | KCU , МДж/м ² |
| | | | МПа | | % | | | | |
| BT3-1 | 900 °C, 1 ч, охлаждение с печью до 630 °C, 1 ч, воздух | 980 | 1100 | 1060 | 14 | 29 | 0,235 | 3080 | — |
| | | 1030 | 1080 | 1050 | 13 | 26 | 0,324 | 2550 | — |
| | 900 °C, 1 ч, охлаждение — воздух + старение 550 °C, 5 ч | 980 | 1140 | 1100 | 14 | 31 | — | 2550 | — |
| | | 1030 | 1190 | 1160 | 10 | 19 | 0,33 | 2310 | — |
| | 850 °C, 1 ч, охлаждение — вода + старение 550 °C, 5 ч | 980 | 1310 | 1240 | 5 | 12 | 0,108 | 1770 | — |
| | | 1030 | 1250 | 1210 | 5 | 11 | 0,137 | 2015 | — |
| BT22 | 750 °C, 1 ч, охлаждение — вода + старение 575 °C, 8 ч | 850 | 1260 | 1230 | 12 | 48 | — | — | 0,30 |
| | | 950 | 1310 | 1270 | 7,7 | 20 | — | — | 0,27 |
| | | 1050 | 1310 | 1270 | 9,5 | 10,6 | — | — | 0,20 |

67. Анизотропия механических свойств титановых сплавов [17]

| Сплав | Термическая обработка | Механические свойства | | | |
|-------|---------------------------|-----------------------|----------------|--------------|----------------------------|
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ , % | KCT , МДж/м ² |
| | | МПа | | | |
| OT4 | Отжиг 550 °C, 1 ч, воздух | 760 | 726 | 15 | 0,88 |
| | | 785 | 652 | 16,5 | 0,45 |
| BT3-1 | Отжиг 800 °C, 20 мин | 1070 | 1000 | 15 | 0,363 |
| | | 1120 | 1095 | 11,8 | 0,412 |

Продолжение табл. 67

| Сплав | Термическая обработка | Механические свойства | | | |
|--|---|-----------------------|----------------|--------------|---------------------------------|
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | $K_{CT},$ МДж/м ² |
| | | МПа | | | |
| BT3-1 | Закалка 920 °С, 20 мин, вода | 1095 | 608 | 13,7 | 0,177 |
| | | 1140 | 680 | 12,8 | 0,167 |
| BT3-1 | Закалка 920 °С, 20 мин, вода + старение 520 °С, 10 ч | 1440 | — | 4,4 | 0,039 |
| | | 1510 | — | 3,1 | 0,031 |
| BT14 | Отжиг 850 °С, охлаждение с печью до 650 °С, воздух | 950 | — | 11 | 0,50 |
| | | 870 | — | 13 | 0,33 |
| | Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух | 824 | 735 | 14 | 0,47 |
| | | 873 | 873 | 7 | 0,882 |
| Закалка 880 °С, 20 мин, вода + старение 480 °С, 16 ч | 1275 | 1170 | 2,2 | 0,108 | |
| | 1375 | 1280 | 4,9 | 0,137 | |
| BT22 | Отжиг 730 °С, 30 мин, вакуум | 940 | 883 | 16,0 | 0,1350 |
| | | 1080 | 1060 | 17,6 | 0,1510 |
| | Отжиг 800 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 350 °С, воздух | 1010 | — | 12,6 | 0,236 |
| | | 1060 | — | 8,1 | 0,167 |
| | Отжиг 800 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 650 °С, воздух | 1000 | — | 13 | 0,235 |
| | | 1070 | — | 11 | 0,167 |
| Закалка 750 °С, 15 мин, вода + старение 500 °С, 16 ч | 1360 | — | 7,5 | 0,098 | |
| | 1480 | — | 3,7 | 0,049 | |
| Закалка 750 °С, 15 мин, вода + старение 550 °С, 16 ч | 1290 | — | 12,6 | 0,137 | |
| | 1345 | — | 8,1 | 0,088 | |
| BT5-1 | Отжиг 750 °С, 20 мин, воздух | 874 | 810 | 20 | 0,902 |
| | | 868 | 820 | 12,6 | 1,45 |
| | Отжиг 750 °С, 1 ч, вакуум | 825 | 745 | 22,3 | 0,981 |
| | | 815 | 760 | 18,5 | 1,52 |
| | Закалка 950 °С, 20 мин, вода | 912 | 755 | 17 | 0,91 |
| 804 | | 755 | 19,3 | 1,45 | |

Примечание. В числителе приведены значения параметров для продольных образцов, в знаменателе — для поперечных.

68. Влияние термической обработки на механические свойства титановых сплавов [17]

| Сплав | Термическая обработка | Механические свойства | | | |
|-------|---|--|----------------|--------------|---------------------------------|
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $\delta, \%$ | $K_{CT},$ МДж/м ² |
| | | МПа | | | |
| BT14 | Отжиг 750 °С, 1 ч, охлаждение — воздух | 1080 | 1040 | — | 0,255 |
| | | Закалка 880 °С, 30 мин + старение 480 °С, 16 ч | 1370 | 1275 | 5 |
| | Закалка 880 °С, 30 мин + старение 510 °С, 16 ч | | 1060 | 1010 | 12,5 |
| BT3-1 | Отжиг 750 °С, 1 ч | 880 | 800 | 8 | 0,88 |
| | Отжиг 800 °С, 20 мин | 1120 | 1095 | 11,8 | 0,412 |
| | Закалка 920 °С, 20 мин | 1140 | 680 | 12,8 | 0,167 |
| | Закалка 920 °С, 20 мин + старение 520 °С, 10 ч | 1510 | — | 3,1 | 0,31 |
| BT22 | Отжиг 750 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 350 °С, затем на воздухе | 1080 | 1000 | — | 0,147 |
| | | Отжиг 800 °С, 15 мин, охлаждение с печью до 350 °С, затем на воздухе | 1060 | — | 8,1 |
| | Закалка 750 °С, 15 мин + старение 500 °С, 16 ч | | 1480 | — | 5,3 |
| | | Закалка 750 °С, 15 мин + старение 550 °С, 16 ч | 1345 | — | 3,7 |

свариваются. После сварки требуется отжиг для повышения пластичности сварного шва. Они менее склонны к водородной хрупкости, чем α - и псевдо- α -сплавы, так как водород обладает большей растворимостью в β -фазе (см. табл. 49). Двухфазные сплавы куются, штампуются и прокатываются легче, чем сплавы с α -структурой. Они поставляются в виде поковок, штамповок, прутков, листов, ленты. Технологические свойства и области применения сплавов представлены в табл. 69.

Однофазные β -сплавы не имеют промышленного значения, так как для получения устойчивой β -структуры сплавы должны быть легированы большим количеством изоморфных β -стабилизаторов (V, Mo, Nb, Ta) — дорогих, дефицитных и обладающих высокой плотностью.

Псевдо- β -сплавы. Это высоколегированные в основном β -стабилизаторами сплавы. Суммарное количество легирующих элементов в них, как правило, превышает 20%. Наиболее часто их легируют Mo, V, Cr, реже Fe, Zr, Sn. Алюминий присутствует почти во всех сплавах в небольшом количестве (~3%). В равновесном состоянии они имеют в основном β -структуру и небольшое количество α -фазы.

После закалки имеют структуру переохлажденной метастабильной β' -фазы, обеспечивающей высокую пластичность сплавам ($\delta = 12 \div 40\%$, $\psi = 30 \div 60\%$) и хорошую обрабатываемость давлением; $\sigma_v \approx 650 \div 1000$ МПа. При старении сплавов временное сопротивление увеличивается приблизительно в 1,5 раза и достигает 1300—1800 МПа. Плотность сплавов находится в интервале 4,9—5,1 г/м³, а удельная прочность, самая высокая среди титановых сплавов, превышает 30 км. Сплавы обладают низкой склонностью к водородной хрупкости, но чувствительны к примесям — кислороду и углероду, вызывающим снижение пластичности и вязкости; сварные швы имеют пониженную пластичность; термическая стабильность низкая. Наибольшее распространение в промышленности получил сплав BT15 (~3% Al, ~8% Mo и 11% Cr). Этот сплав выпускается в виде полос, листов,

прутков, поковок и рекомендуется для длительной работы при температуре до 350 °С.

Литейные титановые сплавы. Небольшой температурный интервал кристаллизации обеспечивает высокую жидкотекучесть и плотность отливок из титановых сплавов. Они отличаются малой склоиностью к образованию горячих трещин; линейная усадка 1%; объемная усадка 3%.

Плавку и заливку сплавов на основе титана осуществляют в среде нейтральных газов или в вакууме в связи с их высокой химической активностью при нагреве.

Отливки изготовляют методом фасонного литья в чугунные, стальные и специальные формы. Для получения высококачественных сложных титановых отливок необходим комплексный подход к выбору оптимальных режимов литья как при плавке и заливке металла, так и при формировании отливки в литейной форме.

Литейные сплавы обладают более низкими механическими свойствами, чем соответствующие деформируемые. Упрочняющая термическая обработка не применяется, так как резко снижает пластичность сплавов.

Химический состав и механические свойства литейных титановых сплавов приведены в табл. 70 и 71.

Порошковые титановые сплавы. Высокая стоимость изготовления и трудность механической обработки сплавов на основе титана являются серьезным препятствием на пути их широкого применения. Методы порошковой технологии позволяют повысить коэффициент использования металла путем уменьшения отходов при механической обработке и открывают потенциальные возможности получения готовых деталей для конструкций летательных аппаратов и двигателей.

Получение порошков из сплавов на основе титана является сложной проблемой вследствие вредного влияния различных примесей. Высокая химическая активность расплавленного титана исключает применение большинства огнеупоров в качестве материала для тиглей.

Использование современных методов получения легированных порошков ду-

69. Технологические свойства и область применения титановых сплавов [12, 43, 44, 64]

| Сплав | Класс прочности | Технологические свойства | | | | Область применения |
|--------|------------------------------|--------------------------|--|---------------|---------------------|---|
| | | Термическая обработка | Пластичность | Свариваемость | Обработка безанемом | |
| BT1-00 | Малопрочные высокопластичные | Неупрочняемые | Высокая | Хорошая | Удовлетворительная | Слабонагруженные детали сложной конфигурации, работающие при температуре от -253 °С до 150 °С |
| | | | | | | |
| BT-0 | | | | | | Отличная |
| OT4-0 | | | | | | Хорошая |
| OT4-1 | | | | | | — |
| OT4 | Среднепрочные | | В горячем состоянии хорошая, в холодном удовлетворительная | Хорошая | Хорошая | Детали сложной конфигурации, работающие длительно при температуре 300—350 °С и временно при температуре до 500—600 °С |
| BT5 | | | | | | Тонкостенные детали сложной формы, работающие длительно до температуры 300 °С (3000 ч) и 350 °С (2000 ч) |
| BT5-1 | | | | | | Детали, длительно работающие до температуры 350—400 °С |
| | | | В горячем состоянии хорошая | | | Сварные детали, работающие при температуре от -253 до 400 °С |
| | | | В горячем состоянии хорошая | | | Штампованные детали и узлы, работающие до 450 °С |

Продолжение табл. 69

| Сплав | Класс прочности | Технологические свойства | | | | Коррозионная стойкость | Область применения |
|-------|-----------------|--------------------------|--|--------------------|--------------------|------------------------|--|
| | | Термическая обработка | Пластичность | Свариваемость | Обработка резаньем | | |
| BT20 | Среднепрочные | Неупрочняемые | В горячем состоянии хорошая | Хорошая | Удовлетворительная | Хорошая | Детали, длительно работающие до 500 °С |
| ПТ7М | | | Хорошая | | — | | Трубы и другие тонкостенные сварные детали |
| BT3-1 | Высокопрочные | Упрочняемые | В горячем состоянии хорошая | Удовлетворительная | Хорошая | — | Кованые и штампованные детали, работающие при температуре до 400 °С (6000 ч) и 450 °С (2000 ч) |
| BT6 | | | | Хорошая | — | — | Штампованные детали, длительно работающие до температуры 400—450 °С |
| BT14 | | | | — | — | — | Детали, длительно работающие до температуры 400 °С |
| BT16 | | | Хорошая | Хорошая | — | — | Крепежные и резьбовые детали диаметром 40 мм, работающие до температуры 350 °С |
| BT22 | | | — | — | — | — | Детали, длительно работающие при 350 °С (2000 ч) |
| BT9 | | | В горячем состоянии удовлетворительная | Хорошая | Хорошая | — | Детали, работающие до температуры 500 °С |

70. Химический состав литейных титановых сплавов [43]

| Сплав | Легированные элементы, % | | | | | | | | | | |
|--------|--------------------------|----|---------|---------|---------|---------|----|-----------|----|---|---------|
| | Al | Mn | Mo | V | Zr | Cr | Sn | Si | Fe | W | Прочие |
| BT1Л | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT5Л | 4,1—6,2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT6Л | 5,0—6,5 | — | — | 3,5—4,5 | — | — | — | — | — | — | — |
| BT3-1Л | 5,3—7,0 | — | 2,0—3,0 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT9Л | 5,6—7,0 | — | 2,8—3,8 | — | 0,8—2,0 | 0,8—2,3 | — | 0,15—0,4 | — | — | 0,2—0,7 |
| BT14Л | 4,3—6,3 | — | 2,5—3,8 | 0,9—1,9 | — | — | — | 0,20—0,35 | — | — | — |

| Сплав | Примесь, % не более | | | | | | | | | | |
|--------|---------------------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|--|--|
| | C | Fe | Si | Zr | W | O | N | H | Прочие | | |
| BT1Л | 0,15 | 0,3 | 0,15 | — | 0,20 | 0,20 | 0,05 | 0,015 | 0,3 | | |
| BT5Л | 0,20 | 0,95 | 0,20 | 0,80 | 0,20 | 0,20 | 0,05 | 0,015 | 0,3 | | |
| BT6Л | 0,10 | 0,3 | 0,15 | 0,30 | 0,20 | 0,15 | 0,05 | 0,015 | 0,3 | | |
| BT3-1Л | 0,15 | — | — | 0,50 | 0,20 | 0,18 | 0,05 | 0,015 | 0,3 | | |
| BT9Л | 0,15 | 0,30 | — | — | 0,20 | 0,15 | 0,05 | 0,015 | 0,3 | | |
| BT14Л | 0,12 | 0,6 | 0,15 | 0,30 | 0,20 | 0,15 | 0,05 | 0,015 | 0,3 | | |

Примечания: 1. Во всех марках сплавов количество титана определяется по разности до 100 %.

2. В техническом титане BT1Л допускается не более 0,7 % Al.

3. В сплаве BT5Л допускается не более 0,8 % Mo и не более 1,2 % V.

4. В сплаве BT14Л допускается до 0,6 % Cr.

5. Во всех сплавах, содержащих в качестве легирующего элемента Mo, допускается частичная замена его W в количестве не более 0,3 %.

71. Механические свойства литейных титановых сплавов [10, 43]

| Сплав | t, °C | E, ГПа | σ_B , МПа | δ , % | KCU, МДж/м ² | σ_{-1} , МПа * |
|--------|-------|--------|------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|
| BT5Л | -70 | — | 850 | 10 | 0,15 | — |
| | 20 | 118 | 800 | 6 | 0,3 | 280 |
| | 300 | 105 | 400 | 8 | — | — |
| | 400 | 93 | 350 | 10 | — | — |
| BT6Л | 20 | 115 | 880 | 4 | 0,3 | 200 |
| | 200 | — | 600 | 4 | — | — |
| | 300 | 95 | 550 | 5 | — | — |
| | 400 | 91 | 500 | 5 | — | — |
| BT14Л | 20 | 113 | 950 | 7 | 0,35 | 270 |
| | 300 | 97 | 630 | 8 | — | — |
| | 400 | 95 | 550 | 8 | — | — |
| BT3-1Л | -70 | — | 1100 | 3 | — | — |
| | 20 | 114 | 990 | 4 | 0,3 | 220 |
| | 400 | — | 730 | 9 | — | — |
| | 450 | 92 | 680 | 10 | — | — |
| | 500 | 88 | 630 | 10 | — | — |
| BT9Л | 20 | 103 | 1030 | 4 | 0,25 | 180 |
| | 300 | 90 | 710 | 4 | — | — |
| | 400 | 88 | 650 | 7 | — | — |
| | 500 | 82 | 570 | 8 | — | — |
| BT20Л | -70 | — | 1100 | 5 | — | — |
| | 20 | 108 | 980 | 8 | 0,3 | 200 |
| | 300 | — | 670 | 10 | — | — |
| | 350 | 93 | 630 | 10 | — | — |
| | 400 | — | 610 | 10 | — | — |
| | 500 | 81 | 560 | 12 | — | — |

*1 2·10⁷.

говой плавкой с вращающимся анодом и неподвижным вольфрамовым катодом, электроплазменной плавкой либо распылением в вакууме и других позволяет исключить загрязнения. Повышение качества полуфабрикатов и готовых деталей сложной формы может быть достигнуто в результате использования новых прогрессивных методов, таких, как горячее компактирование гранул, горячее изостатическое прессование легированных порошков (ГИП).

с последующим спеканием в вакууме и др.

Несмотря на определенные сложности и недостатки (пористость, наличие неметаллических включений и примесей), ухудшающих качество изделий из порошковых сплавов на основе титана, преимущество порошковой металлургии, особенно в ее новом варианте, очевидно.

Для изготовления деталей методами порошковой технологии используют

72. Механические свойства порошковых сплавов на основе титана [4]

| Сплав | t спекания, °C | τ , ч | σ_B , МПа | δ , % |
|-------|----------------|------------|------------------|--------------|
| BT5 | 1300 | 3 | 590—690 | 0,7—6,3 |
| | 1300 | 4 | 620—730 | 2,4—6,9 |
| | 1400 | 3 | 770—810 | 0,8—3,8 |
| | 1400 | 4 | 650—830 | 1,2—4,8 |
| BT5-1 | 1300 | 3 | 450—710 | 0 |
| | 1300 | 4 | 620—720 | 0 |
| | 1400 | 3 | 400—680 | 0 |
| | 1400 | 4 | 630—700 | 0 |
| OT4 | 1300 | 4 | 700—720 | 8—12 |
| BT6 | 1300 | 4 | 740 | 4,4 |

сплавы BT5, BT5-1, OT4, BT3-1 и др. Свойства порошковых сплавов приведены в табл. 72 и 73. Из зарубежных сплавов весьма перспективными являются сплав Ti-6Al-4V и особенно Корона-5, обладающий высокой вязкостью разрушения.

Химический состав и механические свойства некоторых зарубежных сплавов приведены в табл. 74, 75.

Механические свойства порошковых материалов зависят от их плотности (табл. 76).

73. Кратковременная прочность литого и порошкового сплава BT3-1 [4]

| t, °C | BT3-1Л | | BT3-1 порошок | |
|-------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа |
| 200 | 880 | 720 | 970 | 810 |
| 350 | 810 | 650 | 960 | 800 |
| 400 | 790 | 620 | 900 | 780 |
| 450 | 740 | 590 | 890 | 750 |
| 500 | — | — | 700 | 630 |

Применение титановых сплавов. В авиационной, ракетостроительной — каркасные детали, обшивка, топливные баки, детали реактивных двигателей, диски и лопатки компрессоров, детали воздухозаборника, детали корпусов ракетных двигателей второй и третьей ступени и т. д.

В судостроении — обшивка корпусов судов и подводных лодок, сварные трубы, гребные винты, детали насосов и др.

В химической промышленности: реакторы для агрессивных сред, насосы, емкостные аппараты, центрифуги и др.

В гальванотехнике: ванны для хромирования, анодные корзины, теплообменники, трубопроводы, подвески и др.

В газовой и нефтяной промышленности: фильтры, седла клапанов, резервуары, отстойники и др.

В криогенной технике: детали холодильников, насосов компрессоров, теплообменники и др.

В пищевой промышленности: сепараторы, холодильники, емкости для продуктов, цистерны и др.

В медицинской промышленности: инструмент, хирургические и внутренние протезы, внутрикостные фиксаторы, зажимы и др.

74. Химический состав (в %) некоторых зарубежных порошковых титановых сплавов [41]

| Сплав | Al | V | Sn | Zr | Mo | Cr | Bi | Cu | Si | Fe |
|-----------|----------|---------|------|-----|----|-----|------|-----|-----|------|
| Ti-6Al-4V | 5,5—6,75 | 3,5—4,5 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Ti11 | 6 | — | 2 | 1,5 | 1 | — | 0,35 | — | 0,1 | — |
| Ti662 | 5,5—5,6 | 5,7—5,9 | 2,25 | — | — | — | — | 0,6 | — | 0,65 |
| Ti6246 | 6 | — | 2 | 4 | 6 | — | — | — | — | — |
| Корона-5 | 4,5 | — | — | — | 5 | 1,5 | — | — | — | — |

75. Механические свойства некоторых зарубежных порошковых титановых сплавов [41]

| Сплав | Режим термической обработки | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | K_{10^3} МПа·м ^{1/2} |
|-----------|-----------------------------|------------|----------------|----------|--------|------------------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Ti-6Al-4V | Отжиг | 950 | 880 | 10 | 23 | 93 |
| Корона-5 | Отжиг | 999 | 940 | 13 | — | 75 |
| Ti6246 | Ковка + отжиг | 1200 | 1075 | 8 | 9 | 52 |
| Ti662 | Отжиг | 1045 | 967 | 20 | 33 | — |
| | Закалка + старение | 1100 | 1020 | 17 | 26 | — |

Примечание. Метод получения — горячее изостатическое прессование.

76. Механические свойства спеченного, спеченого и ковального технического титана и сплава Ti-6Al-4V [41]

| Сплав | Спеченный (плотность 94 %) | | | | Спеченный и ковальный (плотность 100 %) | | | |
|--|----------------------------|----------------|----------|--------|---|----------------|----------|--------|
| | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
| | МПа | | % | | МПа | | % | |
| Технический титан (0,12 % O ₂) | 430 | 340 | 15 | 23 | 455 | 365 | 23 | 30 |
| Сплав Ti-6Al-4V (0,12 % O ₂) | 830 | 740 | 5 | 8 | 920 | 840 | 11 | 24,7 |

4. БЕРИЛЛИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Бериллий — химический элемент II группы Периодической системы; атомный вес 9,013, температура плавления 1283 °С, плотность 1,860 г/см³, модуль упругости $E = 284\,000 \pm 294\,000$ МПа. Теплофизические свойства бериллия приведены в табл. 77.

Бериллий обладает эффективным сечением захвата тепловых нейтронов, большой проникаемостью для мягкого рентгеновского излучения (в 17 раз больше, чем у алюминия), высокой отражательной способностью, малым коэффициентом линейного расширения, хорошей коррозионной стойкостью, сравнительно высокой прочностью, но низкой пластичностью. Бериллий имеет уникальный модуль упругости. Если для большинства металлов и промышленных сплавов (за исключением сплавов типа 1420) значение удельного модуля упругости $E/(\rho g)$ колеблется в пределах (2,3—2,6) 10^3 км, то удельный модуль упругости бериллия достигает $16,6 \cdot 10^3$ км, а сплавов бериллия с алюминием и магнием $10,5 \cdot 10^3$ км (табл. 78). Наряду с ценными техническими свойствами бериллий и его соединения обладают резко выраженными токсическими свойствами. Наиболее токсичными являются химические соединения бериллия, особенно хлористые и фтористые. Аэрозоли и мелкодисперсные частицы бериллия, его сплавов и соединений воздей-

ствуют на дыхательные пути и могут привести к заболеванию бериллезом, а их попадание на кожу может вызвать поражение кожного покрова и слизистых оболочек (дерматиты, экземы, конъюнктивиты). В компактном виде бериллий безвреден. В окружающей среду частицы бериллия могут попадать при плавке, изготовлении порошков, обработке резанием, сварке, шлифовании, полировании. Предельно допустимое содержание бериллия в воздушной среде производственных помещений — 0,001 мг/м³ [6]. Сочетание высокого модуля упругости, теплопроводности и теплоемкости, малой плотности и других характеристик обусловили применение бериллия и его сплавов в ряде изделий авиационной техники, в том числе для тормозов самолетов и теплозащитных экранов при вхождении возвращаемых летательных аппаратов в плотные слои атмосферы, в приборах, в зеркалах, замедлителях и отражателях тепловых нейтронов, материалах оболочек теплоделяющих элементов атомных реакторов.

В таких конструкциях, как системы и введения, тормоза и зеркала бериллий не имеет конкуренции и может превосходить по эффективности использования даже лучшие композиционные материалы [5]. Бериллий широко используется в качестве небольших присадок в алюминиевых сплавах для создания защитной пленки на жидком металле, в стали для

77. Теплофизические свойства бериллия *1

| Параметр | Температура испытания, °С | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 20—100 | 100—200 | 200—300 | 300—400 | 400—500 | 500—600 |
| λ , Вт/(м·°С) | 163 | 146 | 131 | 121 | 113 | 100 | — | — | — | — | — | — |
| c_p , кДж/(кг·°С) | 2,05 | 2,36 | 2,53 | 2,62 | 2,72 | 2,89 | — | — | — | — | — | — |
| $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С | — | — | — | — | — | — | 13,8 | 15,3 | 16,8 | 18,2 | 19,2 | 20,1 |

*1 По данным А. И. Ковалева.

78. Модуль упругости бериллия и других металлов *1

| Металл или сплав | $\rho, \text{г/см}^3$ | $E \cdot 10^{-4}, \text{МПа}$ | $(E/\rho) \cdot 10^{-7}, \text{км}^2/\text{с}^2$ |
|------------------|-----------------------|-------------------------------|--|
| Os | 22,5 | 559 | 2,53 |
| Ir | 22,4 | 510 | 2,34 |
| Re | 21,0 | 460 | 2,25 |
| Be | 1,85 | 294 | 16,6 |
| Fe | 7,8 | 205 | 2,65 |
| Ti | 4,5 | 102 | 2,44 |
| Al | 2,7 | 69 | 2,63 |
| Mg | 1,76 | 42 | 2,5 |
| Сталь | 7,85 | 200 | 2,65 |
| BT16 | 4,52 | 102 | 2,33 |
| B95 | 2,85 | 69 | 2,56 |
| D16 | 2,78 | 69 | 2,56 |
| I420 | 2,47 | 73 | 3,12 |
| АБМ (30 % Be) | 2,35 | 132 | 5,7 |
| АБМ (40 % Be) | 2,25 | 156 | 7,04 |
| АБМ (70 % Be) | 2,05 | 215 | 10,5 |

*1 По данным Е. М. Савицкого, И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко.

образования твердого диффузионного слоя. Сплавы меди с бериллием (бериллиевые бронзы) обладают эффектами термической обработки; они немагнитны, не искрят при ударе, имеют

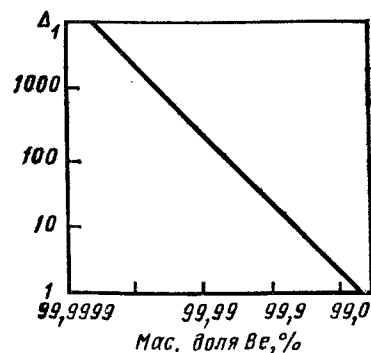


Рис. 11. Зависимость относительного электрического сопротивления Δ_1 бериллия от общего содержания примесей [5]

хорошую коррозионную стойкость, достаточно высокую прочность, а в закаленном состоянии высокую пластичность.

Значительное распространение получили алюминидо-бериллиевые сплавы и алюминидо-бериллиевые сплавы с магнием, сочетающие высокую прочность, пластичность, высокий модуль упругости, теплоемкость и теплопроводность. Добавка 0,5 % Ni повышает длительную прочность бериллия при 900 °С. Лучшие технологические свойства достигаются у сплавов бериллия, содержащих 2—4 % Si, 0,1—1,0 % Ag, 2—4 % Al или у сплава с 0,5 % Ti и 0,1 % Ag.

Интерметаллические соединения бериллия с Ta, Nb, Zn и другие могут использоваться при температуре до 1650 °С; они обладают исключительно высокой твердостью и стойкостью против окисления.

Бериллий получают электролизом хлорида бериллия и NaCl (электролитный бериллий) или восстановлением фторида бериллия магнием (фторидный или магниевотермический бериллий). Электролитный бериллий имеет меньше примесей и большую пластичность, чем магниевотермический. Для дальнейшего повышения чистоты бериллия проводят дистилляцию в вакууме, зонную плавку или электролиз с растворимым анодом. На рис. 11 показана зависимость отношения электросопротивления $\Delta_1 = R_{25^\circ\text{C}}/R_{-169^\circ\text{C}}$ от общего содержания примесей. Химический состав технического, очищенного зонной плавкой и дистиллированного бериллия приведен в табл. 79; в табл. 80 дано содержание примесей в промышленных сортах бериллия.

Примеси, в частности алюминий, понижают пластичность бериллия (рис. 12); механические свойства меняются в зависимости от типа заготовки, величины зерна и чистоты металла (табл. 81, рис. 13). Самые высокие свойства у заготовок, выдвленных из мелкозернистых порошков высокой чистоты; еще более высокие прочностные свойства имеет проволока (табл. 82).

Заготовки из бериллия, полученные ковкой и штамповкой с хорошо прореформированной при обработке струж-

79. Химический состав бериллия технической чистоты (10⁴, ат. доль, %), очищенного зонной плавкой и дистилляцией [5]

| Элемент | ТР-ВП | СР-ВП | СР-ВП-63П | СР-ВП-Д | СР-ВП-23П-Д | СР-ВП-ДД-63П *1 |
|---------------|-------|-------|-----------|---------|-------------|-----------------|
| G | 150 | — | — | <45 | 2,0 | 1 |
| N | — | — | — | <10 | <0,2 | 0,5 |
| O | — | — | — | <60 | 5,0 | 1 |
| F | — | — | — | <10 | <0,2 | 0,5 |
| Na | — | — | — | <10 | <1,0 | 0,7 |
| Al | 200 | 50 | 5 | 4 | <0,2 | <0,003 |
| Si | 100 | <20 | 20 | 2,5 | <0,3 | 4 |
| S | — | — | — | — | <0,2 | 0,1 |
| Cl | <50 | — | — | 10 | 0,1 | 0,2 |
| K | — | — | — | — | 0,3 | <0,01 |
| Ca | <200 | — | — | 1 | 0,03 | 0,01 |
| Cr | 20 | — | — | 2 | 0,01—0,1 | 0,008 |
| Mn | 20 | — | — | 2 | 0,1 | <0,002 |
| Fe | 250 | 15 | 5 | 4 | 0,02 | 0,04 |
| Co | — | — | — | — | <0,002 | — |
| Ni | 125 | 30 | 80 | <3 | 0,01—0,06 | 0,03 |
| Cu | 10 | <5 | 10 | 0,8 | 0,6 | 0,4 |
| Zn | — | — | — | <0,1 | 0,005 | 0,2 |
| Mg | — | — | — | 6 | — | 0,002 |
| Be | 99,7 | 99,95 | 99,99 | — | 99,999 | 99,999 |
| Δ_1 ** | 10 | 50 | 250 | — | — | 3300 |

*1 Данные, полученные спектральным анализом.

*2 $R_{25^\circ\text{C}}/R_{-169^\circ\text{C}}$.

Обозначения: Бериллий: ТР — технически рафинированный; СР — суперрафинированный, подвергнутый двойному электролизу; ВП — вакуумно-плавленный; Д — дистиллированный; ДД — дважды дистиллированный; 633П — зоннорафинированный (6 рафинированных проходов зоны); СР-ВП-ДД-63П — электрорафинированный, вакуумно-плавленный, дважды дистиллированный и зонноплавленный (6 проходов зоны — металл); СР-ВП-23П-Д — электрорафинированный, вакуумно-плавленный, дистиллированный и зонноплавленный (2 прохода зоны — металл).

80. Содержание примесей в промышленных сортах бериллия [5]

| Примесь | Инструментальные сорта 1400, HP-40 | Конструкционные сорта S-200 E, HP-20 | Сорта для ядерной техники N-50, HP-8 |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| BeO | 4,25 (минимум) | 2 (максимум) | 0,9 (максимум) |
| C | 0,25 | 0,15 | 0,1 |
| Fe | 0,25 | 0,18 | 0,075 |
| Al | 0,16 | 0,16 | 0,06 |
| Mo | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| Другие (каждой не более) | 0,1 | 0,04 | 13 элементов содержится в количестве от $2 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ % |

Примечание. Сорта 1400, S-200E, N-50 — фирмы «Браш Веллман»; HP-40, HP-20, HP-8 — фирмы «Канеки Берилко Индустри».

81. Свойства бериллия разных сортов при испытаниях на растяжение *1 [5]

| Сорт материала, полуфабрикат | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ **, % |
|--|------------------|----------------------|----------------|
| Горячепрессованный обычной чистоты *3 | 370/390 | 266/273 | 2,3/3,6 |
| Конструкционный | 294/322 | 196/196 | 2,7/4,6 |
| Для тормозных агрегатов высокой чистоты (изопрессованный) | 455/455 | 287/287 | 3,9/4,4 |
| Инструментальный с высоким содержанием окиси (горячепрессованный) | 476/511 | 406/413 | 1,5/2,7 |
| Мелкозернистый (изопрессованный) | 580/587 | 407/407 | 3,7/4,2 |
| Листы толщиной 1—6,3 мм: | | | |
| порошковый обычной чистоты | 531 | 372 | 16 |
| литой обычной чистоты | 362 | 172 | 7 |
| Выдавленные порошковые заготовки: | | | |
| обычной чистоты | 655—690 | 345—518 | 8—13 |
| высокой чистоты | 655—828 | 345—518 | 8—13 |
| Покówki обычной чистоты | 483—600 | 435—600 | 0—4,5 |
| Проволока (диаметром 0,05—0,63 мм), полученная из слитка высокой чистоты | 966 | 793 | 3 |

*1 В числителе дроби приведены результаты испытаний в продольном, знаменателе — в поперечном направлении.

*2 Удлинение на длине 50,8 мм, кроме проволоки (254 мм).

*3 Конструкционный сорт содержит около 1,8 % BeO, а сорт для тормозных агрегатов и конструкций — около 0,9 % BeO.

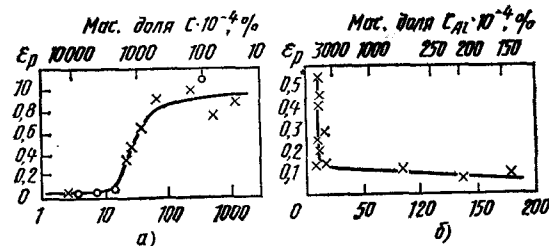


Рис. 12. Зависимость деформации до разрушения при базисном скольжении от содержания:

а — примесей; б — алюминия [5]

турой, обладают небольшой анизотропией и достаточно высокими механическими свойствами (табл. 83, 84).

Механические свойства при растяжении, сжатии различных полуфабрикатов из бериллия приведены в табл. 85. На свойства бериллия сильно влияют поверхностные концентраторы и общее состояние поверхности (табл. 86, рис. 14). Чувствительность к концентрации напряжений прессованного прутка в зависимости от коэффициента концентрации напряжений K_t приведена в табл. 87. Уменьшения влияния концентраторов достигают травлением и отжигом (табл. 88, 89). При повышении температуры испытаний происходит заметное снижение прочности и увеличение пластичности (табл. 90, рис. 15). Бериллий обладает сравнительно невысоким сопротивлением ползучести (табл. 91), модуль упругости снижается при 100 °С до 264 700 МПа; при 300 °С — до 235 300 МПа; при 500 °С — до 147 000 МПа. При минус 70 °С прочность снижается с 539—

637 МПа до 490—539 МПа, а удлинение с 4—8 до 1—1,5 %. В качестве жаропрочного материала бериллий практически не применяется.

Ультрамелкозернистый сверхчистый бериллий (с размером зерна 5 мкм,

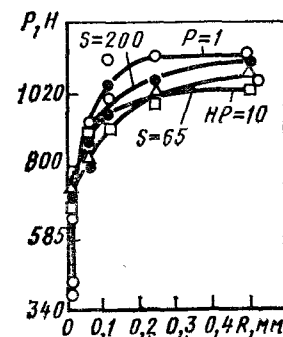


Рис. 14. Влияние радиуса надреза на разрушающую нагрузку [5]

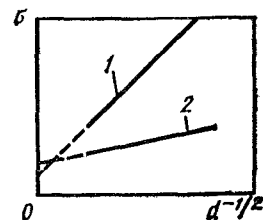


Рис. 13. Зависимость прочностных характеристик от размеров зерна в бериллии: 1 — разрушающие напряжения; 2 — предел текучести [5]

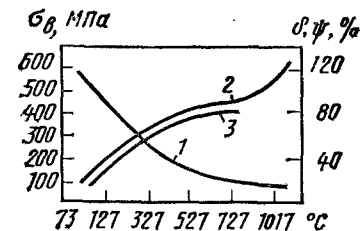


Рис. 15. Температурная зависимость механических свойств мелкозернистого бериллия высокой чистоты:

1 — предел прочности при растяжении σ_B ; 2 — удлинение δ ; 3 — поперечное сужение ϕ [5]

82. Механические свойства проволоки диаметром 0,125 мм из бериллия, полученной разными способами [5]

| Исходный бериллий | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\delta_{вв}$, % |
|---|------------------|----------------------|-------------------|
| Слиток (0,02 % BeO) | 980 | 860 | 6,2 |
| Электрорафинированный ГП: 0,97 % BeO 0,81 % BeO | 1010 | 875 | 9,8 |
| | 1380 | 1010 | 2,8 |
| Магнетермический ГП: 0,86 % BeO 1,52 % BeO | 1120 | 935 | 5,2 |
| | 1210 | 985 | 2,1 |

83. Механические свойства поковок из бериллия при растяжении [5]

| Растяжение | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ |
|----------------|----------------|------------|----------|--------|
| | МПа | | % | |
| Осевое | 468 | 587 | 4,3 | 4,3 |
| Тангенциальное | 505 | 568 | 3,6 | 4,0 |
| Радиальное | 450 | 558 | 3,6 | 3,7 |

84. Работа разрушения поковок из бериллия [5]

| Испытания | Направление удара | Работа разрушения*1, Дж | Испытания | Направление удара | Работа разрушения*1, Дж |
|----------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Динамические То же » | Осевое | —/8,4 | Баллистические То же » | Осевое | 0,92/0,98 |
| | Тангенциальное | —/5,7 | | Тангенциальное | 0,46/0,56 |
| | Радиальное | —/4,6 | | Радиальное | 0,87/0,92 |

*1 В числителе дроби — без разрушения образца, в знаменателе — при разрушении образца.

85. Механические свойства бериллия при растяжении, сжатии*2

| | Проволока диаметром, мм | Полоса | Штамповка | Лист | Пруток, прессованная труба | Полуфабрикат | Д | | | | | |
|-----------------------|-------------------------|------------|-----------|---------|----------------------------|--------------|------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|---|---|
| | | | | | | | 0,05—0,1 | 0,1—0,3 | 0,3—1,0 | 1,0—5,0 | | |
| σ_B , МПа | | ≥ 490 | 392 | 392—539 | 539—637 | | 1176—931 1568—1421Н | 931—833М 1421—1274Н | 833—686М 1274—882Н | 686—392М 882—539Н | | |
| $\sigma_{в сж}$, МПа | | — | — | — | 1470—1666 | | — | — | — | — | — | — |
| δ_b , % | | ≥ 3 | ≥ 2 | 2—4 | 4—8 | | — | — | — | — | — | — |

*2 По данным И. Н. Фридландера, К. П. Яценко, В. И. Колесниковой, Н. В. Цукановой.

Обозначения: М — в отожженном состоянии; Н — в нагартованном состоянии; Д — долевое направление; П — поперечное направление.

86. Влияние обработки поверхности на прочность при испытании на растяжение образцов с надрезом *1 и без надреза из прокатанного бериллия [5]

| Поверхность листа | $\sigma_{в}^н$, МПа | $\sigma_{в}^н$, МПа | K_{*2} |
|-------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| Шлифованная | 298/268 | 387/387 | 0,77/0,69 |
| Фрезерованная | 225/217 | 383/392 | 0,59/0,55 |
| Травленая | 461/228 | 454/436 | 1,02/0,52 |

*1 Коэффициент концентрации $K_t = 4,4$.

*2 Отношение прочности образцов с надрезом к прочности образцов без надреза.

Примечание. В числителе дроби — прочность в продольном направлении, в знаменателе — прочность в поперечном направлении.

87. Чувствительность бериллия к концентрации напряжений *1. Образец круглый (гладкий и с кольцевой выточкой)

| K_t | $\sigma_{в}$, МПа | $\sigma_{в}^н$, МПа | $\sigma_{в}^н/\sigma_{в}$ |
|-------|--------------------|----------------------|---------------------------|
| 1 | 588 | — | — |
| 2,2 | — | 470 | 0,8 |
| 4,0 | — | 166 | 0,28 |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, Д. Я. Брагина, И. Н. Шкайова.

88. Влияние травителей на свойства бериллия, протравленного после механической обработки [5]

| Состояние материала | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\sigma_{в}$, МПа | δ , % |
|--|----------------------|--------------------|--------------|
| После механической обработки | — | 389 | 0 |
| После травления слоя 0,1 мм травителями: | | | |
| NH ₄ F ₂ (15 %), Be (20 г/л) | 410 | 573 | 18 |
| HNO ₃ (20 %), HF (1 %), Be (10 г/л) | 399 | 547 | 16 |
| HNO ₃ (20 %), HF (1 %), Be (20 г/л) | 410 | 578 | 18 |

89. Влияние отжига и отжига с последующим травлением на свойства горячеокаленного бериллиевого листа при растяжении [5]

| Обработка поверхности | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\sigma_{в}$, МПа | δ , % |
|----------------------------------|----------------------|--------------------|--------------|
| Шлифование слоя толщиной 0,13 мм | 290 | 462 | 8,6 |
| Шлифование и отжиг | 272 | 496 | 13,0 |
| Шлифование, отжиг и травление | 272 | 505 | 18,3 |

чистотой более 99,9 %) по пластическим характеристикам может не уступать другим металлам с гексагональной кристаллической решеткой и имеет относительное удлинение до 22 %. Температура его перехода из хрупкого состояния в пластичное минус 20 °С. Такой металл имеет способность к сверхпластической деформации; относительное удлинение его образцов при 600—700 °С может достигать 350 %. Однако освоение промышленного выпуска ультрамелкозернистого сверхчистого бериллия, по-видимому, является задачей не близкого будущего.

Более высокой пластичностью, чем бериллий, обладают двойные и тройные сплавы типа алюминий—бериллий и алюминий—магний—бериллий. Высокая пластичность фазы [Al], упрочненной магнием, вводимым в сплавы в концентрациях, не превышающих его предельную растворимость, благоприятно

влияет на свойства двухфазных сплавов системы Al—Be—Mg. Так как растворимость магния с повышением содержания бериллия уменьшается, то в сплавы системы Al—Be—Mg при самом низком содержании бериллия необходимо вводить наиболее высокое количество магния. В сплавах с наиболее высоким содержанием бериллия должно быть низкое содержание магния.

Наряду с сравнительно плавным повышением прочности в сплавах системы Al—Be и Al—Be—Mg (рис. 16) с увеличением содержания бериллия одновременно происходит непрерывный, но значительно более интенсивный рост модуля упругости, который при содержании 70—80 % Be достигает 215 000—245 000 МПа; плотность такого сплава равна 2 т/м³. В результате этого сплавы на алюминий-бериллиевой основе высокомодульные и

90. Механические свойства при растяжении прессованного прутка из бериллия при высоких температурах после отжига *1

| Параметр | Температура испытания, °С | | |
|--------------------|---------------------------|---------|---------|
| | 100 | 300 | 500 |
| $\sigma_{в}$, МПа | 509—539 | 382—431 | 254—294 |
| δ_5 , % | 13—20 | 29—36 | 22—29 |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной.

91. Пределы ползучести и длительной прочности прессованного прутка из бериллия после отжига *1

| Параметр | Температура испытания, °С | | | | |
|--------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| $\sigma_{0,2/100}$, МПа | 205 | — | 147 | — | 49 |
| σ_{100} , МПа | 411 | 294 | 225 | 156 | 98 |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной.

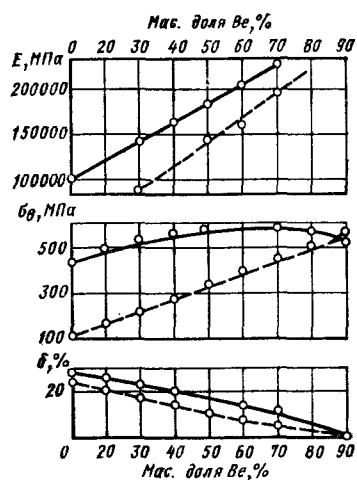


Рис. 16. Механические свойства сплавов с различным содержанием бериллия; штриховая линия — Al—Be; сплошная линия — Al—Be—Mg [18]

по модулю упругости в зависимости от состава превосходят высокопрочные сплавы на алюминиевой основе более чем в 2—3 раза. Модуль упругости — аддитивное свойство, приблизительно определяемое среднеарифметическим значением модуля упругости компонентов, входящих в состав сплава. Этим объясняется высокий рост модуля упругости при введении бериллия в больших количествах в указанные сплавы. Наблюдается аномалия в тройных сплавах Al—Be—Mg — значительное повышение модуля упругости алюминий-бериллиевых сплавов в результате введения магния.

Сплавы системы Al—Be—Mg имеют более высокий модуль упругости (на 14 700—39 200 МПа), чем сплавы системы Al—Be при одинаковом содержании бериллия, хотя магний (и твердый раствор магния в алюминии) имеет модуль упругости ниже, чем алюминий (44 100 МПа), и его вводят в сплавы сравнительно немного. Эта аномалия объясняется физическими особенностями структурных составляющих исследуемых сплавов, представляющих смесь двух фаз с резко выраженной разнородностью и уменьшением степе-

ни этой разнородности при легировании алюминиевой фазы магнием.

Другая закономерность для этих сплавов состоит в том, что тройные сплавы системы Al—Be—Mg при содержании бериллия до 70 % превосходят двойные сплавы системы Al—Be не только по прочности, но и по относительному удлинению. По-видимому, более низкое относительное удлинение двойных алюминий-бериллиевых сплавов также есть следствие резко выраженной неоднородности фаз, присутствующих в структуре этих сплавов: твердой и прочной бериллиевой фазы [В] и мягкой и малопрочной фазы [А]. В сплавах системы Al—Be—Mg свойства упрочненной магнием фазы [А] меньше отличаются от свойств фазы бериллия. Это обеспечивает и более однородный и равномерный характер деформации при растяжении и, как результат этого, одновременное повышение прочности и относительного удлинения.

Если предел прочности двойных сплавов непрерывно повышается при увеличении содержания бериллия от 10 до 100 %, то кривая прочности тройных сплавов системы Al—Be—Mg располагается значительно выше и достигает максимума приблизительно при 70 % Be. При 70 % Be относительное удлинение тройного сплава сохраняется на достаточно высоком уровне (около 10 %). При дальнейшем повышении содержания бериллия прочность понижается при одновременном резком снижении пластичности, поэтому сплавы системы Al—Be—Mg при содержании бериллия более 70—75 % (более 80 об. долей, %) для практического применения не представляют особого интереса. Резкое снижение относительного удлинения в сплавах данной концентрации объясняется тем, что количество [А]-фазы в структуре сплава уже недостаточно и она перестает оказывать пластифицирующее действие, как это происходит в сплавах, более богатых этой фазой. Сплавы с малым количеством [А]-фазы можно рассматривать как бериллий, содержащий некоторое количество легкоплавкой составляющей, ухудшающей его свойства, особенно при температурах свыше 500—600 °С. В этом случае предпочтительно приме-

нять чистый бериллий. Благодаря различию в алюминий-бериллиевых и алюминий-бериллиев-магнийевых сплавах, содержащих до 70—75 % Be, достаточного количества высокопластичной алюминиевой составляющей и хорошему сцеплению между алюминиевой и бериллиевой фазами, эти сплавы по сравнению с бериллием обладают хорошей общей и технологической пластичностью и удовлетворительно деформируются при 380—420 °С. В процессе обработки давлением происходит деформация алюминиевой матрицы и бериллиевой фазы, поскольку бериллий при температурах около 400 °С имеет достаточно высокую пластичность.

Структура прессованных полуфабрикатов представляет собой смесь алюминиевой матрицы и вытянутых в направлении течения металла частиц бериллиевой фазы [Be] размером 10—50 мкм в поперечнике. В горячекатаных листах эти частицы имеют форму, близкую к лизовидной (чешуйка), с большим отношением диаметра к толщине. Структура изделий из алюминий-бериллиевых сплавов, полученных давлением, является характерной для композиционного материала, армированного сравнительно короткими волокнами или чешуйками бериллия. Поскольку модуль упругости бериллиевой составляющей выше, чем алюминиевой матрицы, она воспринимает основную долю приложенных напряжений. Для эффективной эксплуатации материала важно, что алюминиевая матрица более пластична, чем бериллий, что благоприятствует перераспределению нагрузки между волокнами. Общая прочность композиций пропорциональна квадратному корню из расстояния между частицами (рис. 17). Изменение предела прочности сплавов Al—Be и Al—Be—Mg в зависимости от расстояния между частицами бериллия в структуре сплавов (рис. 17) имеет тот же характер, что и изменение прочности сплавов этих систем в зависимости от содержания бериллия (см. рис. 16). При этом максимум на кривой прочности сплавов Al—Be—Mg (см. рис. 17) соответствует расстояниям между частицами бериллия в сплаве,

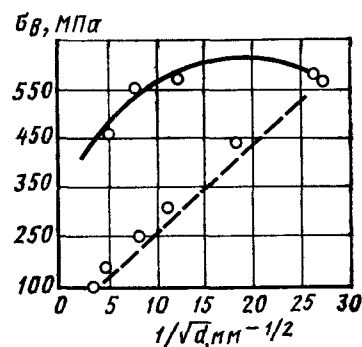


Рис. 17. Зависимость прочности алюминий-бериллиевых сплавов от расстояния d между частицами бериллия [18]

приблизительно содержащем 70 % Be. Наличие ориентированной структуры в прессованных и волоченых полуфабрикатах резко повышает механические свойства в направлении деформации и приводит к анизотропии механических свойств [2].

Свойства сплавов типа АБМ (Al—Be—Mg) в сравнении с зарубежными двойными сплавами Al—Be «Локаллой» представлены на рис. 18. Механические свойства прутков диаметром 30 мм и листов сплава с 30 % Be различной толщины приведены в табл. 92, а чувствительность к концентрации напряжений — в табл. 93. Скорость роста усталостных трещин (СРТУ) в листовом материале из сплава АБМ с 30 % Be в сравнении с промышленным сплавом Д16Т приведена в табл. 94. Акустическая выносливость листовых образцов сплава АБМ с 30 % Be в сравнении с промышленным сплавом Д16Т показана в табл. 95. Пределы выносливости даны в табл. 96, а влияние длительных нагревов — в табл. 97. При понижении температуры у сплавов типа АБМ прочность и предел текучести растут, а удлинение падает (табл. 98). При повышенных температурах прочностные характеристики снижаются, а при 350 °С — и пластичность (табл. 99). Сопротивление ползучести сплавов АБМ показано в табл. 100. Теплофизические свойства полуфабрикатов из сплавов АБМ с 30 % Be приведены в табл. 101.

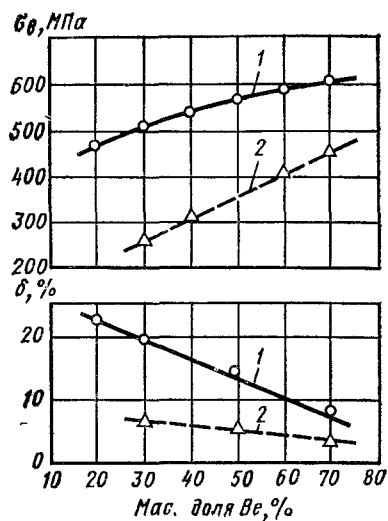


Рис. 18. Сравнительные свойства отечественных и зарубежных деформируемых алюминий-бериллиевых сплавов: 1 — АБМ; 2 — Локаллой (Al—Be) [5, 18]

Сплав типа АБМ с 70 % Ве имеет плотность 2,01—2,06 г/см³, модуль упругости $E = 196\,000 \div 225\,500$ МПа; его теплофизические свойства приведены в табл. 102, а механические свойства при комнатной температуре — в табл. 103. При концентрации напряжения $K_t = 2,2$ (кольцевая выточка) предел прочности прутка снижается с 510 до 460 МПа, а предел выносливости ($N = 2 \cdot 10^7$ циклов, чистый изгиб с вращением) при том же коэффициенте концентрации напряжений — с 264 до 98 МПа. Длительные нагревы до 500 °С слабо влияют на прочность сплавов АБМ при комнатной температуре. При повышении температуры испытания одновременно снижаются прочность и относительное удлинение (табл. 104).

Композиты бериллий — титан (табл. 105) обладают высокой прочностью, но очень низким пределом текучести при растяжении. При работе на сжатие предел прочности и особенно предел текучести растут.

Низкий предел текучести не является типичным для порошковых ма-

териалов Ве—Ti (патент США 3,774,290.1973).

Сравнительно широкое применение имеет бериллиевая бронза — сплав меди с бериллием. При введении в медь 2 % Ве прочность многократно повышается, что связано с процессами распада пересыщенного твердого раствора бериллия в меди. Растворимость бериллия снижается с 2,1 % при 864 °С до 0,2 % при 700 °С. Промышленные значения имеют сплавы, содержащие 1,7—2,5 % Ве.

В закаленном состоянии бронзы обладают высокой пластичностью и малой прочностью и могут упрочняться нагартовкой и старением. Старение проводится в закаленном или в закаленном и нагартованном состоянии. После старения прочность, предел текучести, твердость растут, пластичность резко снижается. Бериллиевые бронзы коррозионно-стойки в морской воде, в водном растворе соляной кислоты.

Физические свойства бериллиевых бронз приведены ниже,

Физические свойства бериллиевой бронзы БрБ2[49]

| | |
|---|-------|
| Температура плавления, °С: | |
| солидус | 955 |
| ликвидус | 864 |
| ρ , г/см ³ | 8,23 |
| $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С, при температуре, °С: | |
| 20—100 | 16,6 |
| 100—200 | 17,2 |
| 200—300 | 19,0 |
| λ бронзы, Вт/(м·°С): | |
| мягкий | 83,5 |
| облагороженной | 105 |
| деформированной | 75 |
| c , кДж/(кг·°С) | 0,419 |
| ρ_1 бронзы, Ом·м·10 ⁶ : | |
| закаленной | 0,1 |
| облагороженной | 0,68 |
| Магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$ бронзы: | |
| в закаленном состоянии | —0,45 |
| после дисперсионного твердения | —0,62 |

После соответствующей механической и термической обработки детали из бериллиевых бронз обладают высо-

92. Механические свойства сплава АБМ с 30 % Ве при растяжении и сжатии *1

| Параметр | Полуфабрикат | | | | | |
|-----------------------------|---------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Пруток прессованный | Лист | | | | |
| Толщина, мм | ∅ 30 | 0,5—0,8 | 1,0—2,0 | 7—12 | | |
| Состояние | Без термообработки | М | Н | М | Н | |
| Направление вырезки образца | Вдоль | Поперек | | | | |
| | | σ _в , МПа | 411 | 402—441 | 441—539 | 490—588 |
| σ _{0,2} , МПа | 264 | 245—294 | 343—372 | 411—451 | 264—284 | 264—313 |
| σ _{в сж} , МПа | 1185 | — | — | — | — | — |
| δ ₁₀ , % | 16 | 15—20 | 10—18 | 3—10 | 7—12 | 4—10 |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной, Г. А. Нерасовой.

Обозначения: М — отожженное; Н — нагартованное.

93. Чувствительность к концентрации напряжений сплава АБМ с 30 % Ве *1

| Параметр | Полуфабрикат | | | |
|---|--|----------------------------------|------|-----|
| | Пруток прессованный | Лист | | |
| Толщина, мм | ∅ 30 | 1,0 | | |
| Состояние | Без термообработки | Отожженное | | |
| Направление вырезки образца | Вдоль | Поперек | | |
| Форма образца | Круглая (гладкий и с кольцевой выточкой) | Плоская (гладкий и с отверстием) | | |
| K _t | 1 | 2,2 | 1 | 2,5 |
| σ _в , МПа | 480 | — | 524 | — |
| σ _в ^н , МПа | — | 519 | — | 521 |
| σ _в ^н /σ _в | 1,1 | | 0,99 | |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, И. Н. Шканова.

94. СРТУ в листовом материале из сплавов АБМ и Д16Т *1

| $\Delta K \sqrt{z}$, МПа | $d(2l) dN$, мм кол. циклов | |
|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | АБМ (σ брутто = 100 МПа) | Д16Т (σ брутто = 80 МПа) |
| 12,4 | 0,2—0,4 | 0,35—0,5 |
| 15,5 | 0,3—0,6 | 0,6—0,75 |
| 18,6 | 0,6—0,9 | 1,0—1,2 |
| 21,7 | 0,8—1,5 | 1,7—2,0 |
| 24,8 | 1,5—2,0 | 2,8—3,0 |

*1 По данным С. И. Кишкиной и Е. Н. Старовой.

Примечание. $d(2l) dN$ — скорость роста трещины усталости; ΔK — размах коэффициента интенсивности напряжения.

95. Акустическая выносливость листовых образцов из сплавов АБМ и Д16Т *1

| Материал | N циклов до разрушения при напряжениях, МПа | | | $\frac{N \text{ АБМ}}{N \text{ Д16Т}}$ (при $\sigma = 30 \pm 35$ МПа) |
|----------|---|-------------------|------------------|--|
| | 69 | 44 | 34 | |
| АБМ | $3 \cdot 10^6$ | $6,7 \cdot 10^7$ | $4,4 \cdot 10^8$ | 40—50 |
| Д16Т | $0,35 \cdot 10^6$ | $0,25 \cdot 10^7$ | $0,8 \cdot 10^7$ | |

*1 По данным Е. А. Шахагуни.

96. Пределы выносливости ($N = 2 \cdot 10^7$ циклов) сплава АБМ с 30 % Ве *1

| Параметр | Полуфабрикат | | | |
|-----------------------------|----------------------------------|-----|--|------|
| | Лист | | Пруток | |
| Толщина, мм | 1,5 | | Ø 30 | |
| Состояние | Отожженное | | Без термообработки | |
| Направление вырезки образца | Поперек | | Вдоль | |
| Вид испытания | Чистый изгиб | | Изгиб с вращением | |
| ν , Гц *2 | 25 | | 50 | |
| R *3 | —1 | | | |
| Форма образца | Плоская (гладкий и с отверстием) | | Круглая (гладкий и с кольцевой выточкой) | |
| K_t | 1 | 2,2 | 1 | 1,89 |
| σ_R , МПа | 196 | 137 | 176 | 64 |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, И. Н. Шканова.

*2 ν — частота циклов, Гц.*3 R — симметричность циклов.

97. Влияние длительных нагревов на механические свойства листов из сплава АБМ с 30 % Ве при комнатной температуре *1

| Полуфабрикат | Лист | | | |
|------------------------------|-------------|-----|------|-----|
| | Толщина, мм | 0,7 | | |
| Состояние | Отожженное | | | |
| Направление вырезки образца | Поперек | | | |
| Температура нагрева, °С | 20 | 150 | 200 | 250 |
| Продолжительность нагрева, ч | 100 | | | |
| σ_B , МПа | 460 | 470 | 465 | 465 |
| δ_{10} , % | 21 | 24 | 17,5 | 15 |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной.

98. Механические свойства листов из сплава АБМ с 30 % Ве при растяжении при низких температурах *1

| Полуфабрикат | Лист | | |
|-----------------------------|-------------|---------|---------|
| | Толщина, мм | 1,0—1,5 | |
| Состояние | Отожженное | | |
| Направление вырезки образца | Поперек | | |
| Температура испытания, °С | 20 | —70 | —196 |
| σ_B , МПа | 411 | 421 | 539—608 |
| $\sigma_{0,2}$, МПа | 264—294 | 264—284 | 470—490 |
| δ_5 , % | 11—18 | 14—18 | 1,5—3 |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной.

99. Механические свойства бериллия при растяжении при высоких температурах *1

| Полуфабрикат | Лист | | | |
|-----------------------------|-------------|---------|-----|-----|
| | Толщина, мм | 1,0—1,5 | | |
| Состояние | Отожженное | | | |
| Направление вырезки образца | Поперек | | | |
| Температура испытаний, °С | 200 | 250 | 300 | 350 |
| σ_B , МПа | 304 | 254 | 186 | 166 |
| $\sigma_{0,2}$, МПа | 205 | 176 | 127 | 78 |
| δ_{10} , % | 12 | 13 | 16 | 8 |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной,

100. Пределы ползучести и длительной прочности сплава АБМ с 30 % Ве *1

| Параметр | Полуфабрикат | | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------------|-----|-----|-----|
| | Лист | Пруток прессованный | | | |
| Диаметр, мм | 1,5 | 30 | | | |
| Состояние | Отожженное | Без термообработки | | | |
| Направление вырезки образца | Поперек | Вдоль | | | |
| Температура испытания, °С | 200 | 150 | 250 | 300 | 350 |
| σ_B , МПа | — | — | — | 68 | 44 |
| σ_{20} , МПа | 156 | — | 68 | — | 29 |
| $\sigma_{0,2/5}$, МПа | — | 186 | 34 | — | — |
| $\sigma_{0,2/20}$, МПа | 88 | — | — | — | — |
| $\sigma_{0,2/100}$, МПа | — | 107 | — | — | — |
| $\sigma_{0,2/300}$, МПа | — | 78 | — | — | — |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной, З. Г. Семенов.

101. Теплофизические свойства полуфабрикатов из сплава АБМ с 30 % Ве *1

| Состояние | Отожженное | | | | | | |
|----------------------------|---------------------------|------|------|------|------|--------|--------|
| | Температура испытания, °С | 20 | 100 | 200 | 300 | 20—100 | 20—200 |
| λ , Вт/(м·°С) | 138 | 134 | 130 | 126 | — | — | — |
| c , кДж/(кг·°С) | 1,13 | 1,15 | 1,19 | 1,21 | — | — | — |
| $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С | — | — | — | — | 19,2 | 19,7 | 20 |

*1 По данным А. И. Ковалева.

102. Теплофизические свойства сплава АБМ с 70 % Ве *1

| Полуфабрикат | Пруток прессованный | | | | | | | | |
|----------------------------|---------------------|------|------|------|-----|--------|--------|--------|--------|
| | Без термообработки | | | | | | | | |
| Температура испытания, °С | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 20—100 | 20—200 | 20—300 | 20—400 |
| λ , Вт/(м·°С) | 167 | 151 | 142 | 130 | 125 | — | — | — | — |
| c , кДж/(кг·°С) | 1,76 | 1,92 | 2,01 | 2,18 | 2,3 | — | — | — | — |
| $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С | — | — | — | — | — | 15 | 16 | 16,7 | 17,2 |

*1 По данным А. И. Ковалева.

103. Механические свойства сплава АБМ с 70 % Ве при растяжении *1

| Полуфабрикат | Пруток прессованный | |
|-----------------------------|---------------------|--|
| | Без термообработки | |
| Состояние | Вдоль | |
| Направление вырезки образца | Вдоль | |
| σ_B , МПа | 509—549 | |
| $\sigma_{0,2}$, МПа | 353—402 | |
| $\sigma_{пц}$, МПа | 186—264 | |
| δ_{10} , % | 7—12 | |
| ψ , % | 8—12 | |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной, З. Г. Семенов.

104. Механические свойства сплава АБМ с 70 % Ве при растяжении в зависимости от температуры испытания *1

| Температура испытания, °С | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ , % |
|---------------------------|------------|----------------|--------------|
| | МПа | | |
| 200 | 362—411 | 304—343 | 10—12 |
| 300 | 294—313 | 264—284 | 10—17 |
| 400 | 166—215 | 137—186 | 8—11 |
| 500 | 137—147 | 117—127 | 2—3 |

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной, З. Г. Семенов.

Примечание. Полуфабрикат — прессованный прутки, без термообработки, направление вырезки — вдоль.

105. Свойства порошковых композитов Ве—Ті при растяжении и сжатии [5]

| $t_{исп}$, °C | Содержание Ве, мас. доля, % | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ , % | $E \cdot 10^{-3}$, МПа |
|-------------------|-----------------------------|----------------|------------|--------------|-------------------------|
| | | МПа | | | |
| Растяжение | | | | | |
| 25 | 50 | 104 | 846 | 1,5 | 192 |
| | 60 | 131 | 766 | 1,0 | 180 |
| 315 | 20—30 | 90 | 1075 | 1,4 | 143 |
| | 50 | 141 | 685 | 4,1 | 154 |
| | 60 | 133 | 590 | 1,6 | 153 |
| | 20—30 | 227 | 868 | 3,0 | 107 |
| Сжатие | | | | | |
| 25 | 50 | 1030 | 1282 | — | — |
| | 60 | 992 | 1269 | — | — |
| 315 | 50 | 848 | 1175 | — | — |
| | 60 | 977 | 1113 | — | — |

кой размерной стабильностью в течение всего периода эксплуатации. Одна из важнейших областей применения бериллиевых бронз — это пружины, упругие элементы в виде мембран и сильфонов, применяемых в точном приборостроении.

5. ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Свойства полимеров зависят от их химического строения, физического состояния и условий эксплуатации. Для большинства полимерных материалов характерны: низкая плотность, высокая удельная прочность и жесткость, химическая и радиационная стойкость, а также стабильные электрические свойства в определенном интервале температур. Верхняя граница температурного интервала определяется потерей теплостойкости, а нижняя — появлением хрупкости.

В качестве конструкционного материала полимеры используют как в чистом виде (без наполнителей), так и в виде матриц полимерных композиционных материалов.

В табл. 106 приведены свойства полиэтилена, полипропилена и политетрафторэтилена, обладающих невысоким временным сопротивлением, но

очень высокой пластичностью, объединяющей их в одну группу.

В зависимости от метода полимеризации различают полиэтилен высокого и низкого давления. Полиэтилен низкого давления имеет более высокую прочность, теплостойкость и химическую стойкость.

Полипропилен отличается высокой стойкостью к многократным изгибам, износостойкостью и менее подвержен растрескиванию под действием агрессивных сред. Температура перехода в хрупкое состояние полиэтилена находится в интервале $-75^{\circ}\text{C} \div -220^{\circ}\text{C}$, а полипропилена $-7^{\circ}\text{C} \div -15^{\circ}\text{C}$.

Политетрафторэтилен (фторопласт) обладает низким коэффициентом трения, наиболее химически стоек из всех полимеров, имеет повышенную термическую и радиационную стойкость.

Общими недостатками полимеров данной группы являются: невысокая теплостойкость, ползучесть под действием нагрузки и зависимость механических свойств от температуры, длительности нагружения и скорости деформирования.

В табл. 107 приведены механические и физические свойства полимеров, успешно конкурирующих с металлами при изготовлении деталей конструкций

106. Механические свойства полимеров [29, 60, 66]

| Полимер | ρ , г/см ³ | $E \cdot 10^{-3}$ | σ_B | $\sigma_{сж}$ | σ_H | НВ | δ , % |
|--|----------------------------|-------------------|------------|---------------|------------|-------|--------------|
| | | | | | | | |
| Полиэтилен: высокого давления низкого давления среднего давления | 0,900—0,939 | 1,4—2,5 | 10—17 | 12 | 12—20 | 14—25 | 400—600 |
| | 0,948—0,959 | 6,0—8,5 | 20—45 | 20—33 | 20—40 | 45—60 | 300—800 |
| | 0,950—0,976 | 8,0—12,5 | 18—40 | — | 25—40 | 60—80 | 200—1300 |
| Полипропилен | 0,90—0,91 | 6,7—12,3 *1 | 25—40 | 50—70 | 70—80 | 40—70 | 200—800 |
| Политетрафторэтилен: фторопласт-3 » 4 » 4Д » 4М » 40 » 42 » 4НА | 2,09—2,16 | 11,6—15,0 *1 | 35—45 | 55—60 | 60—80 | 10—13 | — |
| | 2,15—2,22 | 4,7—8,5 *1 | 14—35 | 10—12 | 14—18 | 30—40 | 250—500 |
| | 2,21—2,26 | 4,5—8,5 *1 | 12—23 | 12 | 11—14 | 30—40 | 100—330 |
| | 2,14—2,16 | 5,5—6,0 *1 | 16—31 | 20 | 20—30 | 30—40 | 250—400 |
| | 1,65—1,70 | 8—10 *1 | 27—50 | — | 33—34 | 58—63 | 150—400 |
| | 1,91—2,00 | 4—8 *1 | 25—50 | — | 25—35 | — | 250—500 |
| | 2,0—2,1 | 4 *1 | 15—30 | — | 20 | 30—35 | 200—450 |

*1 Указан модуль упругости при изгибе $E_H \cdot 10^{-3}$ МПа.

107. Механические свойства полимеров [29, 60, 66]

| Полимер | ρ , г/см ³ | $E \cdot 10^{-3}$ | σ_b | $\sigma_{сж}$ | σ_H | НВ | δ , % |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------|------------|---------------|------------|---------|--------------|
| | | | | | | | |
| Полистирол | 1,05—1,10 | 30 | 35—45 | 80—100 | 65—100 | 140—160 | 1,5—3,0 |
| Полиметиленаксид: гомополимер | 1,43 | 2,9 | 68—71 | 110—130 | 100—120 | 150—180 | — |
| сополимер | 1,39—1,41 | 22—30 | 65—70 | 105—145 | 100—125 | 100—130 | 15—20 |
| Полифениленоксид: арилкс-100 | 1,06 | — | 60 | 40 | 40 | 165 | 3 |
| РРО (США) | 1,06 | 25 | 74 | 106 | 107 | — | 20—40 |
| норил (США) | 1,06 | 23 | 61 | 113 | 87 | — | 20—30 |
| Полиэтилентерфталат-лавсан | 1,34—1,41 | 30 | 60—70 | 80—100 | 80—150 | 90—120 | 4—20 |
| Поликарбонат | 1,20 | 24—28 | 57—70 | 80—90 | 90—100 | 110—160 | 50—100 |
| Полиакрилат U-1060 (Япония) | 1,11—1,21 | 18,8 | 75 | 96 | — | 200—250 | 62 |
| Полноксбензоат: эксел 1-2000 (США) | 1,40—1,45 | 25,5 | 99 | 127 | 120 | — | 8 |
| эксел С-1000 (США) | 1,40—1,45 | 13,3 | 70 | 140 | 106 | — | 7—9 |
| эксел Р-300 (США) | 1,40—1,45 | 72 | — | — | 75 | — | — |

повышенной жесткости и коррозионной стойкости.

Перспективность данной группы полимеров заключается в сочетании высокого временного сопротивления, модуля упругости и высокой пластичности со стабильностью свойств под нагрузкой, невысокой плотностью и коррозионной стойкостью. При этом полистирол — хрупкий полимер, склонный к старению.

Полиметиленаксид — горючий, неокислительный материал с высоким сопротивлением усталости при динамических знакопеременных нагрузках, обладает высокой износостойкостью и низкой ползучестью.

Полиэтилентерфталат (лавсан) отличается низкой гигроскопичностью, низким коэффициентом трения, стабильностью свойств; устойчив к действию слабых кислот, эфиров, масел и жиров; не стоек в концентрированных кислотах и щелочах.

Поликарбонаты имеют стабильные механические свойства в интервале температур $-150^{\circ}\text{C} \div 200^{\circ}\text{C}$, обладают низкой гигроскопичностью, стабильностью размеров и малой склонностью к ползучести под нагрузкой.

Полиакрилаты огнестойки, устойчивы к длительному действию разбавленных кислот, износостойки при повышенных температурах до 130°C .

Перспективные конструкционные полимеры — полиоксибензоаты, обладающие термостойкостью до 500°C , низким влагопоглощением, высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Высоким временным сопротивлением ($120—140$ МПа), высокими пластичностью и сопротивлением усталости, низкой ползучестью под нагрузкой обладают полиимиды и полиамиды, механические свойства которых приведены в табл. 108.

Полиимиды в зависимости от строения главной полимерной цепи могут быть линейными или трехмерными, а по строению мономерного звена — алифатическими, алициклическими или ароматическими. Наибольшее применение получили ароматические линейные полиимиды.

Полиимидные пресс-порошки ПМ-67, ПМ-69 (СССР), 2080, P13N, NR (США),

кайнол (Франция) перерабатываются в изделия методами прямого или горячего прессования, литьем под давлением.

Изделия из полиимидов отличаются высокой стабильностью размеров, термостойкостью до 300°C , низким коэффициентом трения и низкой ползучестью под нагрузкой.

Полиамиды, как и полиимиды, могут быть алифатическими (капролон, найлон-6, найлон-10) и ароматическими (фенилон П, фенилон С1, фенилон С2 (СССР), номекс (США) и др.).

Для алифатических полиамидов характерны: высокие сопротивление усталости, сопротивление истиранию и ударным нагрузкам, низкая гигроскопичность.

Ароматические полиамиды, имея резко выраженную температуру плавления, обладают стабильностью свойств при повышенных температурах.

Полиамиды, как и большинство ароматических полиимидов, устойчивы к действию органических растворителей, но растворяются в концентрированных кислотах и спиртах.

6. ДИСПЕРСНО-УПРочНЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Материалы данного типа относятся к классу порошковых, в которых матрица из металла или сплава упрочняется искусственно введенными мелкодисперсными частицами размером менее $0,1$ мкм в количестве $0,1—15\%$. В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других тугоплавких соединений.

Смеси порошков получают механическим или химическим смешиванием, поверхностным или внутренним окислением, разложением смеси солей, водородным восстановлением или химическим осаждением из растворов.

После формирования и спекания производят горячую пластическую деформацию с целью получения плотного, беспористого полуфабриката (лент, полос, профилей и т. д.).

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе алюминия. Наиболее распространенными

108. Механические свойства полимеров [29, 60, 66]

| Полимер | ρ , г/см ³ | $E \cdot 10^{-2}$ | σ_B | МПа | | | HB | δ , % |
|--|----------------------------|--|--|-------------------------------------|--|--|--|--------------|
| | | | | $\sigma_{сж}$ | σ_H | | | |
| Полиамид: ПМ-67 ПМ-69 ДФО 2080 (США) P13 (США) NR (США) | 1,33—1,41 | 30—36 *1 — 32 13,2 32—34 37,7 | 120—140 95—125 120 120 51 106 | 200—230 210—240 — 210 — | 180—240 180—230 — 202 70—80 — | 180—280 200—270 — — — — | 9—20 4—7 20—30 10 1,4 9,0 | |
| Полиамиды алифатиче- ские: найлон-6 6, 10 литьевой П-12/1 литьевой капролон В | 1,09—1,14 | 12—15 15—17 16—18 20—23 | 55—77 50—60 40—55 90—95 | 77—85 70—90 60—63 100—110 | 85—100 45—70 55—65 120—150 | 100—120 100—150 75 130—150 | 100—150 100—150 200—280 6—20 | |
| Полиамиды ароматиче- ские: фенилон П » С1 » С2 | 1,35 | 30—32 *1 30—32 *1 30—32 *1 | 90 100 120 | 320 220 220 | 120 150 200 | 180—220 180 220 | 4 5 6 | |

*1 Приведены значения $E_{сж} \cdot 10^{-2}$, МПа.

109. Механические свойства ДКМ на основе алюминия

| Материал | t , °С | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % |
|--|----------|----------------------|------------------|--------------|
| САП-1 | 20 | 200 | 290—310 | 7—9 |
| | 250 | — | 180—190 | 4—6 |
| | 350 | — | 140—150 | 3—4 |
| | 500 | — | 100 | 2 |
| САП-2 | 20 | 230 | 320 | 4 |
| | 250 | — | 190 | 3 |
| | 350 | — | 150 | 2 |
| | 500 | — | 100 | 1 |
| САП-3 | 20 | 340 | 400 | 3 |
| | 250 | — | 240 | 1,5 |
| | 350 | — | 190 | 1 |
| | 500 | — | 130 | 1 |
| SAP-ISML-930 | 20 | 175 | 250 | 14,5 |
| | 300 | 95 | 110 | 8,5 |
| | 400 | 75 | 85 | 4,5 |
| | 500 | 65 | 70 | — |
| SAP-ISML-895 | 20 | 215 | 310 | 10,5 |
| | 300 | 120 | 150 | 5,5 |
| | 400 | 100 | 110 | 2,5 |
| | 500 | 85 | 90 | — |
| SAP-ISML-865 | 20 | 265 | 380 | 7,0 |
| | 300 | 155 | 175 | 3,5 |
| | 400 | 120 | 130 | 2,0 |
| | 500 | 105 | 105 | — |
| Al-1 % С Al-1 % G Al-2 % G Al-2 % Q Al-3 % Q Al-3 % G Al-4 % Q Al-4 % G Al-5 % Q Al-5 % G | 20 | — | 260 | 7,5 |
| | 400 | — | 110—120 | 7 |
| | 20 | — | 360 | 3,5 |
| | 400 | — | 145—160 | 4,5 |
| | 20 | 430 | 450 | 4,2 |
| | 400 | — | 145—160 | 4,5 |
| | 20 | — | 470 | 3,5 |
| | 400 | — | 150—175 | 4 |
| | 20 | — | 520 | 3,5 |
| | 400 | — | 180—200 | 2 |

110. Длительная прочность и пределы ползучести ДКМ на основе алюминия

| Марка | t, °C | σ ₁₀₀ | σ ₁₀₀₀ | σ _{0,2/100} | σ _{0,5/100} | σ _{0,2/1000} | σ _{0,5/1000} |
|-------|-------|------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | МПа | | | | | |
| САП-1 | 200 | 120 | 120 | 90 | 105 | 80 | 95 |
| | 310 | 80 | 75 | 60 | 75 | 50 | 65 |
| | 430 | 45 | 45 | 35 | 45 | — | 40 |
| САП-2 | 250 | 110 | — | — | — | 90 | 115 |
| | 350 | 80 | — | 70 | — | 63 | — |
| | 500 | 50 | — | 40 | — | — | — |
| САП-3 | 250 | 120 | — | — | — | 99 | 125 |
| | 350 | 90 | — | — | — | — | — |
| | 500 | 55 | — | — | — | 36 | — |

соединениями, применяемыми в качестве упрочняющей фазы в дисперсно-упрочненных композиционных материалах (ДКМ) на основе алюминия и его сплавов, являются оксиды. В СССР выпускаются три марки ДКМ на основе алюминия: САП-1, САП-2 и САП-3, отличающиеся концентрацией оксидов (6—9 % Al₂O₃, 9—13 % Al₂O₃, 13—17 % Al₂O₃). Зарубежным аналогом САП-1 является SAP-930, САП-2 — SAP-895, САП-3 — SAP-865.

Наряду с материалами типа САП разработаны ДКМ Al—C, упрочняющей фазой в которых служит карбид алюминия Al₄C₃ [29]. Увеличение содержания оксида алюминия в САП и карбида алюминия в ДКМ Al—C приводит к повышению прочности и снижению пластичности.

111. Длительная прочность ДКМ Al—3 % C

| t, °C | σ ₁ | σ ₁₀ | σ ₁₀₀ |
|-------|----------------|-----------------|------------------|
| | МПа | | |
| 200 | 230 | 210 | 190 |
| 300 | 140 | 130 | 120 |
| 400 | 110 | 95 | 80 |
| 500 | 70 | 65 | 60 |

При температурах 300—500 °C ДКМ на основе алюминия превосходят по прочности все промышленные алюминиевые сплавы (табл. 109) и отличаются высокими характеристиками длительной прочности и ползучести (табл. 110, 111). Поставляются дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе алюминия в виде листов, полос, профилей, прутков, проволоки и штамповок.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе бериллия. Наиболее эффективными упрочнителями бериллия являются оксид BeO и карбид Be₂C. Временное сопротивление ДКМ Be—BeO повышается с увеличением содержания оксида; при этом эффективность упрочнения растет с увеличением температуры (табл. 112). Сопротивление ползучести и длительная прочность Be—BeO композиционных материалов при повышенных температурах сравнительно невелики. Применение карбида бериллия Be₂C в качестве упрочняющей фазы позволяет повысить 100-часовую прочность бериллия при 650 °C в 3 раза, а при 730 °C — более чем в 5 раз [29] (табл. 113).

Благодаря высокому коэффициенту рассеяния нейтронов, высокому модулю упругости и низкой плотности ДКМ на основе бериллия является перспективным материалом в реакторострое-

нии, а также в качестве армирующих элементов в композиционных материалах с повышенным удельным модулем упругости.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе магния. Незначительная растворимость кислорода в магнии дает возможность упрочнять его оксидами. Наибольший эффект достигается при введении оксида магния MgO в количестве до 1%. Дальнейшее повышение содержания оксида практически не меняет временное сопротивление, но существенно снижает пластичность ДКМ. ДКМ Mg—MgO обладают низкой плотностью, высокой длительной прочностью и высоким сопротивлением ползучести при нагреве (табл. 114, 115). Применение этих материалов ограничено низкой коррозионной стойкостью в морской воде, а также на воздухе при температурах выше 400 °C. Наиболее перспективно применение ДКМ на основе магния в авиации, ракетной и ядерной технике в качестве конструкционного материала деталей несущих и корпусных изделий минимальной массы и повышенной прочности.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе никеля. В качестве упрочняющей фазы в ДКМ на основе никеля и его сплавов используются оксиды ThO₂ и HfO₂. Оксид

112. Механические свойства ДКМ Be—BeO

| Об. доля BeO, % | t, °C | σ _{0,2} | σ _B | δ, % |
|-----------------|-------|------------------|----------------|------|
| | | МПа | | |
| 0,8 | 25 | 195 | 275 | 2 |
| | 400 | 145 | 245 | 14 |
| | 600 | 115 | 200 | 15 |
| 1,8 | 25 | 240 | 310 | 2 |
| | 400 | 175 | 240 | 4 |
| | 600 | 140 | 185 | 6,5 |
| 3,0 | 25 | 245 | 325 | 1 |
| | 400 | 210 | 325 | 7 |
| | 600 | 175 | 285 | 14,5 |

113. Длительная прочность ДКМ Be—Be₂C

| Об. доля Be ₂ C, % | t, °C | σ ₁ | σ ₁₀ | σ ₁₀₀ |
|-------------------------------|-------|----------------|-----------------|------------------|
| | | МПа | | |
| 0 | 650 | 46 | 30 | 14 |
| | 730 | 14 | 9 | 4 |
| 2,5 | 650 | 70 | 55 | 40 |
| | 730 | 45 | 35 | 25 |

114. Механические свойства ДКМ Mg—MgO

| Об. доля MgO, % | t, °C | σ _{0,2} | σ _B | δ, % |
|-----------------|-------|------------------|----------------|-------|
| | | МПа | | |
| 0,3 | 20 | — | 270 | — |
| 1,0 | 20 | 250—260 | 285—300 | 8 |
| 1,0 | 400 | — | 50—60 | 9 |
| 1,0 | 450 | 16—18 | 25—30 | 9 |
| 1,0 | 500 | — | 15—20 | 10—12 |
| 2,0 | 20 | — | 270 | — |

тория ThO₂ в количестве до 2% наиболее эффективен для упрочнения никеля и нихрома (ДКМ ВДУ-1, ТД-никель, DS-никель, ТД-нихром). Из-за токсичности оксида тория его часто заменяют оксидом гафния HfO₂ в ДКМ ВДУ-2 (98% Ni, 2% HfO₂), что приводит к существенному снижению жаропрочности.

ДКМ на основе никеля предназначены в основном для работы при тем-

115. Длительная прочность и ползучесть ДКМ Mg—1 % MgO

| t, °C | σ ₁₀₀ , МПа | ε, 10 ⁻³ %/ч, при σ, МПа | |
|-------|------------------------|-------------------------------------|------|
| | | 5 | 10 |
| 450 | — | 9 | 600 |
| 500 | 10 | 80 | 3000 |

пературах выше 1000 °С. Характеристики длительной прочности при этих температурах выше у ДКМ с матрицей из нелегированного никеля, однако при температурах до 800 °С более вы-

соким временным сопротивлением обладают ДКМ на основе никелевых сплавов типа TD-нихром (80% Ni; 20% Cr, упрочненный 2% ThO₂) (табл. 116, 117).

116. Длительная прочность ДКМ на основе никеля

| t, °С | σ ₁₀ , МПа | | σ ₁₀₀ , МПа | | σ ₁₀₀₀ , МПа | |
|---------------|-----------------------|-------|------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | ВДУ-1 | ВДУ-2 | ВДУ-1 | ВДУ-2 | ВДУ-1 | ВДУ-2 |
| Лист | | | | | | |
| 900 | — | — | 115 | 95 | 105 | 85 |
| 1000 | — | 78 | 95 | 75 | 85 | 65 |
| 1100 | 78 | 62 | 75 | 55 | 65 | 45 |
| 1200 | 67 | 42 | 50 | 35 | 50 | 25 |
| Пруток | | | | | | |
| 900 | — | — | 150 | 105 | 140 | 95 |
| 1000 | — | 95 | 125 | 90 | 120 | 80 |
| 1100 | 108 | 75 | 105 | 70 | 100 | 65 |
| 1200 | 88 | 60 | 75 | 55 | 65 | 40 |

117. Механические свойства ДКМ на основе никеля и его сплавов

| t, °С | σ _{0,2} | σ _B | δ | ψ |
|------------------|------------------|----------------|-------|-------|
| | МПа | | % | |
| ВДУ-1 | | | | |
| 20 | 390—410 | 540—570 | 20—24 | 70—75 |
| 400 | 260—270 | 350—370 | 21—24 | — |
| 600 | 210—230 | 280—300 | 21—24 | 40—60 |
| 800 | 150—160 | 200—220 | 12—18 | 25—35 |
| 1000 | 120—130 | 140—160 | 10—13 | 20—25 |
| 1200 | 100—110 | 120—130 | 7—9 | 15—20 |
| ВДУ-2 | | | | |
| 20 | 300—350 | 450—500 | 20—24 | 70—75 |
| 500 | 180—200 | 220—250 | 21—24 | 40—50 |
| 800 | 120—140 | 140—160 | 12—18 | 25—35 |
| 1000 | 95—100 | 105—120 | 10—13 | 25—30 |
| 1100 | 80—85 | 95—100 | 8—10 | 20—25 |
| 1200 | 75—78 | 80—85 | 7—9 | 15—20 |
| TD-нихром | | | | |
| 20 | 440—460 | 800—850 | 18—19 | 25 |
| 400 | 380—390 | 650—700 | 18—19 | 20 |
| 600 | 250—260 | 480—500 | 20—23 | 23 |
| 800 | 200—220 | 240—260 | 20—22 | 30 |
| 1000 | 110—120 | 130—140 | 15—16 | 25 |
| 1100 | 85—90 | 95—105 | 14—15 | 25 |
| 1200 | 75—80 | 80—90 | 10—12 | 15 |

118. Механические свойства ДКМ на основе кобальта

| t, °С | Химический состав матрицы, мас. доля, % | | | | | | Об. доля ThO ₂ , % | σ _B , МПа | δ, % |
|-------|---|----|----|----|---|-----|-------------------------------|----------------------|----------------|
| | Co | Ni | Cr | Mo | W | Zr | | | |
| 100 | — | — | — | — | — | — | 2 | 960 | 8 16 9 |
| | — | — | — | — | — | — | | 780 | |
| | — | — | — | — | — | — | | 1090 | |
| 99,8 | — | — | — | — | — | 0,2 | 2 | 1020 | 13 24 13 |
| | — | — | — | — | — | — | | 780 | |
| | — | — | — | — | — | — | | 1090 | |
| 62 | 20 | 18 | — | — | — | — | 2 2 4 | 1037 | 13 14 — |
| | | | | | | | | 158 | |
| | | | | | | | | 191 | |
| 58 | 20 | 22 | — | — | — | — | 4 | 465 | — — |
| | | | | | | | | 163 | |
| | | | | | | | | — | |
| 50 | 20 | 30 | — | — | — | — | 4 | 585 | — — |
| | | | | | | | | 138 | |
| | | | | | | | | — | |
| 75 | 15 | — | 10 | — | — | — | 4 | 580 | — — |
| | | | | | | | | 154 | |
| | | | | | | | | — | |
| 70 | 15 | — | 15 | — | — | — | 4 | 731 | — — |
| | | | | | | | | 128 | |
| | | | | | | | | — | |
| 60 | 10 | 20 | — | 10 | — | — | 4 | 698 | — — |
| | | | | | | | | 137 | |
| | | | | | | | | — | |

ДКМ на основе никеля и его сплавов применяются главным образом в авиационной и космической технике для изготовления лопаток газовых турбин, камер сгорания, теплозащитных панелей, а также сосудов и трубопроводов, работающих при высоких температурах в агрессивных средах.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе кобальта. ДКМ на основе кобальта и его сплавов с хромом, молибденом и вольфрамом упрочняются оксидом тория

ThO₂, содержание которого находится в пределах 2—4 %.

При температурах ниже полиморфного превращения (470 °С) ДКМ на основе кобальта имеют более высокое временное сопротивление и меньшую пластичность, чем ДКМ на основе никеля. При высоких температурах свойства кобальтовых и никелевых ДКМ отличаются незначительно. Введение небольших добавок циркония в кобальтовую матрицу повышает пластичность, временный и длительный пределы прочности (табл. 118, 119). Леги-

119. Длительная прочность ДКМ на основе кобальта

| Химический состав матрицы, мас. доля, % | | | | Об. доля ThO ₂ , % | t, °C | σ_{100} , МПа |
|--|----|----|-----|----------------------------------|-------|-------------------------|
| Co | Ni | Cr | Zr | | | |
| 99,8 | — | — | 0,2 | 2 | 1090 | 100—110 |
| 61,8 | 20 | 18 | 0,2 | 2 | 780 | 200 |
| 61,8 | 20 | 18 | 0,2 | 2 | 1090 | 70—80 |
| 61,8 | 20 | 18 | 0,2 | 4 | 1090 | 80—90 |

120. Механические свойства ДКМ хром-30

| t, °C | σ_B , МПа | δ , % |
|-------|------------------|--------------|
| 20 | 340 | 15—20 |
| 300 | 265 | — |
| 650 | 245 | — |
| 980 | 125 | 30—40 |
| 1370 | 33 | — |

рование хромом и никелем существенно повышает жаростойкость кобальта, что позволяет использовать ДКМ при температурах до 1100 °C.

Дисперсно-упрочненные материалы на основе кобальта и его сплавов при-

меняют для изготовления лопаток газовых турбин авиационных двигателей, а также деталей, работающих при повышенных температурах в парах ртути.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе хрома. Для упрочнения хрома и его сплавов используется оксид магния MgO или оксид тория ThO₂. ДКМ на основе сплава 99,5 % Cr и 0,5 % Ti, упрочненный 6 % MgO, называется хром-30; на основе сплава 97 % Cr, 25 % V и 0,5 % Si, упрочненный 3 % MgO — хром-90, а на основе 93,5 % Cr, 2,5 % V, 1 % Si, 0,5 % Ti, 2 % Ta и 0,5 % C, упрочненный 3 % MgO — хром-90 S.

Основное назначение ДКМ на основе хрома — конструкционный материал для деталей, работающих при высоких температурах в окислительной среде. Высокая эрозионная стойкость этих ДКМ под действием мощных тепловых потоков делает их перспективными материалами для сопел плазмотронов.

Свойства ДКМ на основе хрома приведены в табл. 120, 121,

121. Длительная прочность ДКМ на основе хрома

| t, °C | σ_{100} , МПа | t, °C | σ_{100} , МПа | t, °C | σ_{100} , МПа |
|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|
| Хром-30 | | Хром-90 | | Хром-90 | |
| 930 | 35 | 980 | 56 | 980 | 195 |
| 980 | 25 | 1090 | 17,5 | 1090 | 56 |
| 1090 | 17,5 | — | — | — | — |

7. ВОЛОКНИСТЫЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Методы изготовления, используемые для получения композиционных материалов (КМ) из различных комбинаций волокон и матриц, непосредственно определяются свойствами этих волокон и матриц. Некоторые из основных методов, используемых для получения композиционных материалов, приведены в табл. 122. Описанные методы могут быть использованы для производства как готовых изделий, так и полуфабрикатов: листов, полос, труб и т. д. Простые полуфабрикаты, из которых получают более сложные и более крупногабаритные изделия, представляют собой моноволокна или прутки, покрытые материалом матрицы, пучки или полосы из одного и нескольких слоев волокон, заключенные в матрицу, широкоформатные листы, состоящие из матрицы, содержащей волокон. Эти полуфабрикаты могут быть

при укладке ориентированы в одном направлении или перекрестно, уложены друг на друга и сформированы в изделия диффузионной сваркой или другим термомеханическим методом.

В специфических условиях использования в авиационной и космической технике КМ с металлической матрицей имеют определенные преимущества по сравнению с КМ с полимерной матрицей по своим высокотемпературным свойствам, стойкости к воздействию повышенной влажности, эрозии и повреждению посторонними объектами.

Сведения о процессах первичного производства композиционных материалов с алюминиевой матрицей приведены в табл. 123.

Методы производства композиционных материалов с металлической матрицей удобно классифицировать, разделив их на три основные категории процессов: твердофазные, жидкофазные и осаждения.

Свойства композиционных материалов в большой степени определяются

122. Существующие и перспективные методы изготовления композиционных материалов [8]

| Общее название метода | Предварительные технологические операции | Заключительные технологические операции |
|------------------------------------|--|---|
| Порошковая металлургия | Укладка волокон в матрицу или шликерное литье в каркас из волокон или скрепление волокон летучим связующим | Спекание, горячее прессование или горячее изостатическое прессование |
| Технология с использованием фольги | Использование летучего связующего или склеивающего вещества для скрепления волокон с фольгой, или прессование чередующихся слоев волокон и фольги (гладкой или с канавками), или точечное либо непрерывное (например, прокаткой) соединение фольги с волокнами | Диффузионная сварка горячим прессованием или горячим изостатическим прессованием |
| Литье | Литье готового изделия или нанесение жидкого металла на поверхность отдельных волокон или изготовленных из непрерывных лент | При получении готовых изделий заключительные операции не нужны. В других случаях — горячее прессование или горячее изостатическое прессование |

123. Сведения о процессах первичного производства композиционных материалов с алюминиевой матрицей, армированной волокнами [8]

| Процессы производства | Матрицы | Полуфабрикаты и изделия | Примечание |
|------------------------------|---|--|--|
| Твердофазные процессы | | | |
| Горячее прессование | Al—B, Al—борсик, Al—Be, Al—сталь, Al—SiC, Al—SiO ₂ | Монослойные ленты, листы, стержни, лопадки турбины | Процесс контролируется напряжением течения или ползучестью. Могут использоваться вспомогательные средства — припой, легкоплавкие металлы или металлы, образующие эвтектику. Монослойные ленты и листы из материала Al—B, полученные ступенчатым прессованием |
| Прокатка | Al—B Al—сталь | Монослойные ленты, листы, балки | Прокаткой можно получать материал либо полностью компактный, либо нуждающийся в дальнейшем уплотнении |
| Совместная экструзия | Al—B | — | — |
| Сварка взрывом | Al—сталь | Монослойные листы, ленты | — |

Продолжение табл. 123

| Процессы производства | Матрицы | Полуфабрикаты и изделия | Примечание |
|---------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Жидкофазные процессы | | | |
| Пропитка жидким металлом | Al—B | Прутки, стержни | Для получения полуфабрикатов с постоянным поперечным сечением, армированных однонаправленно |
| Пропитка жидким металлом | Al—C | Прутки, стержни | |
| Непрерывное литье | Al—борсик | Монослойные ленты, прутки, стержни, трубы, уголки | |
| То же | Al—SiC Al—B (с покрытием BN) | То же Монослойные ленты | |
| Процессы осаждения | | | |
| Плазменное напыление | Al—B, Al—борсик | Монослойные ленты | При плазменном напылении существует проблема предотвращения чрезмерного химического взаимодействия расплавленного алюминия с бором. Для производства полуфабрикатов необходимо дополнительно применять горячее прессование, пропитку жидким металлом или сварку |
| Электролитическое осаждение | Al—B, Al—SiC | | |
| Осаждение из паровой фазы | Al—Be | | |
| Процессы порошковой металлургии | Al—B | Монослойные ленты | Процессы не нашли широкого применения для получения композиционных материалов с алюминиевой матрицей, армированной волокнами |

124. Свойства волокон, проволоки и нитевидных кристаллов для армирования композиционных материалов [42]

| Материал | t, °C | ρ, г/м³ | σ _B | E | σ _B /(ρg) | E/(ρg)·10 ⁻³ |
|------------------------------|-------|---------|----------------|-------------|----------------------|-------------------------|
| | | | ГПа | | кМ | |
| Волокно: | | | | | | |
| борное | 2040 | 2,63 | 2,45—3,43 | 372,0—411,0 | 95—133 | 14,4—15,9 |
| углеродное | 3000 | 1,70 | 1,96—2,96 | 196,0—296,0 | 117—176 | 11,7—17,4 |
| карбида кремния | 2827 | 3,21 | 1,96—3,92 | 451,0 | 62—124 | 14,3 |
| оксида алюминия | 2054 | 3,96 | 2,06—2,55 | 490,0 | 52—65 | 12,6 |
| оксида циркония | 2677 | 6,27 | 2,35—2,65 | 461,0 | 39—43 | 7,4 |
| Проволока: | | | | | | |
| бериллиевая | 1284 | 1,84 | 0,98—1,25 | 284,0 | 55—65 | 15,7 |
| вольфрамовая | 3400 | 1,93 | 4,11 | 392,0 | 21 | 2,0 |
| стальная | 1300 | 7,80 | 3,53—3,92 | 196,0 | 45—51 | 2,5 |
| титановая | 1668 | 4,50 | 1,47—1,96 | 117,9 | 33—41 | 2,6 |
| Нитевидные кристаллы: | | | | | | |
| оксида алюминия | 2054 | 3,96 | 27,4 | 490,0 | 710 | 12,6 |
| нитрида алюминия | 2400 | 3,30 | 14,7 | 372,0 | 455 | 11,5 |
| карбида кремния | 2650 | 3,21 | 36,2 | 569,0 | 1150 | 18,0 |
| нитрида кремния | 1900 | 3,18 | 14,7 | 485,0 | 472 | 15,6 |

армирующим материалом, его видом (волокно, проволока), количеством и ориентацией в матрице.

Неметаллические волокна — борные, углеродные, карбида кремния, оксида алюминия, оксида циркония, нитевидные кристаллы карбида и нитрида кремния, оксида и нитрида алюминия и др. Металлические армирующие — волокна (проволока) бериллия, вольфрама, молибдена, стали, титановых и других сплавов.

Свойства армирующих материалов, применяемых в СССР, приведены в табл. 124.

В табл. 125 приведены свойства волокон по сравнению со свойствами сплавов, нашедших наиболее широкое применение в качестве матрицы композиционных материалов за рубежом.

Наиболее широкое применение в качестве матрицы КМ получил алюминий, так как именно он определяет в первую очередь те самые удельные

(т. е., отнесенные к плотности) характеристики композиционных материалов, благодаря которым эти материалы считаются перспективными во многих областях новой техники. Свойства отечественных композиционных материалов с алюминиевой матрицей приведены в табл. 126, 127, а зарубежных КМ — в табл. 128—130.

Композиционный материал ВКА-1 (табл. 126) состоит из чередующихся слоев фольги алюминия или алюминиевых сплавов и волокон бора. Для предотвращения взаимодействия фольги с борными волокнами при нагреве в условиях длительной эксплуатации на последние наносят барьерный слой карбида кремния или нитрида бора толщиной 3—5 мкм.

Композиционный материал марки ВКУ-1 на алюминиевой основе, армированный углеродными волокнами, обладает малой плотностью в сочетании с высокими прочностными свойствами

125. Свойства волокон и матричных алюминиевых сплавов [8]

| Материал | ρ, г/м³ | σ _B | E·10 ⁻³ |
|---|---------|----------------|--------------------|
| | | ГПа | |
| Монокристаллические волокна конечной длины («усы») | | | |
| Al ₂ O ₃ | 3,96 | 4,1—24,1 | 0,41—1,03 |
| SiC | 3,17 | 13,8—41,5 | 0,48—1,03 |
| Si ₃ N ₄ | 3,16 | 4,8—13,8 | 0,28—0,38 |
| Непрерывные волокна | | | |
| S-стекло | 2,50 | 4,5 | 0,09 |
| SiO ₂ | 2,19 | 5,9 | 0,07 |
| B | 2,63 | 3,1 | 0,40 |
| Борсик | 2,70 | 2,8 | 0,40 |
| SiC | 3,35 | 2,8 | 0,45 |
| C | 1,90 | 2,1 | 0,34 |
| Be | 1,83 | 1,3 | 0,24 |
| Сталь | 7,70 | 4,1 | 0,19 |
| W | 19,4 | 4,1 | 0,41 |
| Матричные алюминиевые сплавы | | | |
| 2024 *1 | 2,77 | 0,19 | 0,07 |
| 2024 *2 | 2,77 | 0,48 | 0,07 |
| 6061 *1 | 2,70 | 0,13 | 0,07 |
| A384 (литой) | 2,70 | 0,32 | 0,07 |
| 6061 *1 | 2,70 | 0,31 | 0,07 |

*1 Сплав не подвергался термической обработке.

*2 Сплав подвергался термической обработке.

126. Механические свойства одноосно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей [33]

| Композиционный материал | Наполнитель | | ρ, г/м³ | σ _B /(ρg), кМ | E, ГПа | E/(ρg)·10 ⁻³ , кМ | σ _B , МПа (20 °C) | σ ₋₁ , МПа (на базе 10 ⁷ циклов) |
|-------------------------|--------------------|---------------|---------|--------------------------|--------|------------------------------|------------------------------|--|
| | Материал | Количество, % | | | | | | |
| ВКА-1 | Борное волокно | 50 | 2,65 | 45 | 240 | 9 | 1200 | 600 |
| ВКУ-1 | Углеродное волокно | 30—40 | 2,2—2,3 | 42 | 270 | 12 | 900—1000 | 200 |
| КАС-1 | Стальная проволока | 40 | 4,8 | 33 | 120 | 2 | 1600 | 350 |

127. Механические свойства композиционного материала алюминий—стальная проволока [42]

| Материал | σ_{100} при 400 °С | σ_{-1} (на базе 10 ⁷ циклов) | E | KCU, кДж/м ² |
|---|------------------------------|--|-------|----------------------------|
| | ГПа | | | |
| АД1 — 24 об. долей, % стальной проволоки с $\sigma_B = 2,45$ ГПа | 0,05 | 0,25 | — | — |
| Алюминий — 25 об. долей, % проволоки ВНС-9 с $\sigma_B = 37,5$ ГПа | 0,44 | 0,29 | — | 150—250 |
| КАС-1*1 — алюминий 40 об. долей, %, проволоки ВНС-9 с $\sigma_B = 3,53$ ГПа | 0,44 | 0,34 | 107,8 | 930 |

*1 Материалы КАС-1 имеют плотность 4,8 т/м³, предел прочности при сдвиге 0,065 ГПа и коэффициент Пуассона 0,33.

128. Механические свойства композиционного материала алюминий-сплав 6061—бериллиевая проволока [42]

| Об. доля волокну, % | σ_B | $\sigma_{пц}$ | E | δ , % |
|---------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| | ГПа | | | |
| 0 | 0,27 | 0,18 | 65,37 | 5,3 |
| 35 | 0,54 | 0,29 | 150,9 | 6,7 |
| 43 | 0,60 | 0,31 | 165,6 | 9,2 |
| 50 | 0,66— 0,69 | 0,31 | 186,2— 196,0 | 3— 7,6 |

| Об. доля во- локна, % | Угол уклад- ки воло- кон, ° | σ_B | $\sigma_{пц}$ | E | δ , % |
|--------------------------|-----------------------------------|------------|---------------|-------|-----------------|
| | | ГПа | | | |
| 35 | 30 | 0,33 | 0,16 | 148,0 | 2,1 |
| 35 | 45 | 0,27 | 0,13 | 122,5 | 1,7 |
| 35 | 60 | 0,26 | 0,13 | 116,6 | 0,5 |
| 35 | 90 | 0,26 | 0,18 | 123,5 | 0,3 |
| 43 | 45 | 0,30 | 0,09 | 130,3 | 0,6 |
| 43 | 90 | 0,26 | 0,11 | 142,1 | 0,2 |

129. Механические свойства композиционного материала алюминий-сплав 6061—Ве в направлении под углом к оси укладки волокон [42]

130. Свойства композиционного материала алюминий-сплав X7002—Ве при различных температурах [42]

| Об. доля волокну, % | σ_B , ГПа | | | | | E, ГПа | | | | |
|---------------------------|---------------------|------|------|------|------|--------|-------|-------|-------|------|
| | при температуре, °С | | | | | | | | | |
| | 20 | 120 | 200 | 250 | 300 | 20 | 120 | 200 | 250 | 300 |
| 0 | 0,35 | 0,34 | 0,25 | — | 0,13 | 68,6 | 68,6 | 63,4 | 56,4 | — |
| 10 | 0,41 | — | — | — | — | 89,6 | 88,2 | 86,2 | 77,4 | 59,8 |
| 22 | 0,47 | 0,41 | 0,33 | 0,29 | 0,22 | 118,6 | 117,6 | 114,7 | 109,8 | — |
| 40 | 0,55 | 0,50 | 0,41 | 0,38 | 0,33 | 172,5 | — | — | — | — |

является перспективным для создания новых конструкций.

Для применения в различных отраслях техники перспективными являются КМ на основе алюминия, армированные высокопрочной стальной и бериллиевой проволокой, имеющие высокие прочностные характеристики и сравнительно малую стоимость.

Композиционный материал марки КАС-1 (табл. 127) на алюминиевой основе, армированный стальной проволокой, отличается от других КМ доступностью и низкой стоимостью армирующего материала, а также лучшей тепло- и электропроводностью. В качестве матрицы в этой композиции ис-

пользуется фольга из алюминия и алюминиевых сплавов; армирующим элементом служит проволока из аустенитной стали ЭП322 или аустенитно-мартенситной стали ВНС-9 диаметром 0,15—0,3 мм с временным сопротивлением 3,5—4,0 ГПа.

Весьма перспективными для применения в различных отраслях техники являются композиционные материалы на основе алюминия, армированные высокопрочной стальной и бериллиевой проволокой, имеющие высокие прочностные характеристики и сравнительно малую стоимость.

В табл. 131 приведены свойства при растяжении КМ с металлической ма-

131. Свойства при растяжении композиционных материалов с металлической матрицей, полученной фирмой TRW [8]

| Диаметр во- локна, мм | Об. доля во- локна, % | Матрица (тип волокон) | Состояние материала | В продольном направлении | | | В поперечном направлении | | |
|--------------------------|--------------------------|--|------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|-----------------------------|----------------------|--------------|
| | | | | σ_B | E · 10 ⁻³ | δ , % | σ_B | E · 10 ⁻³ | δ , % |
| | | | | ГПа | | | ГПа | | |
| 100 | 40 | Алюминиевый сплав 6061 (бор) | A *1 | 1,20 | 0,2 | 0,7 | 0,11 | 0,11 | 0,3 |
| | 40 | | То же | B *2 | 1,3 | — | — | 0,17 | — |
| | 50 | » | A | 1,47 | 0,23 | 0,7 | 0,11 | 0,14 | 0,3 |
| | 50 | | B | 1,51 | — | — | 0,15 | — | — |
| | 60 | » | A | 1,78 | 0,26 | 0,7 | 0,11 | 0,16 | 0,3 |
| | 60 | | B | 1,72 | — | — | 0,15 | — | — |
| | 50 | Алюминиевый сплав 7075 (бор) | A | 1,36 | 0,23 | 0,6 | 0,10 | — | — |
| | 50 | | То же | B | 1,54 | 0,22 | 0,7 | 0,23 | — |
| 140 | 40 | Алюминиевый сплав 6061 (бор) | A | 1,28 | — | — | 0,16 | 0,11 | 0,4 |
| | 40 | | То же | B | 1,39 | — | — | 0,23 | 0,12 |
| | 50 | » | A | — | — | — | 0,15 | 0,11 | 0,4 |
| | 50 | | B | — | — | — | 0,30 | 0,14 | 0,6 |
| | 60 | » | A | 1,79 | — | — | 0,19 | 0,16 | 0,3 |
| | 60 | | B | 1,75 | — | — | 0,32 | 0,16 | 0,4 |
| 200 | 50 | Алюминиевый сплав 6061 (бор) | A | 1,54 | 0,23 | 0,8 | 0,13 | 0,14 | 0,7 |
| | 50 | | То же | B | 1,63 | 0,23 | 0,8 | 0,25 | 0,14 |
| 106 | 30 | Титановый сплав Ti + 6Al + 4V (борсик) | A | 1,06 | 0,19 | 0,6 | — | — | — |

Продолжение табл. 131

| Диаметр волокон, мкм | Об. доля волокон, % | Матрица (тип волокон) | Состояние материала | В продольном направлении | | | В поперечном направлении | | |
|----------------------|---------------------|--|---------------------|--------------------------|-------------------|--------------|--------------------------|-------------------|--------------|
| | | | | σ_B | $E \cdot 10^{-3}$ | $\delta, \%$ | σ_B | $E \cdot 10^{-3}$ | $\delta, \%$ |
| | | | | | | | | | |
| 106 | 40 | Титановый сплав Ti + 6Al + 4V (борсик) | A | 1,10 | — | — | — | — | — |
| | 50 | То же | A | 1,13 | 0,26 | 0,5 | 0,27 | 0,20 | 0,4 |
| | 60 | » | A | 1,17 | — | — | — | — | — |
| 145 | 30 | Титановый сплав Ti + 6Al + 4V (борсик) | A | 1,21 | 0,20 | 0,7 | 0,58 | 0,18 | 2,7 |
| | 50 | То же | A | 1,34 | 0,26 | 0,6 | 0,45 | 0,21 | 0,8 |

*1 A — материал не подвергался термической обработке.

*2 B — материал подвергался термической обработке.

132. Свойства композиционных материалов с матрицей из сплава Ti + 6Al + 4V, армированной бериллиевой проволокой [8], при растяжении при комнатной температуре

| Способ получения материалов | Бериллиевая проволока | | | Композиционные материалы | | | Объемное содержание, % |
|--|---------------------------|-------------|------------------|--------------------------|----------------|-------------------|------------------------|
| | Состав | Диаметр, мм | σ_B , ГПа | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | $E \cdot 10^{-3}$ | |
| | | | | | | | |
| Горячее вакуумное прессование: проволоки и листа с канавками | Металл химической чистоты | 1,5 | 0,64 | 0,70 *1 | 0,62 *1 | 0,19 *1 | 50 |
| | То же | 1,5 | 0,64 | 0,41 *2 | — | 0,13 *1 | 50 |
| проволоки и фольги | » | 1,5 | 0,64 | 0,79 *1 | 0,57 *1 | 0,21 *1 | 50 |
| | То же | 0,5 | 0,96 | 0,92 *1 | 0,60 *1 | 0,18 *1 | 43 |
| » | Металл с добавкой 2% BeO | 0,5 | 0,96 | 0,35 *2 | — | — | 43 |
| | То же | 9,5 | 0,60 | 0,80 *1 | 0,50 *1 | 0,17 *1 | 38 |
| Совместная экструзия и прокатка | » | 9,5 | 0,60 | 0,75 *2 | — | 0,17 *2 | 38 |
| | То же | 9,5 | 0,60 | 0,75 *1 | 0,45 *1 | 0,18 *1 | 40 |
| Совместная экструзия | » | 9,5 | 0,60 | 0,52 *2 | — | — | 40 |
| | То же | 9,5 | 0,60 | 0,62 *2 | — | 0,13 *3 | 40 |

*1 Свойства вдоль оси волокон.

*2 Свойства в поперечном направлении.

*3 Свойства вдоль оси волокон при температуре 315 °C.

трицей и неметаллическими волокнами, изготовленных диффузионной сваркой, полученные фирмой TRW.

В большинстве зарубежных КМ на основе титана в качестве матрицы использован ($\alpha + \beta$)-сплав Ti + 6Al + 4V в виде фольги толщиной 0,05—0,10 мм. Широкое использование этого сплава было обусловлено его доступностью и приемлемой прочностью. Свойства матричного титанового сплава Ti + 6Al + 4V

+ 4V, армированных бериллиевой проволокой, полученных различными методами, приведены в табл. 132. Горячее вакуумное прессование проводилось при температурах 580—700 °C и давлении 0,21 ГПа; материалы получали совместной экструзией при 700 °C.

В аэрокосмической технике находят все более широкое применение жаропрочные КМ, которые могут работать в условиях высоких температур и знакопеременных нагрузок. В этом случае малая плотность конструкционного материала не имеет такого большого значения, как его способность работать при более высоких температурах.

При испытаниях на длительную прочность измеряется высокотемпературная прочность КМ и ее стабильность в условиях действия постоянной нагрузки. Такие испытания КМ не только выявляют преимущества и недостатки в их изготовлении (эти вопросы в некоторой степени решаются при испытаниях на растяжение), но также и совместимость их компонентов в условиях испытания (т. е. под воздействием напряжений при высоких температурах в течение различных периодов времени).

В большинстве исследований жаропрочных КМ приводятся характеристики их прочности в течение 100 ч испытаний в интервале температур 649—1204 °C (табл. 133).

| | |
|--|------|
| $\rho, \text{т/м}^3$ | 4,43 |
| $E \cdot 10^{-3}, \text{ГПа, при температуре, } ^\circ\text{C:}$ | |
| 20 | 0,11 |
| 205 | 0,10 |
| 315 | 0,09 |
| 425 | 0,08 |
| 540 | 0,06 |
| $\sigma_{0,2}, \text{ГПа, при температуре, } ^\circ\text{C:}$ | |
| 20 | 0,90 |
| 205 | 0,69 |
| 315 | 0,55 |
| 425 | 0,59 |
| 540 | 0,41 |
| $\sigma_{0,2/1000}, \text{ГПа, при температуре, } ^\circ\text{C:}$ | |
| 370 | 0,34 |
| 425 | 0,15 |
| 455 | 0,09 |

Свойства композиционных материалов с матрицей из сплава Ti + 6Al +

133. Пределы длительной и удельной длительной прочности композиционных материалов и конкурирующих с ними суперсплавов за 100 ч [8]

| Температура испытания, °C | Композиционный материал или суперсплав | | $\rho, \text{т/м}^3$ | $\sigma_{100}, \text{ГПа}$ | $\sigma_{100}/(\rho g), \text{км}$ | |
|---------------------------|--|---------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| | Тип волокна | Об. доля волокна, % | | | | Матрица или монокристаллический сплав |
| 649 | Mo | 30 | Ti + 6Al + 4V | 6,28 | 0,08 | 1,35 |
| 649 | Mo | 16,5 | Ti + 6Al + 4V | 5,45 | 0,13 | 2,44 |
| 649 | Mo | 16,5 | Ti + 6Al + 4V | 5,45 | 0,17 | 3,30 |
| 649 | — | — | Хастеллой-X | 8,22 | 0,50 | 3,81 |
| 649 | W | 30 | То же | 11,54 | 0,58 | 5,33 |
| 649 | — | — | Полоса I | 8,30 | 0,73 | 9,15 |

Продолжение табл. 133

| Температура испытания, °С | Композиционный материал или суперсплав | | | ρ , т/м ³ | σ_{100} , ГПа | $\sigma_{100}/(\rho g)$, км |
|---------------------------|--|---------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------|
| | Тип волокна | Об. доля волокна, % | Матрица или монолитный сплав | | | |
| 732 | — | — | Хастеллой-Х | 8,22 | 0,18 | 2,29 |
| 732 | W | 30 | То же | 11,54 | 0,50 | 4,57 |
| 816 | — | — | Полоса II | 8,30 | 0,47 | 5,84 |
| 816 | — | — | Полоса III | 8,86 | 0,22 | 2,54 |
| 816 | — | — | Хастеллой-Х | 8,22 | 0,95 | 1,19 |
| 816 | — | 33 | То же | 11,87 | 0,32 | 2,79 |
| 816 | — | 50 | Медь | 14,19 | 0,40 | 3,05 |
| 816 | — | 75 | То же | 16,69 | 0,62 | 3,81 |
| 899 | — | — | Хастеллой-Х | 8,21 | 0,06 | 0,71 |
| 899 | W | 33 | То же | 11,87 | 0,28 | 2,44 |
| 982 | — | — | Полоса II | 8,30 | 0,21 | 2,54 |
| 982 | — | — | Полоса III | 8,86 | 0,12 | 1,42 |
| 982 | — | 37 | Хастеллой-Х | 8,22 | 0,03 | 0,38 |
| 982 | W | 37 | То же | 12,32 | 0,24 | 2,03 |
| 1000 | — | — | Нимокаст-258 | 7,89 | 0,09 | 1,17 |
| 1000 | — | — | EPD-16 | 8,30 | 0,14 | 1,8 |
| 1000 | — | 40 | Нимокаст-258 | 12,46 | 0,21 | 1,91 |
| 1000 | — | 40 | EPD-16 | 12,73 | 0,26 | 2,11 |
| 1000 | W + 5Re | 20 | Сплав 713С | 10,82 | 0,15 | 1,45 |
| 1093 | — | — | Полоса II | 8,30 | 0,09 | 1,09 |
| 1093 | — | — | Полоса III | 8,86 | 0,1—0,11 | 1,19—1,35 |
| 1093 | W + 1ThO ₂ или CS-218 | 70 | Сплав NASA-3 | 16,19 | 0,24 | 1,52 |
| 1093 | W + 2ThO ₂ | 70 | То же | 16,19 | 0,33 | 2,13 |
| 1100 | — | — | Нимокаст-258 | 7,89 | 0,02 | 0,30 |
| 1100 | — | — | EPD-16 | 8,30 | 0,05 | 0,64 |
| 1100 | W | 40 | Нимокаст-258 | 12,46 | 0,11 | 0,89 |
| 1100 | W | 40 | EPD-16 | 12,73 | 0,13 | 1,04 |
| 1100 | W + 5Re | 20 | Сплав 713С | 10,82 | 0,09 | 0,89 |
| 1100 | W + 5Re | 24 | Сплав J(Nb) | 8,86 | 0,17 | 1,98 |
| 1204 | W + 1ThO ₂ или CS-218 | 70 | Сплав NASA-3 | 16,19 | 0,01 | 0,7 |
| 1204 | W + 3Re | 24 | Сплав J(Nb) | 8,86 | 0,17 | 1,98 |

Среди композиционных материалов с магниевой матрицей наиболее интересными являются материалы, упрочненные борными волокнами, поскольку именно в магниевой матрице удается наиболее полно реализовать высокие

прочностные характеристики борных волокон. Некоторые механические свойства композиций на основе магния с различным содержанием борных волокон приведены в табл. 134.

134. Механические свойства композиционных материалов магнии—борное волокно [42]

| Об. доля волокна, % | ρ , т/м ³ | E | σ_B | σ_H | $\sigma_{сж}$ |
|---------------------|---------------------------|------------|------------|------------|---------------|
| | | | | | |
| 25 | 1,96 | 19,1—218,5 | 0,86—0,20 | 11,2 | — |
| 30 *1 | — | — | 0,94 | — | — |
| 35 | — | — | — | — | 2,01 |
| 50 ** | 2,20 | 196,0 | 12,3 | — | — |
| 70 | — | — | — | — | 31,4 |
| 75 | — | 1,3 | 1,3 | 1,57 | — |

*1 Композиция Mg — 30 об. долей волокна, %, имеет удлинение при разрыве 0,6 %.

*2 Композиция Mg — 50 об. долей волокна, %, имеет временное сопротивление при растяжении 0,78 ГПа при 450 °С и 0,58 ГПа при 500 °С. Длительная прочность этой композиции 0,52 ГПа при 400 °С.

8. ЭВТЕКТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Эвтектическими композиционными материалами (ЭКМ) называются сплавы эвтектического или близкого к эвтектическому состава, в которых упрочняющей фазой служат ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации.

Методы, применяемые для направленной кристаллизации эвтектических сплавов (аналогичные методам получения монокристаллов: Бриджмена, Чохральского, зонной плавки), должны обеспечивать плоский фронт кристаллизации — поверхность раздела между жидкой и твердыми фазами и однонаправленный отвод теплоты. В этом случае фазы эвтектики кристаллизуются перпендикулярно к поверхности раздела и следуют за ней по мере перемещения фронта кристаллизации, образуя ориентированные волокнистые или пластинчатые кристаллы.

Структура эвтектических композиционных материалов, создаваемая естественным путем, а не в результате искусственного введения армирующей фазы в матрицу, обладает высокой прочностью, термической стабиль-

ностью до температур, близких к температуре плавления эвтектики, и лишена многих недостатков, связанных с химической совместимостью между матрицей и упрочняющей фазой искусственных композиционных материалов.

Из эвтектических композиционных материалов изделия можно получать за одну операцию, исключая трудоемкие процессы изготовления армирующих волокон, введение и ориентацию их в матрице.

К недостаткам эвтектических композиционных материалов относятся повышенные требования к чистоте исходных материалов, зависимость свойств от скорости процесса направленной кристаллизации и ограниченная возможность изменения объемного содержания армирующей фазы, которое определяется в основном диаграммой состояния системы.

Выбор эвтектических композиционных материалов заключается в подборе матричной основы, удовлетворяющей заданной плотности, температуре эксплуатации, коррозионной стойкости и др., и эвтектики, обеспечивающей необходимую прочность.

Эвтектические композиционные материалы на основе алюминия. ЭКМ на основе алюминия получают в основном

135. Механические свойства ЭКМ на основе алюминия [29]

| ЭКМ | v , см/ч | σ_B , МПа | δ , % |
|-----------------------|------------|------------------|--------------|
| Al—Al ₃ Ni | 3,3 | 335 | 2,3 |
| | 10,8 | 420 | — |
| | 30,0 | 340 | — |
| Al—CuAl ₂ | — | 270 | 0,7 |
| | 150 | 350—450 | — |
| | 630 | 500—650 | — |
| Al—Be | 0,1 | 70 | — |
| Al—Si | 0,27 | 120 | — |
| | 48,0 | 150 | — |
| | — | 220 *1 | 4—20 |

*1 ЭКМ Al—Si с $\sigma_B = 220$ МПа после закалки.

136. Влияние угла ориентации волокнистой фазы на механические свойства ЭКМ Al—Al₃Ni [19]

| θ° | σ_B , МПа | δ , % |
|----------------|------------------|--------------|
| 0 | 335 | 2,3 |
| 25 | 100 | 16,5 |
| 45 | 75 | 48 |
| 90 | 40 | 14 |

137. Влияние угла ориентации пластинчатой фазы на прочность при изгибе ЭКМ Al—CuAl₂ [19]

| θ° | σ_H , МПа | $a_{пр}$, мм |
|----------------|------------------|---------------|
| 0 | 330 | 0,4 |
| 30 *1 | 230 | 1,5 |
| 45 *1 | 195 | 1,5 |
| 75 | 145 | 0,2 |
| 90 | 140 | 0,15 |

*1 Образец не разрушился.

методом направленной кристаллизации (методом Бриджмена).

Прочность ЭКМ зависит от скорости кристаллизации v (табл. 135) и ориентации армирующей фазы по отношению к направлению приложения нагрузки (табл. 136, 137) [19].

Наибольшая прочность и минимальное удлинение соответствуют растяжению образцов ЭКМ Al—Al₃Ni вдоль волокон ($\theta = 0^\circ$), а минимальная прочность и максимальное удлинение — растяжению под углом 45° . В ЭКМ Al—CuAl₂ с пластинчатой формой армирующей фазы CuAl₂ максимальный прогиб $a_{пр}$ при ориентации пластинки под углом $30—45^\circ$.

Существенным недостатком пластинчатой эвтектики Al—CuAl₂ является большая хрупкость при испытаниях на ударную вязкость.

При повышенных температурах ЭКМ на основе алюминия достаточно хорошо сохраняют прочность на разрыв; при этом, начиная с температуры 227°C , у ЭКМ Al—CuAl₂ многократно возрастает относительное удлинение (табл. 138) [19].

138. Механические свойства ЭКМ Al—Al₃Ni и Al—CuAl₂ при повышенных температурах [19]

| t , $^\circ\text{C}$ | σ_B , МПа | δ , % |
|------------------------|------------------|--------------|
| Al—Al ₃ Ni | | |
| 20 | 335 | 2,3 |
| 100 | 295 | — |
| 200 | 240 | — |
| 300 | 180 | — |
| 400 | 120 | — |
| 500 | 75 | — |
| Al—CuAl ₂ | | |
| 20 | 270 | 0,7 |
| 100 | 270 | 3—6 |
| 200 | 220 | 6—8 |
| 300 | 120 | 50 |
| 400 | 70 | 110 |
| 500 | 30 | 185 |

Кроме того, системы Al—Al₃Ni и Al—CuAl₂ обладают высокой стабильностью структуры при повышенных температурах. Волокна Al₃Ni не укрупняются и не подвергаются сфероидизации при нагреве до 611°C .

ЭКМ на основе алюминия обрабатываются холодной пластической деформацией и хорошо свариваются методом диффузионной сварки.

ЭКМ Al—Al₃Ni и Al—CuAl₂ применяются как в качестве конструкционного материала, так и для изготовления высокопрочных электрических проводов и контактов выключателей, благодаря низкому электросопротивлению — близкому к электросопротивлению алюминия.

Эвтектические композиционные материалы на основе никеля и кобальта.

ЭКМ на основе никеля и кобальта получают методом направленной кристаллизации или методом зонной плавки.

Никелевые и кобальтовые ЭКМ являются жаропрочными материалами и по поведению при растяжении делятся на две группы: хрупкие и пластичные. Хрупкими, например, являются никелевые пластинчатые ЭКМ с объемной долей упрочнителя более 33—35%. К пластичным относятся волокнистые ЭКМ с объемной долей упрочнителя 3—15%, например сплавы никеля и кобальта, упрочненные монокарбидами тантала, ниобия, гафния.

Физико-механические свойства никелевых и кобальтовых ЭКМ представлены в табл. 139 [58].

139. Свойства никелевых и кобальтовых ЭКМ [58]

| Матрица | Упрочнитель | Об. доля упрочнителя, % | $t_{пл}$, $^\circ\text{C}$ | ρ , г/см ³ | E , ГПа | σ_B , МПа | δ , % |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------|------------------|--------------|
| Ni | NiBe | 38—40 | 1157 | — | 215 | 918 | 9,0 |
| Ni | Ni ₃ Nb | 26 | 1270 | 8,8 | — | 745 | 12,4 |
| Ni | Cr | 23 | 1345 | 8,0 | — | 718 | 29,8 |
| Ni | NiMo | 50 | 1315 | 9,5 | — | 1250 | 1 |
| Ni | Ni ₃ Ti | 29 | 1300 | 8,2 | — | — | 1 |
| Ni | W | 6 | 1500 | — | — | 830 | 45 |
| Ni | TiC | 5,5 | 1307 | — | — | — | — |
| Ni | HfC | 15—28 | 1260 | — | — | — | — |
| Ni | NbC | 11 | 1328 | 8,8 | — | 890 | 9,5 |
| Ni | TaC | ~10 | — | — | — | — | — |
| Ni—Cr | NbC | 11 | 1320 | — | — | — | — |
| Ni—Co—Cr—Al | TaC | ~9 | — | 8,8 | — | 1650 | 5 |
| Ni ₃ —Al | Ni ₃ Nb | 44 | 1280 | 8,44 | 242 | 1240 | 0,8 |
| Ni ₃ —Al | Ni ₃ Nb | 32 | 1280 | — | — | 1230 | 2,0 |
| Ni—Ni ₃ Al | Ni ₃ Nb | — | 1270 | — | — | 1140 | 2,3 |
| Ni ₃ Al | Ni ₃ Ta | ~65 | 1360 | 10,8 | — | 930 | 1 |
| Ni—Ni ₃ Al | Ni ₃ Ta | — | 1360 | — | — | 1060 | 5 |
| Ni ₃ Al | Ni ₇ Zr ₂ | 42 | 1192 | — | — | — | — |
| Ni ₃ Al | Mo | 26 | 1306 | 8,18 | 138 | 1120 | 21 |
| Ni ₃ Al | Cr | 34 | 1450—1455 | 6,4 | 182 | 1240 | 1 |
| Ni—Cr | (Cr, Ni) ₇ C ₃ | 30 | 1305 | — | 200—290 | 685—960 | 2—11 |
| Co | CoAl | 35 | 1400 | — | 172 | 500—585 | 6 |

Продолжение табл. 139

| Матрица | Упрочнитель | Об. доля упрочнителя, % | $t_{пл}, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{г/см}^3$ | $E, \text{ГПа}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $\delta, \%$ |
|----------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|--------------|
| Co | CoBe | 23 | 1120 | — | — | — | — |
| Co | Co ₃ Nb | ~50 | 1235 | — | — | — | — |
| Co | Co ₂ Ta | 35 | 1276 | — | — | — | — |
| Co | Co ₂ W ₆ | 23 | 1480 | — | — | 750 | <1 |
| Co | TiC | 16 | 1360 | — | — | — | — |
| Co | HfC | 15 | — | — | — | — | — |
| Co | VC | 20 | — | — | — | — | — |
| Co | NbC | 12 | 1365 | 8,8 | — | 1030 | 2 |
| Co | TaC | 16 | 1402 | 9,1 | 222 | 1035 | 11,8 |
| Co—Cr | NbC | 12 | 1340 | — | — | 1280 | 2 |
| Co—Cr | TaC | ~9 | 1360 | 9,0 | 210 | 1035—1160 | 16—20 |
| Co—Cr | (Cr, Co) ₇ C ₃ | 30 | 1304 | 8,0 | 296 | 1280—1380 | 1,5 |
| Co—Cr | (Cr, Co) ₂₅ C ₆ | 40 | 1340 | 7,91 | 276 | 1200 | 0,96 |
| Co—Cr—Al | (Cr, Co) ₇ C ₃ | 28 | 1295 | 7,8 | 283 | 1730—2011 | 2,5—1,0 |

Высокие механические свойства волоконистых ЭКМ на основе никеля и кобальта, упрочненных карбидами, объясняются композиционной структурой, при которой пластичная матрица армирована высокопрочными ориентированными кристаллами. Дополнительное увеличение прочности ЭКМ достигается легированием твердого раствора матрицы или ее дисперсным упрочнением.

Пластинчатые ЭКМ, по сравнению с волоконистыми, более чувствительны к скорости кристаллизации, влияющей на расстояние между пластинами.

Быстрая кристаллизация, приводящая к уменьшению расстояния между пластинами, способствует значительному упрочнению ЭКМ. По сравнению с жаропрочными сплавами с интерметаллидным упрочнением ЭКМ при высоких температурах разупрочняются менее интенсивно (табл. 140, 141) [58].

Пределы длительной прочности ряда ЭКМ на основе никеля и кобальта превышают пределы длительной прочности современных жаропрочных спла-

вов, особенно при температурах выше 900 °С (табл. 142) [29].

ЭКМ на основе никеля и кобальта используют в основном для изготовления литых рабочих и сопловых лопаток, а также крепежных деталей камер сгорания газотурбинных двигателей.

Эвтектические композиционные материалы на основе тантала и ниобия. ЭКМ на основе тантала и ниобия получают методом направленной кристаллизации.

Если армирующая фаза ЭКМ Ta—Ta₂C кристаллизуется в форме пластин, то временное сопротивление составляет 560 МПа при относительном удлинении 2%. При кристаллизации армирующей фазы в форме стержней временное сопротивление этого ЭКМ достигает 1050 МПа при относительном удлинении 1,5% (табл. 143) [19].

Прочность ЭКМ Nb—Nb₂C при комнатной температуре в 5 раз выше прочности ниобия и, благодаря высокой термической стабильности, сохраняет

140. Временное сопротивление волоконистых ЭКМ в зависимости от температуры [58]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ |
|---------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---|------------------------|
| Ni—NbC | | (Ni—Co—Cr—Al)—TaC | | (Co—Cr)—TaC | | (Co—Cr)—(Cr, Co) ₇ C ₃ | |
| 20 | 890 | 20 | 1650 | 20 | 1160 | 20 | 1380 |
| 200 | 780 | 200 | 1545 | 200 | 1070 | 200 | 1370 |
| 400 | 680 | 400 | 1400 | 400 | 940 | 400 | 1350 |
| 600 | 590 | 600 | 1205 | 600 | 830 | 600 | 1240 |
| 800 | 490 | 800 | 910 | 800 | 680 | 800 | 920 |
| 900 | 420 | 900 | 690 | 900 | 560 | 900 | 690 |
| 1000 | 320 | 1000 | 500 | 1000 | 410 | 1000 | 410 |
| 1100 | 200 | 1100 | 330 | — | — | — | — |
| 1200 | 120 | 1200 | 200 | — | — | — | — |
| NiAl—Cr | | Ni ₃ Al—Ni ₃ Ta | | (Co—Cr—Ni)—TaC | | (Co—Cr—Al)—(Cr, Co) ₇ C ₃ | |
| 20 | 1240 | 20 | 930 | 20 | 1060 | 20 | 1730 |
| 200 | 1180 | 200 | 895 | 200 | 1020 | 200 | 1615 |
| 400 | 980 | 400 | 820 | 400 | 920 | 400 | 1500 |
| 600 | 650 | 600 | 780 | 600 | 850 | 600 | 1310 |
| 800 | 400 | 800 | 700 | 800 | 690 | 800 | 940 |
| 900 | 330 | 900 | 630 | 900 | 580 | 900 | 700 |
| 1000 | 280 | 1000 | 580 | 1000 | 440 | 1000 | 520 |
| 1100 | 210 | 1100 | 390 | — | — | 1100 | 350 |
| 1200 | 70 | 1200 | 260 | — | — | 1200 | 240 |

141. Временное сопротивление пластинчатых ЭКМ в зависимости от температуры [58]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ |
|---------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|---|------------------------|
| Ni—NiMo | | Ni—Ni ₃ Nb | | Ni ₃ Al—Ni ₃ Nb | | Ni—Ni ₃ Ti | |
| 20 | 1250 | 20 | 840 | 20 | 1130 | 20 | 940 |
| 200 | 1190 | 200 | 780 | 200 | 1100 | 800 | 540 |
| 400 | 1140 | 400 | 700 | 400 | 1030 | 900 | 320 |
| 600 | 1090 | 600 | 630 | 600 | 1000 | 1000 | 130 |
| 800 | 1000 | 800 | 470 | 800 | 950 | (Ni ₃ Al—Ni ₃ Ti)—Ni ₂ TiAl ₂ | |
| 900 | 800 | 900 | 350 | 900 | 900 | 1100 | 270 |
| 1000 | 550 | 1000 | 250 | 1000 | 810 | Ni ₃ Al—Ni ₇ Zr ₂ | |
| 1100 | 320 | — | — | 1100 | 650 | 1100 | 430 |
| 1200 | 140 | — | — | 1200 | 300 | — | — |

142. Жаропрочность ЭКМ на основе никеля и кобальта [29]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $\tau, \text{ч}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $\tau, \text{ч}$ |
|---|------------------------|------------------|--|------------------------|------------------|
| Ni₃Al—Ni₃Nb | | | (Co—Cr—Ni)—TaC | | |
| 900 | 520 | 100 | 800 | 300 | 4000 |
| 1000 | 300 | 100 | 1070 | 120 | 1300 |
| 1100 | 140—150 | 100 | 1100 | 100 | 1200 |
| (Ni—Ni₃Al)—Ni₃Nb | | | (Co—Cr)—(Cr, Co)₂C₃ | | |
| 800 | 670 | 100 | 1150 | 100 | 100 |
| 900 | 450 | 100 | | | |
| 1000 | 200 | 100 | | | |
| 1100 | 135 | 100 | | | |
| (Ni—Co—Cr—Al—W—Re—V)—TaC | | | (Co—Cr)—TaC | | |
| 871 | 520 | 156 | 649 | 375 | 1000 |
| 871 | 550 | 154 | 760 | 350 | 1000 |
| 982 | 310 | 125 | 871 | 300 | 1000 |
| 982 | 275 | 300 | 982 | 225 | 1000 |
| 1093 | 140 | 171 | 1050 | 160 | 403 |
| 1093 | 120 | 300 | 1093 | 140 | 1000 |
| (Co—Cr)—TaC | | | 1250 | 55 | 100 |
| 800 | 300 | 710 | | | |
| 1072 | 120 | 170 | | | |
| 1100 | 105 | 618 | | | |

такие высокие значения при повышенной температуре.

ЭКМ на основе тантала и ниобия используют для изготовления деталей

143. Временное сопротивление ЭКМ Ta—Ta₂C и Nb—Nb₂C в зависимости от температуры [19]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ |
|---------------------------|------------------------|
| Ta—Ta₂C | |
| 20 | 1050 |
| 1100 | 390 |
| 1200 | 365 |
| 1300 | 325 |
| 1400 | 270 |
| 1500 | 230 |
| 1600 | 180 |
| 1640 | 165 |

Продолжение табл. 143

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ |
|---------------------------|------------------------|
| Nb—Nb₂C | |
| 20 | 1070 |
| 200 | 1025 |
| 400 | 955 |
| 600 | 870 |
| 800 | 795 |
| 1000 | 685 |
| 1093 | 632 |
| 1200 | 565 |
| 1300 | 470 |
| 1400 | 385 |
| 1500 | 290 |
| 1600 | 170 |
| 1649 | 128 |

самолетов и ракет, работающих при повышенных температурах (лопатки двигателей, защитные кромки).

9. ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

В конструкции летательных аппаратов все более широко начинают применяться полимерные композиционные материалы (КМ), которые по сравнению с традиционными сплавами имеют ряд преимуществ, позволяющих значительно снизить массу, повысить прочность, жесткость, теплостойкость конструкций. При создании таких материалов применяют непрерывные и дискретные поликристаллические волокна и нитевидные кристаллы бора, углерода и различных соединений (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и др.). В табл. 144 приведены свойства наиболее распространенных в СССР и за рубежом полимерных КМ на основе непрерывных стеклянных, углеродных, борных и органических волокон. Из большого числа разработанных полимерных КМ наиболее перспективными являются КМ на основе углеродных волокон, т. е. углепла-

стики. К основным преимуществам углепластиков следует отнести: сравнительно малую плотность, высокую статическую прочность и сопротивление усталости, жесткость, коррозионную стойкость, износостойкость, малый коэффициент температурного расширения и электропроводность. В табл. 145 приведены свойства углеродных волокон, полученных из вискозного сырья. Большое число различных марок углеродных волокон, получаемых в СССР и за рубежом из ПАН-волокна, можно условно разделить на две группы:

1) высокопрочные волокна с пределом прочности 2,45—3,14 ГПа и сравнительно малым модулем упругости 176,4—215,6 ГПа;

2) высокомодульные волокна с пределом прочности 1,37—2,16 и модулем упругости 343—350 ГПа.

В табл. 146 приведены основные характеристики физико-механических свойств различных эпоксифенольных карбоволоконитов: КМУ-1л на основе углеродной ленты; КМУ-1у на основе углеродного жгута; КМУ-1в — на основе того же жгута, вискеризованного нитевидными кристаллами. Использование ленты и жгутов, состоящих из более прочных моноволокон, обес-

144. Свойства высокомодульных волокон и однонаправленных эпоксидных композиционных материалов [53]

| Тип волокон | Марка волокна | Свойства волокон длиной 10 мм | | Свойства композиционных материалов *1 | | |
|--------------|-----------------|-------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|--------------------------------|
| | | σ_B | E | σ_B | E | $\sigma_B/(\rho g), \text{км}$ |
| | | | | | | |
| Стеклянные | ВМ-1 | 3,82 | 102,9 | 2,01 | 69,1 | 98 |
| | ВМП | 4,61 | 93,2 | 2,35 | 64,7 | 114 |
| » | М-11 | 4,61 | 107,9 | 2,15 | 72,6 | 98 |
| | БН (сорт 2) | 2,75 | 392,2 | 1,37 | 225,5 | 75 |
| Борные | БН (сорт 1) | 3,14 | 382,4 | 1,72 | 274,6 | 87 |
| | Борофил (США) | 2,75 | 382,4 | 1,57 | 225,5 | 80 |
| Органические | СВМ | 2,75 | 117,7 | 1,47 | 58,8 | 111 |
| | Кевлар-49 (США) | 2,75 | 130,4 | 1,37 | 80,4 | 100 |

*1) Объемная доля наполнителя 60 %.

145. Свойства углеродных волокон [5]

| Марка волокна (страна) | ρ , т/м ³ | σ | $E \cdot 10^{-3}$ | $\sigma_B (\rho g)$ | $E (\rho g) \cdot 10^{-3}$ |
|---------------------------|------------------------------|-----------|-------------------|---------------------|----------------------------|
| | | | | | |
| ВМН-4 (СССР) | 1,75 | 1,96—2,45 | 0,25—0,29 | 118—137 | 14,2—17,6 |
| ВМН-5 (СССР) | 1,75 | 2,45—2,94 | 0,32—0,49 | 142—171 | 18,2—20,6 |
| Модмор 2 (Англия) | 1,80 | 2,35—3,04 | 0,24—0,30 | 133—172 | 13,3—17,2 |
| Торнел-50 (США) | 1,63 | 19,6 | 0,33 | 120 | 20,8 |
| Торнел-60 (США) | 1,69 | 2,16 | 0,39 | 130 | 23,7 |
| Торнел-70 (США) | 1,86 | 2,55 | 0,51 | 140 | 28,0 |
| Торейка М-40А (Япония) | 1,95 | 1,96 | 0,36 | 102 | 19,0 |

146. Характеристики физико-механических свойств однонаправленных эпоксикарбо- и эпоксисборо-волокон и карбо- и боро-волокон с углеродной матрицей [53]

| Характеристика | Карбо-волокониты | | | Боро-волокониты | | | | Карбо-волоконит КУП-ВМ с углеродной матрицей |
|---|------------------|--------|--------|-----------------|--------|---------|---------|--|
| | КМУ-1л | КМУ-1у | КМУ-1в | КМВ-1м | КМВ-1к | КМВ-2к | КМВ-3к | |
| ρ , т/м ³ | 1,4 | 1,47 | 1,55 | 2,1 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 1,35 |
| σ_B , ГПа | 0,65 | 1,02 | 1,00 | 1,30 | 0,9 | 1,0 | 1,30 | 0,20 |
| $\sigma_{сж}$, ГПа | 0,35 | 0,40 | 0,54 | 1,16 | 0,92 | 1,25 | 1,50 | 0,26 |
| $\sigma_{и}$, ГПа | 0,80 | 1,10 | 1,20 | 1,75 | 1,25 | 1,55 | 1,45 | 0,64 |
| τ , ГПа | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,04 |
| E , ГПа | 120 | 180 | 180 | 270 | 214 | 260 | 260 | 165 |
| $E_{п}$, ГПа | 100 | 145 | 160 | 250 | 223 | 215 | 238 | 160 |
| G , ГПа | 2,8 | 3,5 | 5,35 | 9,8 | 7,0 | 6,8 | 7,2 | — |
| σ_{1000} , ГПа (на базе 10^7 циклов) | 0,47 | 0,88 | 0,90 | 1,37 | 1,22 | 1,20 | 1,30 | — |
| σ_{-1} , ГПа | 0,30 | 0,50 | 0,35 | 0,40 | 0,35 | 0,40 | 0,42 | 0,24 |
| δ , % | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,3—0,5 | 0,3 | 0,3—0,4 | 0,3—0,4 | — |
| μ | 0,22 | 0,27 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,18 | 0,2 | — |
| KCU , кДж/м ² | 50 | 44 | 84 | 90 | 78 | 110 | 110 | 12 |

печивает повышение прочности карбо-волоконитов при растяжении и изгибе. Карбо-волокониты КМУ-3 и КМУ-3л на основе эпоксиналиноформальдегидного связующего предназначены для изделий, эксплуатирующихся при температурах 100 °С. До температуры 80 °С карбо-волокониты сохраняют свои прочностные и упругие свойства неизменными, соответствующими свойствам материалов КМУ-1у и КМУ-1л.

Карбо-волокониты на эпоксифенольном связующем используют в изделиях, длительно работающих при температурах до 200 °С. Для изделий, длительно работающих при температурах до 300 °С, применяют карбо-волокониты марки КМУ-2 и КМУ-2л на полиимидном связующем. Показатель, наиболее чувствительный к температурному воздействию, — предел прочности при изгибе и меж-

слойном сдвиге, линейно понижающийся с ростом температуры вплоть до температуры стеклования связующего.

Изделия из карбо-волоконитов можно изготавливать несколькими методами: «мокрой» намоткой, когда жгуты или ленты пропитывают связующим в процессе укладки на вращающуюся оправку, пропиткой связующим под давлением, когда заготовку из сухого наполнителя пропитывают связующим в замкнутой форме, выкладкой или намоткой в виде пропитанных смолы непрерывных лент или листов и последующего формования при повышенных давлении и температуре. Метод выбирают в зависимости от геометрических особенностей изделия и типа применяемого связующего. Природа связующего определяет основные технологические параметры формования материалов: давление, время и температуру. Наиболее технологичны карбо-волокониты КМУ-3, температура и давление формования которых минимальны.

Особенность карбо-волоконитов — их высокая усталостная прочность, большая, чем у боро- и стекловолоконитов, и имеющая тот же порядок, что и прочность титана и легированных сталей. Отличаясь высокой демпфирующей способностью, карбо-волокониты существенно превосходят металлы по вибропрочности. Ориентируя волокна под углом друг к другу, можно в больших пределах изменять демпфирующую способность карбо-волоконитов и предотвращать резонансный режим деталей, не изменяя их геометрии.

К недостаткам слоистых карбо-волоконитов относится их низкая прочность при сжатии и межслойном сдвиге, увеличение которой в 1,5—3 раза достигается различными методами поверхностной обработки углеродных волокон; окислением на воздухе, травлением в азотной кислоте, выращиванием нитевидных кристаллов.

Теплофизические характеристики карбо-волоконитов существенно анизотропны. В направлении, перпендикулярном к плоскости укладки волокон, они на 30—50 % выше, чем у стеклопластиков. В направлении укладки волокон теплофизические свойства из-

меняются в зависимости от ориентации волокон и их содержания в направлении измерения. Необычна зависимость относительного удлинения однонаправленного карбо-волоконита от температуры, определяемая термическими свойствами карбо-волокон, коэффициент линейного расширения которых в интервале температур 20—300 °С отрицателен. Коэффициент термического расширения однонаправленного карбо-волоконита КМУ-1 в интервале температур 20—120 °С близок к нулю, в интервале 120—200 °С равен $0,5 \times 10^{-6}$, 1/°С.

Полимерные боро-волокониты отличаются от других композиционных материалов сочетанием таких свойств, как высокое сопротивление сжатию, срезу, сдвигу, низкая ползучесть, высокие твердость и модуль упругости.

В качестве армирующего наполнителя боро-волоконитов используют борное волокно в виде единичной нити непрерывной длины диаметром 100 или 150 мкм и комплексные боростекло-ниты, состоящие из семи или 49 параллельных боро-волокон, сплетенных вспомогательной стеклянной нитью высокого метрического номера для придания формоустойчивости.

Прочность боро-волоконитов при изгибе и растяжении зависит от средней прочности боро-волокна, используемого для их изготовления. Использование боро-волокон сортов 1, 2 и 3 обеспечивает получение боро-волоконитов со средним значением предела прочности при изгибе 1,75; 1,60 и 1,20 ГПа соответственно. При этом предел прочности при сжатии остается постоянным на уровне 1,20 ГПа.

Использование комплексных боростекло-нитей позволяет в несколько раз повысить производительность процесса намотки и сократить общую продолжительность технологического цикла изготовления материала, но при этом увеличивается толщина монослоя и несколько уменьшается содержание борного волокна в композиционном материале, что вызывает незначительное снижение его упруго-прочностных свойств (см. табл. 145). В зависимости от температуры эксплуатации изделий указанные наполнители сочетают с модифицированными

эпоксидными и полиимидными связующими. Бороволокниты КМБ-1 и КМБ-1к на эпоксизоцианатном связующем предназначены для длительной работы при температуре 200 °С. Бороволокнит КМБ-2к на основе амидоимидного связующего работоспособен при температуре 300 °С. Материалы КМБ-3 и КМБ-3к на модифицированном эпоксидном связующем, отличающемся повышенными прочностными свойствами и технологичностью, характеризуются более высоким пределом прочности при сдвиге и сжатии и низким давлением формования при переработке, но рабочие температуры этих материалов не превышают 100 °С.

Своеобразие геометрических, механических и физико-химических характеристик борного волокна предопределяет особенности свойств бороволокнитов. Характерная ячеистая микроструктура обеспечивает достижение высокой прочности при сдвиге по границе раздела упрочняющей и связующей компонент. Отсутствие крутки и искривленности волокон, обусловленных большим диаметром и высокой жесткостью волокон, благоприятствует более полной реализации их механических свойств и повышает сопротивление бороволокнитов при сжатии. Однако большой диаметр волокна вызывает увеличение эффективной длины и повышение чувствительности бороволокнитов к нарушению целостности волокон, что приводит к некоторому снижению прочности бороволокнитов при растяжении по сравнению с прочностью материалов на основе равнопрочного тонковолокнистого наполнителя.

Высокая длительная прочность, неизменность деформативных свойств во времени и низкое удлинение при разрыве волокон бора предопределяют высокий уровень статической усталости и малую ползучесть материалов на их основе. Достаточно высокое сопротивление усталости бороволокнитов, составляющее для материала КМБ-1м и КМБ-2 0,35—0,40 ГПа, может быть увеличено при использовании более высокопрочной матрицы.

Наряду с отмеченными особенностями механические свойства бороволокнитов подчиняются общим для арм-

рованных систем закономерностям. Регулирование свойств бороволокнитов достигается варьированием схем ориентации наполнителя.

Теплофизические характеристики бороволокнитов так же, как и карбоволокнитов, анизотропны. Бороволокниты стойки к воздействию проникающей радиации. Длительное воздействие воды, органических растворителей и горючесмазочных материалов не влияет на изменение их механических свойств.

Карбоволокниты с углеродной матрицей находят применение для тепловой защиты, дисков авиационных тормозов, химически стойкой аппаратуры, заменяя различные типы графитов. Сохранение углеродными волокнами присущей им высокой прочности до температуры сублимации, высокая прочность сцепления с коксом связующего придает этим композициям высокие механические и абляционные свойства, стойкость к термическому удару и другие ценные свойства. Процесс изготовления карбоволокнитов с углеродной матрицей состоит из трех стадий: получения обычного карбоволокнита на полимерном связующем, пиролиза полученного карбоволокнита в инертной или восстановительной среде при температуре 1000—1500 °С, пороплотнения дополнительной пропиткой связующим с последующей карбонизацией или пироуглеродом.

Свойства материалов типа КУП-ВМ изменяются в зависимости от типа и ориентации волокна, плотности коксового остатка, количества пироуглерода.

По значениям прочности и ударной вязкости материал КУП-ВМ превосходит в 5—10 раз специальные графиты и при нагреве в инертной атмосфере в вакууме сохраняет неизменной прочность до температуры 2200 °С. При нагреве на воздухе материал без специального покрытия начинает окисляться при 450 °С.

При трении одного карбоволокнита с углеродной матрицей по другому коэффициент трения их высок (0,35—0,45), а износ мал (0,7—1 мкм на тор. можение). Применение углеродного материала вместо чугуна позволяет снизить массу тормозных дисков на 40—

147. Свойства одноосно-армированных композиционных материалов с полимерной матрицей [33]

| Материал | ρ , г/см ³ | σ_B , МПа | $\sigma_B/(\rho g)$, км | δ , % | E , ГПа | $E/(\rho g) \cdot 10^{-6}$, км | σ_{-1}^{*1} , МПа |
|---------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|--------------|-----------|---------------------------------|--------------------------|
| Органоволокниты с упрочнителем: | | | | | | | |
| эластичным | 1,15—1,3 | 100—190 | 8—15 | 10—20 | 2,5—8,0 | 0,22—8,0 | 100 |
| жестким | 1,2—1,4 | 650—700 | 50 | 2—5 | 35 | 2,7 | — |
| Стекловолокониты | 2,2 | 2100 | 96 | — | 70 | 3,2 | — |

*1 На базе 10⁷ циклов.

50 % и увеличить ресурс эксплуатации в 1,5—2 раза.

Механические свойства некоторых одноосно-армированных волокнистых композиционных материалов представлены в табл. 147. Самую высокую прочность и удельную прочность имеют стекловолокониты. Временное сопротивление стекловолоконитов повышается приблизительно в 3 раза по мере увеличения объемного содержания наполнителя.

Основные недостатки современных углепластиков с эпоксидной матрицей связываются с пониженными вязкостью разрушения, ударной стойкостью и температурой использования. Новые разработки и исследования направлены на улучшение указанных характеристик и, в первую очередь, на повышение теплоустойчивости и вязкости разрушения. Углепластики на основе бисмалендов и полиимидов дешевы и широко применяются в промышленности. По сравнению с эпоксидными полимерами они имеют более высокую теплоустойчивость и ударную прочность, легко перерабатываются и представляются весьма перспективными при использовании КМ на их основе в силовых конструкциях.

Жидкокристаллические полимеры представляют новый класс полимеров, которые имеют упорядоченную структуру в растворах (лиотропную) или в расплавах (термотронную). Фирмой

Силаниз разрабатываются термотропные полимеры и, в частности, семейство нафталиновых сополимеров, которые обозначаются LCP. Уникальные свойства LCP позволяют получить высокие механические характеристики при малой плотности, высокую химическую стойкость и большой диапазон рабочих температур.

Изменение характеристик углепластика на основе полиимидной матрицы LARC-160 и углеродного волокна Селион 6000 с повышенной стойкостью к окислению и модулем упругости 245 ГПа в зависимости от времени выдержки на воздухе при 315 °С представлено в табл. 148. Углепластик Селион 6000/LARC-160 после выдержки в указанных условиях в течение 1000 ч практически не изменяет своих механических характеристик.

В табл. 149 дано сравнение углепластиков на основе волокна Селион с разрушающей деформацией 1,8 %. Ударная прочность бисмалендиного связующего по сравнению с эпоксидным значительно улучшается (табл. 150).

Из термопластичных полимеров наиболее перспективны полиэфирафторкеттоны и жидкокристаллические полимеры.

Характеристики однонаправленных углепластиков со связующим РЕЕК приведены в табл. 151, а углепластиков на основе ткани с эпоксидной и

148. Влияние теплового старения на характеристики углепластика Селион 6000/LARC-160 (объемное содержание волокна 68 %) [39]

| Режим старения | t, °C | Унос массы, % | $\bar{\epsilon}_n$ | $E_n \cdot 10^{-2}$ | τ |
|--|-------|---------------|--------------------|---------------------|--------|
| | | | ГПа | | |
| Контрольные образцы | 23 | — | 2,15 | 0,13 | 0,11 |
| | 360 | — | 1,59 | 0,12 | 0,05 |
| Время выдержки при 315 °C на воздухе, ч: | 200 | 0,33 | 1,59 | 0,14 | 0,05 |
| | 500 | 0,57 | 2,07 | 0,13 | 0,06 |
| | 1000 | 1,08 | 2,06 | 0,14 | 0,06 |

149. Механические характеристики однонаправленных углепластиков на основе волокна Селион [39]

| Характеристики | Углепластик с эпоксидной матрицей | Углепластик с модифицированной бисмалеимидной матрицей |
|--|-----------------------------------|--|
| Растяжение в продольном направлении (ГПа): | | |
| σ_B | 2,06 | 2,52 |
| $E \cdot 10^{-3}$ | 0,14 | 0,14 |
| Разрушающая деформация, % | 0,14 | 0,17 |
| Сжатие в продольном направлении (ГПа): | | |
| $\sigma_{сж}$ | 1,45 | 1,32 |
| $E_{сж} \cdot 10^{-3}$ | 0,11 | 0,11 |
| Растяжение в поперечном направлении (ГПа): | | |
| σ_B | 0,05 | 0,06 |
| E | 10,0 | 9,0 |
| Сдвиг в плоскости (ГПа): | | |
| τ | 0,09 | 0,10 |
| G | 5,31 | 4,97 |
| τ (испытанья на коротких балках), ГПа | 0,12 | 0,10 |

РЕЕК-матрицами — в табл. 152. Углепластики с РЕЕК-матрицей в условиях влажности и температуры меняют характеристики очень незначительно; при этом максимальное влаго-содержание не превышает 0,4 %. Углепластики с РЕЕК-матрицей по вязкости разрушения на порядок превосходят углепластики с эпоксидной матрицей (табл. 153).

Жидкокристаллические полимеры представляют новый класс полимеров, которые имеют упорядоченную структуру в растворах (лиотропную) или в расплавах (термотропную).

Характеристики жидкокристаллических полимеров LCP, разработанных фирмой Силанз, приведены в табл. 154, а однонаправленных углепластиков с LCP-матрицей — в табл. 155. Удель-

150. Механические характеристики полимерных связующих [39]

| Характеристики | Эпоксидное связующее | Модифицированное бисмалеимидное связующее | Условия испытаний |
|---------------------------------|-------------------------|---|-------------------|
| σ_B , ГПа | 0,11 | 0,14 | 22 °C |
| | 0,08 | 0,14 | 93 °C, сухие |
| | 0,06 | 0,14 | 93 °C, влажные *1 |
| E_B , ГПа | 3,76 | 3,43 | 22 °C |
| | 3,26 | 3,19 | 93 °C, сухие |
| | 2,89 | 3,04 | 93 °C, влажные *1 |
| Ударная прочность по Изоду, Дж: | | | |
| | на образцах с надрезами | 0,4 | 1,07 |
| на образцах без надрезов | 3,2 | 10,2 | 22 °C |

*1 После выдержки в кипящей воде в течение 40 ч.

151. Характеристики однонаправленных углепластиков со связующим РЕЕК (объемное содержание волокна 50 %) [39]

| Характеристики | Температура испытаний | |
|---|-----------------------|--------|
| | 20 °C | 121 °C |
| σ_B , ГПа | 1,65 | 1,27 |
| $E_n \cdot 10^{-3}$, ГПа | 0,12 | 0,12 |
| τ (из испытаний коротких балок), ГПа | 0,10 | — |
| $\sigma_{сж}$, ГПа | 1,03—1,38 | — |
| Максимальное влагопоглощение, % | 0,4 | 0,4 |

152. Характеристики углепластиков [39]

| Характеристики | Углепластик с эпоксидной матрицей | Углепластик с РЕЕК-матрицей | Условия испытаний |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| σ_B , ГПа | 0,78 | 0,70 | 20 °C |
| | 0,74 | 0,58 | 120 °C, сухие |
| | 0,49 | 0,57 | 120 °C, влажные |
| | 0,55 | 0,40 | 175 °C, сухие |
| | 0,23 | 0,41 | 175 °C, влажные |
| Влагосодержание, % | 1,3 | 0,4 | — |
| Объемная доля волокна, % | 62,0 | 57,3 | — |

153. Стойкость к расслоению углепластиков с эпоксидной и РЕЕК-матрицами [39]

| Армирующий материал | Матрица | $KCU \cdot 10^2$, МДж/м ² |
|------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| Ткань | Эпоксидная РЕЕК | 0,23 2,0 |
| Однонаправленная левта | Эпоксидная РЕЕК | 0,14 1,40 |

154. Характеристики жидкокристаллических полимеров LCP в различной структурной форме ($\rho = 1,42$ т/м³) [39]

| Структурная форма | Характеристики при растяжении | | |
|------------------------|-------------------------------|------------|--------------|
| | $E \cdot 10^{-2}$ | σ_B | δ , % |
| | ГПа | | |
| Волокно: | | | |
| без термообработки | 0,09 | 3,20 | 5 |
| после термообработки | 0,12 | 3,20 | 3 |
| Нить диаметром 0,76 мм | 0,08 | — | 4 |
| Лента шириной 6,35 мм | 0,08 | 1,97 | 4 |
| Лист: | | | |
| без термообработки | 0,02 | 0,23 | 1 |
| после термообработки | 0,02 | 0,58 | 2 |
| Отливки: | | | |
| без термообработки | 0,01 | 0,23 | 3 |
| после термообработки | 0,01 | 0,35 | 3 |

155. Характеристики однонаправленных углепластиков с LCP-матрицей (объемная доля волокна 50 %) [39]

| Характеристика | Значения | Условия испытаний |
|---|----------|-------------------|
| σ_B , ГПа | 1,51 | 22 °С, сухие |
| | 1,45 | 22 °С, влажные |
| | 0,85 | 120 °С, сухие |
| | 0,85 | 120 °С, влажные |
| $E \cdot 10^{-3}$, ГПа | 0,10 | 20 °С, сухие |
| | 0,09 | 120 °С, влажные |
| | 0,09 | 120 °С, сухие |
| τ , ГПа (испытания коротких балок) | 0,05 | 20 °С |
| $\sigma_{сж}$, ГПа | 0,89 | 20 °С |
| Максимальное влагопоглощение, % | 0,2 | — |

156. Физико-механические характеристики связующих [39]

| Характеристики | Связующее | | |
|--------------------------------------|-----------|-------|------------|
| | К-1 | К-11 | Эпоксидное |
| Температура стеклования, °С | 210 | 277 | 190 |
| Максимальная рабочая температура, °С | 177 | 232 | 135 |
| σ_B^{*1} , ГПа | 0,106 | 0,109 | 0,047 |
| E^{*1} , ГПа | 2,42 | 2,92 | 3,87 |
| δ , % | 7 | 11 | 1 |
| KCU , кДж/м ² | 6,3 | 14 | 0,08 |
| Кислородный показатель | 50 | — | — |
| Обугливаемость, % | 60 | — | — |

*1 При 23 °С.

157. Механические характеристики однонаправленных углепластиков на основе волокна AS-4 (объемная доля волокна 60 %) [39]

| Характеристики | Сухие образцы | | После выдержки в воде при 71 °С в течение 2 недель | | | |
|---|---------------|------|--|------------|------|------|
| | Связующее | | | | | |
| | эпоксидное | К-1 | К-11 | эпоксидное | К-1 | К-11 |
| σ_B , ГПа, при температуре, °С: | | | | | | |
| 23 | 1,67 | 1,36 | 1,53 | 1,76 | 1,42 | — |
| 93 | 1,55 | 1,26 | — | 1,39 | 1,15 | 1,41 |
| 121 | 1,46 | 1,22 | — | 1,19 | 1,11 | — |
| 149 | 1,33 | 1,04 | 1,23 | 1,03 | 0,95 | 1,13 |
| 177 | 1,19 | 1,12 | 1,04 | 0,64 | 0,80 | 0,92 |
| 204 | — | — | 0,97 | — | — | 0,92 |
| 232 | — | — | 0,90 | — | — | 0,84 |
| $E \cdot 10^{-3}$, ГПа, при температуре, °С: | | | | | | |
| 20 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,11 |
| 121 | 0,12 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,10 | 0,11 |
| 177 | 0,12 | 0,11 | 0,12 | 0,11 | — | 0,10 |
| 232 | — | — | 0,12 | — | — | 0,12 |
| τ , ГПа, при температуре, °С: | | | | | | |
| 20 | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,10 | 0,09 | — |
| 93 | 0,08 | 0,08 | — | 0,07 | 0,07 | 0,08 |
| 121 | 0,08 | 0,07 | — | 0,06 | 0,06 | — |
| 149 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 0,06 |
| 177 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,06 |
| 204 | — | — | 0,06 | — | — | 0,06 |
| 232 | — | — | 0,05 | — | — | 0,04 |
| Температура стеклования, °С | 168 | 208 | 264 | 132 | 190 | 229 |
| Влагосодержание, мас. доля, % | — | — | — | 0,93 | 0,33 | 0,60 |

158. Керамические теплозащитные материалы, используемые в конструкции «Space Shuttle» (США)

| Теплозащитный материал | LI-900 [6] | LI-2200 [6] | FRCI-12 [6] | FRCI-40 [7] | FRCI-8 [3] | FRCI-8 [3] |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|--|---|
| Состав материала | Волокно кремния + кремниевая связка | Волокно кремния + кремниевая связка | Волокно кремния + волокно Nextel 312 *1 | 60 % волокна кремния + 40 % волокна Nextel 312 | 78 % волокна кремния + 22 % волокна Nextel 312 | 85 % волокна кремния + 15 % (об. доля) волокна Nextel 312 |
| ρ , т/м ³ | 0,128—0,152 | 0,320—0,384 | 0,191—0,216 | 0,098 | 0,128 | 0,136 |
| $\sigma_{\text{в}} \cdot 10^{-6}$, ГПа: в направлении формования перпендикулярно к направлению формования | 166 462 | 503 1242 | 558 1772 | 1269 3171 | 290 — | 241 — |
| $\sigma_{\text{сж}} \cdot 10^{-6}$, ГПа: в направлении формования перпендикулярно к направлению формования | 193 482 | 896 1586 | 910 1827 | — — | — — | — — |
| $\alpha \cdot 10^{-7}$, °С ⁻¹ : в направлении формования перпендикулярно к направлению формования | 7,2 7,2 | 7,2 7,2 | 12,6 12,6 | — — | — — | — — |

Продолжение табл. 158

| Теплозащитный материал | LI-900 [6] | LI-2200 [6] | FRCI-12 [6] | FRCI-40 [7] | FRCI-8 [3] | FRCI-8 [3] |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|
| α , 1/°С, при нагреве до 833 °С: в направлении формования перпендикулярно к направлению формования | — — | — — | — — | 0,42 × 10 ⁻³ 1,89 × 10 ⁻³ | 0,96 × 10 ⁻⁴ 1,31 × 10 ⁻⁴ | 0,82 × 10 ⁻⁴ 0,83 × 10 ⁻⁴ |
| λ , Вт/(м·°С): в направлении формования: при 39 °С и 9,8 Па при 556 °С и 9,8 Па перпендикулярно к направлению формования: при 39 °С и 9,8 кПа при 556 °С и 9,8 кПа при 833 °С и 9,8 Па | 0,014 0,038 0,061 0,149 — | 0,030 0,057 0,101 0,177 — | 0,018 0,047 0,073 0,156 — | — — — — — | — — — 0,19 — | — — — 0,09 — |
| ϵ , кДж/(кг·°С) | 0,71 | 0,71 | 0,71 | — | — | — |
| Рабочая температура, °С: многократное воздействие однократное воздействие | 1257 1497 | 1257 1497 | 1257 1497 | 1257 1497 | 1257 — | 1257 — |

*1 Nextel 312 — алюмоборосиликатное волокно фирмы 3М Со; состав: 62 % Al₂O₃, 14 % В₂O₃, 24 % SiO₂ (об. доля); волокно кремния фирмы John—Malville Corp. — содержание кремния 99,7 % (об. доля).

ная прочность LCP, получаемых литьевым формованием, в 2 раза превосходит удельную прочность алюминия.

Углепластики с термопластичными связующими на основе К-полимеров, имеющих высокую вязкость разрушения, исследовала фирма Дюпон. Были рассмотрены связующие К-I и К-II с максимальной рабочей температурой соответственно 177 и 232 °С (табл. 156). В качестве армирующего материала использовалось углеродное волокно AS-4. Результаты испытаний однонаправленных углепластиков приведены в табл. 157. Воздействие внешней среды оценивалось по снижению прочности при сдвиге, определяемой при испытании на изгиб коротких балок. Наибольшее снижение прочности (~14 %) получено после выдержки в воде при 71 °С в течение 336 ч; при этом максимальное влагосодержание в углепластике AS-4/К-I составляло 0,28 %.

Теплозащитные композиционные материалы для летательных аппаратов многократного использования изготавливают из тугоплавких волокон (химически чистого кремния, алюмоборосиликатных волокон); они обладают сильной анизотропией теплофизических характеристик в плоскости формования и перпендикулярных к ней. Низкая теплопроводность материала по нормали к плоскости формования обеспечивается преимущественной ориентацией волокон при формовании.

Плотность КМ, его прочностные и теплофизические характеристики определяются относительным объемным содержанием волокон. Состав и свойства теплозащитных КМ приведены в табл. 158.

Эффективность теплозащитного материала повышается при нанесении тонкого покрытия из стекла специального состава, служащего радиационным экраном и обеспечивающего отвод (до 80 %) теплового потока.

Низкая прочность материала и малый коэффициент линейного расширения вызывают необходимость обеспечения термической совместности теплозащитного КМ и защищаемой конструкции или изоляции КМ от деформируемой поверхности путем введения компенсирующих прокладок.

Список литературы

1. Акопов И. А., Бобрищев-Пушкин Д. М., Прокофьева А. К., Яценко К. П. Безопасность труда при работе с бериллием и его сплавами. М.: Машиностроение, 1964. 216 с.
2. Альтман М. Б., Лебедев А. А., Чухров М. В. Плавка и литье легких сплавов. М.: Металлургия, 1969. С. 100—139.
3. Алюминиевые сплавы/Под ред. В. И. Елагина, В. А. Ливанова. М.: Металлургия, 1984. 407 с.
4. Анциферов В. Н., Устинов В. С., Олесов Ю. Г. Спеченные сплавы на основе титана. М.: Металлургия, 1984. 167 с.
5. Бериллий. Наука и технология. М.: Металлургия, 1984. 110 с.
6. Бибиков Е. Л., Глазунов С. Г., Неуструев А. А. и др. Титановые сплавы. Производства фасонных отливок из титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983. 296 с.
7. Борисова Е. А., Бочвар Г. А., Брун М. Я., Глазунов С. Г. и др. Металлография титана. М.: Металлургия, 1980. 464 с.
8. Волокнистые композиционные материалы/Под ред. Дж. Уитона. Э. Скала. М.: Металлургия, 1988. 42 с.
9. Вульф Б. К. Титан в электронной технике. М.: Энергия, 1975. 184 с.
10. Вульф Б. К. Термическая обработка титановых сплавов. М.: Металлургия, 1969. 375 с.
11. Герчикова Н. С. Тонкая структура и коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1982. 128 с.
12. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 366 с.
13. Дриц М. Е., Рохлин Л. Л. Магниево-титановые сплавы с особыми акустическими свойствами. М.: Металлургия, 1983. 128 с.
14. Дриц М. Е., Елкин Ф. М., Гурьев И. Н., Бондарев Б. И. и др. Магниево-титановые сплавы. М.: Металлургия, 1980. 140 с.
15. Дриц М. Е. Магниево-титановые сплавы для работы при повышенных температурах. М.: Наука, 1964. 231 с.
16. Дриц М. Е., Падеев Е. М., Рохлин Л. Л. и др. Легкие сплавы,

17. Дроздовский Б. А., Проходцев Л. В., Новосельцев Н. И. Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983. 192 с.
18. Закономерности изменения структуры и свойств бериллиево-алюминиевых сплавов/И. Н. Фридляндер, К. П. Яценко, Г. А. Некрасов и др.//МИТОМ. 1970. № 7. С. 50—55.
19. Залкинд М., Лемке Ф., Джорж Д. Монокристаллы волокна и армированные ими материалы. М.: Мир, 1973. С. 332—378.
20. Кадыкова Г. Н. Управление структурой двухфазных титановых сплавов при термической обработке//МИТОМ. 1984. № 5. 53 с.
21. Кишкин С. Т., Строганов Г. Б., Логунов А. В. и др. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов//Литейное производство. 1984. № 4. С. 17—19.
22. Кишкин С. Т., Строганов Г. Б., Логунов А. В. Структурная стабильность и ее влияние на механические свойства//Доклады АН СССР. 1983. Т. 268, № 4. С. 141—148.
23. Кишкин С. И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1981. 280 с.
24. Колачев Б. А., Мальков А. В. Физические основы разрушения титана. М.: Металлургия, 1983. 160 с.
25. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. 414 с.
26. Колачев Б. А., Габидулин Р. М., Пигусов Ю. В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 280 с.
27. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1974. 542 с.
28. Колобнев И. Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1966. 394 с.
29. Композиционные материалы: Справочник/Под ред. Д. М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. С. 373—474.
30. Магниево-титановые сплавы: Справочник/Под ред. М. Б. Альтмана, М. Е. Дрица,

М. А. Тимоновой, М. В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. Ч. 1. 232 с.
31. Магниево-титановые сплавы: Справочник/Под ред. И. И. Гурьева, М. В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. Ч. 2. 296 с.

32. Мальцев М. В. Металлография тугоплавких, редких и радиоактивных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1971. 488 с.

33. Материаловедение/Под ред. Б. Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1986. 383 с.

34. Моисеев В. Н., Поваров И. А., Каплин Ю. И. Структура и свойства титановых сплавов после изотермического деформирования с малыми скоростями//МИТОМ. 1984. № 5. 43 с.

35. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1979. 640 с.

36. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986. 480 с.

37. Папиров И. И. Структура и свойства сплавов бериллия: Справочник. М.: Энергоиздат, 1981. 311 с.

38. Папиров И. И. Бериллий — конструкционный материал. М.: Машиностроение, 1977. С. 8—47.

39. Перспективные конструкционные материалы//Техническая информация ЦАГИ. 1985. № 12. 2 с.

40. Полькин И. С. Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 93 с.

41. Порошковая металлургия титановых сплавов/Ред. Ф. Фроуса, Д. Смучереккн. М.: Металлургия, 1985. 262 с.

42. Портной К. И., Салибеков С. Е., Светлов И. А., Чубаров В. М. Структура и свойства композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 89 с.

43. Применение титана в народном хозяйстве/Под ред. А. Т. Туманова. Киев: Техніка, 1975. 217 с.

44. Прогрессивные методы производства конструкционно-прочных отливок. М.: МДНТИ им. Ф. Э. Дзержинского, 1987. 140 с.

45. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник/Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1984. 527 с.

46. Рачев Х., Стефанов С. Справочник по коррозии. М.: Мир, 1982. 91 с.
47. Рохлин Л. Л. Магниеые сплавы, содержащие РЗМ. М.: Наука, 1980. 193 с.
48. Сборник трудов конференции. Магниеые сплавы. М.: Наука, 1978. 224 с.
49. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1974. С. 224—236.
50. Солонина О. П., Глазунов С. Г. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 447 с.
51. Сплавы магниеые деформируемые. Марки: ГОСТ 14957—76.
52. Сплавы магниеые литейные. Марки: ГОСТ 2876—79.
53. Справочник металлста. М.: Машиностроение, 1976. Т. 2. 717 с.
54. Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б. Алюминиевые сплавы с кремнием. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
55. Строганов Г. Б. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
56. Тимонова М. А. Коррозия и защита магниеых сплавов. М.: Машгиз, 1964. 286 с.
57. Титан. Металловедение и технология: Труды III Международной конференции по титану/Под ред. А. Ф. Белова. М.: ВИЛС, 1978. Т. 1—3.
58. Томсон Е. Р., Лемке Ф. Д. Композиционные материалы с металлической матрицей/Под ред. К. Крейдера. М.: Машиностроение, 1978. Т. 4. С. 110—164.
59. Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н., Рахштадт А. Г. Металловедение высокодеформирующихся сплавов. М.: Металлургия, 1980. 272 с.
60. Фрейзер А. Г. Высокотермостойкие полимеры: Пер. с англ. М.: Химия, 1971. 294 с.
61. Фридляндер И. Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1979. 209 с.
62. Фридляндер И. Н. Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1980. 38 с.
63. Цвиккер У. Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979. 510 с.
64. Чечулин Б. Б., Утков С. С. Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1979. 247 с.
65. Эмли Е. Ф. Основы технологии производства и обработки магниеых сплавов: Пер. с англ./Под ред. М. Е. Дрица. М.: Металлургия, 1972. 63 с.
66. Энциклопедия полимеров/Под ред. В. А. Каргина, В. А. Кабанова. М.: Сов. энцикл., 1972—1977. Т. 1—3. 416 с.
67. Banas R. P., Grouski E. R., Larsen W. T. Processing aspects of the Space Shuttle Orbiter's ceramic reusable surface insulation//Ceramic Eng. and Sci. Proc. 1983. 34, N 7—8. P. 591—610.
68. Strauss E. L., Jonson C. W., Graese R. W., Campbell R. L. Producibility of fibrous refractory composite insulation FRCJ 40—20//Ceramic Eng. and Sci. Proc. 1983. 34, N 7—8. P. 611—623.
69. Tomez R. S., Cordia E. R. Development of an improved, lightweight insulation material for Space Shuttle Orbiter's thermal — protection system//Ceramic Eng. and Sci. Proc. 1983. 34, N 7—8, P. 501—511.

1. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ
МАТЕРИАЛЫ

Коррозионно-стойкие материалы разделяются на две основные группы: металлические сплавы и неметаллические материалы.

Металлические сплавы представляют собой двух- или многокомпонентные системы, обладающие стойкостью против общей коррозии или локальных видов коррозии, в том числе межкристаллитной, точечной, коррозионного растрескивания и др. (ГОСТ 9.908—85). Реже используют чистые металлы. Основой промышленных коррозионно-стойких сплавов являются железо (стали), титан, никель, медь, алюминий; в отдельных случаях в качестве коррозионно-стойких применяются тугоплавкие и благородные металлы.

Коррозионно-стойкие стали включают в себя так называемые атмосферокоррозионно-стойкие низколегированные стали (АКС) и собственно коррозионно-стойкие стали (КС), применяемые для изготовления оборудования, работающего в контакте с агрессивными средами в химической промышленности и других отраслях техники.

АКС представляют собой низколегированные стали, содержащие медь, фосфор, хром, иногда мышьяк (10ХНДП, 15ХСНД, 10ХДП, 10ХСНД, 15ХСНД и др.). Толщина металлоконструкций из АКС за 20—30 лет работы уменьшается в 2—3 раза меньше, чем толщина конструкций из обычных углеродистой и низколегированной сталей.

Более высокая стойкость на первом периоде работы достигается образованием поверхностных пленок, содержащих оксиды хрома и фосфида, а при продолжительных сроках — накопле-

нием на поверхности благородного металла — меди.

Для АКС характерна хорошая адгезия лакокрасочных покрытий, что в свою очередь продляет в 1,5—2,0 раза сроки службы искусственных покрытий.

Применение сталей 10ХДП и 10ХНДП без окраски рекомендовано в несущих и ограждающих металлических конструкциях, эксплуатируемых на открытом воздухе в сельской и промышленной атмосфере слабой агрессивности, в том числе:

промышленных зданий (наружные стеновые панели, кровельный настил для неотапливаемых зданий, фахверки, фонари и стеновые переплеты, ворота); галереях и эстакадах (несущие конструкции, элементы ограждений, стеновые панели, кровельный настил); газгольдерах (корпуса сухих газгольдеров пониженного давления, элементы кровли, направляющие);

доменных и других комплексах заводов черной металлургии и топливной промышленности (газопроводы, воздухопроводы, опоры и пролетные строения трубопроводов, бункеры, открытые эстажерки, лестницы, площадки, переходные мосты, ограждающие конструкции);

опорах ЛЭП и объектах связи (металлические конструкции опор, сплошнотенчатые антенные системы, решетчатые конструкции мачт и башен); жилых и общественных зданиях (наружные элементы каркаса, стеновые панели);

мостах, мостовых переходах для автотранспорта, пешеходных дорог и магистральных газопроводов;

большепролетных покрытиях ангаров и общественных зданий, стадионов, плавательных бассейнов, спортивных комплексов;

несущих конструкциях, панелях с преимущественно напряженной обшив-

кой, предварительно напряженном настиле;

дымовых трубах.

Сталь 10ХНДП рекомендуется применять также в окрашиваемых конструкциях, эксплуатируемых в закрытых помещениях с постоянной повышенной влажностью, а также в средне- и сильноагрессивной атмосфере для следующих сооружений:

элементов каркасов и металлических панелей утепленных кровель промышленных зданий черной металлургии, цветной металлургии, лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности;

наружных конструкций заводов химической, нефтехимической целлюлозно-бумажной промышленности и цветной металлургии.

Коррозионно-стойкие стали представляют собой большую группу высоколегированных материалов, включающих шесть структурных классов (ферритный, аустенитный, аустенитоферритный, мартенситный, аустенитомартенситный, ферритомартенситный) (ГОСТ 5632—72); при этом независимо от класса КС содержат не менее 12 % Сг. При достижении данной концентрации хрома в сплавах на основе железа скачкообразно возрастает электрохимический потенциал и сталь переходит в категорию коррозионно-стойких.

Важнейшим свойством КС является наличие области пассивного состояния.

1. Десятибалльная шкала коррозионной стойкости

| Группа стабильности | Скорость коррозии металла, мм/год | Балл |
|---------------------|-----------------------------------|------|
| Совершенно стойкие | 0,001 | 1 |
| Весьма стойкие | 0,001 до 0,005 | 2 |
| | 0,005 » 0,01 | 3 |
| Стойкие | 0,01 » 0,05 | 4 |
| | 0,05 » 0,1 | 5 |
| | 0,1 » 0,5 | 6 |
| Пониженно-стойкие | 0,5 » 1,0 | 7 |
| | 1,0 » 5,0 | 8 |
| Малостойкие | 5,0 » 10,0 | 9 |
| | 10,0 | 10 |

ния в определенном диапазоне потенциалов. Пассивность определяется как «состояние повышенной коррозионной стойкости металла или сплава (в условиях, когда с термодинамической точки зрения они являются вполне реакционноспособными), вызванное преимущественным торможением анодного процесса» [64].

Причиной пассивности является образование на поверхности химически стойкой пленки гидратированного оксида хрома и оксида хрома шпинельного типа.

К КС примыкают сплавы на железоникелевой основе 06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ, 06ХН28МТ (ГОСТ 5632—72), отличающиеся высокой стойкостью в серной, фосфорной кислотах и ряде других агрессивных сред. Однако, в отличие от КС, сплавы типа ХН28МДТ работают не в пассивном состоянии, а в термодинамическом активном состоянии.

Коррозионная стойкость сталей и сплавов обычно оценивают по десятибалльной шкале (табл. 1). В табл. 2 и 3 указано назначение наиболее распространенных КС и их коррозионная стойкость в некоторых агрессивных средах.

Более подробно с основными свойствами, термической обработкой и применением, а также коррозионной стойкостью КС можно ознакомиться в работах [68, 69], выпускаемым сортаментом — в ГОСТ 5949—75, ГОСТ 7350—77 (толстый лист), ГОСТ 5582—75 (тонкий лист), ГОСТ 9940—81 и ГОСТ 9941—81 (холодно- и теплодеформированные, горячедеформированные трубы).

Титан и его сплавы. Титан принадлежит к активно пассивирующимся металлам, что обуславливает его высокую стойкость практически во всех природных средах: атмосфере (в том числе промышленной и морской), грунте, пресной и морской воде.

Легирование титана позволяет создавать сплавы с высокой стойкостью в весьма агрессивных средах, например царской водке, азотной кислоте, многих органических кислотах, влажном хлоре и др.

2. Коррозионно-стойкие стали, применяемые в СССР (ГОСТ 5632—72)

| Структурный класс | Марка | Область применения |
|-----------------------|---------------------|--|
| Ферритный | 08Х13, 08Х18Т1 | Изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред (атмосферные осадки, слабые растворы минеральных и органических кислот) при комнатной температуре |
| | 15Х25Т | Детали, не подвергающиеся действию ударных нагрузок, работающие в средах окислительного характера |
| Аустенитный | 08Х18Н10Т | Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах типа азотной кислоты и др. |
| | 08Х17Н13М2Т | Сварная аппаратура, работающая в кипящей фосфорной, серной, 10 %-ной уксусной кислоте и сернистых средах |
| | 10Х14Г14Н4Т | Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах слабой агрессивности, а также при температурах до —253 °С |
| | 03Х21Н21М4ГБ | Сварная аппаратура по производству фосфорных удобрений |
| Аустенитоферритный | 08Х22Н6Т | Сварная аппаратура в химической, пищевой и других отраслях промышленности; является заменителем стали типа Х18Н10Т при температуре до 300 °С |
| | 08Х21Н6М2Т | Заменитель стали 10Х17Н13М2Т |
| Мартенситный | 20Х13, 30Х13, 40Х13 | Режущий, измерительный и хирургический инструмент, упругие элементы, предметы домашнего обихода |
| Аустенитомартенситный | 07Х16Н6 | Высокопрочные штамповые конструкции и детали, работающие в слабоагрессивных условиях |
| | 08Х17Н5М3 | Нагруженные детали, работающие в атмосферных условиях, слабоагрессивных условиях восстановительного характера |

Продолжение табл. 2

| Структурный класс | Марка | Область применения |
|----------------------|---------|--|
| Мартенсито-ферритный | 12X13 | Предметы домашнего обихода, изделия, работающие в слабоокислительных условиях |
| | 14X17H2 | Нагруженные детали, работающие в слабоагрессивных условиях окислительного характера в авиационной, химической промышленности |

3. Коррозионная стойкость (в баллах) сталей [68]

| Коррозионная среда | t, °C | 08X13, 12X13 | 08X18T1 | 15X25 | 08X21H5T | 08X21H6M2T | 08X18H10T | 08X17H13M2T |
|---------------------------------|------------------|----------------------------------|---------|-------|----------|------------|-----------|-------------|
| | | Азотная кислота концентрации, %: | | | | | | |
| 5 | 20 | 5 | 4 | 3 | — | — | 3 | 3 |
| 5 | 85 | 7 | 5 | 5 | — | — | 4 | 4 |
| 5 | t _{кип} | 8 | 7 | 5 | — | — | — | — |
| 10 | 20 | 5 | 4 | 4 | — | 3 | 3 | — |
| 10 | 85 | 7 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 10 | t _{кип} | 8 | 7 | 6 | 5 | 5-6 | 5-6 | 5-6 |
| 50 | 20 | 6 | 6 | 5 | — | — | 3 | 3 |
| 50 | 80 | 8 | 7 | 6 | 4 | 5 | 4-5 | 4-5 |
| 50 | t _{кип} | 9 | 8 | 7 | 6 | 6 | 6-7 | 6-7 |
| 65 | 20 | 6 | 5 | 5 | — | — | 4 | 4 |
| 65 | 85 | 9 | 8 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 65 | t _{кип} | 10 | 9 | 8 | 7-8 | — | 8 | 8 |
| Серная кислота концентрации, %: | | | | | | | | |
| 10 | 20 | 10 | 10 | 10 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| 10 | 75 | 10 | 10 | 10 | 7 | 6 | 7 | 7 |
| 10 | t _{кип} | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 40 | 20 | 10 | 10 | 10 | 7-8 | 6-7 | 7-8 | 6-7 |
| 40 | 50 | 10 | 10 | 10 | 8 | 7 | 8 | 7 |
| 40 | 100 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 60 | 20 | 9 | 8 | 8 | 4 | 4 | 4 | 3-4 |
| 60 | 70 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 |
| 60 | 100 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 98 | 20 | 6 | 6 | 6 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 98 | 100 | 8 | 8 | 7 | 10 | 9 | 10 | 9 |
| 100 | 20 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 3 |
| 100 | 70 | — | — | — | — | 7 | 9 | 8 |
| 150 | 10 | 10 | 10 | — | 10 | 10 | 10 | 10 |

Продолжение табл. 3

| Коррозионная среда | t, °C | 08X13, 12X13 | 08X18T1 | 15X25 | 08X21H5T | 08X21H6M2T | 08X18H10T | 08X17H13M2T |
|-----------------------------------|------------------|--|---------|-------|----------|------------|-----------|-------------|
| | | Смесь кислот концентрации, % (азотная + серная): | | | | | | |
| 1,0 + 50 | 50 | — | — | — | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 3,0 + 30 | 50 | — | — | — | 4 | 4 | 5 | 5 |
| 3,0 + 30 | t _{кип} | — | 10 | 10 | — | — | 7 | — |
| 5,0 + 15 | t _{кип} | — | — | — | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 5,0 + 50 | 50 | — | — | — | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 5,0 + 65 | 100 | — | — | — | 9 | 9 | 10 | 9 |
| 15 + 80 | 60 | 7 | 6 | 6 | — | 5 | 6 | — |
| 25 + 75 | 60 | 8 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 36 + 5 | 85 | — | — | — | 5 | — | 5 | 5 |
| Соляная кислота концентрации, %: | | | | | | | | |
| 0,5 | 20 | 8 | 6 | 6 | — | 5 | 5 | 4 |
| 0,5 | 50 | 8 | 7 | 7 | — | 6 | 6 | 5 |
| 0,5 | t _{кип} | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 8 |
| 5 | 20 | 9 | 8 | 8 | 7 | 6 | 6 | 5 |
| 5 | 60 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 8 |
| 10 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 7 |
| 10 | 60 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 8 |
| 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 | 8 | 7 |
| 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 | 8 | 7 |
| 20 | 60 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 8 |
| 30 | 20 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 |
| 30 | 60 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 8 | 7 |
| 37 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 7 |
| Уксусная кислота концентрации, %: | | | | | | | | |
| 1 | 90 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 1 | t _{кип} | — | — | — | 5 | 4 | 5 | 4 |
| 5 | 20 | 6 | 6 | 6 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 5 | 75 | 8 | 8 | 8 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 5 | t _{кип} | 10 | 8 | 7 | 6 | 5 | 6 | 5 |
| 15 | 20 | 7 | 6 | 6 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 15 | 80 | 8 | 7 | 7 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 15 | t _{кип} | 10 | 9 | 8 | — | 5 | 8 | 5 |
| 50 | 20 | 7 | 7 | 6 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 50 | 60 | — | — | — | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 50 | 100 | 10 | 9 | 8 | — | 5 | 8 | 5 |
| 80 | 20 | 6 | 5 | 5 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 80 | 80 | 9 | 8 | 8 | — | 4 | 5 | 5 |
| 80 | t _{кип} | 10 | 9 | 8 | 8 | 6 | 8 | 6 |
| 98 | t _{кип} | — | — | — | 6 | 5 | 7 | 5 |
| 100 | 20 | 6 | 5 | — | — | 4 | 5 | 4 |
| 100 | 90 | 9 | — | — | 6 | 5 | 6 | 5 |
| 100 | t _{кип} | 10 | 10 | — | — | 7 | 8 | 6 |

Продолжение табл. 3

| Коррозионная среда | t, °C | Продолжение табл. 3 | | | | | | |
|---|------------------|---------------------|---------|-------|----------|------------|-----------|-------------|
| | | 08X13, 12X13 | 08X18T1 | 15X35 | 08X21H5T | 08X21H6M2T | 08X18H10T | 08X17H13M2T |
| Фосфорная кислота концентрации, %: | 5 | 4 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 10 | 9 | 8 | — | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | 50 | 20 | 7 | — | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 50 | 85 | 8 | 6 | 5 | 4 | 3 | 3 |
| | 50 | t _{кип} | 10 | 9 | 8 | 2 | 2 | — |
| | 85 | 20 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 |
| | 85 | 85 | 9 | 8 | 8 | 7 | 6 | 4 |
| 85 | t _{кип} | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 8 | |
| 90 | 110 | 10 | 10 | 10 | — | — | 10 | |
| Фтористо-водородная кислота концентрации, %: | 5 | — | — | — | 10 | 10 | 10 | 7 |
| | 10 | 20 | — | — | — | — | 7 | 7 |
| | 40 | 20 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 8 |
| Щавелевая кислота концентрации, %: | 5 | 20 | 8 | 7 | 6 | — | 5 | 4 |
| | 5 | 85 | 8 | 7 | 7 | — | 7 | 5 |
| | 10 | 20 | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| | 10 | 75 | 8 | 8 | 8 | — | 7 | 6 |
| | 10 | t _{кип} | 10 | 10 | 10 | 8 | 7 | 8 |
| | 25 | 85 | 9 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8 |
| | 25 | t _{кип} | 10 | 10 | 10 | — | 9 | 8 |
| Едкое кали концен- трации, %: | 25 | t _{кип} | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| | 50 | 20 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 50 | t _{кип} | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 6 |
| Расплав | 300 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Едкий натр концен- трации, %: | 10 | 90 | 5 | 5 | — | 4 | 5 | 4 |
| | 20 | 50 | 4 | 4 | — | 4 | 4 | 3 |
| | 20 | t _{кип} | 8 | 5 | — | 5 | 5 | 5 |
| | 60 | 90 | 8 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 |
| | 60 | 160 | — | — | — | 9 | 8 | 8 |
| | 90 | 300 | 9 | 9 | 9 | — | — | 8 |
| Расплав | 318 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 | |

Титан является перспективным материалом для изготовления костных имплантатов и других изделий, к которым предъявляются требования высокой стойкости в физиологических средах.

Для титана и его сплавов характерна малая склонность к контактной, питтинговой и щелевой коррозии.

Для повышения коррозионной стойкости в зависимости от поставленной задачи могут быть использованы молибден, цирконий, ванадий, тантал, марганец. Повышение коррозионной стойкости может быть достигнуто и с помощью так называемого катодного легирования, т. е. введением Cu, W, Mo, Ni, Re, Ru, Pd, Pt, роль которых заключается в увеличении наклона катодных поляризационных кривых, что приводит к созданию самопассивирующихся сплавов.

Для повышения прочности сплавы титана часто легируют алюминием, влияние которого на коррозионную стойкость в принципе негативно, но в количественном отношении невелико.

Техническая характеристика и коррозионная стойкость титана и его промышленных сплавов приведены в табл. 4 и 5.

Полуфабрикаты из титана и его сплавов поставляются по следующей нормативно-технической документации: ОСТ 192077—78 (лист), ГОСТ 22178—76 (плиты), ГОСТ 23755—79 (прутки), ТУ 183-42—80 (профили), ОСТ 192051—76 (трубы сварные), ОСТ 190050—72 (трубы), ГОСТ 21945—76 (трубы бесшовные).

Алюминий и его сплавы. Алюминий принадлежит к металлам, имеющим большую склонность к пассивации; в нейтральных и слабощелочных водных растворах алюминий обладает способностью к самопассивации. Поверхность алюминия в пассивном состоянии покрыта защитной пленкой, состоящей из байерита β — $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, толщина пленки 5—100 нм.

Коррозионная стойкость алюминия зависит от чистоты по ряду элементов (медь, железо, никель; в сильной степени Mg, Zn); алюминий чувствителен к присутствию в среде галогенных анионов Cl^- , F^- , Br^- , I^- , разрушающих пассивную пленку, что приводит в

первую очередь к питтинговой коррозии, например, в морской воде.

Алюминий широко используют для металлоконструкций, работающих в атмосферных условиях (кроме морской), в химической промышленности, бытовой и криогенной технике.

Алюминий высокой чистоты имеет очень высокую коррозионную стойкость в азотной кислоте и используется для ее хранения и транспортирования, в уксусной кислоте, атмосферах, содержащих сероводород, сернистый ангидрид, пары серы.

Алюминий высокой чистоты используется в качестве плакирующего слоя для защиты самолетных конструкций (крылья, фюзеляж и др.), изготавливаемых из высокопрочных, но коррозионно-нестойких сплавов на основе алюминия.

Легирование алюминия осуществляют с целью повышения прочности при комнатной и повышенных температурах, жаростойкости, что в зависимости от вида и степени легирования, как правило, в той или иной степени приводит к снижению коррозионной стойкости. Например, наиболее распространенный высокопрочный деформируемый алюминиевый сплав — дуралюмин (3,5—5,5 % Cu и небольшие добавки Mg и Mn), упрочняемый интерметаллидной фазой $CuAl_2$ ($\sigma_B = 330 \div 500$ МПа), имеет низкую стойкость к общей коррозии, склонен к расслаивающей и межкристаллитной коррозии. Поэтому необходимо применять плакирование листового дуралюмина чистым алюминием, прежде чем использовать его в соответствующих конструкциях самолетов, судов и других объектах.

Среди деформируемых сплавов алюминия, приближающихся по коррозионной стойкости к чистому алюминию, можно назвать сплавы, содержащие 1—2 % Mn (AMn) и 1—3 % Mg (AMg); эти сплавы имеют предел прочности 90—250 МПа и хорошо свариваются.

К литейным сплавам алюминия, обладающим достаточно высокой коррозионной стойкостью, относятся силумины (Al — до 14 % Si) и магнилий (Al — до 10 % Mn). Сплавы типа силумин успешно применяются в виде

4. Промышленные коррозионно-стойкие сплавы титана [64]

| Сплав | Структура | Основной состав, % | Техническая характеристика |
|-------|--|---------------------------|---|
| BT1-0 | α | Технически чистый | Деформируемый и свариваемый материал, коррозионно-стойкий в природных условиях, окислительных и органических средах и др. |
| OT4-0 | $\alpha + \alpha'$ | 0,2—1,4 Al, 0,2—1,3 Mn | Имеют более высокую прочность по сравнению с чистым титаном ($\sigma_{0,2} = 390 \pm 490$ МПа), деформируются, свариваются |
| OT4-1 | $\alpha + \alpha'$ | 1,5—2,5 Al, 0,7—2 Mn | |
| OT4 | $\alpha + \beta$ | 3,5—5 Al, 0,8—2 Mn | Имеет высокую прочность ($\sigma_{0,2} = 580$ МПа), деформируется, сваривается |
| BT6 | $\alpha + \beta$ | 5,5—7 Al, 4,2—6 V | $\sigma_{0,2} = 730$ МПа; по коррозионной стойкости близок к технически чистому титану, хорошо деформируется в горячем состоянии, удовлетворительно сваривается |
| 4200 | α | 0,15—0,30 Pd | Имеет высокую коррозионную стойкость в соляной, муравьиной, лимонной, хромовой кислоте, хлорном железе, деформируется, сваривается |
| 4201 | α' — мартенситоподобная структура после закалки из β -области | 35 | Обладает высокой коррозионной стойкостью в HCl, H ₂ SO ₄ ; применение ограничено в связи со сложной технологией изготовления полуфабрикатов |

5. Коррозионная стойкость (в баллах) титана и его сплавов [62]

| Коррозионная среда | t, °C | BT1-0 | Коррозионная среда | t, °C | BT1-0 | |
|----------------------------------|-----------|-------|-------------------------------------|-------|-------|----|
| Азотная кислота концентрации, %: | 100 | 3 | Муравьиная кислота концентрации, %: | 140 | 1 | |
| | | | 32 | | | 5 |
| | | | 55 | | | 25 |
| | | | 70 | | | 25 |
| | $t_{кип}$ | 4 | | 100 | 1 | |
| | $t_{кип}$ | 3 | | 140 | 5 | |

Продолжение табл. 5

| Коррозионная среда | t, °C | BT1-0 | Коррозионная среда | t, °C | BT1-0 | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|--------------|--------------------|-------|-------|------------------------------------|-----------|------------|----|-----------|--------------|-----------------------------------|------------|-----------|----|--------|-----------|-------|------------|
| 30 | 95 | 3; 7 для OT4 | 50 | 165 | 5 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 98 | 165 | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 100 | 200 | 3 для 4200 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 99 | $t_{кип}$ | 3 для 4201 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Хлористый кальций концентрации, %: | 90 | 1 | 30 | $t_{кип}$ | 1; 1 для OT4 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 50,6 | 1 для 4200 | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | Хлорное железозо концентрации, %: | 95 | 2 для OT4 | 40 | 30—100 | 1 для OT4 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1—5 | 3 для 4201 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | 3 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10—15 | 1 |
| Уксусная кислота концентрации, %: | 165 | 1 | 5—15 | 100 | 3 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 5—20 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 5 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 25 | 1 | | | | | | | | | | | | |

литых изделий, работающих в атмосферных условиях и морской воде; еще более высокой стойкостью в морской воде обладает сплав магний AlMg с 10 % Mn.

При конструировании металлоизделий с использованием деталей из алюминия и его сплавов необходимо учитывать их высокую склонность к контактной коррозии.

Сплавы алюминия применяются в качестве расходных анодов для катодной защиты морских сооружений и судов. Для этих целей используются протекторы из сплавов на основе Al—Zn—Mg и Al—Zn—Hg. Покрытия из алюминия, нанесенные на стальную поверхность плазменным и изотермическим методами, также играют роль расходных анодных покрытий и широко используются для защиты стационарных морских конструкций и судов.

Металлопродукция из алюминия поставляется по ГОСТ 11069—74, ГОСТ 4784—74, ГОСТ 2685—75 (марки),

ГОСТ 6132—79 (проволока), ГОСТ 21631—76 (лист), ГОСТ 17232—79 (плиты), ГОСТ 21488—76 (прутки), ГОСТ 8617—81 (профили), ГОСТ 18475—82 (трубы), ОСТ 92-1008—77 (штамповки, поковки).

Медь и ее сплавы. Повышенная коррозионная стойкость меди связана с высокой термодинамической стабильностью, в то время как способность к пассивации выражена слабо.

Медь устойчива против коррозии на воздухе, в нейтральных сульфатных и слабощелочных растворах, в пресной, горячей и холодной воде, деаэрированных горячих и холодных разбавленных растворах серной, фосфорной и уксусной кислот. Медь достаточно стойка в морской воде.

В окислительных средах — в HNO₃, горячей концентрированной H₂SO₄, растворах KMnO₄, K₂Cr₂O₇ — медь неустойчива.

Для латуни характерны два вида коррозионного повреждения — обесцинкование и коррозионное растрескивание.

скивание. Склонность к обоим видам поврежденной увеличивается с повышением содержания цинка. Явление обесцинкования заключается в избирательной коррозии в связи со значительно более высокой электрохимической активностью атомов цинка по сравнению с атомами меди.

Для снижения склонности к обесцинкованию применяют легирование небольшими количествами фосфора, сурьмы, мышьяка (сотые доли).

Наиболее широкое распространение в морских условиях получили так называемая адмиралтейская латунь (70 % Cu, 29 % Zn, 1 % Sn) и алюминиевая латунь (75 % Cu, 23 % Zn, 2 % Al).

Коррозионное растрескивание проявляется при наличии в металлоизделии внутренних или внешних растягивающих напряжений. Под действием растягивающих напряжений происходит раскрытие трещины и ускоренное разрушение материала по плоскостям, обогащенным цинком.

Скорость развития коррозионного растрескивания усиливается при наличии в атмосфере аммиака, сернистого ангидрида, а в растворах аммиака — аммониевых и ртутных солей.

Коррозионное растрескивание, обусловленное наличием внутренних напряжений, предупреждается отжигом при 250—300 °С в течение нескольких часов.

Цинк повышает стойкость латуни, если в растворе или атмосфере присутствуют сернистые соединения (SO₂, H₂S).

Бронзы могут рассматриваться как коррозионно-стойкие материалы. Оловянная бронза (8—10 % Sn) обладает хорошей стойкостью в разбавленных неокислительных кислотах, органических кислотах. Алюминиевые бронзы (9—10 % Al) более стойки, чем оловянные, в том числе в органических кислотах, соляной кислоте, морской воде. Кремнистые бронзы (до 15 % Si) являются хорошими кислотостойкими материалами.

Бронзы широко используются для изготовления подшипников скольжения, деталей насосов и арматуры для подачи агрессивных жидкостей.

Никель и его сплавы. Чистый никель относительно редко применяется в качестве конструкционного коррозионно-стойкого материала, несмотря на то что проявляет высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях, неокисляющих кислотах: соляной — (до 15 %), серной (до 70 %), растворах многих солей, морской воде. Никель способен переходить в пассивное состояние. Вместе с тем использование никеля рациональнее в сплавах на его основе, так как с помощью легирования можно добиться значительного повышения коррозионной стойкости.

Промышленные коррозионно-стойкие сплавы в основном относятся к следующим системам: Ni—Mo, Ni—Cr—Mo, Ni—Cu [7].

Сплавы системы Ni—Mo обычно содержат 25—30 % Mo и обладают высокой коррозионной стойкостью в средах восстановительного характера — соляной, серной, фосфорной, органических кислотах, влажном хлористом водороде и др.

Типичным представителем этих сплавов является сплав Н70МФВ—ВИ, имеющий после оптимальной термической обработки (закалка от 1070 °С с охлаждением в воде) структуру α-твердого (ГЦК-решетка) и частиц карбида типа M₁₂C. Сплав Н70МФВ—ВИ применяется для изготовления сварной аппаратуры, трубопроводов для ионообменных смол, галлоидоводородных кислот, полипропилена, в процессах органического синтеза, при изготовлении фармацевтических препаратов. Сварные соединения сплава Н70МФВ—ВИ стойки против межкристаллитной и ножевой коррозии; скорость коррозии основного металла и сварных соединений в растворе 21 %-ной HCl при температуре кипения не превышает 0,5 мм/год.

Сплавы бинарной системы Ni—Cr обычно содержат 30—50 % Cr и проявляют высокую коррозионную стойкость в окислительных средах, например в кипящих растворах азотной кислоты. Эти сплавы в отличие от сплавов системы Ni—Mo работают в пассивном состоянии.

Типичным представителем является отечественный свариваемый сплав

ХН58В (39—41 % Cr, 0,5—1,5 % W, не более 0,03 % C). Термическая обработка сплава ХН58В состоит в закалке с 1070 °С с охлаждением в воде, после чего он имеет структуру γ-твердого раствора с отдельными выделениями карбонитридов хрома в объеме зерен.

Сплав применяется в химической промышленности для изготовления сварной аппаратуры, а также травильных ванн с азотно-фторидными растворами. Для сплава ХН58В характерна высокая стойкость в средах азотной и плавиковой кислот, концентрированных растворах кипящей азотной кислоты, 30—70 %-ной H₂COOH при температуре кипения.

Промышленные сплавы системы Ni—Cr—Mo чаще всего представлены сплавами на основе системы Ni—15 % Cr—15 % Mo, например отечественный свариваемый сплав ХН65МВУ (14,5—16,5 % Cr, 15—17 % Mo, 3,0—4,5 % W, не более 0,02 % C). Сплав после закалки с 1070 °С с охлаждением в воде имеет структуру γ-твердого раствора на основе никеля с выделением первичных карбидов типа M₆C.

Сплав ХН65МВУ применяют в химической промышленности для изготовления сварных аппаратов, теплообменников, реакторов и оборудования для производства уксусной кислоты, эпоксидных смол, сложных органических соединений, этилбензола, стирола и др.

В системе Ni—Cu наибольшее распространение получили сплавы типа монель, содержащие примерно 30 % Cu и 3—4 % (Fe + Mn), иногда с добавками Al и Si.

Сплавы типа монель применяют для аппаратуры, работающей в растворах неокислительных кислот, фосфорной, серной и соляной, растворах солей, органических кислот; для теплообменной аппаратуры, работающей в контакте с морской водой.

Тугоплавкие металлы в качестве коррозионно-стойких материалов имеют ограниченное применение, за исключением тантала. Тантал стоек в большинстве минеральных и органических кислот (например, скорость его коррозии в 85—98 %-ной

серной кислоте при температуре 210 °С не превышает 0,05 мм/год), устойчив в фосфорной и азотной кислотах при всех концентрациях до 190 °С, в соляной до 30 %-ной концентрации при температуре до 190 °С. Тантал применяется для изготовления химической аппаратуры.

Благородные металлы Ag, Au, Pt, Pd обладают высокой коррозионной стойкостью, которая связана с их термодинамической стабильностью, а не переходом в пассивное состояние. Высокая стоимость ограничивает их применение в качестве коррозионно-стойких материалов. Наиболее часто эти металлы или сплавы на их основе используют для изготовления химической посуды (лабораторной), неокисляющихся электроконтактов, фильтров и фильтров для производства искусственного волокна, в ювелирном деле и др.

Неметаллические материалы. К неметаллическим материалам относятся полимерные и минеральные материалы, а также резины и эбониты.

Полиэтилен принадлежит к числу химически стойких материалов; он стоек в соляной, фтористоводородной и фосфорной кислотах, в разбавленных азотной и серной кислотах в широком диапазоне концентраций и температур (табл. 6).

Полиэтилен устойчив в щелочах, растворах солей, воде, сложных эфирах, кислотах.

Полиэтилен является коррозионно-стойким конструкционным материалом в химической промышленности, строительстве, используется в виде листов, плит, пленки.

Полистирол, получаемый полимеризацией стирола, от полиэтилена отличается тем, что атом водорода в нем замещен фенольной группой. Полистирол устойчив к воздействию минеральных кислот (кроме окислительных), щелочей, минеральных солей. Для полистирола характерно низкое водопоглощение.

Выпускается блочный и суспензионный полистирол для изготовления изделий методом прессования, литья под давлением, экструзией.

6. Химическая стойкость полимерных материалов [74]

| Агрессивная среда | Концентрация, % | t, °C | Винипласт | Полиэтилен | | Полипропилен | Пентапласт | Фторопласт | |
|-------------------------------|-----------------|----------|-----------|------------|-------|--------------|------------|------------|-----|
| | | | | НД-ВП | ВД-НП | | | Ф-3 | Ф-4 |
| | | | | | | | | | |
| Кислота: азотная | До 70 | 20 | с | с | с | с | с | с | с |
| | До 90 0,5 | 60 20 | н | е | н | с | с | н | с |
| серная | До 40 | 100 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 40—75 | 20 | с | с | с | с | с | с | с |
| | | 60 | с | с | с | с | с | с | с |
| 75—98 | 20 | с | с | с | с | с | с | с | |
| | 60 | о | н | н | в | с | с | е | |
| соляная | До 5 | 20 | с | с | с | с | с | с | с |
| | 10—35 | 60 | с | с | с | с | с | с | с |
| | | 20 | с | с | с | с | с | с | с |
| Любая | 60 | о | о | о | о | о | с | с | |
| фосфорная | 10—90 | 130 | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 20 | с | с | с | с | с | с | с |
| — | 85 | 60 | о | с | о | с | с | с | с |
| фтористо-водородная | Любая | 20 | с | с | с | с | с | с | с |
| уксусная | До 80 | 60 | о | о | н | с | в | с | с |
| | | 20 | с | с | с | с | в | с | с |
| кремнефтористо-водородная | До 35 | 60 | о | с | с | с | е | с | с |
| | | 20 | с | с | с | с | — | с | с |
| едкий натр | До 52 | 60 | с | с | с | с | — | с | с |
| хлористое железо | До 48 | 20 | с | с | с | с | с | с | с |
| Ацетон | — | 60 | о | с | с | с | с | с | с |
| | | 20 | н | о | о | с | с | с | с |
| Спирты (метилловый, этиловый) | — | 60 | н | н | н | о | о | с | с |
| | | 20 | с | о | с | с | с | с | с |
| Бензин | — | 20 | с | с | о | о | с | с | с |
| | | 60 | с | о | н | и | е | с | с |

Продолжение табл. 6

| Агрессивная среда | Концентрация, % | t, °C | Винипласт | Полиэтилен | | Полипропилен | Пентапласт | Фторопласт | |
|-------------------|-----------------|-------|-----------|------------|-------|--------------|------------|------------|-----|
| | | | | НД-ВП | ВД-НП | | | Ф-3 | Ф-4 |
| | | | | | | | | | |
| Бензол | — | 20 | с | о | о | о | с | с | с |

Обозначения: с — стоек; о — относительно стоек; н — не стоек.

Поливинилхлорид получают полимеризацией хлористого винила; этот полимер является одним из наиболее стойких материалов [в минеральных (неокислительных) кислотах, например 20—100 %-ной H_2SO_4 до 60 °C; 35 %-ной HCl до 60 °C; ряде органических кислот].

Винипласт получают из поливинилхлорида с добавлением стеарина, трансформаторного масла и меламин. При комнатной и повышенных температурах винипласт проявляет высокую стойкость в 37 %-ной HCl , 90 %-ной H_2SO_4 , 50 %-ной HNO_3 , 80 %-ной CH_3COOH , растворах едких щелочей, карбонатов щелочных металлов, растворах аммиака, бензина, спиртов и других средах. Винипласт относится к свариваемым полимерам.

Тефлон — фторированный этилен — пропиленовый полимер; обладает высокой стойкостью. Тефлон используют в качестве термо- и коррозионно-стойкого материала в сочетании с титаном, танталом и бериллием ввиду почти одинаковой коррозионной стойкости.

Тефлон выпускается в виде труб, прутков, шлангов, пленки и других полуфабрикатов для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах.

Промышленность выпускает полимерные коррозионно-стойкие материалы других наименований, находящие применение в качестве конструк-

ционных материалов, покрытий, замазок в различных отраслях техники [31, 74].

Минеральные материалы (гранит, диорит, спенит, апдезит, бештаунит, базальт, габбро, кварцит, порфирит [31, 74]) обладают при нормальной температуре высокой кислотостойкостью, удовлетворительной щелочестойкостью, малым водопоглощением. Благодаря большой плотности, механической прочности на сжатие, твердости и другим свойствам природные каменные материалы удобны для изготовления фундаментов промышленных зданий, облицовки стен и полов корпусов, башен, резервуаров в гигиенических целях. Обычно каменные природные материалы используют в виде штучных изделий простой формы. Из расплавов природного каменного сырья получают фасонные изделия, даже трубы.

Кислотостойким минеральным материалам относят: кислотоупорный кирпич (ГОСТ 474—80), кислото- и термокислотоупорные плитки, шамотный кирпич, кварцевое (ГОСТ 16548—80) и силикатное (ГОСТ 8688—77) стекло, ситаллы и шлакоситаллы (ТУ 21-УСС-539—70), кислотоупорный бетон; их физико-химические свойства, включая коррозионную стойкость, описаны в работе [74].

Для изготовления тонкой химической аппаратуры, в том числе промышленной, контактирующей с высоко-

агрессивными средами, начинают применять кварцевое и силикатное стекло в виде труб диаметром до 300 мм, змеевиков, футеровочных плит, фасонных изделий, царг ректификационных колонн.

Коррозионная стойкость кварцевого и силикатного стекла примерно одинакова — оно устойчиво практически во всех минеральных и органических кислотах до 80 °С, кроме плавиковой кислоты при комнатной температуре и фосфорной при высокой. Кварцевое стекло имеет значительно более высокую термостойкость по сравнению с силикатным.

Ситаллы и шлакоситаллы являются кристаллическими стеклами, которые получают с помощью специальной термической обработки.

Ситаллы и шлакоситаллы имеют высокую коррозионную стойкость в серной, соляной, азотной, фосфорной, уксусной кислотах [74]. Эти материалы чаще всего применяют в виде футеровочных плиток, которые крепят к поверхности конструкций растворами на силикатных и полимерных вяжущих.

Кислотоупорный бетон представляет собой затвердевшую смесь кислотоупорного цемента и песка со щебнем из кислотоупорных природных каменных пород.

В свою очередь кислотоупорный цемент состоит из вяжущего (жидкое стекло) наполнителя — порошка из кислотостойких природных каменных материалов; могут также использоваться порошки искусственных каменных материалов, способствующих схватыванию и твердению (кремнефтористый натрий Na_2SiF_6).

Кислотоупорный порошок в смеси с кремнефтористым натрием известен как кислотоупорный кварцевый кремнефтористый цемент.

В зависимости от конструкции применяют ряд составов кислотоупорных бетонов, отличающихся друг от друга расходом составляющих в килограммах на 1 м³ бетона.

Кислотоупорный бетон стоек к действию многих минеральных кислот в широком диапазоне концентраций, агрессивных газов и солей с кислотной реакцией. При контакте со щелочами

и растворами солей со сложной реакцией кислотоупорный бетон разрушается.

К кислотоупорным бетонам принадлежат также полимерсиликатбетон и полимербетон.

Полимерсиликатбетон имеет тот же состав, что и кислотоупорный, но только с введением в смесь добавки фурфуролового спирта в количестве 3% массы жидкого стекла. Добавка фурфуролового спирта делает бетон более пластичным, прочным, водостойким.

Полимербетон получают при отвердении смеси, состоящей из связующего (эпоксидные, полиэфирные, акриловые, фурановые, карбоамидные смолы), отвердителя и заполнителя.

Полимербетон имеет высокую прочность и стойкость против серной, соляной, азотной, фосфорной, уксусной, щавелевой, молочной кислот, едкого натра, водного раствора аммиака, минеральных солей [31].

При использовании этих материалов элементы технологического оборудования, зданий, сооружений должны эксплуатироваться в условиях, исключающих замораживание и оттаивание.

Углеродистые изделия обладают высокой коррозионной стойкостью в минеральных кислотах, NaOH и многих других средах, являясь к тому же термостойкими, а также тепло- и электропроводными (табл. 7).

Углеродистые изделия получают методом прессования и последующего отжига массы, состоящей из измельченного и прокаленного антрацита и нефтяного или каменноугольного пека. Различают изделия, отожженные при температуре 1300 °С — угольные и отожженные при 2300 °С — графитизированные.

Графитизированные изделия имеют более высокую прочность при растяжении и изгибе, на порядок более высокую теплопроводность, более высокую температуру применения — до 400 вместо 350 °С.

Для защиты химической аппаратуры углеродистые материалы применяют в виде штучных изделий — блоки, пластины, фасонные изделия (ТУ 48-12-6-77. «Изделия фасонные из угольного и коксового обожженного

7. Химически стойкие углеродистые плитки АТМ-1 [31]

| Агрессивная среда | Концентрация, % | t, °С |
|---|-----------------|----------------------|
| Кислоты: азотная серная соляная уксусная фосфорная фтористо-водородная щавелевая | 5 | 20 |
| | До 60 | До 130 |
| | Любая | До t _{крип} |
| | » | 20 |
| Аммиак (газ) Алюминий (сернистый, хлористый), хлористые аммонии, железо (сернистое, хлорное), этиловый спирт, бензол, толуол, ацетон, бензин | До 80 | До t _{крип} |
| | До 48 | До t _{крип} |
| Любая | До 100 | |
| Любая | Любая | До t _{крип} |

8. Рекомендуемые марки резин и эбонитов [31] для службы в агрессивных средах

| Среда | Концентрация, % | t, °С | Резины | | |
|---------------------------|-----------------|----------|----------------------------|----------------------|-----------------------|
| | | | мягкие и средней твердости | повышенной твердости | эбониты и полуэбониты |
| Кислоты: азотная | 5 | 20 | 60—340 | — | 51—1626 |
| | 5 | 20 | 60—341 | — | 51—1629 |
| | 5 | 20 | ИРП-1390 | ИРП-1391 | — |
| | 10 | 70 | 51—1639 | 51—1632 | — |
| | 15 | 20 | — | ИРП-1391 | 60—343 |
| кремнефтористо-водородная | 14 | 100 | 51—1639 | 51—1632 | 51—1627 |
| | 27 | 70 | ИРП-1390 | ИРП-1394 | 51—1626 |
| | 27 | 100 | — | 51—1632 | 51—1627 |
| серная | 60 | 100 | — | 51—1632 | 51—1626 |
| | — | — | — | — | 51—1627 |
| | — | — | — | — | 51—1629 |
| | 60 | 125 | 51—1639 | — | — |
| | 70 | 70 | 60—340 | — | 51—1574 |
| | 70 | 70 | 60—341 | — | — |
| | 70 | 70 | ИРП-1390 | — | — |
| | 70 | 85 | — | ИРП-1394 | 51—1626 |
| 70 | 85 | — | — | 51—1627 | |
| соляная | 10 | 70 | — | — | 51—1629 |
| | 10 | 80 | — | — | 51—1626 |
| | 10 | 80 | — | — | 51—1627 |
| | 20 | 90 | 51—1639 | — | 51—1626 |
| | Любая | 20 | 60—340 | — | 51—1629 |
| | » | — | 60—341 | — | 60—343 |
| » | — | ИРП-1390 | — | 60—344 | |

Продолжение табл. 8

| Среда | Концентрация, % | t, °C | Резины | | |
|--|-----------------|-------|----------------------------|----------------------|-----------------------|
| | | | мягкие и средней твердости | повышенной твердости | эбониты и полуэбониты |
| уксусная | Любая | 70 | — | — | 51—1626 |
| | » | 70 | — | — | 51—1627 |
| фосфорная | » | 70 | 60—340 | — | 60—343 |
| | » | 70 | 60—341 | — | 60—344 |
| | » | 70 | ИРП-1390 | ИРП-1391 | 51—1574 |
| | » | 100 | — | 51—1632 | 51—1626 |
| | — | 100 | — | ИРП-1394 | 51—1627 |
| фтормисто-водородная (плавиковая) | Любая | 110 | 51—1639 | — | 51—1629 |
| | » | 20 | — | ИРП-1391 | — |
| Основания: гидрат окиси калия | Любая | 70 | 60—340 | — | 51—1574 |
| | » | 70 | 60—341 | — | 60—343 |
| гидрат окиси натрия | » | 70 | ИРП-1390 | ИРП-1391 | 60—344 |
| | » | 110 | 51—1639 | ИРП-1394 | 51—1626 |
| | » | 110 | — | 51—1632 | 51—1627 |
| | » | 110 | — | — | 51—1629 |
| Растворы солей: бихромат натрия или бихромат калия | 10 | 70 | ИРП-1390 | — | 51—1574 |
| | 10 | 100 | 51—1639 | ИРП-1394 | 51—1626 |
| | 10 | 100 | — | — | 51—1627 |
| | 10 | 100 | — | — | 51—1629 |
| хлористый натрий | Любая | 70 | 60—340 | ИРП-1391 | — |
| | » | 70 | 60—341 | — | 51—1574 |
| | » | 70 | ИРП-1390 | — | — |
| хлористый цинк | 30 | 100 | 51—1639 | ИРП-1394 | 51—1626 |
| | 30 | 100 | — | — | 51—1627 |
| | 30 | 100 | — | — | 51—1629 |
| | 30 | 100 | — | — | 60—344 |
| Ацетон | Любая | 56 | 51—1639 | — | 51—1526 |
| | » | 56 | — | — | 51—1627 |
| Спирты (C ₂ —C ₆) | Любая | 70 | 51—1639 | — | — |
| Белильная известь | Любая | 65 | 60—340 | — | 60—343 |
| | » | 65 | 60—341 | — | — |
| | » | 65 | ИРП-1390 | — | — |
| Хлор сухой и влажный | 98 | 80 | — | ИРП-1394 | 60—343 |
| | 98 | 80 | — | — | 60—344 |

материала», ТУ 48-12-11—77. «Блоки угольные футеровочные» и др.).

Резины и эбониты изготавливают на основе натурального или синтетического каучука.

Резиновая смесь представляет собой композицию из каучука и серы. С повышением содержания серы в каучуке изменяется твердость резины; выпускают резины: мягкие, средней и повышенной твердости, эбониты и полуэбониты. Кроме серы резиновые смеси содержат наполнители, ускорители и активаторы вулканизации и другие добавки.

Резиновые смеси и эбониты используют в технике как коррозионно-стойкие уплотнительно-прокладочные материалы и для гуммирования в качестве антикоррозийной обкладки аппаратуры. Для обкладки применяют листовую техническую резину (ГОСТ 7338—77): кислотоупорную, теплостойкую, морозостойкую, маслостойкую, пищевую.

Для защиты от коррозии применяют гуммирование резервуаров, арматуры, насосов, гальванических ванн, прокладок и т. д.

Рекомендуемые марки резин и эбонитов для службы в агрессивных средах приведены в табл. 8.

Все большее распространение в технике находят полиуретановые каучуки, проявляющие до 60 °C стойкость в воде, растворах азотно-кислого и серно-кислого аммония, хлористого и хлорноватокислого натрия. Полиуретан стоек в органических средах — бензине, глицерине, растительном масле, пропане, этиловом спирте, тетраэтилсвинце.

2. ТЕПЛОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Теплостойкими называют материалы, способные работать в нагруженном состоянии при температурах до 600 °C в течение определенного времени.

Наиболее распространенным в современной технике жаропрочным материалом являются жаропрочные стали, что объясняется их невысокой стоимостью и хорошими технологическими свойствами. По масштабам применения они занимают ведущее место при тем-

пературах 500—750 °C. При температурах ниже 450 °C целесообразно использовать обычные конструкционные стали.

Для изготовления деталей, работающих в нагруженном состоянии при температурах до 600 °C в течение длительного времени, применяют главным образом стали на основе α -железа (перлитные, мартенситные и др.) и их классифицируют как **теплостойкие стали** (теплоустойчивые). При температурах выше 600 °C в основном используют жаропрочные аустенитные стали.

Теплостойкие стали разделяют на низколегированные и среднелегированные перлитного и мартенситного класса, на которые распространяется ГОСТ 20072—74, и высоколегированные хромистые стали, химический состав которых регламентирован ГОСТ 5632—72.

Номенклатура марок теплостойких сталей по ГОСТ 20072—74 и рекомендации по их применению приведены в табл. 9, а механические свойства этих сталей при комнатной и повышенных температурах представлены в табл. 10.

Перлитные стали предназначены для длительной эксплуатации при температурах 450—580 °C и применяются в основном в котлотурбостроении для изготовления паропроводных и пароперегревательных труб. Так как они характеризуются продолжительными сроками службы (сотни тысяч часов), то их не подвергают упрочняющей термической обработке и применяют в отожженном или нормализованном и отпущенном состоянии (иногда вообще без термической обработки). Необходимая теплостойкость перлитных сталей достигается комплексным легированием хромом, молибденом, ванадием, ниобием; содержание каждого из этих элементов не превышает 1%*, за исключением хрома, содержание которого для повышения жаростойкости доводят до 2,5—3,0%. Эти стали низкоуглеродистые с содержанием 0,08—0,15% C (иногда до 0,2—0,3% C).

*1 Содержание элементов здесь и далее по тексту в мас. долях.

9. Низко- и среднелегированные теплоустойчивые стали

| Сталь (ГОСТ 20072—74) | Применение | Температура применения, °С | Срок эксплуатации | Температура интенсивного окисления, °С |
|-------------------------------------|---|----------------------------|-------------------|--|
| Стали перлитного класса | | | | |
| 12МХ 12Х1МФ | Трубы пароперегревателей, трубопроводов, коллекторных установок высокого давления, ковки для котлов и паропроводов. Детали цилиндров газовых турбин | 510 570—585 | Весьма длительный | 570 600 |
| 20Х1М1Ф1ТР 20Х1М1Ф1БР | Крепежные детали турбин и фланцевых соединений паропроводов и аппаратуры | 500—580 | Длительный | — |
| 25Х1МФ 25Х2М1Ф | Болты, плоские пружины, шпильки и другие крепежные детали | 510 520—550 | Весьма длительный | 600 |
| 18Х3МВ | Трубы для гидрогенерационных установок | 450—500 | Длительный | 600 |
| 20Х3МВФ | Роторы, диски, поковки, болты. Трубы высокого давления для химической аппаратуры и гидрогенерационных установок | 500—560 | Длительный | 600 |
| 12Х2МВ8ФБ (ЧМ ТУ/ЦНИИЧМ 1154—64) | Энергетическое машиностроение | 650 | Длительный | — |
| Стали мартенситного класса | | | | |
| 15Х5 | Трубы, детали насосов, лопатки турбомашин, подвески котлов | 600 | — | 650 |
| 15Х5М 15Х5ВФ | Корпуса и внутренние элементы аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов и крекинг-овые трубы, детали насосов, крепеж | 600 | Весьма длительный | 650 |
| 12Х8ВФ | Трубы печей, аппаратов и коммуникаций нефтезаводов | 500 | Длительный | 650 |

10. Механические свойства (не менее) низко- и среднелегированных теплоустойчивых сталей при комнатной и повышенных температурах [44, 45, 47, 51]

| Сталь (ГОСТ 20072—74) | Механические свойства при 20 °С | | | | КСУ, МДж/м ² | Жаропрочные свойства | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|------------|----------|--------|-------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | σ_B | σ_T | δ | ψ | | Температура испытания, °С | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{100\ 000}$ | $\sigma_{1/10\ 000}$ | $\sigma_{1/100\ 000}$ |
| | | | | | | | | | | |
| 12МХ | 420 | 240 | 21 | 45 | 0,6 | 540 | 110 | 70 | — | 35 |
| 12Х1МФ | 480 | 260 | 21 | 55 | 1,0 | 560 | 140 | 108 | 118 | 84 |
| 20Х1М1Ф1ТР | 800 | 680 | 15 | 50 | 0,6 | — | — | — | — | — |
| 20Х1М1Ф1БР | 800 | 680 | 14 | 50 | 0,6 | — | — | — | — | — |
| 25Х1МФ | 900 | 750 | 14 | 50 | 0,6 | 550 | 130 | 65 | 90 | 30 |
| 25Х2М1Ф | 800 | 680 | 12 | 50 | 0,5 | 550 | 220 | 150 | 250 | 70 |
| 18Х3МВ | 650 | 450 | 18 | — | 1,2 | 550 | — | — | 75 | — |
| 20Х3МВФ | 900 | 750 | 12 | 40 | 0,6 | 550 | 200 | 160 | 130 | 100 |
| 12Х2МВ8ФБ | 460 | 660 | 26 | 51 | 0,5 | 650 | 150 | 130 | 120 | 80 |
| 15Х5 | 400 | 170 | 24 | 50 | 1,0 | — | — | — | — | — |
| 15Х5М | 400 | 220 | 22 | 50 | 1,2 | 540 | 100 | 75 | 65 | 40 |
| 15Х5ВФ | 400 | 220 | 22 | 50 | 1,2 | 550 | 89 | 70 | 50 | 38 |
| 12Х8ВФ | 400 | 170 | 22 | 50 | 1,0 | — | — | — | — | — |

Примечание. Стали термообработаны в соответствии с рекомендациями ГОСТ 20072—74; свойства стали 12Х2МВ8ФБ — из [45].

Перлитные стали пластичны в холодном состоянии (см. табл. 10), удовлетворительно обрабатываются резанием и свариваются. По теплопроводности и тепловому расширению они близки к обычным конструкционным сталям.

Критерием жаропрочности перлитных сталей является предел ползучести с допустимой деформацией 1% за 10 000 или 100 000 ч. По характеристикам жаропрочности эти стали при 550—600 °С существенно уступают аустенитным жаропрочным сталям. Однако при невысоких рабочих температурах перлитные стали благодаря высокой стабильности структуры оказываются в числе немногих конструкционных материалов, способных в течение длительного времени сопротивляться ползучести и сохранять достаточную пластичность (не охруп-

чиваясь), которая характеризует надежность работы конструкции в условиях возможного образования внутренних и внешних дефектов.

Наиболее широкое применение при температурах 550—600 °С нашла сталь 12Х1МФ, которая применяется на всех мощных электростанциях для изготовления пароперегревателей, коллекторов, паропроводов и т. п. Стали 25Х2М1Ф и 20Х3МВФ отличаются повышенной жаропрочностью в интервале 500—550 °С. Наиболее высокие показатели жаропрочности при 600—650 °С, приближающие ее к высоколегированным аустенитным сталям, имеет сталь 12Х2МВ8ФБ. В отличие от аустенитных она не содержит никеля, имеет высокую теплопроводность, меньший коэффициент термического расширения и не склонна к разрушению в зоне сварного шва.

Состав низколегированных сталей перлитного класса стабилизировался и новых путей его принципиального изменения пока не найдено. Значительное улучшение свойств достигнуто совершенствованием технологии производства и применением микролегирования.

Мартенситные стали предназначены для изделий, работающих при температурах 450—600 °С, и отличаются от перлитных сталей повышенной жаростойкостью в атмосфере пара или топочных газов.

Критерием жаропрочности мартенситных сталей является предел ползучести с допустимой деформацией 0,1 % за 10 000 ч или 1 % за 100 000 ч. По уровню жаропрочности они не намного превосходят перлитные стали.

Хром, который повышает жаростойкость и жаропрочность, присутствует во всех сталях, предназначенных для длительной эксплуатации при высоких температурах в различных средах: на воздухе, в продуктах сгорания угля, природного газа или мазута с различными агрессивными добавками ванадия, серы и др.

В зависимости от содержания хрома высокохромистые стали на основе α -железа подразделяют на три группы: 1) с содержанием 5—10 % Cr (мартенситные); 2) с содержанием 10—13 % Cr (мартенситно-ферритные); 3) с содержанием Cr выше 13 % (ферритные). Наиболее высокую жаропрочность имеют стали, содержащие 10—13 % Cr, а самую низкую — стали, содержащие свыше 13 % Cr, которые применяются в основном как жаростойкие.

Номенклатура марок мартенситных сталей, содержащих до 8 % Cr (в соответствии с ГОСТ 20072—74), и рекомендации по их применению приведены в табл. 9, а механические свойства — в табл. 10. Для обеспечения высоких, стабильных в процессе длительной службы механических свойств эти стали дополнительно легируют вольфрамом, молибденом, ванадием.

Сортамент теплостойких сталей (из числа указанных в ГОСТ 20072—74) должен соответствовать ГОСТ 2590—88 — для горячекатаной круглой; ГОСТ 2591—71 — горячекатаной квадратной; ГОСТ 103—76, 4405—75 —

горячекатаной полосовой; ГОСТ 1133—71 — ковальной круглой и квадратной; ГОСТ 7417—75 — калиброванной, круглой; ГОСТ 8559—75 — квадратной; ГОСТ 8560—78 — шестигранной.

К высоколегированным мартенситным сталям, содержащим до 10 % Cr, в первую очередь относятся *сильхромы* — среднеуглеродистые стали (до 0,4 % C) с кремнием (до 2—3 % Si). Они характеризуются повышенной жаростойкостью в среде выхлопных газов и используются для изготовления клапанов двигателей внутреннего сгорания. Номенклатура марок в соответствии с ГОСТ 5632—72 и рекомендации по их применению приведены в табл. 11, а жаропрочные свойства после соответствующей термической обработки — в табл. 12. Жаропрочность *сильхромов* позволяет применять их при температурах не выше 600—650 °С; при более тяжелых условиях эксплуатации клапаны мощных двигателей изготавливают из аустенитных сталей.

Сильхромы не содержат дорогих и дефицитных легирующих элементов. Технологические свойства их хуже, чем свойства перлитных сталей; особенно затруднена сварка, требуется предварительный подогрев и последующая термическая обработка.

Наибольшее распространение в промышленности среди высоколегированных жаропрочных сталей получили *высокохромистые* стали, содержащие 10—13 % Cr (см. табл. 11). Номенклатура марок и химический состав этих сталей также обусловлен ГОСТ 5632—72. Для повышения сопротивления ползучести в состав сталей дополнительно вводят Mo, W, V, Nb, Ti. При таком высоком содержании хрома и других ферритообразующих элементов и низком содержании углерода стали становятся мартенситно-ферритными. Количество феррита невелико, поэтому по характеристикам жаропрочности они близки к мартенситным. Упрочнение этих сталей обеспечивается созданием мартенситно-ферритной основы и выделением различных карбидов (типа $Me_{23}C_6$ и MeC) и фаз Левеса Fe_2W [44]. При длительной эксплуатации они могут приме-

11. Высоколегированные теплостойкие стали

| Сталь (ГОСТ 5632—72) | Применение | Рекомендуемая температура применения, °С | Срок эксплуатации | Температура интенсивного окисления, °С |
|--|---|--|-------------------|--|
| Стали мартенситного класса | | | | |
| 40X9C2, 40X10C2M | Клапаны моторов, крепежные детали | 650 | Длительный | 850 |
| 15X11MФ | Рабочие и направляющие лопатки паровых турбин, поковки, бандажи и др. | 560—580 | Весьма длительный | 750 |
| 18X11MНФБ, 20X12ВНМФ | Высоконагруженные детали, лопатки паровых турбин, детали клапанов, поковки дисков, роторов паровых и газовых турбин, крепежные детали | 600 | То же | 750 |
| 11X11Н2В2МФ, 13X11Н2В2МФ, 16X11Н2В2МФ | Диски компрессора, лопатки и другие нагруженные детали | 600 | Длительный | 750 |
| 20X13 | Лопатки паровых турбин, уплотнительные втулки, клапаны, болты, гайки, трубы, арматура крекинг-установок | 500 | Весьма длительный | 750 |
| 13X14Н3В2ФР | Высоконагруженные детали (диски, валы, болты, лопатки и др.), работающие в условиях повышенной влажности | 550 | То же | 700 |
| Стали мартенситно-ферритного класса | | | | |
| 18X12ВМБФР | Поковки, турбинные лопатки, трубы паровых котлов и паропроводов, крепеж | 500 | Весьма длительный | 750 |
| 12X13 | Лопатки паровых турбин, клапаны гидравлических прессов, болты, гайки, трубы, бандажи, арматура крекинг-установок | 500 | То же | 750 |
| 14X17Н2 | Рабочие лопатки, диски, валы, втулки | 400 | Длительный | 800 |

Продолжение табл. 11

| Сталь (ГОСТ 5632—72) | Применение | Рекомендуемая температура применения, °С | Срок эксплуатации | Температура интенсивного окисления, °С |
|--------------------------------------|---|--|-------------------|--|
| | | | | |
| Стали аустенитного класса | | | | |
| 08X16H13M2B | Поковки для дисков и роторов, лопатки, болты | 600 | Весьма длительный | 850 |
| 09X16H15M3B | Трубы пароперегревателей и трубопроводов высокого давления | 350 | То же | 850 |
| 12X18H9T, 12X18H10T, 12X18H12T | Детали выхлопных систем, газовых турбин, турбокомпрессоров, трубы, листовые и сортовые детали | 600 | То же | 850 |
| 31X19H9MBBT | Роторы, диски, болты, поковки, лопатки и др. | 600 | Весьма длительный | 800 |
| 55X20Г9АН4 | Клапаны моторов | 600 | То же | 750 |

12. Механические свойства (не менее) высоколегированных теплостойких сталей при повышенных температурах [44, 45, 47, 51]

| Сталь (ГОСТ 5632—72) | Режимы термической обработки | Температура испытания, °С | σ_{-1} (N = 10 ⁷) для образца | | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{100\ 000}$ | $\sigma_{1/10\ 000}$ | $\sigma_{1/100\ 000}$ |
|-------------------------|---|---------------------------|--|------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | | | гладкого | с надрезом | | | | |
| МПа | | | | | | | | |
| 40X10C2M | Закалка с 1100 °С, масло, отпуск 800 °С, вода | 550 | — | — | 130 | 95 | 100 | 40 |
| | | 600 | — | — | — | — | 46 | 22 |
| 15X11MФ | Нормализация 1050 °С, отпуск 680—700 °С | 550 | 250* | 170* | 200 | 170 | 180 | 90 |
| | | 600 | — | — | — | — | 90 | 40 |
| 18X11MНФБ | Нормализация 1100—1140 °С, отпуск 750 °С | 550 | — | — | 170 | — | 120 | — |

Продолжение табл. 12

| Сталь (ГОСТ 5632—72) | Режимы термической обработки | Температура испытания, °С | σ_{-1} (N = 10 ⁷) для образца | | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{100\ 000}$ | $\sigma_{1/10\ 000}$ | $\sigma_{1/100\ 000}$ |
|-------------------------|---|---------------------------|--|------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | | | гладкого | с надрезом | | | | |
| МПа | | | | | | | | |
| 20X13 | Закалка с 1000—1050 °С, воздух или масло, отпуск 700—750 °С | 500 | 240 | 130 | 195 | 160 | 180 | 48 |
| 18X12ВМБФР | Закалка 1050 °С, масло, отпуск 650—700 °С | 590 620 | — — | — — | 210 140 | 170 110 | 140 80 | 100 60 |
| 12X13 | Закалка с 1030—1050 °С, масло, отпуск 740—750 °С | 500 | — | — | 145 | 120 | 100 | 57 |
| | Закалка с 1030—1050 °С, масло, отпуск 680—700 °С | 500 | 225 | 107 | 220 | 190 | — | — |
| 08X16H13M2B | Закалка с 1100—1130 °С, воздух | 550 600 | — — | — — | 260 200 | 210 150 | — 140 | 160 90 |
| 12X18H9T | Закалка с 1130—1160 °С, воздух или вода, старение 800 °С | 600 | 205 | 135 | 130 | 95 | 200 | 75 |
| 12X18H12T | Закалка с 1050—1100 °С, воздух | 600 | — | — | 170 | 135 | — | 75 |
| 31X19H9MBBT | Закалка с 1150—1180 °С, вода, старение 800 °С | 560 600 | — — | — — | 300 240 | 260 220 | 240 150 | 170 110 |

* База испытаний N = 10⁸.

няться до 600—650 °С. Используются в термически упрочненном состоянии после закалки (или нормализации) и старения (высокого отпуска).

Основным свойством высокохромистых сталей является высокое сопротивление газовой коррозии, что выгодно отличает их от никельсодержащих сталей в условиях применения высокосернистых мазутов. Благодаря высокому содержанию легирующих элементов стали глубоко прокаливаются даже при нормализации (до 120—200 мм) и поэтому более пригодны для деталей крупных сечений, чем перлитные стали.

Наименее легированные хромистые стали 12X13 и 20X13 применяются для лопаток паровых турбин, работающих длительное время при температурах 450—500 °С. Одной из причин использования этих сталей для лопаток является их высокая демпфирующая способность. Сталь 15X11МФ отличается пониженным содержанием хрома, но дополнительно легирована молибденом и ванадием, которые всегда используются при комплексном легировании. Максимальная температура для длительной службы этой стали 550—580 °С. Для легирования 12 %-ных хромистых сталей также используется в небольшом количестве никель (0,5—3 %). Комплексно-легированные хромистые стали содержат молибден, вольфрам, ванадий, ниобий и бор, например сталь 18X12ВМФР. Жаропрочные свойства высоколегированных теплостойких сталей приведены в табл. 12.

К теплостойким сталям можно также отнести некоторые аустенитные стали, для которых максимальная рабочая температура при длительной эксплуатации составляет 600 °С и ниже (см. табл. 11 и 12). Они обладают более высокой жаростойкостью и используются для более нагруженных деталей.

Химический состав этих сталей регламентирован ГОСТ 5632—72 и является обязательным для других стандартов, установленных для конкретных видов продукции: прутков, листов, труб, проволоки, штанг и ленты. Каждым из этих стандартов определена номенклатура марок стали (на

числа указанных в ГОСТ 5632—72) и установлены требования по сорту, качеству поверхности, макроструктуре, механическим свойствам и термической обработке. Механические свойства различных полуфабрикатов из высоколегированных теплостойких сталей приведены в табл. 13—15. Профили для паровых турбин поставляются по ГОСТ 19442—74 в виде горячекатаных и холоднотянутых фасонных прутков — для лопаток и в виде холоднокатаных и холоднотянутых круглых и полукруглых прутков — для деталей (связей) лопаток для работы при температурах до 580 °С. Согласно ГОСТ 18968—73 поставляются профили горячекатаных и кованные: круглые (до 150 мм), квадратные (до 220 мм) и полосы (толщиной до 80 мм и шириной до 150 мм) с механическими свойствами, соответствующими приведенным в табл. 16.

К теплостойким материалам можно отнести высоколегированные чугуны с шаровидным графитом [4]. Механические свойства некоторых высоколегированных чугунов при повышенных температурах приведены в табл. 17.

Жаропрочные цветные сплавы на основе титана, алюминия и магния можно применять как теплостойкие. Указанные материалы, несмотря на более высокую стоимость, используют в тех случаях, когда нельзя применять стали вследствие большой массы. Однако они менее жаропрочны и используются при следующих температурах: сплавы магния — до 300—350 °С, сплавы алюминия — до 350—400 °С (за исключением САП, их можно применять до 500 °С), сплавы титана — до 500—600 °С.

Свойства некоторых жаропрочных сплавов магния приведены в табл. 18. Недостатками магниевых сплавов является их низкая технологичность при плавке, литье, обработке давлением и термообработке и недостаточная коррозионная стойкость и жаропрочность по сравнению с алюминиевыми сплавами.

Алюминиевые сплавы более прочные и имеют хорошие технологические свойства. Высокие тепло- и электропроводность позволяют использовать их в качестве проводниковых материа-

13. Механические свойства (не менее) сортовой теплостойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5949—75

| Сталь | σ _в | | σ _т | | δ | ψ | KCU, МДж/м ² | Сталь | σ _в | | σ _т | | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|-------------|-----------------|-----------|----------------|---------|-----------|---|-------------------------|------------|----------------|---------|----------------|-----|---|---|-------------------------|
| | МПа | | МПа | | | | | | МПа | | МПа | | | | |
| 40X9C2 | 735 | 441 | 15 | 35 | — | — | 13X11H2B2MФ | 882 (1078) | 735 (931) | 15 (13) | 55 | 0,9 | | | |
| 40X10C2M | 931 | 735 | 10 | 35 | 0,2 | — | 18X12BMBФР | 735 | 490 | 12 | 45 | 0,4 | | | |
| 15X11MФ | 686 | 490 | 15 | 35 | 0,6 | — | 12X13 | 588 | 412 | 20 | 60 | 0,9 | | | |
| 18X11MНФБ | 735 | 588 | 15 | 50 | 0,6 | — | 14X17H2 | 1078 | 412 | 20 | 30 | 0,5 | | | |
| 20X12BHMФ | 735 | 588 | 15 | 50 | 0,6 | — | 08X16H13M2B | 539 | 216 | 40 | 50 | 1,2 | | | |
| 11X11H2B2MФ | 980 | 833 | 10 | 50 | — | — | 12X18H9T | 539 | 196 | 40 | 55 | — | | | |
| 16X11H2B2MФ | По согласованию | | | | | | | | | | | | | | |
| 20X13 | 645 (833) | 441 (637) | 16 (10) | 55 (50) | 0,8 (0,6) | — | 12X18H10T | 510 | 196 | 40 | 55 | — | | | |
| 13X14H3B2ФР | 931 (1127) | 735 (882) | 14 (12) | 55 (50) | 0,9 (0,7) | — | 12X18H12T | 539 | 196 | 40 | 55 | — | | | |
| | | | | | | | 31X19H9MBBT | 588 | 294 | 30 | 40 | — | | | |

Примечание. Значения в скобках относятся к стали, термообработанной с более низкой температуры отпуска.

14. Механические свойства (не менее) толстолистовой теплоустойчивой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 7350-77

| Сталь | σ_B | σ_T | $\delta_s, \%$ | Сталь | σ_B | σ_T | $\delta_{st}, \%$ |
|---------|-----------------|------------|----------------|-----------|------------|------------|-------------------|
| | МПа | | | | МПа | | |
| 20X13 | 509 | 372 | 20 | 12X18H9T | 530 | 216 | 38 |
| 12X13 | 490 | 340 | 21 | 12X18H10T | 530 | 236 | 38 |
| 14X17H2 | По согласованию | | | 12X18H12T | 530 | 236 | 38 |

15. Механические свойства (не менее) тонколистовой теплоустойчивой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5582-75

| Сталь | σ_B | σ_T | $\delta, \%$ | Сталь | σ_B | σ_T | $\delta, \%$ |
|-------------|------------|------------|--------------|-----------|-----------------|------------|--------------|
| | МПа | | | | МПа | | |
| 11X11H2B2MФ | 830 | — | 22 | 13X13 | 392 | — | 21 |
| 16X11H2B2MФ | 830 | — | 22 | 14X17H2 | По согласованию | | |
| 20X13 | 490 | — | 20 | 12X18H10T | 529 | 196 | 40 |

16. Механические свойства термообработанных профилей для паровых турбин при испытании механически обработанных образцов

| Сталь | $\sigma_T, \text{ МПа}$ | $\sigma_B, \text{ МПа}$ | $\delta, \%$ | $\psi, \%$ | $KCU, \text{ МДж/м}^2$ | НВ | |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|------------|------------------------|---------|----------|
| | | | | | | | не менее |
| 15X11MФ, 15X11MФ-Ш | 550—670 | 686 | 15 | 50 | 0,6 | 217—255 | |
| | 588—755 | 735 | 15 | 50 | 0,6 | 220—269 | |
| | 666—784 | 813 | 13 | 40 | 0,4 | 255—286 | |
| 18X11MНФБ, 18X11MНФБ-Ш | 588—735 | 735 | 15 | 50 | 0,6 | 229—255 | |
| 20X12ВНМФ | 588—755 | 735 | 15 | 50 | 0,6 | 229—269 | |
| | 666—784 | 813 | 13 | 35 | 0,4 | 241—286 | |
| | 20X13 | 490—657 | 666 | 18 | 50 | 0,7 | 207—241 |
| | 20X13-Ш | 686—882 | 833 | 15 | 50 | — | 255—302 |
| | 12X13, 12X13-Ш | 441—608 | 617 | 20 | 60 | 0,8 | 187—229 |

17. Механические свойства (не менее) высоколегированных чугунов

| Чугун (ГОСТ 7769-82) | 20 °С | | | | 600 °С | | |
|-------------------------|------------|------------|--------------|------------------------|---------------|-----------------|---|
| | σ_B | σ_T | $\delta, \%$ | $KCU, \text{ МДж/м}^2$ | σ_{10} | σ_{1000} | Скорость ползучести, %/ч ($\sigma = 40 \text{ МПа}$) |
| | МПа | | | | МПа | | |
| ЧЮ22-Ш | 350 | — | 0,5 | 0,05 | 100 | — | $4,0 \cdot 10^{-5}^*$ |
| ЧН11Г7-Ш | 300 | 180 | 10,0 | 0,2 | — | 120 | $1,8 \cdot 10^{-4}$ |
| ЧН19Х3-Ш | 250 | 180 | 2,0 | 0,2 | — | 120 | $1,0 \cdot 10^{-4}$, $2,0 \cdot 10^{-4}^*$ |

* Скорость ползучести при 700 °С и напряжении 30 МПа.

18. Свойства жаропрочных сплавов магния и алюминия [30, 49, 54]

| Сплав | Рекомендуемая температура применения | Температура испытания | σ_B | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}^*$ |
|-------|--------------------------------------|-----------------------|------------|----------------|----------------------|
| | | | °С | | МПа |

Сплавы на основе магния

Деформируемые (ГОСТ 14957-76)

| | | | | | |
|------|---------|-----|-----|----|----|
| МА8 | 150—200 | 200 | 130 | 75 | 35 |
| МА9 | 150—200 | 200 | 170 | 70 | 28 |
| МА11 | 200—250 | 250 | 180 | 80 | 20 |
| МА13 | 300—350 | 300 | 120 | 70 | 50 |
| МА14 | 300—350 | 300 | 130 | 90 | 60 |

Литейные (ГОСТ 2856-79)

| | | | | | |
|------|---------|-----|-----|----|----|
| МЛ15 | 150—200 | 200 | 120 | 65 | 40 |
| МЛ11 | 200—250 | 250 | 120 | 50 | 30 |
| МЛ9 | 250—300 | 250 | 180 | 60 | 45 |
| МЛ14 | 300—350 | 300 | 80 | 65 | 37 |

Сплавы на основе алюминия

Деформируемые (ГОСТ 4784-74)

| | | | | | |
|------|---------|-----|-----|----|----|
| ВД17 | 250—300 | 300 | 170 | 55 | 32 |
| АК4 | 250—300 | 300 | 160 | 40 | 35 |
| Д20 | 250—300 | 300 | 180 | 80 | 65 |

Литейные (ГОСТ 2685-75)

| | | | | | |
|-------|---------|-----|-----|-------|----|
| АЛ19 | 250—300 | 300 | 150 | 65 | 40 |
| АЛ21 | 300—325 | 300 | — | 70—80 | 50 |
| АЛ33 | 300—350 | 300 | 160 | 90 | — |
| АЦР1У | 350—400 | 300 | 115 | 110 | 60 |

Спеченные

| | | | | | |
|-------|---------|-----|---|----|----|
| САП-1 | 300—500 | 350 | — | 70 | 60 |
| | | 500 | — | 40 | 30 |

19. Свойства и область применения жаропрочных титановых сплавов [30, 58]

| Сплав (ГОСТ 19807—74) | Температура применения, °С | Применение | Температура испытания, °С | МПа | | | |
|---|----------------------------|--|---------------------------|------------|----------------|--------------------|---|
| | | | | σ_B | σ_{100} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{-1} ($N = 10^7$), г/мм ² образца |
| α-сплавы | | | | | | | |
| OT4 | 350—400 | Корпусные детали | 400 | 560 | 390 | 200 | 230—250 |
| BT5-1 | 450—500 | То же | 500 | 480 | 310 | 150 | 270 |
| BT20 | 500—550 | То же, фасонные отливки | 500 | 690 | 450—480 | 150—170 | 360 |
| BT18 | 550—600 | Лопатки компрессора и др. детали | 500 | 880 | 650—700 | 370 | — |
| | | | 600 | 770 | 300—330 | 100—120 | 400—430 |
| $(\alpha + \beta)$-сплавы | | | | | | | |
| BT3-1 | 350—400 | Лопатки, диски, кольца, крепежные и др. детали. Силовые детали, фасонные отливки | 400 | 800/950 | 780/920 | 500/250 | 450—480* |
| BT8 | 450—500 | Детали авиадвигателей | 500 | 750/870 | 500/580 | 250 | 440 |
| BT9 | 450—500 | Детали компрессора и др. детали, фасонные отливки | 500 | 750 | 600/780 | 350/450 | 420* |
| BT25 | 500—550 | Детали авиадвигателей | 500 | 850/900 | 680/750 | 360 | 420* |

* База испытаний $N = 2 \cdot 10^7$.

Примечание. В числителе указаны значения для сплавов в отожженном, а в знаменателе — в термически упрочненном (после закалки и старения) состоянии.

лов. Жаропрочные алюминиевые сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности, в том числе в авиационной и ракетной технике. Свойства основных алюминиевых жаропрочных сплавов приведены в табл. 18. Свойства и область применения жаропрочных сплавов титана приведены в табл. 19.

3. ЖАРОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Разрушение поверхностных слоев металлов и сплавов при высоких температурах в коррозионно-активных средах создает большие трудности при эксплуатации машин и аппаратов, например газовых турбин, высокотемпературных печей, ядерных реак-

торов, двигателей внутреннего сгорания. Велики потери металла от газовой коррозии и при различных технологических операциях, ковке, штамповке, в металлургии и металлообработке, например, при термической обработке и ряде других операций.

Способность материалов сопротивляться газовой коррозии в процессе обработки и эксплуатации при высоких температурах называют жаростойкостью.

Наиболее распространенным является процесс взаимодействия металлов с кислородом, хотя известны и другие виды газовой коррозии (сернистая, водородная и др.). Химическая коррозия, имеющая место в этом случае, развивается в кислородсодержащих газах: на воздухе, в углекислом газе, водяном паре, чистом кислороде и др. Движущей силой газовой коррозии является термодинамическая неустойчивость металлов в газовых средах при данных внешних условиях: давлении, температуре, составе среды и др. При этом на поверхности металла чаще всего образуется оксидная пленка. От структуры, состава и свойств этих пленок зависит скорость процесса газовой коррозии. Защитные свойства оксидных пленок в значительной степени определяются их сплошностью, которая зависит от отношения моля оксида к массе атома металла. Хорошо защищают металл от дальнейшего окисления только плотные оксиды, если отношение объемов находится в пределах 1,0—2,5 [28].

При разработке жаростойких сплавов основным необходимым требованием ко всем легирующим элементам является большее химическое сродство их к кислороду, чем основы. Согласно существующим теориям можно выделить три принципа жаростойкого легирования.

1. Ионы легирующего элемента входят в кристаллическую решетку оксида основного металла, уменьшая его дефектность и соответственно скорость диффузии, и образуется легированный оксид. Этим объясняется повышенная жаростойкость низколегированных сталей и сплавов.

2. Легирующий компонент образует собственный оксид, обладающий луч-

шими защитными свойствами, чем оксид основного металла. Этим объясняется хорошая жаростойкость высоколегированных сталей и сплавов.

3. Легирующий элемент с основным металлом образует двойной оксид с кристаллической решеткой типа шпинеля, обладающий повышенными защитными свойствами. На жаростойких сплавах обнаружены двойные оксиды-шпинели: $FeO \cdot Cr_2O_3$, $FeO \cdot Al_2O_3$, $NiO \cdot Fe_2O_3$, $NiO \cdot Cr_2O_3$, $NiO \cdot Al_2O_3$ и др. С этим связана высокая жаростойкость высоколегированных сталей и сплавов.

Окисление металлов протекает по различным кинетическим законам, зависящим от условий реализации процесса и свойств образующихся оксидов. Температурные зависимости скорости окисления металлов определяют экспериментально в условиях, имитирующих эксплуатационные. По ним оценивают жаростойкость и максимальную рабочую температуру, что определяет возможность использования металла при заданных температуре и длительности эксплуатации.

Для количественного определения жаростойкости применяют различные методы, из которых наиболее известны весовой метод (по изменению массы образца) и метод непосредственного измерения глубины коррозии по ГОСТ 6130—71. Высокой точностью характеризуется параметрический метод расчета жаростойкости металлов на ЭВМ. В руководящих материалах [27] приведены характеристики жаростойкости основных классов металлургических конструкционных материалов, применяемых в энергомашиностроении: глубина коррозии, средняя скорость коррозии, предельная допускаемая температура применения в различных коррозионных средах. Применительно к нагреваемым расчетные значения характеристик жаростойкости, применяемых для оценки конструкционных материалов, не выявляют степень отрицательного влияния неоднородности окисления на срок их службы. В этом случае разработаны специальные методы оценки стойкости путем нагрева образцов электрическим током [59].

Жаростойкость сплавов магния с Mn, Zn, Al выше, чем нелегированного магния. Улучшает жаростойкость маг-

ния бериллий (0,02—0,05 %) *1, устраняя самовозгорание при технологической обработке.

Жаростойкость промышленных медных сплавов (латуней и бронз) выше жаростойкости меди, так как они легированы элементами четвертой группы. Высокой жаростойкостью отличаются сплавы меди с Ве, Al, Мп; немного уступают им сплавы с Zn, Sn, Si.

Жаростойкость промышленных алюминиевых сплавов такая же хорошая, как и нелегированного алюминия. Исключение составляют сплавы с магнием типа АМг, так как при нагреве образуется собственный рыхлый оксид MgO.

Жаростойкость сплавов титана можно повысить применением жаростойких покрытий.

Тугоплавкие металлы (Mo, W, Ta, Nb) имеют низкую жаростойкость. Они не могут работать в окислительных средах при температуре выше 500 °С. Объемное легирование повышает жаростойкость (разработаны сплавы ниобия с повышенной жаростойкостью [7]). Основные усилия специалистов направлены на разработку защитных покрытий [6].

Основные жаростойкие сплавы созданы на основе железа и никеля. Химический состав высоколегированных сталей и сплавов на железной, железоникелевой и никелевой основах, предназначенных для работы в коррозионно-активных средах и при высоких температурах, приведен в ГОСТ 5632—72. Согласно этому стандарту жаростойкие (окалиностойкие) сплавы относятся к группе II и характеризуются как стали и сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температуре выше 550 °С, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Жаропрочные стали и сплавы, отнесенные к группе III, также должны обладать достаточной жаростойкостью.

При выборе марки стали или сплава необходимо знать рабочую температуру, механические напряжения, допустимую по конструктивным соображе-

ниям деформацию, срок службы и режим работы детали, состав окружающей среды. *1 Номенклатура и рекомендации по применению жаростойких сталей и сплавов приведены в табл. 20, а характеристики жаростойкости некоторых из них — в табл. 21.

Жаростойкость сталей и сплавов на основе железа и никеля повышается легированием в основном хромом, алюминием и кремнием, которые могут образовывать плотные оксиды Cr₂O₃, Al₂O₃, SiO₂. Наибольшее распространение в качестве легирующего элемента получил хром. Высокими защитными свойствами отличаются двойные оксиды-шпинели, которые образуются в высокохромистых сплавах FeO·Cr₂O₃ и NiO·Cr₂O₃.

Из жаростойких сталей наиболее широкое применение нашли хромистые (15X5, 15X6СЮ). Стали с содержанием хрома 5—6 % обладают достаточно высокой жаростойкостью до 600—650 °С, с 14—15 % — до 800 °С. При более высоких температурах требуется применять стали с более высоким содержанием хрома (12X17, 15X28). Недостатком высокохромистых сталей является склонность к росту ферритного зерна. Для предотвращения охрупчивания при длительных нагревах сталь дополнительно легируют титаном, сильным карбидообразующим элементом (08X17Т, 15X25Т, 08X18Т1). Стали без титана применяются для деталей при высоких температурах и отсутствии больших нагрузок, например для нагревателей.

Дополнительное легирование высокохромистых сталей алюминием и кремнием повышает их жаростойкость. В качестве жаростойких сталей применяют хромистые стали, легированные кремнием, — *силхромы* (40X9С2, 40X10С2М6, 30X13Н7С2), которые широко применяются в автостроении. Однако содержание алюминия и кремния в отличие от хрома в сталях ограничено, так как эти элементы ухудшают технологические свойства. Этот недостаток исключается при совместном легировании хромом и алюминием.

*1 Содержание элементов здесь и далее по тексту в маю. долях.

*1 Исходят также из расчета на прочность с учетом экономии никеля.

20. Жаростойкие стали и сплавы на основе железа и никеля [42, 51, 75, 76]

| Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72) | Применение | Температура интенсивного окисления | Рекомендуемая температура (до 10 000 ч) | Примечание |
|--|--|--|---|--|
| | | °С (на воздухе) | | |
| Стали мартенситного класса | | | | |
| 15X5 (ГОСТ 20072—74) | Трубы | 600—650 | — | — |
| 40X9С2 * | Клапаны автомобильных, тракторных и дизельных моторов, теплообменники, колосники | 850 | — | Устойчива в серосодержащих средах |
| 40X10С2М * | Клапаны автомобильных, тракторных и дизельных моторов | 850 | — | То же |
| 30X13Н7С2 | Клапаны автомобильных, тракторных и дизельных моторов | 950 | — | То же |
| Стали мартенситно-ферритного класса | | | | |
| 15X6СЮ | Детали котельных установок, трубы | 800 | — | Устойчива в серосодержащих средах |
| 12X13 | Детали турбин, трубы, детали котлов, детали, работающие в агрессивных средах | 700 | — | — |
| Стали ферритного класса | | | | |
| 10X13СЮ | Клапаны моторов, различные детали | 950 | — | Устойчива в серосодержащих средах |
| 12X17 | Теплообменники, чехлы, термопары, краны, поддоны, оборудование для кухни, трубы | 900 | 850 | Рекомендуется для замены стали 12X18Н9 |
| 08X17Т | То же | 900 | — | — |
| 08X18Т1 | То же | 900 | — | — |

Продолжение табл. 20

| Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72) | Применение | Температура интенсивного окисления | Рекомен- дуемая температура (до 10 000 ч) | Примечание |
|---|---|--|--|---|
| | | °С (на воздухе) | | |
| 15X18CЮ | Трубы пиролизных установок, аппаратура, детали | 1050 | — | Устойчива в серосодержащих средах |
| 15X25T | Аппаратура, детали, чехлы термодар, электроды, трубы пиролизных установок, теплообменники | 1050 | 1000 | Рекомендуется для замены стали 12X18H10T |
| 15X28 | Аппаратура, детали, трубы пиролизных установок | 1100— 1150 | 1100 | Рекомендуется для замены стали 20X23H18 |
| Стали аустенитно-ферритного класса | | | | |
| 08X20H14C2 | Трубы | 1000— 1050 | 1000 | Устойчива в серосодержащих средах |
| 20X20H14C2 | Печные конвейеры, ящики для цементации | 1000— 1050 | — | То же |
| 20X23H13 | Трубы для пиролиза метана, пирометрические трубки, печная арматура, муфелы | 1050 | 1000 | В интервале температур 600—800 °С охрупчивается |
| Стали аустенитного класса | | | | |
| 09X14H16Б * | Трубы пароперегревателей и трубопроводы установок сверхвысокого давления | 850 | 650 | — |
| 12X18H9 | Трубы, печная арматура, теплообменники, муфелы | 850 | 900 | Неустойчива в серосодержащих средах |
| 08X18H10 | То же | 850 | 900 | — |

Продолжение табл. 20

| Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72) | Применение | Температура интенсивного окисления | Рекомен- дуемая температура (до 10 000 ч) | Примечание |
|-----------------------------------|---|--|--|---|
| | | °С (на воздухе) | | |
| 12X18H9T | Трубы, печная арматура, теплообменники, муфелы | 850 | 900 | Неустойчива в серосодержащих средах |
| 08X18H10T | То же | 850 | 900 | То же |
| 12X18H10T * | То же | 850 | 900 | То же |
| 12X18H12T * | Трубы | 850 | 900 | То же |
| 36X18H25C2 | Печные конвейеры и другие нагруженные детали, головки форсунок, ящики для цементации | 1100 | 1000 | Устойчива в науглероживающих средах |
| 55X20Г9АН4 * | Клапаны автомобильных моторов | 950 | — | — |
| 45X22H4M3 * | То же | 950 | — | — |
| 10X23H18 * | Трубы и детали установок для конверсии метана, пиролиза, листы, печная арматура | 1050 | 1000 | В интервале температур 600—800 °С охрупчивается |
| 20X23H18 * | То же | 1050 | 1000 | То же |
| 20X25H20C2 | Подвески и опоры в котлах, трубы электролизных установок, печная арматура, муфелы, роторы | 1050 | 1000 | В интервале температур 600—800 °С охрупчивается |

Продолжение табл. 20

| Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72) | Применение | Темпе- ратура интен- сивного окисления | Рекомен- дуемая температура (до 10 000 ч) | Примечание |
|-----------------------------------|--|--|--|---|
| | | °С (на воздухе) | | |
| 12Х25Н16Г7АР * | Детали газопроводных систем, камер сгорания, диафрагмы, листовые детали | 1100 | 1050 | Рекомендуется для замены сплавов никеля |
| Сплавы на железоникелевой основе | | | | |
| ХН38ВТ * | Детали газовых систем | 1050 | 1000 | Рекомендуется для замены стали ХН78Т |
| ХН28ВМАБ | Листовые детали турбин | 1100 | 800—1000 (до 1000 ч) | — |
| ХН45Ю * | Детали горелок, чехлы термопар, листы и трубы для деталей печей, муфелы колпаковых печей | — | 1250—1300 | Рекомендуется для замены стали ХН78Т |
| Сплавы на никелевой основе | | | | |
| ХН60ВТ * | Листовые детали двигателя | 1100 | 1000 | — |
| ХН60Ю * | То же | 1250 | 1200 | — |
| ХН75МБТЮ * | Детали газопроводных систем, аппаратура, детали камер сгорания | 1100 | 1050 | — |
| ХН70Ю * | Детали газопроводных систем, печная арматура | 1250 | 1200 | — |
| ХН78Т * | Детали газопроводных систем, детали камер сгорания | 1150 | 1100 (1200 кратковременно) | — |

* Марки сталей и сплавов, способных работать в нагруженном состоянии.

21. Показатели жаростойкости сталей и сплавов на воздухе [51, 59]

| Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72) | Температура испытания, °С | Средняя скорость коррозии, мм/год | Увеличение массы, г/(м ² ·ч) | Глубина коррозии, мм (10 000 ч) |
|-----------------------------------|------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 12Х13 | 600 | 0,02 | — | — |
| | 700 | 0,12 | — | — |
| | 800 | 0,45 | — | — |
| | 850 | 0,83 | — | — |
| 12Х17 | 800 | 0,0034 | — | 0,004 |
| | 850 | 0,0045 | — | 0,005 |
| | 900 | 0,0059 | — | 0,007 |
| 15Х25Т | 900 | 0,0181 | — | 0,021 |
| | 950 | 0,0276 | — | 0,032 |
| | 1050 | 0,35 | — | — |
| 15Х28 | 1050 | 0,45 | — | — |
| 12Х18Н9 | 700 | 0,06 | — | — |
| | 800 | 0,17 | — | — |
| 12Х18Н9Т | 750 | 0,013 | — | — |
| 12Х18Н12Т | 700 | 0,0023 | — | 0,003 |
| 36Х18Н25С2 | 1000 | — | 0,42 | — |
| 20Х23Н18 | 900 | — | — | 0,018 |
| | 950 | — | — | 0,025 |
| | 1000 | — | 0,2 | — |
| | 1100 | — | 0,35 | — |
| 12Х25Н16Г7АР | 1100 | — | 0,46 | — |
| ХН45 | 1250 | 0,1 | — | — |
| | 1300 | 0,24 | — | — |
| ХН75МБТЮ | 900 | 0,0112 | — | 0,013 |
| | 950 | 0,0177 | — | 0,02 |
| ХН78Т | 900 | 0,0066 | — | 0,007 |
| | 1100 | — | — | 0,036 |
| | 1200 | — | — | 0,063 |

Химический состав этих сталей и сплавов приведен в ГОСТ 10994—74.

Легирование никелем улучшает технологические и прочностные свойства хромоникелевых и прочностные свойства хромоникелевых аустенитных сталей, но значительно удорожает их. Стали и сплавы с никелем необходимо применять только в тех случаях, в которых требуется повышенная жаропрочность и пластичность. Разработаны жаростойкие Cr—Mn—стали, легированные алюминием [2], которые могут использоваться как жаростойкие до 900—950 °С, имеют высокие механические свойства и хорошую технологичность. В сплавах системы Fe—Ni—Cr, предназначенных для работы до 1050 °С, марганец может лишь частично заменить никель (до 10 %). Следует выделить сплав ХН45Ю, который обладает лучшими свойствами, чем сплавы на основе никеля. Это единственный сплав, который работает при температуре 1350 °С (до 100 ч). Стали ХН35ЮС, 10Х18Н18Ю, 10Х10Н20ЮС содержат еще меньшее количество никеля, но могут эксплуатироваться соответственно: сталь ХН35ЮС — до 1200 °С, две остальные стали — до 1100 °С. Сплавы системы Fe—Ni—Co—Cr также являются высокожаростойкими, но легирование кобальтом (до 40 %) связано в основном с необходимостью повышения жаропрочности [51].

Никель обладает более высокой жаростойкостью в окислительных средах, чем железо, так как его единственный оксид NiO менее дефектный, чем оксид FeO. Высокая жаростойкость нихромов (сплав никеля с хромом) объясняется прежде всего образованием шпинели NiO·Cr₂O₃. Жаростойкие сплавы на никелевой основе имеют в основном структуру твердых растворов, мало упрочняются термической обработкой и обладают невысокой прочностью и жаропрочностью, но хорошей технологичностью. Нихромы имеют высокое удельное электрическое сопротивление и поэтому используются как материал для нагревателей электропечей, а также для изготовления камер сгорания, газопроводов и деталей газотурбинных установок.

Сплав, содержащий никель и 20 % Cr — основа большинства жаростойких никелевых сплавов. Содержание

углерода ограничено 0,1 %. Марганец снижает жаростойкость этих сплавов. Кремний с этой целью также не используется, так как он снижает технологичность сплава. Для создания высокожаростойких никелевых сплавов используют алюминий. Лучший жаростойкий никелевый сплав Х20Н80Ю3.

Жаростойкие сплавы на основе никеля в окислительных средах (парах воды, кислороде, синтетическом аммиаке) более стойки, чем на основе железа. Однако в серосодержащих средах никель нестойк к газовой коррозии. Присутствие серы в окислительных средах снижает температуру применения никелевых сплавов до 550 °С, а в восстановительных — до 260 °С.

Виды полуфабрикатов из жаростойких сталей и сплавов, применяемых в электропечестроении, и стандарты на поставляемую продукцию приведены в табл. 22. В табл. 23 представлены стандарты на полуфабрикаты, из которых можно изготовлять нагреватели печей сопротивления. В табл. 22 и 23 приведены стандарты на сортамент жаростойких сталей, в которых определена номенклатура марок сталей (из числа указанных в ГОСТ 5632—72 и ГОСТ 10994—74) и установлены требования по сортаменту, качеству поверхности, макроструктуре, режимам термической обработки и механическим свойствам в состоянии поставки. В литом состоянии жаростойкие стали выпускаются по ГОСТ 2176—77.

Жаростойкие сплавы на основе железа и никеля не претерпевают фазовых превращений, и поэтому их термическая обработка состоит в высокотемпературном нагреве для выращивания зерна или для снятия напряжений.

Механические свойства термически обработанных полуфабрикатов из жаростойких сталей приведены в табл. 24—27. В табл. 28 даны механические и жаропрочные свойства широко применяемых в электропечестроении жаростойких сталей и сплавов при различных температурах.

Сплавы для нагревателей составляют особую группу. Эти сплавы отличаются сочетанием жаростойкости и

22. Стандарты и технические условия на полуфабрикаты из сталей и сплавов, применяемых в электропечестроении [76]

| Сталь или сплав | Трубы | Листы | Лента | Сортовой прокат | Проволока |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------------|
| 12Х13 | ГОСТ 9941—81, ГОСТ 9940—81 | ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77 | ГОСТ 4986—79 | ГОСТ 5949—75 | ГОСТ 2246—70, ГОСТ 18143—72 |
| 15Х25Т | ГОСТ 9941—81, ГОСТ 9940—81 | ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77 | — | ГОСТ 5949—75 | ГОСТ 2246—70 |
| 12Х18Н10Т | ГОСТ 9941—81, ГОСТ 9940—81 | ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77 | ГОСТ 4986—79 | ГОСТ 5949—75 | ГОСТ 2246—70, ГОСТ 18143—72 |
| 20Х23Н13 | — | ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77 | — | ГОСТ 5949—75 | — |
| 20Х20Н14С2 | ГОСТ 9941—81, ГОСТ 9940—81 | ГОСТ 5582—75 | — | ГОСТ 5949—75 | — |
| 20Х23Н18 | ГОСТ 9940—81 | ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77 | ГОСТ 4986—79 | ГОСТ 5949—75 | ГОСТ 2246—70 |
| 20Х25Н20С2 | — | ГОСТ 5582—75 | — | ГОСТ 5949—75 | — |
| ХН45Ю | ТУ 15-3-59—72 | ТУ 14-123-41—73, ТУ 14-123-40—73 | — | ТУ 14-1-941—74 | ТУ 14-131-65—72 |
| ХН70Ю | — | ТУ 14-1-1386—75, ТУ 14-1-493—75 | — | ГОСТ 12766.4—77 | ГОСТ 12766.1—77 |

Примечание. Тонколистовая сталь по ГОСТ 5582—75 (горячекатаная толщиной 1,5—3,9 мм, холоднокатаная толщиной 0,7—3,9 мм) поставляется в термически обработанном и выпрямленном виде; термообработка толстолистовой стали по ГОСТ 7350—77 (горячекатаной толщиной 4—50 мм, холоднокатаной толщиной 4—5 мм) и сортового проката по ГОСТ 5949—75 (диаметром или толщиной до 200 мм) оговаривается в заказе.

23. Сортамент жаростойких сплавов для нагревателей печей сопротивления

| Сортамент | ГОСТ |
|---|------------|
| Проволока холоднокатаная диаметром 0,1—7,5 мм | 12766.1—77 |
| Лента холоднокатаная сечением (0,1÷3,2)×(6÷250) мм, длиной 10—40 м | 12766.2—77 |
| Сплав калиброванный диаметром 8—10 мм | 12766.3—77 |
| Прокат сортовой горячекатаный диаметром: 6—12 мм в мотках, 13—30 мм в прутках | 12766.4—77 |
| Лента плоская сечением (0,1÷1,0)×(0,5÷5,0) мм | 12766.5—77 |

высокого омического сопротивления. Ниже приведены предельные рабочие температуры ($T_{пр}$) сплавов в различных средах [59].

В воздушной среде

| Сплав . . . | X15Ю5 | X23Ю5 | X23Ю5Т | X27Ю5Т | OX24Ю5Т-ВИ (с иттрием) |
|--------------------------------|----------|----------|--------|--------|---------------------------|
| $T_{пр}, ^\circ\text{C}$. . . | 1000 | 1200 | 1400 | 1350 | 1300 |
| Сплав . . . | X15Н60-Н | X20Н80-Н | XН7ЮЮ | XН6ЮЮЗ | XН2ЮЮС |
| $T_{пр}, ^\circ\text{C}$. . . | 1125 | 1200 | 1200 | 1200 | 1100 |

В водяном паре $T_{пр}$ для сплавов X23Ю5Т, X27Ю5Т — не более 1300 °С, для сплава X20Н80-Н — не более 1100 °С.

В углеродсодержащих и серосодержащих средах рекомендуется применять сплавы X23Ю5, X23Ю5Т, X27Ю5Т до 1150 °С

В азотсодержащих средах

| Среда . . . | Азот | Диссоциированный аммиак | | | |
|--------------------------------|--------|-------------------------|----------|-------|--------|
| Сплавы . . . | X23Ю5Т | X15Н60-Н | X20Н80-Н | X23Ю5 | X23Ю5Т |
| $T_{пр}, ^\circ\text{C}$. . . | 900 | 1100 | 1200 | 1100 | 1200 |

В водороде целесообразно использовать сплавы X23Ю5Т, X27Ю5Т до 1400 °С, сплавы XН7ЮЮ, XН6ЮЮЗ до 1200 °С; в вакууме (10^{-1} — 10^{-2}) Па — сплавы X23Ю5, X23Ю5Т, X27Ю5Т, OX24Ю5Т-ВИ с иттрием до 1350 °С, сплавы XН7ЮЮ, XН6ЮЮЗ, X15Н6ЮЮ3А до 1150 °С, в аргоне технической чистоты — сплавы X23Ю5Т, X27Ю5Т до 1300 °С, сплав X20Н80-Н до 1200 °С. В парах хлора и брома можно приме-

нять нагреватели из сплава X20Н80-Н при температурах не выше 300 °С. Значения предельной рабочей температуры относятся только к нагревателям толстого сечения. Срок службы нагревателей резко снижается с уменьшением сечения проволоки или ленты. Максимальные рабочие температуры нагревательных элементов приведены в табл. 29. В табл. 30 приведены механические свойства проволоки из жаро-

24. Механические свойства (не менее) сортовой жаростойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5949—75

| Сталь | σ_B | σ_T | δ | ψ | $KCU, \text{МДж/м}^2$ | Сталь | σ_B | σ_T | δ | ψ | $KCU, \text{МДж/м}^2$ |
|------------|-----------------|------------|----------|--------|-----------------------|--------------|------------|------------|----------|--------|-----------------------|
| | МПа | | % | | | | МПа | | % | | |
| 40X9C2 | 735 | 441 | 15 | 35 | — | 20X23H13 | 490 | 294 | 35 | 50 | — |
| 40X10C2M | 931 | 735 | 10 | 35 | 0,2 | 09X14H16B | 490 | 196 | 35 | 50 | — |
| 30X13H7C2 | 1176 | 784 | 8 | 25 | 0,2 | 12X18H9 | 490 | 196 | 45 | 55 | — |
| 15X6CЮ | 441 | 245 | 20 | 40 | — | 12X18H9T | 539 | 196 | 40 | 55 | — |
| 12X13 | 558 | 412 | 20 | 60 | 0,9 | 08X18H10 | 470 | 196 | 40 | 55 | — |
| 10X13CЮ | 490 | 343 | 15 | 60 | — | 08X18H10T | 490 | 196 | 40 | 55 | — |
| 12X17 | 392 | 245 | 20 | 50 | — | 12X18H10T | 510 | 196 | 40 | 55 | — |
| 08X17T | По согласованию | | | | | 12X18H12T | 539 | 196 | 40 | 55 | — |
| 15X18CЮ | 490 | 294 | 20 | 50 | — | 36X18H25C2 | 637 | 343 | 25 | 40 | — |
| 15X25T | 441 | 294 | 20 | 45 | — | 10X23H18 | 490 | 196 | 35 | 50 | — |
| 15X28 | 441 | 294 | 20 | 45 | — | 20X23H18 | 490 | 196 | 35 | 50 | — |
| 08X20H14C2 | 539 | 245 | 40 | 50 | 1,0 | 20X25H20C2 | 558 | 294 | 35 | 50 | — |
| 20X20H14C2 | 588 | 294 | 35 | 55 | — | 12X25H16Г7AP | 686 | 323 | 40 | 45 | — |

25. Механические свойства (не менее) полуфабрикатов из толстолистовой жаростойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 7350—77

| Сталь | σ_B | σ_T | $\delta, \%$ | Сталь | σ_B | σ_T | $\delta, \%$ |
|----------|------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|
| | МПа | | | | МПа | | |
| 12X13 | 490 | 343 | 21 | 04X18H10 | 490 | 176 | 45 |
| 12X17 | 441 | — | 18 | 08X18H10T | 510 | 206 | 43 |
| 15X25T | 441 | — | 14 | 12X18H12T | 510 | 206 | 43 |
| 20X23H13 | 568 | — | 35 | 20X23H18 | 539 | 265 | 35 |
| 12X18H9 | 529 | 216 | 38 | 12X25H16Г7AP | 735 | 392 | 50 |
| 12X18H9T | 529 | 216 | 38 | | | | |

26. Механические свойства (не менее) полуфабрикатов из тонколистовой жаростойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5582—75

| Сталь | σ_B | σ_T | $\delta, \%$ | Сталь | σ_B | σ_T | $\delta, \%$ |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|
| | МПа | | | | МПа | | |
| 12X13 | 392 | — | 21 | 12X18H9 | 539 | — | 35 |
| 12X17 | 490 | — | 20 | 08X18H10 | 510 | — | 45 |
| 08X17T | 461 | — | 20 | 08X18H10T | 510 | — | 40 |
| 08X18T1 | 461 | — | 30 | 12X18H10T | 529 | 196 | 40 |
| 15X25T | 529 | — | 17 | 20X23H18 | 510 | — | 35 |
| 15X28 | 529 | — | 17 | 20X25H20C2 | 490 | — | 35 |
| 20X20H14C2 | 588 | — | 40 | 12X25H16Г7AP | Не более | | 35 |
| 20X23H13 | 539 | — | 35 | | 980 | — | |

27. Механические свойства жаростойкой проволоки

| Сталь | Диаметр проволоки, мм | Термо-обработанная | Нагартованная | |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------|------------------|
| | | | δ , % | σ_B , МПа |
| | | σ_B , МПа | не менее | |
| 12X13 | 1,0—6,0 | 500—750 | 16 | — |
| 08X18N10 12X18N9 12X18N9T | 0,2—1,0 | 600—900 | 20 | 1100 |
| 12X18N10T | 1,0—6,0 | 550—900 | | |

Примечание. Термическая обработка проводится в соответствии с рекомендациями ГОСТ 18143—72.

28. Механические и жаропрочные свойства жаростойких сталей и сплавов, применяемых в электропечестроении [76]

| Сталь; режим термообработки | Температура, °С | σ_B | σ_T | δ | ψ | KCU , МДж/м ² | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{1/10\ 000}$ |
|---|-----------------|------------|------------|----------|--------|----------------------------|--------------------|----------------------|
| | | МПа | | % | | | | |
| | | МПа | | | | | | |
| 12X13; нагрев 1030—1050 °С, охлаждение в масле, отпуск 700 °С | 20 | 710—750 | 580—605 | 14—22 | 66—68 | 1,4—1,7 | — | — |
| | 400 | 585 | 470—500 | 13—15 | 64—67 | 1,8—2,3 | — | — |
| | 500 | 530—550 | 450—480 | 15—18 | 69,5 | 1,9—2,5 | 150 | — |
| | 600 | 340—460 | 320—420 | 20—27 | 79—85 | 1,9—2,7 | 47 | 47,0 |
| | 700 | — | — | — | — | — | 12 | 8,8 |
| 12X18N10T; нагрев 1050—1100 °С, охлаждение на воздухе | 20 | 560 | 230 | 46 | 66 | 2,2 | — | — |
| | 400 | 420 | 150 | 26 | 61 | 2,9 | — | — |
| | 500 | 400 | 140 | 30 | 60 | 2,0 | — | — |
| | 600 | 350 | 120 | 28 | 51 | 2,0 | 130 | 100,0 |
| | 700 | 270 | 120 | 20 | 40 | 2,6 | 160 | 16,0 |
| | 800 | — | — | — | — | — | 54—70 | 15 |

Продолжение табл. 28

| Сталь; режим термообработки | Температура, °С | σ_B | σ_T | δ | ψ | KCU , МДж/м ² | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{1/10\ 000}$ |
|--|-----------------|------------|------------|-------------|--------|----------------------------|--------------------|----------------------|
| | | МПа | | % | | | | |
| | | МПа | | | | | | |
| 15X25T; нагрев 730—770 °С, охлаждение в воде или на воздухе | 20 | 450 | 300 | 20 | 45 | — | — | — |
| | 800 | — | — | — | — | — | 5,0 | — |
| | 1000 | — | — | — | — | — | 1,7 | 0,08 |
| 20X23N13; нагрев 1150 °С, охлаждение на воздухе | 20 | 667 | 363 | 38,5 | 59,9 | 2,1 | — | — |
| | 800 | — | — | — | — | — | 1,7 | 6,8 |
| | 1000 | — | — | — | — | — | 0,42 | 1,8 |
| 20X20N14C2; нагрев 1150 °С, охлаждение на воздухе | 20 | 640 | 350 | 53 | 73 | — | — | — |
| | 800 | 230 | 100 | 41 | 42 | — | — | — |
| | 900 | 110 | 40 | 58 | 58 | — | — | — |
| | 1000 | — | — | — | — | — | — | 0,35 |
| 20X23N18; без термической обработки | 800 | — | — | — | — | — | — | 1,5 |
| | 900 | — | — | — | — | — | — | 0,4 |
| 20X23N18; нагрев 1180 °С, старение 800 °С, охлаждение в воде | 20 | 610 | 300 | 29—35 | 47 | 1,4—1,9 | — | — |
| | 800 | 190 | 160 | 19—24 | 34 | 1,8 | — | — |
| 20X23N18; нагрев 1150 °С, охлаждение на воздухе | 800 | — | — | — | — | — | 20,0 | 17,5 |
| | 900 | — | — | — | — | — | 12,0 | — |
| | 1000 | — | — | — | — | — | 4,5 | 1,6 |
| 20X25N20C2; нагрев 1200 °С, охлаждение на воздухе | 20 | 550 | ≥ 250 | $\geq 51,0$ | 73,0 | 2,5 | — | — |
| | 1100 | 88 | — | 57,7 | 67,5 | — | — | 0,12 |
| ХН45Ю; нагрев 1150 °С, охлаждение на воздухе | 20 | 710 | 330 | 60 | 58 | — | — | — |
| | 1100 | 34 | 20 | 80 | 55 | — | 3,3 | — |
| | 1200 | 24 | — | 100 | 80 | — | 1,3 | — |
| ХН70Ю; нагрев 1200 °С, охлаждение на воздухе | 20 | 650 | 330—750 | 50 | 45 | 2,5 | — | — |
| | 1100 | 20 | — | 70 | 70 | 0,4 | 4,5 | 0,33 |
| | 1200 | — | — | — | — | — | — | 0,17 |

стойких сплавов, применяемых для нагревателей.

Широкое применение в промышленности находит жаростойкий чугун как наиболее дешевый и доступный материал (см. гл. II). Жаростойкость

чугуна определяется его сопротивлением окислению, увеличению массы и росту (не более 0,2 %) при заданной температуре в течение 150 ч. Для деталей, работающих при температурах до

29. Максимальные рабочие температуры нагревательных элементов, работающих на воздухе

| Сплав (ГОСТ 10994—74) | Диаметр или толщина элемента, мм | | | | |
|--------------------------|----------------------------------|------|------|------|------|
| | 0,2 | 0,4 | 1,0 | 3,0 | 6,0 |
| X13Ю4 | 700 | 800 | 850 | 900 | 950 |
| X15Ю5 | 750 | 850 | 900 | 950 | 1000 |
| X23Ю5 | 950 | 1025 | 1100 | 1150 | 1200 |
| X23Ю5Т | 950 | 1075 | 1225 | 1350 | 1400 |
| X27Ю5Т | 950 | 1075 | 1200 | 1300 | 1350 |
| X15Н60-Н | 900 | 950 | 1000 | 1075 | 1125 |
| X20Н80-Н | 950 | 1000 | 1100 | 1150 | 1200 |
| XН70Ю (ГОСТ 5632—72) | 950 | 1000 | 1100 | 1175 | 1200 |

30. Механические свойства проволоки из жаростойких сплавов, термообработанных в соответствии с рекомендациями ГОСТ 12766.1—77

| Сплав (ГОСТ 10994—74) | σ_b | σ_T | δ | ψ | Сплав (ГОСТ 10994—74) | σ_b | σ_T | δ | ψ |
|--------------------------|------------|------------|----------|--------|--------------------------|------------|------------|----------|--------|
| | МПа | | % | | | МПа | | % | |
| X23Ю5 | 645 | 540 | 23 | 72 | X15Н60-Н | 645 | 264 | 31,0 | 59,8 |
| X23Ю5Т | 645 | 540 | 23 | 72 | X20Н80-Н | 656 | — | 45,4 | 61,0 |
| X27Ю5Т | 663 | 534 | 15,9 | — | X20Н80 | 656 | — | 45,4 | 61,0 |
| X15Н60 | 664 | 645 | 31,9 | 59,8 | XН70Ю (ГОСТ 5632—72) | 813 | — | 37,5 | — |

300 °С, могут использоваться простые серые чугуны при условии получения мелкого графита. До 450—500 °С удовлетворительными характеристиками обладают отливки из модифицированного и ковкого чугуна. Незначительное легирование хромом (иногда совместно с никелем) позволяет повысить температуру использования чугунов до 700 °С. Не менее важным фактором являются высокие литейные характеристики простых и низколегированных чугунов. Более тяжелые условия работы и необходимость применения отливок для работы при температурах выше 600—700 °С требуют обязательного использования специальных чугунов [4]. При выборе типа чугуна, помимо жаростойкости и ростоустойчивости, необходимо принимать во внимание и изменение механи-

ческих характеристик с температурой, а также учитывать экономическую целесообразность его применения.

Требования по химическому составу, режимам термической обработки и механическим свойствам жаростойких чугунов определены ГОСТ 7769—82. К основным легирующим элементам жаростойких чугунов относятся хром, кремний и алюминий. При разработке этих чугунов руководствуются теми же принципами жаростойкого легирования, что и при разработке жаростойких сталей. Рекомендации по применению жаростойких чугунов приведены в табл. 31, а их механические свойства — в табл. 32.

Наряду с жаростойкими металлами и сплавами широкое применение в промышленности получили керамика и металлокерамика (керметы). Общим

31. Жаростойкие чугуны

| Чугуны (ГОСТ 7769—82) | Марка | Применение | Максимальная рабочая температура, °С | Показатели жаростойкости [75] | | |
|---------------------------------|--------|---|--------------------------------------|-------------------------------|---|--------------|
| | | | | Температура испытания, °С | Увеличение массы, г/(м ² ·ч) | Рост, % |
| Хромистые: низколегированные | ЧХ1 | Холодильные плиты доменных печей, колосники, реторты, детали газотурбинных двигателей и компрессоров, горелки, кокилы и др. | 500 | 500 600 | 0,20 0,50 | 0,05 0,20 |
| | ЧХ2 | Колосники и балки горна агломерационных машины, детали химического и нефтехимического оборудования, турбокомпрессоров, термических печей и др. | 600 | 600 700 | 0,50 0,50 | 0,05 0,20 |
| | ЧХ3 * | Турбокомпрессоров, термических печей и др. | 700 | 700 800 | 0,50 1,50 | 0,10 0,50 |
| | ЧХ16 * | Арматура химического машиностроения, печная арматура, детали цементационных печей | 900 | — | — | — |
| высоколегированные | ЧХ22С | Детали, не подвергающиеся действию нагрузок. Печная арматура и др. | 1000 | — | — | — |
| | ЧХ28 | Детали, работающие при небольших нагрузках в среде SO ₂ и SO ₃ , в щелочах, азотной кислоте, растворах и расплавах солей до 1000 °С. Детали центробежных насосов, печная арматура | 1100 | 900 1000 | 0,20 0,20 | — — |

Продолжение табл. 31

| Чугуны (ГОСТ 7769—82) | Марка | Применение | Максимальная рабочая температура, °С | Показатели жаростойкости [75] | | |
|--------------------------------|---------|--|--------------------------------------|-------------------------------|---|-----------|
| | | | | Температура испытания, °С | Увеличение массы, г/(м ² ·ч) | Рост, % |
| | | | | | | |
| Кремнистые низколегированные | ЧС5 | Колосники, бронеплиты для печей обжига цементной промышленности, сероуглеродные реторты | 700 | 800 | 0,20 | 0,40 |
| | ЧС5Ш | Арматура котлов, детали пароперегревателей котлов, газовые сопла, подовые плиты термических печей | 800 | 800 900 | 0,05 0,20 | — 0,20 |
| Алюминиевые: низколегированные | ЧЮХШ | Пресс-формы для стеклянных изделий, детали печного оборудования, ролики листопркатных станов | 700 | — | — | — |
| высоколегированные | ЧЮ6С5 * | Отливки, работающие при температурах до 800 °С в условиях резких теплосмен | 800 | — | — | — |
| | ЧЮ7Х2 * | Детали печной арматуры | 800 | — | — | — |
| | ЧЮ22Ш * | Детали арматуры котлов, детали пароперегревателей котлов, обжиговых печей, нагревательных печей, колосники | 1100 | 1100 | 0,05 | — |
| | ЧЮ30 * | Детали печей обжига колчедана | 1100 | — | — | — |

Примечания: 1. Ш — графит имеет шаровидную форму. 2. Звездочкой отмечены жаростойкие чугуны с повышенной износостойкостью.

32. Механические свойства жаростойких чугунов (не менее)

| Чугун | σ _B | σ _H | НВ | Чугун | σ _B | σ _H | НВ |
|-------|----------------|----------------|-----------|-------|----------------|----------------|-----------|
| | МПа | | | | МПа | | |
| ЧХ1 | 170 | 350 | 2030—2800 | ЧС5 | 150 | 290 | 1400—2940 |
| ЧХ2 | 150 | 310 | 2030—2800 | ЧС5Ш | 290 | — | 2230—2940 |
| ЧХ3 | 150 | 310 | 2230—3560 | ЧЮХШ | 390 | 590 | 1830—3560 |
| ЧХ16 | 350 | 700 | 3900—4400 | ЧЮ6С5 | 120 | 240 | 2360—2940 |
| ЧХ22С | 290 | 540 | 2150—3330 | ЧЮ7Х2 | 120 | 170 | 2540—2940 |
| ЧХ28 | 370 | 560 | 2150—2640 | ЧЮ22Ш | 290 | 490 | 2350—3560 |
| ЧХ32 | 390 | 690 | 2450—3330 | ЧЮ30 | 200 | 350 | 3560—5360 |

недостатком этих материалов (на основе окислов, боридов, карбидов, нитридов и силицидов) является их хрупкость при комнатной температуре.

4. ЖАРОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Аустенитные жаропрочные стали. Состав, режимы термической обработки, свойства аустенитных сталей регламентированы ГОСТ 5632—72. Общим признаком для всех этих сталей является сохранение в условиях службы устойчивой аустенитной структуры. В зависимости от химического состава аустенитные стали по структурному признаку могут быть разделены на три группы: однородные, с карбидным упрочнением и с карбидно-интерметаллидным упрочнением.

К группе однородных аустенитных сталей относятся главным образом низкоуглеродистые хромоникелевые стали, дополнительно легированные более тугоплавкими элементами. Однородные аустенитные стали используются преимущественно в энергомашиностроении для изготовления труб паронагревателей и паропроводов, арматуры установок сверхвысоких параметров и рассчитаны на длительную (до 10⁶ ч) службу при 650—700 °С. Характерными для этих сталей являются высокие технологические свойства, такие, как способность к горячей пластической деформации, прошиваемость при изготовлении цельнотянутых труб, свариваемость и др. Эти цели достигаются повышенным со-

держанием никеля [отношение (Ni/Cr) > 1] при низком содержании углерода (в пределах 0,06—0,012 %) и повышенном отношении (Ti, Nb/C) > 10, что исключает возможность образования при эксплуатации карбидных фаз типа Me₂₃C₆, охрупчивающих стали. Дополнительное легирование сплавов вольфрамом (до 2—3 %) и молибденом (до 2,5 %) способствует повышению жаропрочности.

Базовым составом для однородных аустенитных сталей является состав стали 10Х18Н9Т. Механические свойства стали представлены в табл. 33. Дополнительное легирование молибденом увеличивает жаропрочные свойства стали. В табл. 34 представлены характеристики длительной прочности стали Х18Н12М3Т. Бор и редкоземельные элементы положительно влияют на жаропрочные и технологические свойства.

33. Механические свойства стали 10Х18Н9Т при высоких температурах [51]

| Температура испытания, °С | σ _B , МПа | δ | ψ | KCU, кДж/м ² |
|---------------------------|----------------------|------|------|-------------------------|
| | | % | | |
| 20 | 554 | 63 | 71 | 1250 |
| 650 | 320 | 16,9 | 33,2 | 1960 |
| 800 | 185 | 23,7 | 51,5 | 2590 |
| 900 | 91 | 36 | 70 | 2360 |
| 1000 | 55 | 43 | 71 | 2060 |
| 1100 | 38 | 37 | 70 | 1510 |

34. Длительная прочность (в МПа) стали X18H12M3T [51]

| Температура испытания, °C | Время, ч | | | | | | | |
|---------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|------|--------|---------|
| | 1 | 10 | 100 | 300 | 500 | 1000 | 10 000 | 100 000 |
| 650 | 350 | 270 | 220 | 196 | 189 | 182 | 140 | 112 |
| 700 | 270 | 210 | 164 | 155 | 140 | 126 | 84 | 62 |
| 760 | 210 | 145 | 110 | 83 | 84 | 73 | 49 | 30 |
| 815 | 145 | 105 | 77 | 66 | 61 | 49 | 23 | 11 |
| 870 | 120 | 77 | 52 | 42 | 39 | 30 | — | — |
| 980 | 58 | 35 | 19 | 13 | 10 | 8,4 | — | — |

35. Длительная прочность гомогенных жаропрочных сталей [47]

| Сталь | $t_{\text{зак}}$, °C | $t_{\text{исп}}$, °C | Длительная прочность, МПа | | |
|-------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|------------------|
| | | | σ_{100} | σ_{1000} | σ_{10000} |
| 10X18H12T | 1100—1200 | 600 | — | — | 110 |
| | | 650 | — | — | 70 |
| | | 700 | — | — | 45 |
| 0X15H24B4TP | 1130 | 700 | 260 | 180 | 120 |
| | | 750 | 170 | 110 | 80 |

ства сталей. В табл. 35 представлены свойства стали, в состав которой наряду с хромом и никелем введен бор.

Термическая обработка аустенитных гомогенных сталей состоит из закалки (аустенизации) от высоких температур (1050—1200 °C) или аустенизации и стабилизирующего отпуска (700—750 °C) с целью получения более однородного γ -твердого раствора, заданной величины зерна (балл 3—6) и стабильной структуры, а также снятия напряжений, которые могут возникнуть в процессе изготовления деталей. Положительным качеством гомогенных аустенитных сталей, наряду с технологичностью, является их высокая жаростойкость.

Стали с карбидным упрочнением предназначены для работы при температурах 650—750 °C и высоких напряжениях. Их используют для изготовления ответственных деталей энер-

гомашиностроения (диски и лопатки турбин, крепежные детали и др.).

Основу сталей с карбидным упрочнением составляет хромоникелевый аустенит, содержащий 0,25—0,5 % С. В ряде сплавов дефицитный никель частично заменяют менее дефицитным марганцем. Присутствие марганца наряду с никелем способствует повышению жаропрочности сталей. Карбидообразующие элементы V, Nb, W, Mo связывают часть углерода в специальные карбиды, что приводит к заметному повышению жаропрочности.

Структура и механические свойства сталей в значительной степени зависят от термической обработки, условий старения.

При низкотемпературном старении (500—600 °C) твердение сталей протекает крайне медленно, но с образованием большого количества карбидной фазы высокой дисперсности. При дли-

тельных выдержках старения существенно снижаются характеристики пластичности сталей. С целью получения наиболее выгодных свойств для этих сталей используют старение при температурах на 100—150 °C выше рабочей температуры или двойное старение (низкотемпературное + высокотемпературное).

В целях предотвращения коробления и растрескивания изделий при термической обработке не следует допускать вылеживания сталей между операциями двойного старения.

Из аустенитных сталей с карбидным упрочнением наиболее простой является сталь 40X14H14B2M. Основное ее назначение — выхлопные клапаны авиационных и автомобильных двигателей, крепежные детали. Сталь 31X19H9MBEГ при более низком содержании никеля дополнительно легирована вольфрамом, титаном, ниобием и, кроме того, содержит марганец. С целью повышения пластичности сталь переплавляют методом ЭШП. Еще более низкое содержание никеля имеют стали 40X15M7Г7Ф2M и 37X12H8Г8МФБ. Эти стали могут быть использованы при температурах до 800 °C.

Длительная прочность и сопротивление усталости сталей в значительной степени зависят от однородности размеров зерен. В этой связи не рекомендуется перегревать стали выше 1160 °C и заканчивать деформацию ниже 1000 °C с тем, чтобы при нагреве под закалку получить равномерную мелкозернистую структуру.

Широко применяются стали с невысоким содержанием никеля (7—8 %). К числу последних относится сталь 40X15H7ГФ2МС. Однако из-за ограниченной жаростойкости при температурах выше 750 °C ее целесообразно алитировать. Сталь 37X12H8Г8МФБ легирована значительным количеством карбидообразующих элементов при ограниченном содержании никеля. Ее применяют для изготовления крупных деталей — турбинных дисков, бандажных колец и пр. Оптимальным вариантом термической обработки является закалка плюс двойное старение.

В табл. 36—49 представлены свой-

ства основных аустенитных сталей с карбидным упрочнением.

Аустенитные стали и сплавы с карбидно-интерметаллидным упрочнением имеют ограниченное содержание углерода; большинство сталей — свариваемые. Вследствие ограничения по углероду для получения устойчивой γ -решетки твердого раствора стали и сплавы должны содержать значительное количество никеля, сбалансированное с содержанием элементов, стабилизирующих структуру феррита.

Для повышения жаропрочности железоникельхромовую основу обычно легируют элементами, упрочняющими твердый раствор и вызывающими дисперсионное твердение. Обычно для упрочнения вводят 10—35 % Cr, до 7 % Mo, до 6 % W, до 1,3 % Nb, до 0,5 % V, до 3,2 % Ti, до 3,2 % Al. Тантал и кобальт вследствие их дефицитности не нашли широкого применения. Ограничено и применение сталей с вольфрамом.

Наиболее благоприятное влияние на жаропрочность и технологические свойства сталей и сплавов оказывает молибден. Хром также повышает жаропрочность и, кроме того, является основным элементом, обеспечивающим защиту сталей и сплавов от окисления.

Стали 08X16H13M2B, 09X14H16B упрочнены вследствие легирования твердого раствора, наличия после закалки карбонитрида ниобия и дополнительных карбидов ниобия, выделяющихся при старении. Для этих сталей характерно, что отношение хрома к никелю меньше 1.

Стали 09X14H19B2BP, 09X14H19B2BP1 имеют в своем составе значительное количество вольфрама. Основными упрочняющими фазами являются карбонитрид Nb (C, N) и фаза Лавеса Fe_2W . Повышение содержания бора приводит к некоторому изменению характеристики фазового состава. Бор влияет на растворенный вольфрам. Если в стали 09X14H19B2BP количество фазы Лавеса не превышает 2 %, то в стали 09X14H19B2BP1 фаза Лавеса выделяется в количестве 5 %, причем весьма медленно.

В соответствии с ГОСТ 5632—72 композиция элементов, состоящая из

36. Механические свойства стали 31Х19М9ВВБ в различном сортаменте при 20 °С [47]

| Термическая обработка | Продукция, направление вырезки образцов | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU, кДж/м ² |
|--|---|------------|----------------|----------|--------|-------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Нагрев 1140—1180 °С; вода; старение 750—800 °С, 15 ч, воздух | Сортовой прокат, продольное | 600 | 300 | 30 | 40 | — |
| | | 700 | 300 | 35 | 40 | 600 |
| Нагрев; вода; старение 800 °С, 15 ч, воздух | Поковки, продольное | 700 | 300 | 35 | 40 | 600 |
| | То же, тангенциальное | 700 | 300 | 27 | 30 | 400 |

37. Механические свойства стали 31Х19Н9МВБТ при различных температурах (пруток, продольные образцы) [26]

| Термическая обработка | t, °С | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU, кДж/м ² |
|--|-------|------------|----------------|----------|--------|-------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Нагрев 1150—1180 °С; вода; старение 800 °С, 15 ч | 20 | 750 | 330 | 31 | 40 | 950 |
| | 560 | 500 | 210 | 26 | 40 | 1000 |
| | 600 | 490 | 250 | 20 | 46 | 1100 |
| | 650 | 440 | 240 | 24 | 55 | 1100 |
| Нагрев 1150—1180 °С; вода; старение 700 °С, 50 ч | 20 | 740 | 320 | 32 | 25 | 400 |
| | 300 | 700 | 320 | 32 | 46 | 1500 |
| | 400 | 670 | 310 | 28 | 43 | 1400 |
| | 500 | 630 | 280 | 26 | 45 | 1400 |
| | 600 | 590 | 260 | 26 | 46 | 1000 |
| | 650 | 460 | 190 | 15 | 40 | 500 |
| | 700 | 420 | 250 | 21 | 40 | 1000 |
| | 750 | 320 | 220 | 25 | 52 | — |
| | 800 | 240 | 200 | 29 | 64 | — |

38. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) стали 31Х19Н9МВБТ [26]

| t, °С | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{100\ 000}$ | $\sigma_{1/10\ 000}$ | $\sigma_{1/100\ 000}$ |
|-------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 560 | 240 | 170 | 300 | 260 |
| 600 | 150 | 110 | 230 | 200 |
| 650 | — | 80 | 180 | 150 |
| 700 | — | 40 | 100 | 60 |

39. Релаксационная стойкость стали 31Х19Н9МВБТ [47]

| t, °С | σ_0 , МПа | σ_T (МПа) за время, ч | | | | | | | | |
|-------|------------------|------------------------------|-----|------|------|------|------|--------|--------|--------|
| | | 100 | 500 | 1000 | 3000 | 4000 | 5000 | 10 000 | 15 000 | 20 000 |
| 560 | 200 | 150 | 147 | 144 | 139 | — | 134 | 129 | 124 | 122 |
| 600 | 200 | 138 | 125 | 117 | — | 99 | — | — | — | — |
| 600 | 250 | 160 | 135 | 123 | — | 96 | — | — | — | — |
| 600 | 300 | 180 | 163 | 139 | — | 100 | — | — | — | — |
| 650 | 200 | 110 | 90 | 80 | — | 65 | — | — | — | — |
| 650 | 250 | 130 | 100 | 90 | — | 75 | — | — | — | — |

40. Механические свойства стали 40Х14Н14В2М при 20 °С в различном сортаменте (продольные образцы) [47]

| Вид продукции | Термическая обработка | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU, кДж/м ² |
|------------------------|---|------------|----------------|----------|--------|-------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Прутки, штанги, полосы | Нагрев 800 °С, 5 ч; воздух | 720 | 320 | 20 | 25 | 500 |
| Детали арматуры | Нагрев 1150—1180 °С; вода; старение 750 °С, 5 ч, воздух | 700 | 300 | — | 35 | — |

41. Механические свойства стали 40Х14Н14В2М (пруток, продольные образцы) при различных температурах [47]

| t, °С | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU, кДж/м ² |
|-------|------------|----------------|----------|--------|-------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 550 | 580 | 260 | 22 | 31 | — |
| 600 | 500 | 250 | 15 | 26 | 650 |
| 650 | 440 | 240 | 12 | 24 | 750 |
| 700 | 340 | 220 | 10 | 22 | 800 |
| 750 | 280 | 200 | 8,8 | 17 | 830 |

42. Механические свойства стали 40X14N14B2M (пруток, продольные образцы) при различных температурах после старения в течение 1000 ч [47]

| t, °C | t _{отп} , °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ | KCU, кДж/м² |
|-------|-----------------------|----------------|------------------|----|----|----------------|
| | | МПа | | % | | |
| 20 | 550 | 860 | 410 | — | — | 800 |
| 550 | 550 | 570 | 270 | 23 | — | — |
| 650 | 550 | 550 | 260 | 17 | — | — |
| 700 | 550 | 420 | 250 | 15 | — | — |
| 20 | 600 | 820 | 410 | 18 | 36 | 600 |
| 550 | 600 | 820 | 310 | — | 28 | — |
| 600 | 600 | 560 | 320 | — | 19 | — |
| 700 | 600 | 410 | 280 | 15 | 30 | — |
| 20 | 700 | 820 | 430 | — | 32 | 750 |
| 600 | 700 | 490 | 260 | 20 | 46 | — |
| 650 | 700 | 470 | 270 | 19 | 44 | — |
| 700 | 700 | 400 | 260 | 17 | 39 | — |

43. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) стали 40X14N14B2M [47]

| t, °C | σ _{10 000} | σ _{100 000} | σ _{1/10 000} | σ _{1/100 000} |
|-------|---------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| | МПа | | | |
| 600 | 180 | 80 | 180 | 150 |
| 650 | 70 | 40 | 130 | 100 |
| 700 | 37 | 16 | 26 | — |

45. Механические свойства стали 40X15H7ГФ2МС (пруток, продольные образцы) при различных температурах [47]

| t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ |
|-------|----------------|------------------|----|----|
| | МПа | | % | |
| 20 | 1000 | 600 | 15 | 15 |
| 300 | 810 | 550 | 13 | 26 |
| 400 | 780 | 540 | 12 | 23 |
| 500 | 700 | 490 | 12 | 23 |
| 600 | 640 | 500 | 9 | 23 |
| 700 | 520 | 430 | 8 | 32 |
| 800 | 380 | 280 | 8 | 17 |
| 900 | 250 | — | 7 | 18 |
| 1000 | 160 | — | 6 | 21 |

44. Свойства сварного соединения из стали 40X14N14B2M (термическая обработка — отпуск при 750 °C) [47]

| t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ | KCU, кДж/м² |
|-------|----------------|------------------|----|----|----------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 730 | 470 | 33 | 48 | 700 |
| 450 | 580 | 300 | 32 | 43 | 730 |
| 650 | 450 | 310 | 45 | 29 | 750 |

46. Пределы длительной прочности, ползучести и выносливости (в МПа) стали 40X15H7ГФ2МС [47]

| t, °C | σ ₁₀₀ | σ ₁₀₀₀ | σ _{10 000} | σ _{0,2/100} | σ _{0,2/1000} | σ _{0,2/10 000} | σ _{в*} |
|-------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| | МПа | | | | | | |
| 20 | — | — | — | — | — | — | 510 |
| 500 | — | — | — | 240 | — | — | 380 |
| 600 | 430 | 320 | 250 | 230 | — | — | 340 |
| 700 | 250 | 180 | 110 | 155 | — | — | 240 |
| 800 | 130 | 84 | 50 | 80 | — | — | — |
| 900 | 75 | — | — | — | — | — | — |

*1 На базе 10⁷ циклов.
47. Релаксационная стойкость стали 40X15H7ГФ2МС [47]

| t, °C | σ ₀ , МПа | σ _τ (МПа) за время, ч | | | | |
|-------|----------------------|----------------------------------|------|------|------|--------|
| | | МПа | | | | |
| | | 100 | 1000 | 2000 | 5000 | 10 000 |
| 560 | 150 | 130 | 120 | 117 | 106 | 93 |
| 560 | 200 | 170 | 160 | 157 | 145 | 123 |
| 560 | 250 | 210 | 200 | 196 | 182 | 160 |
| 580 | 150 | 127 | 120 | 112 | 94 | 72 |
| 580 | 200 | 174 | 150 | 147 | 120 | 90 |
| 580 | 250 | 200 | 180 | 172 | 140 | 100 |

49. Длительная прочность (в МПа) стали 37X12H8Г8МФБ

[устойчива против окисления в воздушной среде при температурах до 700—750 °C. При 700 °C скорость окисления 0,06 кг/(м²·ч) [47]

| t, °C | σ ₁₀₀ | σ ₁₀₀₀ | σ ₅₀₀₀ | σ _{10 000} | σ _{—1} |
|-------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|
| | МПа | | | | |
| 600 | 450 | 340 | 310 | 300 | 340 |
| 650 | 370 | 250 | 220 | 210 | 230 |
| 700 | 310 | 230 | 190 | 180 | 130 |
| 750 | 250 | — | — | — | — |

51. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) стали 08X16H13M2Б (прутки, продольные образцы) [47]

| t, °C | σ _{10 000} | σ _{100 000} | σ _{1/10 000} | σ _{1/100 000} |
|-------|---------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| | МПа | | | |
| 550 | 260 | 210 | — | 160 |
| 600 | 200 | 150 | 140 | 90 |
| 650 | 130 | 95 | 100 | 90 |
| 700 | 60 | 35 | 60 | 22 |

48. Механические свойства стали 37X12H8Г8МФБ при различных температурах [47]

| t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ | KCU, кДж/м² |
|-------|----------------|------------------|----|----|----------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 1000 | 600 | 20 | 25 | 350 |
| 200 | 770 | 600 | 15 | 37 | — |
| 300 | 740 | 540 | 14 | 36 | — |
| 350 | 730 | 520 | 14 | 37 | — |
| 400 | 730 | 500 | 15 | 36 | — |
| 450 | 720 | 500 | 13 | 38 | 700 |
| 500 | 680 | 500 | 13 | 37 | 700 |
| 550 | 660 | 490 | 12 | 37 | 750 |
| 600 | 600 | 490 | 12 | 38 | 500 |
| 650 | 560 | 450 | 12 | 42 | 560 |
| 700 | 500 | 430 | 13 | 37 | 560 |
| 750 | 420 | 380 | 15 | 44 | — |

50. Механические свойства стали 08X16H13M2Б (прутки, продольные образцы) при 20 °C и повышенной температуре [51]

| t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ |
|-------|----------------|------------------|----|----|
| | МПа | | % | |
| 20 | 620 | 230 | 45 | 68 |
| 500 | 490 | 175 | 30 | 50 |
| 600 | 470 | 175 | 29 | 55 |
| 650 | 440 | 175 | 27 | 57 |

52. Релаксационная стойкость стали 08X16H13M2Б (прутки, продольные образцы) при 600 °C [47]

| σ ₀ , МПа | σ _τ (МПа) за время, ч | | | | |
|----------------------|----------------------------------|-----|------|------|------|
| | 100 | 500 | 1000 | 3000 | 5000 |
| 200 | 121 | 113 | 107 | 98 | 94 |
| 150 | 95 | 88 | 85 | 77 | 68 |

53. Физические свойства
стали 08X16H13M2B
при различных температурах [51]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $E \cdot 10^{-5}$, МПа | λ , Вт/(м·°C) | $t, ^\circ\text{C}$ (интервал) | $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ |
|---------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---|
| 20 | 2,06 | — | 20—400 | 17,1 |
| 200 | 1,91 | 17,1 | 20—600 | 17,8 |
| 400 | 1,74 | 20,1 | 20—800 | 18,6 |
| 500 | 1,67 | 21,7 | | |
| 600 | 1,58 | 23,0 | | |
| 700 | — | 24,7 | | |

55. Механические свойства
стали 09X14H16B при высоких
температурах [47]

| $t, ^\circ\text{C}$ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU , кДж/м ² |
|---------------------|------------|----------------|----------|--------|-------------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 570 | 250 | 51 | 73 | 2100 |
| 600 | 400 | 180 | 32 | 61 | 3300 |
| 650 | 360 | 160 | 33 | 60 | — |
| 700 | 330 | 160 | 32 | 51 | 3300 |

57. Механические свойства стали 10X11H20T3P
в различном сортаменте [47]

| Вид продукции | Термическая обработка | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU , кДж/м ² |
|----------------------|---|------------|----------------|----------|--------|-------------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Листы холоднокатаные | Закалка с 1100 °C, воздух | 600 | — | 40 | — | — |
| Лейта холоднокатаная | Закалка с 1080 °C, воздух | 550 | — | — | — | — |
| Прутки | Закалка с 1100—1150 °C, воздух; старение при 750 °C | 900 | 600 | 10 | 15 | 800 |

54. Ударная вязкость и твердость
стали 09X14H16B при 20 °C
после старения при различных
температурах [51]

| $t, ^\circ\text{C}$ | τ , ч | KCU , кДж/м ² | НВ, МПа |
|---------------------|------------|-------------------------------|---------|
| 600 | 500 | 1670 | 1450 |
| 600 | 1000 | 1740 | 1510 |
| 600 | 2500 | 1400 | 1540 |
| 600 | 5000 | 1350 | 1560 |
| 650 | 500 | 1490 | 1470 |
| 650 | 1000 | 1550 | 1540 |
| 650 | 2500 | 1640 | 1430 |
| 650 | 5000 | 1300 | 1470 |
| 700 | 1000 | 1470 | 1470 |

56. Пределы длительной прочности
и ползучести (в МПа)
стали 09X14H16B [47]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{100\ 000}$ | $\sigma_{1/10\ 000}$ | $\sigma_{1/100\ 000}$ |
|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 600 | 170 | 120 | 160 | 100 |
| 650 | 110 | 77 | 100 | 65 |
| 700 | 65 | 40 | 55 | 37 |

58. Механические свойства
стали 10X11H20T3P при высоких
температурах [47]

| $t, ^\circ\text{C}$ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|---------------------|------------|----------------|----------|--------|
| | МПа | | % | |
| 20 | 1000 | 600 | 25 | 30 |
| 400 | 950 | 600 | 23 | 30 |
| 600 | 800 | 530 | 22 | 30 |
| 700 | 680 | 470 | 15 | 18 |
| 750 | 560 | 450 | 15 | 20 |
| 800 | 360 | 250 | 25 | 45 |

60. Механические свойства
стали 09X14H19B2BP [47]

| $t, ^\circ\text{C}$ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU , кДж/м ² |
|---------------------|------------|----------------|----------|--------|-------------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 570 | 230 | 44 | 70 | 1800 |
| 600 | 440 | 140 | 32 | 61 | 2200 |
| 650 | 430 | 140 | 33 | 61 | 2100 |
| 700 | 410 | 140 | 33 | 69 | 2200 |

62. Физические свойства стали
09X14H19B2BP при различных
температурах [47]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $E \cdot 10^{-5}$, МПа | λ , Вт/(м·°C) | $t, ^\circ\text{C}$ (интервал) | $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ |
|---------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---|
| 20 | 2,02 | 15,4 | 20—100 | 15,2 |
| 100 | 1,99 | 16,3 | 20—200 | 16,3 |
| 200 | 1,93 | 16,3 | 20—300 | 16,9 |
| 300 | 1,86 | 18,0 | 20—400 | 17,5 |
| 400 | 1,78 | 19,2 | 20—500 | 17,8 |
| 500 | 1,69 | 21,3 | 20—600 | 18,1 |
| 600 | 1,60 | 23,4 | 20—700 | 18,6 |
| 700 | 1,52 | 25,1 | 20—800 | 18,6 |
| 750 | 1,98 | — | | |
| 800 | — | 27,6 | | |

59. Пределы длительной прочности
и выносливости (в МПа)
стали 10X11H20T3P [47]

| $t, ^\circ\text{C}$ | σ_{100} | σ_{-1} (10 ⁷ циклов) | |
|---------------------|----------------|--|------------------------|
| | | Гладкие образцы | Радиус надреза 0,75 мм |
| 500 | 730 | 370 | — |
| 550 | 650 | — | — |
| 600 | 590 | 340 | — |
| 650 | 480 | — | — |
| 700 | 400 | 280 | 280 |
| 750 | 280 | — | — |

61. Пределы длительной прочности
и ползучести (в МПа)
стали 09X14H19B2BP [47]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{100\ 000}$ | $\sigma_{1/10\ 000}$ | $\sigma_{1/100\ 000}$ |
|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 600 | 270 | 200 | — | — |
| 650 | 168 | 130 | 110 | 140 |
| 700 | 125 | 95 | 65 | 85 |
| 750 | 70 | 55 | — | — |

63. Механические свойства стали
08X15H24B4TP при различных
температурах [47]

| $t, ^\circ\text{C}$ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU , кДж/м ² |
|---------------------|------------|----------------|----------|--------|-------------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 750 | 500 | 20 | 30 | 1200 |
| 650 | 650 | 450 | 18 | 30 | 1000 |
| 700 | 600 | 400 | 18 | 30 | 1000 |
| 750 | 500 | 350 | 20 | 40 | 100 |

64. Пределы длительной прочности, ползучести и выносливости (в МПа) стали 08X15H24B4TP [47].

| $t, ^\circ\text{C}$ | σ_{1000} | σ_{10000} | σ_{100000} | $\sigma_{1/10000}$ | $\sigma_{1/100000}$ | σ_{-1} , база испытательный 10 ⁶ циклов |
|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---|
| 20 | — | — | — | — | — | 420 |
| 500 | — | — | — | — | — | 350 |
| 600 | 500 | 400 | 300 | — | — | 400 |
| 650 | 400 | 200 | 230 | 200 | 140 | 340 |
| 700 | 250 | 180 | 140 | — | — | 270 |
| 750 | 180 | 120 | 80 | 80 | 60 | — |

65. Релаксационная стойкость стали 08X15H24B4TP [47]

| $t, ^\circ\text{C}$ | σ_0 , МПа | σ_r (МПа) за время, ч | | | | | |
|---------------------|------------------|------------------------------|-----|------|------|------|--------|
| | | 150 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | 10 000 |
| 550 | 200 | 155 | 154 | 153 | 152 | — | 152 |
| 550 | 250 | 219 | 218 | 218 | 218 | 216 | 200 |
| 550 | 300 | 273 | 273 | 271 | 269 | 265 | 249 |
| 600 | 200 | 185 | 183 | 182 | 179 | 176 | 166 |
| 600 | 250 | 227 | 226 | 224 | 219 | 213 | 198 |
| 600 | 300 | 268 | 266 | 266 | 263 | 256 | 243 |
| 650 | 200 | 177 | 174 | 169 | 162 | — | 132 |
| 650 | 250 | 204 | 198 | 189 | 186 | — | 153 |
| 650 | 300 | 248 | 245 | 236 | 228 | — | 188 |
| 700 | 200 | 162 | 143 | 131 | 123 | 108 | 85 |
| 700 | 250 | 189 | 174 | 159 | 148 | 134 | 100 |
| 700 | 300 | 238 | 210 | 179 | 172 | 156 | 113 |

железа, никеля, хрома и некоторых добавок, когда сумма никеля и хрома превышает 50 %, относится к категории сплавов, а не сталей.

Простейшим жаропрочным сплавом на основе железа является сплав ХН32Т, применяемый для длительной службы при температуре 850 °С. Ограниченное содержание углерода приводит к тому, что при длительной службе в сплаве образуется небольшое количество карбидов хрома, которое не охрупчивает сплав. Именно поэтому при длительном старении (10 000 ч и выше) при 700—800 °С ударная вязкость не опускается ниже 1000 кДж/м².

Из дисперсионно-упрочняемых спла-

вов самым жаропрочным является сплав ХН35ВТЮ. По системе легирования он типичен для ряда других сплавов, описанных в [47].

Сплав подвергают двойной закалке. Цель первого нагрева — вырастить верно определенного размера и перевести γ' -фазу в твердый раствор. Закалку сплава проводят путем охлаждения на воздухе; при этом часть γ' -фазы выделяется. При нагреве под вторую закалку небольшая часть γ' -фазы остается нерастворенной; кроме того, она не переходит в твердый раствор и карбиды хрома.

При 1050 °С вторая фаза укрупняется. При охлаждении на воздухе при повторной закалке и последующем

старении γ' -фаза выделяется в виде дисперсных включений размером 20,0—50,0 нм. В результате упрочнений сплав наряду с мелкими включениями имеет определенный объем укрупненных выделений. Такая структура позволяет получить высокую прочность и необходимый запас пластичности. Если двойную закалку не делать, то прочность и жаропрочность будут несколько выше, чем при двойной закалке, но тогда сплав не будет иметь запаса пластичности и будет проявлять высокую чувствительность к над-

резу. Если температура работы сплава не максимальна (750 °С), а снижена до 600—650 °С, то необходимый уровень пластичности может быть получен в результате измельчения зерна. В этом случае штампованная деталь с мелким зерном подвергается старению при 750 °С в течение 16 ч. Такая обработка заметно повышает пластичность и прочность сплава при умеренных температурах (550—650 °С). Однако когда от сплава требуется жаропрочность и пластичность при длительной службе при более высоких (вплоть до 750 °С) температурах, оптимальное сочетание свойств обеспечивают двойная закалка и старение.

Жаропрочные сплавы на основе никеля. Чистый никель имеет низкую длительную прочность порядка 40 МПа при 800 °С за 100 ч. Повышение свойств достигается путем комплексного легирования, в результате которого образуются многофазные сплавы, отвечающие требованиям современного машиностроения. Хром, кобальт, молибден, вольфрам, ванадий, гафний упрочняют твердый раствор, основу сплава. Помимо этого, хром играет активную роль в защите сплавов от окисления; молибден, вольфрам, ванадий образуют в сочетании с хромом упрочняющие сплав карбидные фазы Me_3C_3 , Me_{23}C_6 , Me_6C .

Алюминий, титан, ниобий и тантал, помимо упрочнения твердого раствора, образуют с никелем интерметаллидное соединение сложного состава, например, типа $(\text{Ni}, \text{Co})_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta})$; кроме того, карбидообразующие элементы этой группы образуют карбиды типа MeC .

Углерод, бор, цирконий, а также лантан, церий, неодим и др., которые вводят в количествах, не превышающих десятые и сотые доли процента, образуют фазы внедрения, упрочняют границы зерен вследствие образования сегрегаций по границам зерен, рафинируют металл от примесей.

Эффективными упрочнителями сплавов являются трудно растворимые оксиды типа ThO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 и др.

Повышенное количество карбидов, вызванное в первую очередь большим содержанием углерода, отрицательно сказывается на пластичности сплавов. Поэтому в деформируемых сплавах предельное содержание углерода в отдельных композициях составляет 0,12 %, чаще всего 0,08 %. Однако содержание углерода ниже 0,03 % также нежелательно, так как долговечность сплавов и длительная пластичность снижаются. Для большинства сплавов на основе никеля содержание углерода колеблется в пределах 0,03—0,08.

Самым простым по составу из дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов является сплав ХН77ТЮ. Более высокожаропрочный сплав ХН77ТЮР отличается от него присадкой бора в количествах 0,005—0,008 %. После закалки сплав обладает относительно невысокой прочностью, но весьма высокой пластичностью. Высокая пластичность сплава в защищенном состоянии позволяет проводить сварку, а также операции пластической деформации в холодном состоянии.

Максимальную жаропрочность сплав приобретает после старения при 700 °С.

Введение бора увеличивает длительную прочность сплава, и этот эффект обнаруженный на сплаве ХН77ТЮ, был затем широко использован при создании жаропрочных сплавов на основе никеля.

Последующие разновидности сплавов отличаются от сплава ХН77ТЮР более высоким содержанием титана, алюминия и дополнительным введением ниобия, что повышает количество γ' -фазы, выделяющейся при старении. С целью упрочнения твердого раствора в сплавы вводят молибден, вольфрам, ниобий. Чтобы сохранить удовлетворительную пластичность сплавов, в них

66. Свойства сплава ХН70МВТЮБ при различных температурах [47]

| t, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | КСУ, кДж/м ² |
|-------|------------|----------------|----------|--------|----------------------------|
| | МПа | | | | |
| 20 | 1050 | 560 | 16 | 16 | — |
| 600 | 980 | 550 | 24 | 24 | — |
| 700 | 930 | 530 | 16 | 16 | 800 |
| 800 | 720 | 450 | 9 | 12 | 600 |
| 850 | 600 | 400 | 8 | 15 | 700 |
| 900 | 380 | 220 | 12 | 35 | — |

снижают содержание хрома. Однако уменьшение содержания хрома ниже 15 % влечет за собой снижение сопротивления окислению. Поэтому сплавы с низким содержанием хрома требуют защиты от газовой коррозии.

Горячая деформация высоколегированных жаропрочных сплавов имеет следующие особенности: 1) малую пластичность при всех температурах; 2) высокое сопротивление деформации, включая однофазную область твердого раствора; 3) узкий температурный интервал деформации (до 80—100 °C); 4) высокую чувствительность к перегреву (нагрев выше определенной температуры приводит к катастрофическому снижению пластичности).

67. Примерное назначение некоторых жаропрочных сплавов на основе никеля [26]

| Сплав (ГОСТ 5632—72) | Назначение | Рекомендуемая температура использования | Температура начала интенсивного окисления |
|-----------------------------|--|---|---|
| | | °C | |
| ХН70МВТЮТ ХН70МВТЮ | Лопатки газовых турбин, крепежные детали, срок работы — весьма длительный | 750 | 1000 |
| | | 850 | 1000 |
| ХН80ТБЮ | Лопатки, крепежные детали турбин | 700 | 1000 |
| ХН70МВТЮБ ХН70Ю ХН78Т | Листовые детали, газопроводы, работающие при умеренных напряжениях, срок службы ограниченный | 850 | 1200 |
| | | 1100 | 1200 |
| | | 1100 | 1100 |
| ХН75МВТЮ | Листовые детали турбин, срок службы ограниченный | 850 | 1050 |
| ХН77ТЮР | Диски, лопатки турбин с ограниченным сроком службы | 750 | 1050 |
| ХН60ВТ | Листовые детали турбин с ограниченным сроком службы | 1000 | 1100 |
| ХН62МВКЮ | Лопатки, диски турбин с длительным сроком службы | 800 | 1080 |

68. Пределы длительной прочности, ползучести и выносливости (в МПа) сплава ХН70МВТЮБ [26]

| t, °C | σ_{100} | σ_{200} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{-1} |
|-------|----------------|----------------|--------------------|---------------|
| 20 | — | — | — | 420 |
| 600 | — | — | — | 350 |
| 650 | 620 | 600 | — | — |
| 700 | 480 | 420 | 300 | 370 |
| 800 | 250 | 230 | 180 | 350 |
| 850 | 180 | 230 | 180 | — |
| 900 | — | — | — | 180 |

69. Чувствительность к надрезу при испытании на длительную прочность сплава ХН70МВТЮБ [47]

| t, °C | σ^*_{-1} , МПа | Время до разрушения образцов, ч | |
|-------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| | | гладких | с надрезом r = 0,1 мм |
| 650 | 600 | 280 | 12—17 |
| 700 | 400 | 220 | 35—130 |
| 800 | 250 | 100 | 90—140 |

*1 Напряжение при испытании.

70. Механические свойства сплава ХН80ТБЮ при различных температурах [26]

| t, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | КСУ, кДж/м ² |
|-------|------------|----------------|----------|--------|----------------------------|
| | МПа | | | | |
| 20 | 950 | 650 | 18 | 22 | 700 |
| 500 | 1000 | 610 | 26 | 26 | — |
| 600 | 830 | 600 | 11 | — | — |
| 630 | 790 | 600 | 7 | — | — |
| 650 | 700 | 550 | 7 | 10 | 1000 |
| 700 | 680 | 500 | 7 | 6 | 1200 |

71. Длительная прочность (в МПа) сплава ХН80ТБЮ [26]

| t, °C | σ_{1000} | σ_{5000} | σ_{10000} |
|-------|-----------------|-----------------|------------------|
| 650 | 450 | 320 | 280 |
| 700 | 280 | 220 | 170 |

72. Выносливость сплава ХН80ТБЮ при 650 °C при симметричном и асимметричном циклах нагружения [26]

| $\sigma_{\text{стат}}$, МПа | Гладкий образец | | | | Образец с надрезом | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 10 ⁶ | 10 ⁷ | 10 ⁸ | 10 ⁹ | 10 ⁶ | 10 ⁷ | 10 ⁸ | 10 ⁹ |
| — | — | 420 | 390 | 370 | — | — | — | — |
| 110 | — | 320 | 280 | 260 | 290 | 200 | 190 | 180 |
| 180 | 340 | 300 | 250 | 200 | 250 | 190 | 180 | 170 |

73. Механические свойства сплава ХН70ВМТЮ при различных температурах [26]

| t, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|-------|------------|----------------|----------|--------|
| | МПа | | % | |
| 20 | 1070 | 700 | 14 | 13 |
| 600 | 990 | 680 | 16 | 19 |
| 700 | 900 | 650 | 10 | 12 |
| 750 | 770 | 650 | 6 | 10 |
| 800 | 720 | 580 | 4,5 | 9 |
| 850 | 590 | 470 | 10 | 14 |
| 900 | 490 | 380 | 14 | 19 |

74. Выносливость (в МПа) сплава ХН70ВМТЮ на 10^7 циклов при различных температурах [47]

| t, °C | Гладкий образец | Образец с надрезом |
|-------|-----------------|--------------------|
| 20 | 340 | 250 |
| 600 | 350 | 240 |
| 700 | 370 | 280 |
| 800 | 360 | 290 |
| 850 | 300 | — |
| 900 | 250 | 190 |

75. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) сплава ХН70ВМТЮ [47]

| t, °C | σ_{100} | σ_{1000} | σ_{3000} | σ_{5000} | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{1/100\ 000}$ |
|-------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------------|
| 650 | — | 550 | 470 | 440 | 400 | — |
| 700 | 480 | — | — | — | — | — |
| 750 | 360 | 250 | 215 | 200 | 180 | — |
| 800 | 240 | 175 | 145 | 130 | 125 | 80 |
| 850 | 180 | — | — | — | — | — |
| 900 | 130 | — | — | — | — | — |

76. Механические свойства сплава ХН73МБТЮ при различных температурах [26] [Сплав ХН73МБТЮ — диски газовых турбин для длительной службы с рабочей температурой до 750 °C. Химический состав по ТУ 14-1-1466-75 (мас. доли, %): 13—16 Cr; 2,8—3,2 Mo; 1,8—2,2 Nb; 2,35—2,75 Ti; 1,3—1,7 Al; $\leq 2,0$ Fe; $\leq 0,4$ Mn; $\leq 0,65$ Si; $\leq 0,08$ C; $\leq 0,005$ V; $\leq 0,005$ Se; $\leq 0,007$ S; $\leq 0,015$ P; остальное никель]

| t, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU, кДж/м ² |
|-------|------------|----------------|----------|--------|-------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 1210 | 800 | 31 | 24 | 720 |
| 550 | 1030 | 700 | 31 | 26 | 1030 |
| 600 | 1090 | 690 | 28 | 26 | 1000 |
| 650 | 1030 | 670 | 28 | 27 | — |
| 700 | 1000 | 680 | 29 | 22 | 750 |

77. Длительная прочность (в МПа) сплава ХН73МБТЮ при различных температурах [26]

| t, °C | σ_{300} | σ_{600} | σ_{1000} | σ_{2000} | σ_{3000} | σ_{5000} | $\sigma_{10\ 000}$ |
|-------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 550 | — | 900 | 870 | 850 | 820 | — | — |
| 650 | 630 | 600 | 570 | 540 | 520 | 500 | 480 |
| 700 | 480 | 450 | 400 | 360 | 340 | 320 | 290 |
| 750 | 360 | 330 | 295 | 265 | 250 | 230 | 210 |

78. Механические свойства сплава ХН70ВМЮТ [26]

| t, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU, кДж/м ² |
|-------|------------|----------------|----------|--------|-------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 1030 | 670 | 28 | 26 | 800 |
| 500 | 1020 | 640 | 27 | 23 | 900 |
| 600 | 970 | 600 | 23 | 18 | 900 |
| 650 | 990 | 600 | 20 | 23 | 850 |
| 700 | 890 | 580 | 16 | 27 | 900 |
| 750 | 710 | 580 | 14 | 28 | 850 |
| 800 | 570 | 500 | 17 | 34 | 1050 |
| 900 | 300 | 280 | 31 | 70 | — |
| 950 | 1140 | 120 | 49 | 74 | — |
| 1000 | 80 | 70 | 58 | 76 | — |

79. Длительная прочность (в МПа) сплава ХН70ВМЮТ [26]

| t, °C | Гладкие образцы | | | | | Образцы с надрезом | | |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| | σ_{1000} | σ_{2000} | σ_{5000} | $\sigma_{10\ 000}$ | $\sigma_{20\ 000}$ | σ_{2000} | $\sigma_{20\ 000}$ | $\sigma_{2\cdot 10\ 000}$ |
| 600 | 650 | 600 | 560 | 530 | 500 | — | 370 | — |
| 650 | 480 | 400 | — | 370 | 340 | — | — | — |
| 700 | 310 | 270 | — | — | — | — | — | — |
| 750 | 220 | 200 | 170 | 160 | 190 | 200 | 150 | 16 |
| 800 | 140 | — | — | — | — | — | — | — |

80. Механические свойства сплава ХН55ВМКЮ

| t, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU, кДж/м ² |
|-------|------------|----------------|----------|--------|-------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 1100 | 750 | 9 | 11 | 200 |
| 700 | 1080 | 750 | 5 | 7 | 300 |
| 750 | 1080 | 750 | 5 | 7 | 300 |
| 800 | 1000 | 700 | 5 | 7 | 300 |
| 850 | 750 | 650 | 3 | 5 | 300 |
| 900 | 650 | 500 | 3 | 5 | 400 |
| 950 | 550 | 400 | 4 | 5 | 400 |
| 1000 | 350 | 250 | 6 | 13 | 400 |

81. Длительная прочность и выносливость (в МПа) сплава ХН55ВМКЮ

| t, °C | σ_{100} | σ_{1000} | σ_{3000} | $\sigma_{0,2/100}$ | σ_{-1} на базе циклов | |
|-------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|------------------------------|-----------------|
| | | | | | 10 ⁷ | 10 ⁸ |
| | | | | | 800 | 440 |
| 900 | 240 | 130 | 100 | 140 | 320 | 280 |
| 950 | 140 | 65 | 55 | — | — | — |

82. Механические свойства сплава ХН56ВМТЮ

| t, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ , % | KCU, кДж/м ² | t, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ , % | KCU, кДж/м ² |
|-------|------------|----------------|--------------|-------------------------|-------|------------|----------------|--------------|-------------------------|
| | МПа | | | | | МПа | | | |
| 20 | 1000 | 650 | 25 | 800 | 900 | 520 | 400 | 5 | 600 |
| 700 | 750 | 600 | 5 | — | 950 | 320 | 240 | 12 | — |
| 800 | 700 | 600 | 5 | 530 | 1000 | 120 | — | 30 | 900 |

83. Длительная прочность и выносливость (в МПа) сплава ХН56ВМТЮ [1, 26]

| t, °C | σ_{100} | σ_{300} | σ_{-1} на базе 10 ⁷ циклов |
|-------|----------------|----------------|--|
| 800 | 280 | 240 | — |
| 900 | 110 | 80 | 170 |
| 950 | 60 | 40 | — |
| 1000 | 30 | — | — |

Сплавы на основе тугоплавких металлов. К тугоплавким относят металлы, имеющие температуру плавления выше 2000 °C. По комплексу свойств и доступности для практического применения важное значение имеют вольфрам, молибден, ниобий, тантал. В табл. 84 приведены основные физические и механические свойства тугоплавких металлов.

Физические и механические свойства тугоплавких металлов зависят от способа получения металлов, их чистоты.

84. Физические и механические свойства тугоплавких металлов [41]

| Свойства | Nb | Ta | W | Mo |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Температура, °C: | | | | |
| плавления | 2468 | 2996 | 3400 | 2622 |
| кипения | 4927 | 5427 | 5900 | 5560 |
| Q _v , кДж/моль | 26,8 | 24,7 | 95,2 | 27,6 |
| c при 20 °C, кДж/(г·°C) | 0,272 | 0,138 | 0,134 | 0,255 |
| λ , Вт/(м·°C) | 0,523 | 0,544 | 2,0 | 1,46 |
| ρ_1 при 20 °C, мкОм·см | 14,5 | 13,1 | 5,3 | 5,3 |
| $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ , при 0—1000 °C | 7,0 | 6,6 | 4,5 | 5,2 |
| ρ , т/м ³ | 8,57 | 16,6 | 19,3 | 10,2 |

85. Механические свойства тугоплавких металлов при 20 °C [41]

| Свойства | Ni | Ta | W | Mo |
|------------------|------|------|----------|---------|
| G, МПа | 6000 | 7000 | 15 140 | 12 200 |
| σ_B , МПа | 350 | 330 | 800—1100 | 800—900 |
| δ , % | 50 | 70 | 0 | 10—15 |

Вольфрам и молибден охрупчиваются при незначительном содержании примесей. Особенно снижает характеристики пластичности и повышает температуру перехода в хрупкое состояние кислород.

В технически чистом молибдене при содержании кислорода 0,02 % температура перехода в хрупкое состояние составляет 300 °C. При уменьшении содержания кислорода до 0,0001 молибден оказывается пластичным до -196 °C.

Тантал и ниобий выгодно отличаются от вольфрама и молибдена высокими показателями пластичности, технологичности, низкими температурами перехода в хрупкое состояние. Ниобий вакуумно-дуговой выплавки — наиболее распространенного способа получения полуфабриката — имеет температуру перехода в хрупкое состояние -185 °C.

Вследствие высокой пластичности ниобий и тантал хорошо обрабатываются давлением, хорошо свариваются аргоно-дуговой сваркой или элект-

тронно-лучевой в вакууме. Точечную сварку листов толщиной менее 0,5 мм можно проводить на воздухе.

Тантал и ниобий применяются в химическом машиностроении, электронике, вакуумной технике, металлургии и других областях. Исключительно высокая химическая стойкость в агрессивных средах позволяет применять тантал и ниобий для изготовления кислотоупорной аппаратуры.

Общим недостатком тугоплавких металлов является низкая жаростойкость, исключающая возможность использования их в качестве жаропрочных материалов без специальных защитных покрытий. Успешно в качестве жаропрочных материалов тугоплавкие металлы могут работать в вакууме и в атмосфере инертных газов. При легировании тугоплавких металлов жаропрочность ниобия и тантала повышается, а технологические свойства молибдена и вольфрама улучшаются.

Основные виды продукции в виде полуфабриката регламентированы техническими условиями, в соответствии

86. Механические свойства сплавов на основе вольфрама при различных температурах [66]

| Мас. доля добавок | Полуфабрикат | 1650 °C | | 1930 °C | | 2200 °C | |
|-------------------------|---------------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | | σ_B | δ | σ_B | δ | σ_B | δ |
| | | МПа | % | МПа | % | МПа | % |
| Нелегированный вольфрам | Прессованные прутки | 100 | 55 | 60 | 68 | 34 | 62 |
| 5 % Mo | То же | 200 | 28 | 70 | 89 | 37 | 116 |
| 25 % Mo | Кованые прутки | 220 | 15 | 80 | 48 | 31 | — |
| 0,5 % Mo | Прессованные прутки | 260 | 32 | 90 | 55 | 51 | 81 |
| 1,6 % Ta | То же | 140 | 28 | 90 | 47 | 50 | 44 |

с которыми выпускают полосы, пластины, проволоку, трубы, фольгу и пр. [66].

Наиболее изучены жаропрочные и сравнительно технологичные ниобиевые сплавы, предназначенные для работы при 1100—1300 °C. Жаропрочные танталовые сплавы могут применяться при 1300—1500 °C, однако они более дефицитны и дороги из-за повышенной стоимости тантала.

Из тугоплавких металлов VIA группы наибольшее внимание уделяется молибдену. Металлы этой группы предназначаются для работы при температурах 1250—1450 °C. Сплавы на основе вольфрама в качестве жаропрочных конструкционных материалов могут работать выше 1650 °C.

Сплавы на основе вольфрама. Нелегированный вольфрам обладает недостаточной технологической пластичностью и имеет высокую температуру перехода из пластического состояния в хрупкое. Разработка жаропрочных сплавов вольфрама преследует в основном две цели — повышение технологической и низкотемпературной пластичности, а также его жаропрочности.

Наиболее полно исследованы сплавы вольфрама с молибденом. В США освоено промышленное производство сплавов вольфрама с 15 и 20 % Mo,

Молибден существенно измельчает зерно вольфрама уже при содержании его около 2 %. Увеличение содержания молибдена до 15—20 % повышает жаропрочность сплавов при 1500—1700 °C. Заметно повышаются характеристики жаропрочности вольфрама при введении 2—3 % Ni или Ta. Высокопрочный деформируемый сплав ВВ-2 системы ниобий—вольфрам рекомендуется для работы при температурах выше 1700 °C [41]. Предел длительной прочности этого сплава при температуре 1500 °C и 50, 100 и 500 ч составляет соответственно 70, 60 и 50 МПа. Предел прочности при 1650 °C составляет 350 МПа, при 1925 °C — 120 МПа.

Легирование реием наряду с увеличением жаропрочности существенно снижает температуру перехода в хрупкое состояние, повышает технологическую пластичность вольфрама.

Перспективными оказались сплавы вольфрама с добавками циркония, гафния, ниобия, бора и углерода. Прочность этих сплавов при 1699 °C в 3—5 раз превышает прочность нелегированного вольфрама и достигает 548 МПа, при 2482 °C — 148 МПа, а при 2760 °C — 46 МПа.

Сплавы на основе молибдена. Разработка жаропрочных сплавов молиб-

дена преследует в основном две цели: улучшение характеристик жаропрочности, а также повышение низкотемпературной и технологической пластичности. В большинстве случаев, за исключением сплавов, легированных реием, увеличение содержания легирующих элементов (таких, как вольфрам, углерод и др.), повышающих жаропрочность, приводит к заметному снижению характеристик пластичности.

Жаропрочные сплавы на основе молибдена могут быть разделены на три основные группы.

Низкоуглеродистые низколегированные сплавы молибдена — это сплавы с содержанием углерода 0,004—0,05 %, титана или циркония в пределах 0,07—0,5 %. В эту группу могут быть включены сплавы Mo—0,5Ti, TZM, ЦМ—2А, ВМ—1 и ВМ—2 (табл. 89). Эти сплавы харак-

теризуются хорошими технологическими свойствами. Из них изготавливают ленты, полосы и другие полуфабрикаты в соответствии с техническими условиями [66].

Более высокой жаропрочностью обладают сплавы второй группы — низколегированные высокоуглеродистые сплавы молибдена. Представителями этой группы являются сплавы TZC и ВМ—3. По сравнению со сплавами первой группы в них повышено содержание углерода до 0,25—0,5 %. Немного увеличено содержание титана и циркония (до 0,5 %). Упрочнение достигается в основном благодаря процессам карбидообразования. Применение высокоуглеродистых сплавов осложняется их плохой технологичностью, высокой температурой перехода в хрупкое состояние.

Высоколегированные молибденовые сплавы — третья группа сплавов —

87. Предел прочности (в МПа) сплавов вольфрама при различных температурах испытания [41]

| Состав сплава (мас. доля) | В отожженном состоянии | Деформированный | | | |
|---------------------------|------------------------|-----------------|-------|---------|---------|
| | | 20 °C | 20 °C | 1500 °C | 1800 °C |
| W — 30 % Re | 1400 | 2720 | 341 | 143 | |
| W — 25 % Re | 1190 | 2710 | 300 | 159 | |
| W — 50 % Re | 950 | 1780 | 152 | 60 | |
| W — 40 % Re | 840 | 1530 | 136 | 62 | |
| W — 20 % Mo — 40 % Re | 1250 | 1850 | 210 | 118 | |
| W — 15 % Mo — 29 % Re | 980 | 1290 | 260 | 93 | |
| W — 24 % Mo — 31 % Re | 900 | 1130 | 240 | 86 | |
| W — 34 % Mo — 33 % Re | 920 | 1290 | 216 | 93 | |

88. Предел прочности (в МПа) вольфрамовых сплавов, получаемых методом порошковой металлургии [30]

| Мас. доля добавок | Полуфабрикат | 1650 °C | 1930 °C | 2200 °C | 2420 °C |
|-------------------------------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| 50 % Mo | Проволока | 140 | 45 | 35 | 13 |
| 1 % ThO ₂ | Листы | 260 | 190 | 90 | — |
| 2 % ThO ₂ | » | 200 | 180 | 120 | 70 |
| 5 % Re + 2 % ThO ₂ | » | 250 | — | — | — |

89. Предел прочности некоторых отечественных и зарубежных сплавов на основе молибдена [66]

| Сплав | Сортамент | Деформированное состояние | | Отожженное состояние | |
|--|-----------------|---------------------------|------------------|----------------------|------------------|
| | | t, °C | σ_B , МПа | t, °C | σ_B , МПа |
| Mo — 0,5 Ti (0,5 % Ti; 0,02—0,05 % C) | Лист | 20 | 789 | 20 | 790 |
| | | 871 | 610 | 982 | 470 |
| | | 982 | 460 | 1093 | 555 |
| | | 1093 | 420 | 1205 | 492 |
| | | 1204 | 350 | 1315 | 130—218 |
| | | 1350 | 135 | — | — |
| TZM (0,5 % Ti; 0,1—0,08 % Zr; 0,02—0,015 % C) | Прутки | 20 | 970 | 24 | 840 |
| | | 982 | 945 | 982 | 540 |
| | | 1093 | 630 | 1093 | 513 |
| | | 1306 | 410 | 1315 | 375 |
| | | 1649 | 100 | 1320 | 350 |
| | | — | — | 1649 | 100 |
| Mo—50 Re (50 % Re) | Лист | 400 | 1200 | 1093 | 450 |
| | | 800 | 840 | 1205 | 350 |
| | | 1200 | 350 | — | — |
| | | 1600 | 140 | 1315 | 275 |
| ЦМ—2А (0,07—0,3 % Ti; 0,07—0,15 % Zr; 0,004 % C) | Лист | 20 | 800 | — | — |
| | | 800 | 500 | — | — |
| | | 1000 | 420 | — | — |
| | | 1200 | 340 | — | — |
| | | 1500 | 140 | — | — |
| | | 1800 | 100 | — | — |
| BM—1 (до 0,4 % Ti; 0,08—0,25 % Zr; $\leq 0,01$ % C; до 0,6 % Nb) | Лист/ Прутки | 20 | 800/820 | — | — |
| | | 800 | 500/510 | — | — |
| | | 1000 | 420/400 | — | — |
| | | 1200 | 340/343 | — | — |
| | | 1500 | 140/137 | — | — |
| | | 1800 | 100 | — | — |
| BM—2 (до 0,2 % Ti; 0,25—0,40 % Zr; 0,02 % C; до 0,2 % Nb) | Прутки | 20 | 750 | 20 | 870 |
| | | 800 | 570 | 700 | 650 |
| | | 1000 | 520 | 1000 | 603 |
| | | 1200 | 450 | 1200 | 445 |
| | | 1400 | 295 | 1500 | 210 |
| | | 1510 | 160 | 1800 | 87 |
| | | 1800 | 90 | — | — |
| 2000 | 30 | — | — | | |

Продолжение табл. 89

| Сплав | Сортамент | Деформированное состояние | | Отожженное состояние | |
|---|-----------|---------------------------|------------------|----------------------|------------------|
| | | t, °C | σ_B , МПа | t, °C | σ_B , МПа |
| BM—3 (0,8—1,3 % Ti; 0,3—0,6 % Zr; 0,25—0,5 % C; 1,0—1,5 % Nb) | Прутки | — | — | 20 | 800 |
| | | — | — | 1150 | 600 |
| | | — | — | 1300 | 500 |
| MP—47ВП (47 % Re) | Прутки | 20 | 173 | 20 | 950 |
| | | 1500 | 152 | — | — |
| | | 1800 | 60 | — | — |

имеют высокие жаропрочные свойства и могут длительное время работать при температурах до 2000 °C. Сплавы с 25—50 % W могут работать при температурах 1500—2500 °C. Хорошим сочетанием прочностных и технологических свойств обладает сплав, легированный 47—50 % Re. Этот сплав выпускается по техническим условиям [66] в виде проволоки, ленты, полосы. Порог хрупкости сплава MP—47ВП ниже —247 °C.

Сплавы на основе ниобия. Чистый ниобий, обладая высокой пластичностью и технологичностью, имеет ограниченную жаропрочность. Стойкостью предел длительной прочности при температурах 1100 и 1200 °C составляет соответственно 50 и 30 МПа [67]. Легирование существенным образом повышает жаропрочные свойства, но при этом снижается характеристики пластичности и технологичности.

Основой высокожаропрочных сплавов являются системы Nb—Mo, Nb—W—Mo при содержании до 10—20 % W и Mo. Указанная основа дополнительно легирована цирконием или гафнием. Жаропрочные и окислостойкие сплавы создают на основе системы Nb—W—Ti или Nb—Mo—Ti при содержании до 20 % Mo или W и до 10 % Ti. Третья группа сплавов с умеренно жаропрочными и достаточно технологичными свойствами — низколегированные ниобиевые сплавы. Они содержат 1—7 % Zr или титан. Основные типы сплавов представлены в табл. 90.

Сплавы на основе тантала из-за дефицитности последнего находят применение в областях, не допускающих применение других материалов. Это прежде всего электронная промышленность, медицина и химическая промышленность. В соответствии с

90. Механические свойства некоторых отечественных и зарубежных промышленных ниобиевых сплавов [41, 66, 67]

| Марка сплава | Сортамент | Вид обработки (состояние) | t, °C | σ_B , МПа | δ , % |
|--------------------------------------|-----------|---------------------------|-------|------------------|--------------|
| BN—2 (3,8—5,2 % Mo; $\leq 0,05$ % C) | Прутки | Без обработки | 20 | 750 | 18—28 |
| | | Деформация | 1000 | 500 | 25 |
| | Лист | » | 1100 | 400—500 | 35 |
| | | » | 1100 | 310—350 | 20—25 |
| | Прутки | Без обработки | 1200 | 180—200 | 45—55 |
| | | Деформация | 1500 | 80—100 | 35 |

Продолжение табл. 90

| Марка сплава | Сортамент | Вид обработки (состояние) | t, °C | σ_B , МПа | δ , % |
|---|---------------------------------------|---------------------------|-------|------------------|--------------|
| ВН-2А (3,5—4,7 % Mo; 0,5—0,9 % Zr; $\leq 0,08$ % С) | Лист » Пруток Лист Пруток | Деформация | 20 | 800—900 | 4—5 |
| | | | 1100 | 450 | 10 |
| | | Отжиг | 1100 | 260—300 | 22—26 |
| | | | 1200 | 300 | 12 |
| | | | 1200 | 240—260 | 26 |
| ВН-3 (4—5,2 % Mo; 0,8—2 % Zr; 0,08—0,16 % С) | Пруток | Деформация | 20 | 750—800 | 16—20 |
| | | | 1100 | 450 | 21—24 |
| | | | 1200 | 250—290 | 26 |
| | | | 1500 | 125 | 40—43 |
| ВН-4 (8,5—10,5 % Mo; 1—2 % Zr; 0,25—0,40 % С) | Пруток | Отжиг | 20 | 810 | 6 |
| | | | 1100 | 700 | — |
| | | | 1200 | 550 | 15 |
| | | | 1500 | 170 | 24 |
| РН-6 (4,5—6 % Mo; 4,5—6 % W; 1—1,5 % Zr) | Пруток | Отжиг | 20 | 890 | — |
| | | | 1200 | 290 | — |
| | | | 1800 | 93 | — |
| F-48 (15 % W, 5 % Mo, 1 % Zr, 0,1 % С) | Лист | Отжиг | 20 | 875 | 25 |
| | | | 1100 | 456 | 19 |
| | | | 1200 | 336 | 21 |
| | | | 1320 | 217 | — |
| | | | 1370 | 232 | — |
| 1483 | 170 | 54 | | | |
| D-43 (10 % W; 1 % Zr; 0,1 % С) | Лист | Отжиг | 20 | 609 | 21 |
| | | | 1093 | 330 | — |
| | | | 1205 | 246 | — |
| | | | 1315 | 190 | — |
| | | | 1315 | 190 | — |
| D-31 (10 % Mo; 10 % Ti; 0,1 % С) | Пруток | Деформация | 20 | 700 | 22 |
| | | | 1100 | 245 | 12 |
| | | | 1200 | 175 | 14 |
| | | | 1320 | 140 | 8 |
| | | | 1420 | 77 | — |
| F-50 (15 % W; 5 % Mo; 1 % Zr; 5 % Ti; 0,05 % С) | Пруток | Деформация | 24 | 860 | 24 |
| | | | 1095 | 350 | 28 |
| | | Отжиг | 1205 | 245 | 35 |
| 1315 | 147 | | 35 | | |

ТУ 48-05-Г-139-71 выпускаются сплавы тантала с содержанием вольфрама 4—21 % [66]. Сведения по жаропрочности носят ограниченный характер.

Жаропрочные медные сплавы. К жаропрочным сплавам на основе меди в зависимости от области применения могут предъявляться различные, часто трудно совместимые в одном материале, требования. Например, высокая жаростойкость, электро- и теплопроводность, износостойкость при высоких температурах. Однако, независимо от назначения, эти сплавы характеризуются общими принципами выбора состава. Это, как правило, сплавы меди, легированные небольшими присадками тугоплавких компонентов. Жаропрочные медные сплавы по составу или типу обработки подразделяют на две группы: упрочняемые деформацией и дисперсионно-твердеющие сплавы. Причем сплавы второй группы существенно превосходят по свойствам сплавы первой группы, особенно когда между закалкой и старением они подвергаются холодной деформации. К первой группе относятся сплавы систем Cu—Ag, Cu—Cd, Cu—Mg и др. Ко второй группе относятся сплавы на основе систем Cu—Cr, Cu—Zr, Cu—Be.

Режимы обработки, свойства и области применения сплавов приведены в табл. 91, 92. Большинство жаропрочных медных сплавов — это сплавы на основе системы Cu—Cr. Хромовые бронзы не склонны к коррозии под напряжением и к «водородной болезни». Жаростойкость их в среднем на 15—20 % выше жаростойкости меди. Коррозионная стойкость в большинстве случаев аналогична меди. Обрабатываемость резанием большинства хромовых бронз составляет в среднем 20 % обрабатываемости латуни ЛС 63—3.

5. РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Радиационные дефекты и свойства материалов. При облучении потоками частиц (нейтронов, протонов, электронов, альфа-частиц, осколков деления)

и жестким электромагнитным (гамма- и рентгеновским) излучением в материалах образуются структурные повреждения, называемые радиационными дефектами. Переданная материалу твердых тел энергия частиц или излучения частично расходуется на разрыв межатомных связей. Для образования, например, простейшего радиационного дефекта — пары Френкеля (вакансии и междоузельного атома) необходима энергия, превышающая пороговую, составляющая 14—35 эВ. При облучении материалов частицами с энергией порядка мегаэлектронвольта смещаемым атомам передается энергия, на порядки более высокая по сравнению с пороговой. Смещаемый атом ускоряется, а его кинетическая энергия расходуется на ионизацию атомов, расположенных вдоль траектории движения. В результате образуется каскад радиационных дефектов.

Частицы и излучения могут приводить к химическим и ядерным реакциям (включая реакции деления) в материале тел, а также появлению в структуре материалов самих бомбардирующих частиц (ионное внедрение), что вызывает появление примесей в материале, и являются второй причиной возникновения радиационных дефектов.

Физические процессы, приводящие к образованию радиационных дефектов, составляют научную основу радиационного материаловедения, изучающего совокупность методов, позволяющих:

создать материалы (конструкционные, полимерные, полупроводниковые и др.), устойчивые к воздействию ядерных излучений;

приспособить материалы к требуемым свойствам путем их дозированного облучения.

Радиационные дефекты способны изменять объемные и поверхностные свойства материалов. Характер изменения свойств зависит от длины пробега частицы или излучения. К поверхностным дефектам приводят облучения электроразряженными частицами, излучениями низких энергий; к объемным дефектам — облучение быстрыми нейтронами.

91. Свойства жаропрочных медных сплавов [5, 8, 25, 53]

| t, °C | Сплав | | | | | | | | | | |
|-------|------------------|-------|---------|-----|-------|--------|-------|-------|-----|-------|---------|
| | Cu | BrKd1 | BrЦр0,4 | BrX | BrXЦр | BrXВЦр | BrНХК | BrXН6 | МКБ | BrМВТ | BrMг0,3 |
| | σ_B , МПа | | | | | | | | | | |
| 20 | 245 | 412 | 392 | 441 | 490 | 550 | 800 | — | 764 | 833 | 490 |
| 300 | 147 | 304 | 314 | 363 | 382 | 450 | 617 | — | 617 | 676 | — |
| 400 | 108 | 216 | 294 | 323 | 343 | 410 | 580 | — | 539 | 588 | — |
| 500 | 78 | 137 | 245 | 274 | 284 | 360 | 470 | — | 412 | 490 | — |
| 600 | 49 | 78 | 196 | 176 | 245 | 220 | 300 | — | 225 | 245 | — |
| | σ_T , МПа | | | | | | | | | | |
| 20 | 157 | 392 | 363 | 412 | 441 | 510 | 780 | — | 745 | 823 | — |
| 300 | 98 | 274 | 304 | 353 | 363 | 430 | 630 | — | 608 | 666 | — |
| 400 | 69 | 186 | 284 | 314 | 333 | 400 | 570 | — | 529 | 578 | — |
| 500 | 49 | 108 | 235 | 265 | 284 | 340 | 460 | — | 402 | 490 | — |
| 600 | 20 | 49 | 186 | 167 | 235 | 210 | 290 | — | 196 | 235 | — |
| | ψ , % | | | | | | | | | | |
| 20 | 90 | 81 | 69 | 69 | 84 | 58 | 50 | — | 22 | 10 | 3 |
| 300 | 37 | 74 | 68 | 87 | 82 | 55 | 40 | — | 13 | 8 | — |
| 400 | 43 | 82 | 68 | 27 | 82 | 57 | 24 | — | 11 | 5 | — |
| 500 | 86 | 95 | 70 | 20 | 82 | 58 | 12 | — | 21 | 3 | — |
| 600 | 100 | 96 | 72 | 32 | 81 | 68 | 26 | — | 76 | 10 | — |
| | δ , % | | | | | | | | | | |
| 20 | 50 | 18 | 17 | 34 | — | 19 | 10 | — | — | — | — |
| 300 | 50 | 14 | — | 11 | — | 14 | 7 | — | — | — | — |
| 400 | 65 | 13 | — | 7 | — | 12 | 5 | — | — | — | — |
| 500 | 80 | 5 | — | 4 | — | 12 | 3 | — | — | — | — |
| 600 | 90 | 3 | — | 8 | — | 16 | 5 | — | — | — | — |

Продолжение табл. 91

| t, °C | Сплав | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|
| | Cu | BrKd1 | BrЦр0,4 | BrX | BrXЦр | BrXВЦр | BrНХК | BrXН6 | МКБ | BrМВТ | BrMг0,3 |
| | $\rho_r \cdot 10^{-6}$, Ом·м | | | | | | | | | | |
| 20 | 0,0172 | 0,0231 | 0,0193 | 0,0213 | 0,0204 | 0,02 | 0,0372 | 0,0185 | 0,0346 | 0,0392 | 0,0238 |
| 300 | 0,0362 | 0,0417 | 0,0387 | 0,0392 | 0,0382 | 0,0378 | 0,0546 | 0,0379 | 0,0536 | 0,0607 | — |
| 400 | 0,0424 | 0,0487 | 0,0454 | 0,0458 | 0,0452 | 0,0449 | 0,0618 | 0,0437 | 0,0614 | 0,0652 | — |
| 500 | 0,0507 | 0,0560 | 0,0534 | 0,0527 | 0,0534 | 0,0525 | 0,0722 | 0,0517 | 0,0705 | 0,0765 | — |
| 600 | 0,0584 | 0,0656 | 0,0612 | 0,0607 | 0,0602 | 0,0608 | 0,0864 | 0,0590 | 0,0825 | 0,0872 | — |
| | KCU, кДж/м ² | | | | | | | | | | |
| 20 | 1666 | 1568 | 1960 | 2156 | 2352 | 1800 | 1000 | — | 294 | 294 | — |
| 300 | 1372 | 1666 | 2058 | 2058 | 2156 | 1700 | 800 | — | 392 | 294 | — |
| 400 | 1372 | 1666 | 2156 | 1960 | 2156 | 1700 | 700 | — | 392 | 196 | — |
| 500 | 1274 | 1470 | 1764 | 1666 | 1764 | 1600 | 500 | — | 392 | 98 | — |
| 600 | 784 | 1274 | 1568 | 1470 | 1568 | 1600 | 1200 | — | 588 | 196 | — |
| | E, МПа | | | | | | | | | | |
| 20 | 129 400 | 123 000 | 134 000 | 131 000 | 130 000 | 132 000 | 140 000 | 135 000 | — | — | — |
| 300 | 115 600 | — | — | 121 000 | 118 000 | 117 000 | 128 000 | 122 000 | — | — | — |
| 400 | — | — | — | 115 000 | 109 000 | 108 000 | 122 000 | 113 000 | — | — | — |
| 500 | — | — | — | 109 000 | 100 000 | 98 000 | 116 000 | 105 000 | — | — | — |
| 600 | 94 000 | — | — | 98 000 | 93 000 | 91 000 | 108 000 | 97 000 | — | — | — |
| | λ , Вт/(м·°C) | | | | | | | | | | |
| 20 | 394 | 297 | 343 | 367 | 366 | 368 | 196 | 380 | 197 | 176 | 243 |
| 300 | — | — | — | 386 | 380 | 382 | 262 | 384 | — | — | — |
| 400 | — | — | — | 375 | 382 | 369 | 271 | 390 | — | — | — |
| 500 | — | — | — | 365 | 367 | 361 | 268 | 372 | — | — | — |
| 600 | 352 | — | — | 358 | 361 | 357 | 252 | 365 | — | — | — |

92. Составы, области применения, режимы обработки, физические свойства жаропрочных сплавов [58, 25, 53]

| Сплав | Температура, °С | | | | | | НВ, МПа | Р _н , % от Р _н меди МО | Р, кг/м ³ | α · 10 ⁶ , °С ⁻¹ | λ, Вт/(м·°С) | Выпускаемые полуфабрикаты | Область применения |
|---|-----------------|-----------------------------|--------|---------------------|----------|----------------------|----------|--|----------------------|--|--------------|--|--|
| | плавления | горячей обработки давлением | отжига | нагрева под закалку | старения | начала разупрочнения | | | | | | | |
| БрКд1 | 1040 | 680—900 | 500 | — | — | 300 | 784—1078 | 75—82 | 8920 | 17,6 | 297 | Прутки, коллекторные полосы, ленты | Электроды для точечной, шовной сварки легких сплавов, коллекторы электродвигателей, проводов, в радиотехнике |
| БрЦр0,2; БрЦр0,3; БрЦр0,4; БрЦр0,7 | 965 | 700—900 | 700 | 940—960 | 440—460 | 550 | 980—1323 | 90 | 8930 | 16,32 | 326 | Полосы, коллекторные полосы, ленты, трубы | Коллекторы высоконагруженных и высокоскоростных двигателей, в радиотехнике, электровакуумной промышленности |
| БрХ | 1073 | 700—950 | 650 | 980—1000 | 440—460 | 450 | 980—1176 | 80 | 8920 | 17 | 314 | Прутки, полосы, коллекторные полосы, трубы | Теплообменники, электроды для контактной сварки углеродистой стали, коллекторы электродвигателей |

Продолжение табл. 92

15 В. Н. Азямасов и др.

| Сплав | Температура, °С | | | | | | НВ, МПа | Р _н , % от Р _н меди МО | Р, кг/м ³ | α · 10 ⁶ , °С ⁻¹ | λ, Вт/(м·°С) | Выпускаемые полуфабрикаты | Область применения |
|--------|-----------------|-----------------------------|---------|---------------------|----------|----------------------|----------|--|----------------------|--|--------------|---|--|
| | плавления | горячей обработки давлением | отжига | нагрева под закалку | старения | начала разупрочнения | | | | | | | |
| БрХЦр | — | 700—900 | 700 | 940—960 | 450—470 | 500 | 980—1274 | 80 | 8920 | 17,5 | 366 | Прутки, полосы, плиты, листы, проволока | Электроды для точечной и шовной сварки углеродистой стали, губки и ролики сварочных машин, арматура, жала паяльников |
| БрНХТ | — | 700—950 | 650—800 | — | — | — | — | — | — | — | — | Прутки, трубы, листы | Присадочные материалы при сварке кристаллизаторов и теплообменников |
| БрХЦрТ | — | 700—900 | 650—700 | — | — | — | — | — | — | — | — | Прутки, трубы, листы, плиты | Кристаллизаторы, теплообменники |
| БрНН6 | — | 700—950 | 650—700 | 940—1000 | 420—460 | — | — | 92 | — | 17,1 | 380 | Проволока, прутки | Присадочные материалы при сварке, провода и кабели |

Продолжение табл. 92

| Сплав | Температура, °С | | | | | | НВ, МПа | ρ, % от ρ _{меди} | ρ, кг/м ³ | α 10 ⁶ , °С ⁻¹ | λ, Вт/(м·°С) | Выпускаемые полуфабрикаты | Область применения |
|---------------------------------|-----------------|-------------------|---------|---------------------|----------|----------------------|---------|---------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------|--|--|
| | плавления | горячей обработки | отжига | нагрева под закалку | старения | начала разупрочнения | | | | | | | |
| BrHxK | — | 750—950 | 750 | 980—1000 | 450—470 | 500 | 1670 | 40 | 8850 | — | 196 | Плиты, проволоки, листы, прутки, лента | Формирующие и электродные кольца турбомоторных станков. Электроды, губки и ролики сварочных машин, кристаллизаторы, теплообменники, токоподводящие пружины, элементы креплений, инструмент |
| BrXVЦр | — | 750—950 | 700 | 930—950 | 450—475 | 550—600 | 1570 | 86 | 8830 | 16,6 | 368 | Проволока, прутки | Электроды для сварки |
| BrHBT | — | 800—950 | 750 | 960—980 | 470—490 | 500 | 1670 | 45 | 8830 | — | 188 | Плиты, листы, цилиндрические заготовки | Детали машин для стывковой сварки коррозионно-стойкой стали и жаропрочных сплавов |
| BrMg0,3; BrMg0,5; BrMg0,8 | 1076 | 850—900 | 600 | — | — | 300 | 1300 | 72 | 8910 | 17,6* | 243 | Коллекторные пластины, проводы, кабели | Контактные кольца, коллекторные пластины, проводы, кабели |
| Cu | 1083 | 800—950 | 500—700 | — | — | 180—230 | — | 100 | 8940 | 16,8 | 394 | — | — |

При взаимодействии быстрого нейтрона с металлическим или керамическим материалом большая часть энергии передается атомам, смеющимся из узлов кристаллической решетки (пороговая энергия смещения атома имеет порядок 25 эВ). В результате происходит образование дефектов кристаллов в виде вакансий и междоузлий. Начиная с определенной величины радиационных дефектов становятся заметными изменения механических, физических, химических и других свойств конструкционных металлических или керамических материалов.

При взаимодействии быстрого нейтрона с органическим веществом большая часть его энергии идет на образование протонов отдачи, на ионизацию атомов водорода или их возбуждение. Разрыв связей C—H или C—C является следствием облучения. Из жидких органических веществ выделяются газы, их вязкость повышается. Радиационная стойкость и стабильность органических веществ намного ниже, чем у металлических и керамических материалов.

Наибольшую чувствительность к радиации имеют полупроводники. При взаимодействии быстрых нейтронов с полупроводниками снижаются их усиливающие характеристики, в запрещенной зоне создаются разрешенные состояния.

Результаты изучения поведения различных материалов в потоках быстрых тепловых нейтронов показали, что существует пороговое значение флюенса нейтронов¹, ниже которого

¹ Быстрые нейтроны образуются при реакции деления ядер, их энергия 0,1—10 МэВ.

² Тепловыми называют нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии с ядрами среды и имеющие энергии 0,005—0,2 эВ.

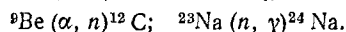
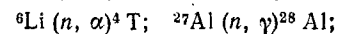
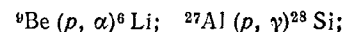
³ Флюенс нейтронов (в нейтр./м²) — произведение плотности потока нейтронов и времени облучения; плотность потока нейтронов — произведение плотности нейтронов и их средней скорости.

⁴ Надтепловыми называют нейтроны с энергиями между тепловыми и резонансными (2—10³ эВ).

⁵ (n, α), (n, γ) — реакции захвата нейтрона (n) ядром, сопровождающиеся вылетом α-частицы, испусканием γ-кванта; (p, α) — реакция захвата протона (p) ядром, сопровождающаяся вылетом α-частицы

влияние облучения на материалы незначительно. В табл. 93 и 94 приведены пороговые значения флюенсов для быстрых, тепловых и надтепловых нейтронов. Выше пороговых значений флюенса нейтронов эффект облучения необходимо учитывать при выборе материалов, расчете механической и конструкционной прочности, коррозионной стойкости, расчете теплопередачи и совместимости материалов.

Степень радиационного воздействия на материалы при облучении их нейтронами зависит от состава изотопов в химических компонентах материалов. Например, в результате (n, α)-реакции в материалах появляется гелий, влияющий на процессы радиационного набухания, ползучести, охрупчивания. Для примера можно указать и другие ядерные реакции, которые могут приводить к дополнительному изменению свойств материалов:



К свойствам конструкционных материалов, работающих в условиях радиационных облучений, предъявляются следующие требования [40, 50]: 1) высокая механическая прочность и пластичность; 2) высокая термическая стабильность (теплостойкость); 3) высокая коррозионная стойкость и совместимость с другими материалами; 4) хорошие характеристики теплопередачи; 5) низкое сечение поглощения (захвата) нейтронов; 6) большая радиационная стабильность; 7) низкая наведенная радиоактивность; 8) высокое сечение рассеяния нейтронов, большая потеря энергии нейтрона за одно столкновение.

Первые четыре требования являются общими для конструкционных материалов; пятое—восьмое — специфическими свойствами, определяемыми необходимостью экономии нейтронов, эффективного их замедления (для реакторов на тепловых нейтронах), а также стремлением иметь малое отрицательное изменение механических и других свойств под влиянием радиационного облучения. Специфические требования определили выбор элементов, служа-

93. Значения порогового флюенса быстрых нейтронов в различных материалах [50]

| Пороговый флюенс, число нейтронов на 1 м ² | Материал | Вызываемое изменение свойств |
|---|--|--|
| 10 ¹⁸ | Германиевые, кремниевые полупроводники | Ухудшение усиливающих характеристик |
| 10 ¹⁹ | Полиметил, метакрилат и целлюлоза | Потеря прочности |
| 10 ²⁰ | Вода и жидкие органические соединения | Газовыделение |
| | Натуральный и бутиловый каучук | Потери эластичности |
| 10 ²¹ | Органические жидкости | Газовыделение, повышение вязкости |
| | Бутиловый каучук Полиэтилен | Размягчение Потеря прочности при растяжении |
| 10 ²² | Фенолполимеры с минеральными наполнителями Натуральный каучук | Потеря прочности при растяжении Отвердевание |
| 10 ²³ | Углеводородные масла Полистирол | Повышение вязкости Потеря прочности при растяжении |
| 10 ²⁴ | Металлы Углеродистые стали | Повышение предела текучести Снижение ударной вязкости |
| 10 ²⁵ | Керамика | Снижение теплопроводности, плотности, разрушение кристаллической структуры |
| | Сплавы циркония Углеродистые стали | Снижение пластичности, рост предела текучести Снижение пластичности, рост предела текучести |
| | Коррозионно-стойкие стали | Снижение пластичности, рост предела текучести, повышение критической температуры хрупкости |

Продолжение табл. 93

| Пороговый флюенс, число нейтронов на 1 м ² | Материал | Вызываемое изменение свойств |
|---|--------------------|---|
| 10 ²⁶ | Алюминиевые сплавы | Значительное падение пластичности Заметное снижение пластичности Распухание, падение пластичности |
| | Циркониевые сплавы | |
| | Никелевые сплавы | |

щих основой и легирующими добавками реакторных металлических материалов. Перечень этих элементов и их ядерно-физические характеристики приведены в табл. 95.

Бериллий и его соединения. Уникальность бериллия как конструкционного материала определяется высоким значением отношения прочности к плотности, особенно при высоких температурах, а также хорошей коррозионной стойкостью. Он имеет наименьшее из всех металлов сечение¹ поглощения тепловых нейтронов, большое сечение рассеяния и высокую температуру плавления, поэтому является отличным замедлителем и отражателем.

Бериллий и оксид бериллия хрупки, дорогостоящи и токсичны, что плохо согласуется с общими требованиями к конструкционным материалам.

Для металлического бериллия и его оксида характерными эффектами, наблюдаемыми при росте флюенса быстрых нейтронов, являются размерная нестабильность и гелиевое охрупчивание. Размерная нестабильность связана с реакциями взаимодействия быстрых нейтронов с бериллием. Увеличение относительного объема $\Delta V/V$ образца бериллия (радиационное распухание) при температурах облучения 70—130 °С описывается зависимостью [50]

$$\Delta V/V = 0,584F^{0,83},$$

¹ Сечения взаимодействия нейтронов с ядрами характеризуют вероятность ядерной реакции (например, поглощения) или изменения энергии нейтронов (рассеяния).

где $F \cdot 10^{-26}$ — флюенс быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ.

Пластичность облученного бериллия падает практически до нуля уже при относительно невысоких флюенсах нейтронов (1 ÷ 4) 10²⁵ нейтр./м². Это свойство носит название гелиевого охрупчивания бериллия.

94. Значения порогового флюенса тепловых и надтепловых нейтронов в различных материалах [50]

| Пороговый флюенс, число нейтронов на 1 м ² | Материалы |
|---|---|
| 10 ¹⁸ | Германиевые, кремниевые полупроводники |
| 10 ¹⁹ 10 ²⁰ | Стекло, люцит |
| | Вода |
| 10 ²¹ | Бутиловый каучук, натуральный каучук, органические жидкости, графит |
| | Полиэтилен, фенолполимеры с минеральными наполнителями |
| 10 ²² | Углеводородные масла, полистирол |
| 10 ²³ | Углеродистая сталь, керамические материалы |
| 10 ²⁴ | Углеродистые, коррозионно-стойкие стали |
| 10 ²⁵ | Алюминиевые, циркониевые, никелевые сплавы |

95. Ядерно-физические свойства реакторных металлических материалов [50]

| Элемент | Относительная атомная масса | ρ , г/см ³ | Сечение поглощения тепловых нейтронов | | Сечение рассеяния тепловых нейтронов, б | $t_{пл}$, °C |
|---------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------|---|---------------|
| | | | σ , б ¹ | относительных единиц | | |
| Be | 9,01 | 1,85 | 0,0095 | 1,0 | 7,0 | 1283 |
| Mg | 24,31 | 1,74 | 0,063 | 6,6 | 4,0 | 640 |
| Zr | 91,22 | 6,50 | 0,180 | 19,0 | 8,0 | 1845 |
| Al | 26,98 | 2,70 | 0,235 | 24,7 | 1,4 | 660 |
| Nb | 92,91 | 8,57 | 1,100 | 116,0 | 5,0 | 2415 |
| Mo | 95,94 | 10,20 | 2,600 | 274,0 | 7,0 | 2617 |
| Fe | 55,85 | 7,87 | 2,530 | 267,0 | 11,0 | 1539 |
| Cr | 52,00 | 7,19 | 3,100 | 326,0 | 3,0 | 1990 |
| Cu | 63,54 | 8,96 | 3,800 | 400,0 | 7,2 | 1083 |
| Ni | 58,71 | 8,91 | 4,600 | 485,0 | 17,5 | 1455 |
| V | 50,94 | 6,10 | 4,900 | 516,0 | 5,0 | 1736 |
| Ti | 47,90 | 4,51 | 6,100 | 642,0 | 4,0 | 1725 |
| Mn | 54,94 | 7,43 | 13,300 | 1400,0 | 2,3 | 1245 |
| W | 183,85 | 19,20 | 19,000 | 2000,0 | 5,0 | 3410 |
| Ta | 180,95 | 16,60 | 21,000 | 2210,0 | 5,0 | 2996 |

¹ б (барн) — внесистемная единица измерения площади; 1 б = 10⁻²⁸ м².

При облучении нейтронным потоком линейные размеры изделий из оксида бериллия увеличиваются, соответственно уменьшается плотность, увеличи-

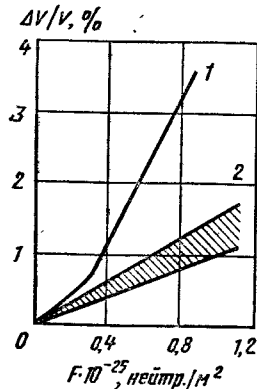


Рис. 1. Относительное изменение объема $\Delta V/V$ высокоплотной окиси бериллия в зависимости от флюенса нейтронов при различных температурах: 1 — 75—110 °C; 2 — 500—700 °C [3]

вается пористость изделий. При низких температурах облучения (75—100 °C) ускорение темпа роста объема оксида бериллия наблюдается при флюенсе нейтронов (энергия более 1 МэВ) около $3 \cdot 10^{24}$ нейтр./м² (рис. 1). Увеличение температуры облучения образцов уменьшает рост их объема. Чем выше плотность образцов, тем больше их расширение при одинаковых значениях флюенса.

Существует предельно допустимое удлинение при расширении, превышение которого приводит к растрескиванию, разрушению, превращению изделий в порошок. Флюенс, при котором происходит разрушение, увеличивается с уменьшением размера зерна образцов (мкм)

$$\delta^{-1/2} = 0,167 F \cdot 10^{-24}$$

где F — флюенс нейтронов с энергией более 1 МэВ, нейтр./м².

Размер зерна получен при температурах облучения 50—100 °C. Максимально допустимые значения флюенса

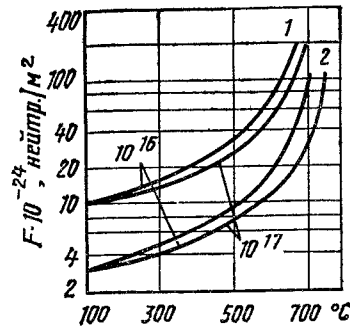


Рис. 2. Максимально допустимые значения флюенса, не вызывающих микрорастрескивания, в зависимости от температуры облучения, размера зерна оксида бериллия (1 — 2,5 мкм; 2 — 10—15 мкм) и потока нейтронов в диапазоне от 10^{16} до 10^{17} нейтр./(м²·с) [3]

сов, не вызывающих микрорастрескивания в зависимости от температуры облучения, плотности потока нейтронов и размера зерна оксида бериллия, приведены на рис. 2.

Основную роль в изменении объема изделий из оксида бериллия играет гелий, а также тритий, образующиеся при взаимодействии бериллия с быстрыми нейтронами. Содержание гелия (его около 0,95 по объему в смеси с тритием) увеличивается с ростом флюенса нейтронов (рис. 3). Если температура изделия превышает

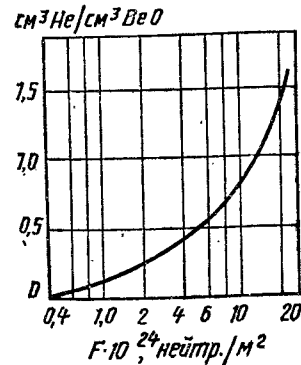


Рис. 3. Объем гелия в облученном оксиде бериллия в зависимости от флюенса нейтронов [3]

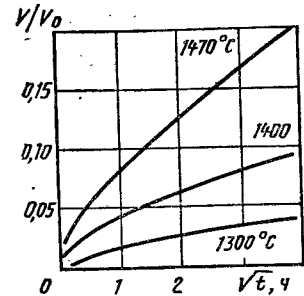


Рис. 4. Объемная доля гелия V/V_0 , выделяющаяся из облученных образцов оксида бериллия ($F = 2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м², 860 °C) при различных температурах отжига как функция времени t [3]

1200 °C, становятся существенным выделение гелия из образцов оксида бериллия (рис. 4), зависящее от времени выдержки. На этом основан способ восстановления свойств изделий из оксида бериллия с помощью высокотемпературного отжига.

Теплопроводность образцов при облучении уменьшается с ростом флюенса в тем большей степени, чем выше плотность образца (рис. 5). С увеличением температуры уменьшение теплопроводности замедляется и при 100 °C достигает насыщения на уровне 40—50 % исходного значения при флюенсе $4 \cdot 10^{25}$ нейтр./м².

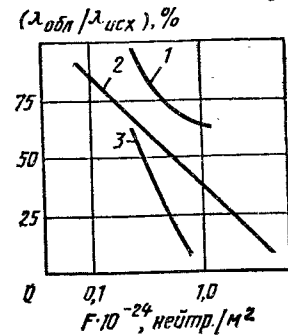


Рис. 5. Зависимость теплопроводности оксида бериллия от флюенса быстрых нейтронов ($E > 1$ МэВ) при плотности образцов (г/см³): 1 — 2,7—2,9; 2 — 2,8—3,0; 3 — 2,9—3,0; температура облучения 40—140 °C [3]

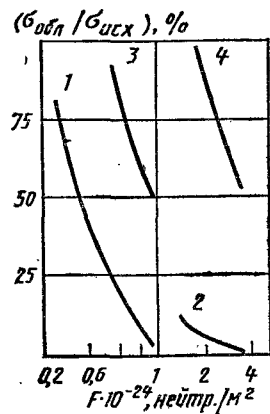


Рис. 6. Изменение прочности при сжатии оксида бериллия в зависимости от флюенса нейтронов при плотности образцов (г/см³): 1 — 2,99—3,0; 2 — 2,5; 3 — 3,0; 4 — 2,7—2,8; 1, 2 — образцы, облученные при температуре 100 °С; 3, 4 — образцы, облученные и обожженные при 1300 °С в течение 24 ч [3]

Прочность образцов из оксида бериллия падает с ростом флюенса нейтронов в тем большей степени, чем выше плотность образца. Повышение температуры облучения до 350—400 °С заметно уменьшает влияние нейтронного потока, но оно остается еще значительным. Отжиг при температуре 1300 °С полностью восстанавливает прочностные свойства. На рис. 6—8

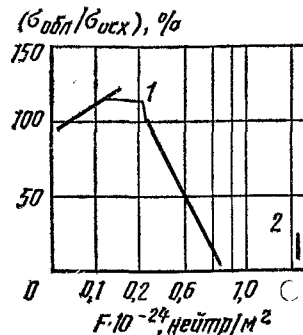


Рис. 7. Зависимость прочности образцов при растяжении от флюенса; плотность образцов 2,6—2,85 г/см³, температура облучения: 1 — 100 °С; 2 — 350—400 °С [3]

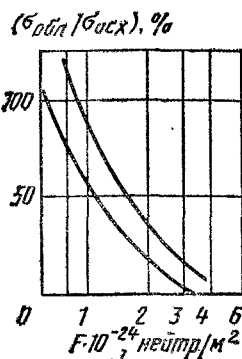


Рис. 8. Зависимость прочности образцов при изгибе от флюенса; плотность образцов 2,8—2,9 г/см³, температура облучения 100 °С [3]

приведены зависимости прочности оксида бериллия при сжатии, растяжении и изгибе в зависимости от флюенса быстрых нейтронов ($E > 1$ МэВ) и температуры. Небольшое увеличение прочностных свойств при малых флюенсах соответствует результатам теоретического анализа.

Облучение приводит к росту скорости ползучести изделий из оксида бериллия. Наблюдается релаксация напряжений в образцах, облучаемых при 500—700 °С, что объясняется наступающей в этих условиях ползучестью.

Магний, его сплавы и соединения. Сплавы магния являются низкотемпературными (температура плавления магния 650 °С) конструкционными материалами, коррозионно-стойкими против окисления на воздухе, в среде углекислого газа до температур приблизительно 400 °С, но имеющими низкое сопротивление коррозии в среде воды, жидкометаллических натрия, эвтектик натрий—калий. По ядерным свойствам магний уступает лишь бериллию. Существенным недостатком магния является высокое термическое сопротивление. Теплопроводность магния и его сплавов [63—171 Вт/(м·°С) при 20 °С] в 100 раз и более ниже, чем у сплавов алюминия.

При температурах ниже 500 °С в среде углекислого газа сплавы магния показали хорошую радиационную стой-

96. Результаты испытания на ползучесть сплавов циркалой-2 и Н-2,5 *1 [29]

| Сплав | Обработка | Температура, °С | Напряжение, МПа | Плотность потока быстрых нейтронов (энергия более 1 МэВ) · 10 ⁻¹⁶ , нейтр./(м ² · с) | Общее время испытаний, г | Скорость ползучести $\dot{\epsilon}_p$, ч ⁻¹ | |
|--------------------|---|-----------------|-----------------|--|--------------------------|--|---|
| | | | | | | в конце испытаний | при тех же условиях, но без влияния облучения |
| Циркалой-2 (труба) | Холодная деформация на 19 %, автоклави-рование при 400 °С, 72 ч | 220 | 311 | 9,6 | 2130 | 1,5 · 10 ⁻⁷ | 10 · 10 ⁻⁸ |
| | | 260 | 211 | 9,3 | 3010 | 5 · 10 ⁻⁷ | 4 · 10 ⁻⁸ |
| | | 300 | 211 | 9,4 | 4300 | 8 · 10 ⁻⁷ | 7 · 10 ⁻⁸ |
| | | 350 | 211 | 9,4 | 4826 | 3,2 · 10 ⁻⁶ | 1,5 · 10 ⁻⁸ |
| | | 375 | 211 | 9,4 | 4977 | 2 · 10 ⁻⁵ | 8 · 10 ⁻⁶ |
| 400 | 211 | 9,4 | 4985 | 7 · 10 ⁻⁵ | 7 · 10 ⁻⁵ | | |
| Н-2,5 (труба) | Закалка в воду от 870 °С, холодная деформация на 11 %, отжиг (500 °С, 24 ч) | 260 | 141 | 5,3 | 5300 | 1,05 · 10 ⁻⁷ | 0,2 · 10 ⁻⁷ |
| | | 300 | 141 | 5,3 | 6250 | 4 · 10 ⁻⁷ | 0,7 · 10 ⁻⁷ |
| | | 350 | 141 | 5,3 | 6620 | 13 · 10 ⁻⁷ | 14 · 10 ⁻⁷ |

*1 Сплав циркалой-2: 1,2—1,7 % Sn; 0,07—0,2 % Fe; 0,05—0,15 % Cr; 0,03—0,08 % Ni; 0,03—0,08 % N; 0,010 % O; сплав Н-2,5: 2,5 % Nb; основа — цирконий.

кость. При флюенсе нейтронов до 10²² нейтр./м² никаких существенных радиационных дефектов (распухания, радиационной ползучести, изменения прочности и пластичности) в сплавах магния не наблюдалось.

Цирконий и его сплавы. Сплавы циркония получили широкое распространение благодаря высокой механической прочности при повышенных температурах, хорошей коррозионной стойкости в воде и паре, технологичности, приемлемой распространенности. По ядерным параметрам цирконий является третьим после бериллия и магния элементом. Низкая теплопроводность циркония [18 Вт/(м·°С) при 20 °С] компенсируется относительно низким тепловым расширением. Высокая коррозионная стойкость при высоких температурах и относительная

дороговизна сдерживают применение сплавов циркония.

В потоке быстрых нейтронов наблюдается радиационный рост и радиационная ползучесть сплавов циркония, существенные в температурном интервале 180—530 °С. С увеличением температуры (от 300 до 400 °С) влияние нейтронного облучения на ползучесть уменьшается, что объясняется быстрым отжигом радиационных дефектов, однако при этом возрастает и становится определяющей термическая ползучесть. Результаты испытаний сплавов циркалой-2 и Н-2,5 представлены в табл. 96*1.

Нейтронное облучение увеличивает скорость ползучести холоднодеформированного циркалой-2 при темпера-

*1 В этой таблице и далее все химические составы сплавов приведены в мас. долях, %.

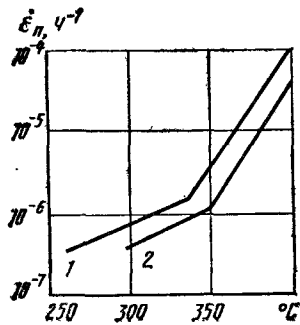


Рис. 8. Зависимость скорости ползучести сплава циркалой-2 от температуры при облучении в потоке нейтронов с энергией более 1 МэВ плотностью (5—9) 10¹⁶ нейтр./((м²·с): 1 — σ = 210 МПа; 2 — σ = 140 МПа; обработка — холодная деформация на 15—20 % [29]

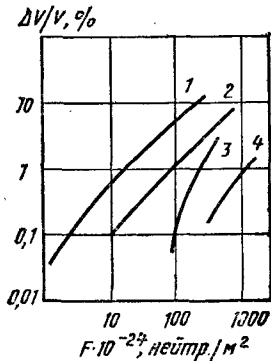


Рис. 10. Относительное изменение объема алюминия и алюминиевых сплавов в зависимости от флюенса нейтронов при температуре облучения 50—60 °С: 1 — 99,9999 % Al; 2 — сплав 8001; 3 — сплав 1100; 4 — сплав 6061 [50]

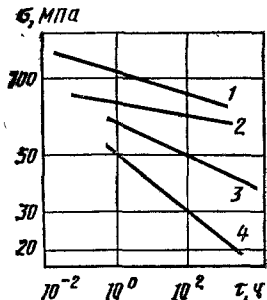


Рис. 11. Длительная прочность алюминиевого сплава 1100: 1, 2 — после облучения при температурах 100 и 50 °С соответственно; 3, 4 — в исходном состоянии при температурах 100 и 150 °С соответственно [50]

туре 200—350 °С на порядок и более. Скорость ползучести холоднодеформированного сплава Н-2,5 увеличивается в меньшей степени.

При температуре образца циркалой-2 340—350 °С наблюдается резкое увеличение скорости ползучести (рис. 9). Образцы были подвергнуты различной предварительной обработке.

Алюминий, его сплавы и соединения. Основными радиационными дефектами для сплавов алюминия являются радиационное распухание и увеличение длительной прочности. Радиационное распухание обусловлено реакциями взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами алюминия, при которых образуются кремний, водород и гелий. Влияние флюенса нейтронов (с энергией более 0,1 МэВ) на относительное изменение объема сплавов алюминия приведено на рис. 10^{*1}. Длительная прочность алюминиевого сплава 1100 после облучения флюенсом (0,7÷11) × 10²⁶ нейтр./м² возрастает (рис. 11), что является следствием радиационного упрочнения материала. Прочностные и пластические свойства сплава 1100 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ приведены на рис. 12 и 13. Значительные дозы облучения не приводят к радикальному изменению механических свойств.

Аустенитные коррозионно-стойкие стали и никелевые сплавы. Потоки быстрых нейтронов вызывают в аустенитных коррозионно-стойких сталях и никелевых сплавах изменение механических свойств, радиационное рас-

*1 Сплав 1100 — алюминий промышленной чистоты; сплав 6061 — сплав Al — 0,7 % Mg — 0,4 % Si.

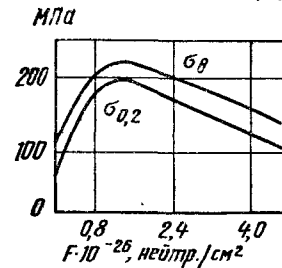


Рис. 12. Зависимость предела прочности и предела текучести сплава 1100 от флюенса нейтронов [50]

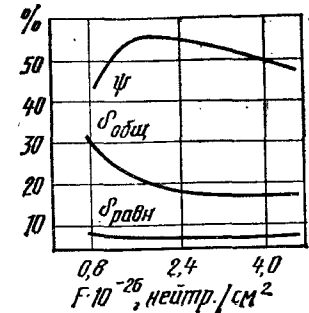


Рис. 13. Зависимость пластических свойств сплава 1100 от флюенса нейтронов [50]

пухание и радиационную ползучесть. На рис. 14 и 15 приведены данные о влиянии флюенса быстрых нейтронов и температуры облучения на механические свойства аустенитных сталей. Это изменение, особенно заметное при флюенсах быстрых нейтронов более 5·10²⁶ нейтр./м² и температурах выше 500 °С, называется высокотемпературным радиационным охрупчиванием (ВТРО).

ВТРО сопровождается значительным снижением пластичности материала (полное удлинение при разрыве может достигать лишь 0,1 %) и повышением предела текучести. Длительная прочность, сопротивление усталости и сопротивление ползучести при этом также существенно снижаются (до половины исходного значения у сталей типа 12X18H9).

Явление ВТРО объясняется радиационным стимулированием изменений свойств на границах зерен, приводящих к образованию трещин. Лучшей сопротивляемостью ВТРО обладают аустенитные стали, легированные молибденом и ниобием, например сталь 0X16H15M3B. Однако это улучшение имеет место при ограниченном флюенсе нейтронов. Так, оболочки твэлов из стали 0X16H15M3B имеют относительное удлинение всего ~0,8 % при флюенсе 8,5·10²⁶ нейтр./м² (температура испытаний 700 °С). Повышения остаточной пластичности и прочности при высоких флюенсах быстрых нейтронов можно достичь легированием аустенитных коррозионно-стойких сталей титаном, бором, кремнием. Малую

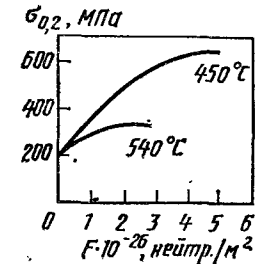


Рис. 14. Влияние облучения на предел текучести стали 304 при различных температурах облучения [50]; отечественный аналог — сталь 08X18H10

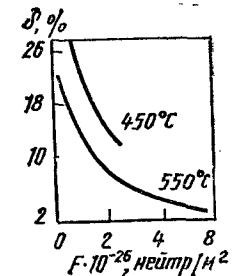


Рис. 15. Влияние облучения на пластичность коррозионно-стойкой стали 304, облученной при различных температурах [50]

склонность к ВТРО имеют стали ферритного и мартенситного классов.

Радиационное распухание (РР) является при флюенсах более 10²⁶ нейтр./м² в интервале температур облучения 0,3—0,55 абсолютной температуры плавления металла, что обыч-

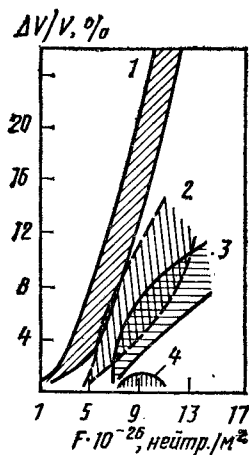


Рис. 16. Влияние облучения на радиационное распухание сталей
1 — 08X18H10T; 2 — 03X16H15M3Б; 3 — 0X16H15M3Б (модифицированная); 4 — 12X13 [72]

но соответствует рабочему диапазону конструкционного материала. Для аустенитных коррозионно-стойких сталей РР может достигать больших значений — до 30—40 % при флюенсах быстрых нейтронов $(1,5 \div 2,5) \times 10^{27}$ нейтр./м². Механизм РР объясняется накоплением в процессе облучения избыточных вакансий, их «конденсацией» и зарождением в металле

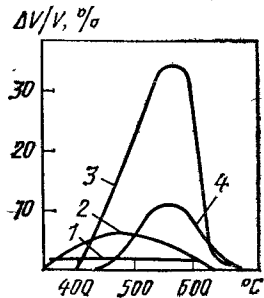


Рис. 17. Влияние температуры на радиационное распухание сталей и сплавов:
1 — ферритная сталь; 2 — высоконикелевые сплавы; 3 — сталь 316, холоднотемпературная (20 %); 4 — аустенитная жароустойчивая сталь модифицированная [72]

вакансионных скоплений, имеющих вид сферических микропор. Центрами зарождения пор являются атомы примесей, атомы гелия, образующегося при взаимодействии нейтронов с никелем, хромом, железом.

На рис. 16 и 17 приведены зависимости РР некоторых сталей и сплавов от флюенса быстрых нейтронов и температуры. Действенным дополнительным средством, уменьшающим распухание аустенитных сталей, является поверхностный наклеп материала в результате деформации изделия при комнатной температуре. При флюенсе быстрых нейтронов $(1,2 \div 1,4) \times 10^{27}$ нейтр./м² увеличение степени холодной деформации с 20 до 30 % для стали типа 316* приводит к снижению распухания с 15 до 4 % при температурах облучения 550—600 °С. Высоконикелевые сплавы (типа нимоника с 40—45 % Ni), а также хромистые коррозионно-стойкие стали ферритного и ферритно-мартенситного классов (12—17 % Cr и не более 0,5 % Ni) имеют меньшее объемное распухание. Однако повышение содержания никеля приводит к усилению ВТРО. Для устранения этого недостатка используют дисперсионное упрочнение и сложное легирование никелевых сплавов молибденом, титаном, алюминием, бором, ниобием, кремнием.

С механизмом вакансионного распухания связана и радиационная ползучесть — свойство постоянного деформирования материала под нагрузкой при температурах, когда не проявляется термическая ползучесть (300—500 °С), при облучении быстрыми нейтронами. Скорость радиационной ползучести пропорциональна флюенсу и приложенному напряжению:

$$\dot{\epsilon}_{р.п} = B\sigma\dot{R},$$

где $\dot{\epsilon}_{р.п}$ — скорость радиационной ползучести, ч⁻¹; σ — напряжение, Па; \dot{R} — скорость накопления радиационных повреждений, смещ./(атом × ч); B — эмпирический коэффициент (2×10^{-12} для стали 03X16H15M3Б и

* Сталь 316 имеет примерный химический состав 17 % Cr, 13 % Ni, 2,5 % Mo; $\leq 0,10$ % C. Вязка по свойствам отечественной стали 08X17H13M2T.

$0,82 \cdot 10^{-12}$ для стали 08X18H10T). Число радиационных повреждений зависит от флюенса и спектра нейтронов. Для типичного спектра энергетического реактора на быстрых нейтронах флюенсу быстрых нейтронов $1,67 \cdot 10^{27}$ нейтр./м² ($E > 0,1$ МэВ) соответствует 100 смещ./атом. Материалы с низкой склонностью к радиационному распуханию имеют и малую скорость радиационной ползучести.

Некоторые чистые металлы, керамики и керметы. Сравнение зависимостей радиационного распухания от отношения температуры испытания к температуре плавления для некоторых чистых металлов приведено на рис. 18. Ниобий, молибден, цирконий, тантал, имеющие ОЦК-решетку, обладают повышенной стойкостью против радиационного распухания. Напротив, никель (ГЦК-решетка) оказывается более склонным к радиационному распуханию.

Керамики и керметы (Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , $Al-Al_2O_3$, V_4C — коррозионно-стойкая сталь) более стабильны, чем металлы и сплавы. Радиационное распухание и радиационная ползучесть у них проявляются слабее.

Графит обладает способностью эффективно замедлять нейтроны, отличными теплофизическими свойствами, хорошей механической прочностью при высоких температурах, относительно легкой обрабатываемостью. Используемый в реакторных установках графит получают искусственно в процессе графитизации нефтяного кокса. Природный графит обладает большим количеством примесей и не может быть использован как замедлитель нейтронов. Графит используется для создания газоплотных конструкций, покрытий. Газоплотный графит получают методом пропитки под высоким давлением углеродсодержащей жидкостью искусственно полученного графита и последующей графитизации. Газоплотным оказывается и пиролитический углерод, получаемый в виде отложений на нагретой поверхности углеводородного газа (метана, бензола). Все искусственные сорта графита обладают высокой анизотропией свойств, связанной с выстраиванием частиц кокса

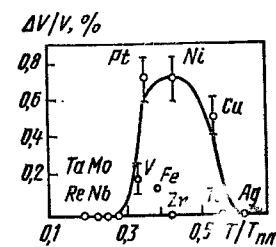


Рис. 18. Зависимость распухания чистых металлов от температуры облучения. Флюенс нейтронов $3 \cdot 10^{26}$ нейтр./м² ($E > 0,1$ МэВ) [50]

при изготовлении брикетов, графитизации отложений из газовой фазы.

Нейтронное облучение повышает прочность на сжатие, твердость и модуль упругости графита. В то же время нейтронное облучение уменьшает теплопроводность при высоких температурах, приводит к нестабильности размеров, уменьшает пластичность, вызывает накопление энергии в графите. Последние качества важны для выбора конструктивных решений.

Наиболее сильно влияние флюенса при невысоких температурах (до 200 °С). При флюенсе нейтронов более 10^{24} нейтр./м² теплопроводность графитовых образцов снижается в 40—50 раз (рис. 19 и 20). Уменьшение теплопроводности (электропроводности), рост термического сопротивления связаны с возникновением дефектов кристаллической структуры, индуцируемых нейтронным потоком.

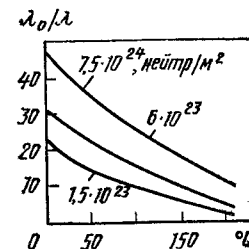


Рис. 19. Зависимость относительной теплопроводности λ_0/λ графита (λ_0 — исходная теплопроводность) от температуры облучения и флюенса тепловых нейтронов [50]

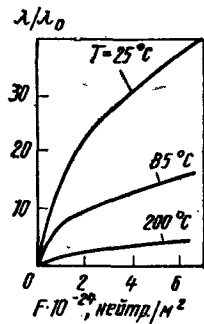


Рис. 20. Зависимость относительного термического сопротивления λ/λ_0 графита от флюенса тепловых нейтронов и температуры [50]

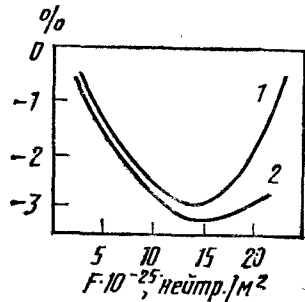


Рис. 21. Зависимость изменения размеров образцов продавленного, почти изотропного графита, вырезанных параллельно оси продавливания, от флюенса быстрых нейтронов и температуры облучения: 1 — 550—600 °С; 2 — 360—400 °С [50]

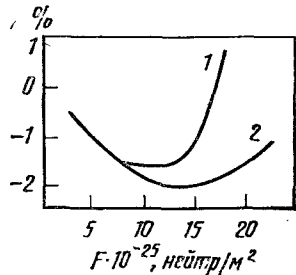


Рис. 22. Зависимость изменения размеров образцов продавленного, почти изотропного графита, вырезанных перпендикулярно оси продавливания, от флюенса быстрых нейтронов и температуры облучения: 1 — 550—600 °С; 2 — 360—400 °С [50]

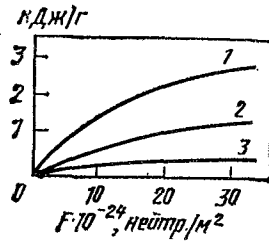


Рис. 23. Зависимость изменения полной накопленной энергии в графите от флюенса тепловых нейтронов: 1 — для облучения при 30 °С; 2 — после отжига в течение 5 ч при 1250 °С; 3 — после обжига при 2000 °С [50]

Изменения размеров графита зависят от направления (вдоль или поперек оси продавливания), флюенса и температуры. Первоначальное (при умеренных флюенсах) уменьшение размеров сменяется их увеличением. С ростом температуры изменения размеров графита снижаются и при температурах выше 350 °С объем многих образцов сокращается. Изменения размеров анизотропного графита от флюенса быстрых нейтронов при различных температурах в направлениях параллельно и перпендикулярно оси продавливания приведены на рис. 21 и 22.

Уменьшение пластичности является следствием радиационного упрочнения графита. Снижение пластичности приводит к образованию трещин.

Важна способность графита накапливать энергию деформации в кристаллической решетке как следствие радиационных дефектов. Накопленная энергия может проявить себя через выделение теплоты, сопровождающееся резким повышением температуры. Зависимость изменения накопленной энергии от флюенса и влияние отжига на ее уменьшение приведены на рис. 23.

6. МАТЕРИАЛЫ С МАЛЫМ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ В ВАКУУМЕ

К конструкционным материалам, применяемым в вакуумных системах, помимо требований в отношении конструкционной прочности, технологичности и экономичности, предъявляют

Дополнительные требования. В их числе малая скорость газовыделения при высокой коррозионной стойкости во влажной атмосфере. Весь этот комплекс свойств определяет выбор материала для различных деталей вакуумных систем. В частности, аустенитные хромоникелевые стали являются основным материалом для высоковакуумных непрогреваемых сварных камер больших размеров благодаря малой скорости газовыделения, высокой коррозионной стойкости, обеспечивающей долговечность, хорошей технологической пластичности и свариваемости.

Развитие отечественной вакуумной техники и создание вакуумных камер больших размеров ограничивает применение аустенитных сталей, содержащих в большом количестве дефицитные легирующие элементы. Это заставляет вести поиск более дешевых и доступных материалов.

Углеродистые и низколегированные стали с коррозионно-стойкими покрытиями являются возможными заменителями аустенитных сталей для низко и среднего вакуума.

Газовыделение — важное свойство для вакуумной техники. Скорость газовыделения материала — характеристика, необходимая для научно обоснованного расчета вакуумной системы.

В вакууме при 20 °С и ниже происходит выделение газа, растворенного в кристаллической решетке материала — водорода, а также газов, десорбирующихся с поверхности. Источники наводораживания могут быть различными. В прокате металла таким источником является главным образом электрохимическое наводораживание при горячей обработке; в органических материалах — разрушение водородных связей. Газы на поверхности металла адсорбируются либо из атмосферы — N_2 , O_2 , H_2O , либо появляются в результате химического взаимодействия адсорбированного кислорода с водородом или углеродом — H_2O , CO , CO_2 .

Газовыделение материала определяют по «методу потока» с диафрагмой постоянной проводимости [37]. Скорости газовыделения Q_i и парциальные давления p_i рассчитывают по экспериментальным масс-спектрам, которые

множественно определяют при длительном вакуумировании в высоком вакууме при постоянной температуре. Расчет выполняют на ЭВМ:

$$Q_i = \frac{p_i^k - (p_i^\phi + p_i^h)}{F \cdot w_i},$$

где p_i^k , p_i^ϕ , p_i^h — парциальные давления i -газа в камере с образцом, в камере без образца (фон), в насосе, Па; w_i — сопротивление диафрагмы для i -газа, $с/м^3$; F — площадь поверхности образца, $м^2$.

Суммарная скорость газовыделения $Q_\Sigma = \sum Q_i$.

Для предварительной оценки газовыделения используют значения скоростей газовыделения $Q_{эвб}$ в азотном эквиваленте, которые рассчитывают по манометрическому давлению в испытательной камере и молекулярной массе азота:

$$Q_{эвб} = \frac{p^k - (p^\phi + p^h)}{F \cdot w_{N_2}},$$

где p — давление, измеренное манометром, Па; w_{N_2} — сопротивление диафрагмы для азота, $с/м^3$.

Для металлов суммарная скорость газовыделения в 1,5—2 раза больше скорости в азотном эквиваленте.

Кинетика изменения скоростей Q выделения каждого газа, а также суммарной скорости газовыделения для коррозионно-стойкой стали показана на рис. 24.

Скорости газовыделения (суммарные и в азотном эквиваленте) для отожженных углеродистых сталей (табл. 97) уменьшаются с увеличением содержания углерода. Строительная низколегированная сталь 10ХСНД практически имеет те же значения скоростей газовыделения, что и углеродистая сталь с таким же содержанием углерода, но в 3 раза выше коррозионную стойкость во влажной атмосфере. Закалка стали У10, сопровождающаяся полиморфным превращением, резко увеличивает прочность стали, но при этом растет газовыделение [9]. Титан ВТ1, растворяющий водород в больших объемах, имеет очень малые

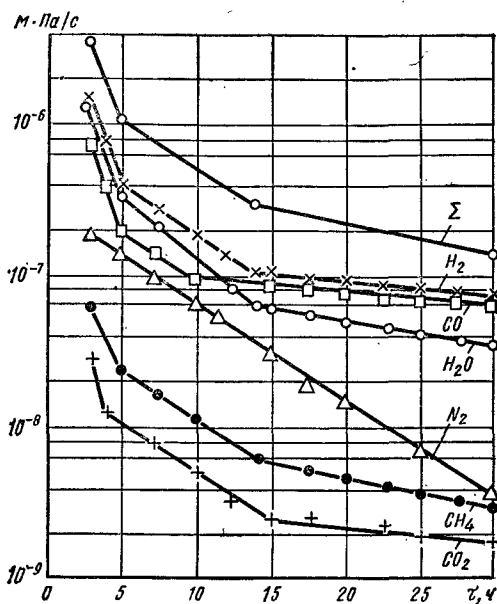


Рис. 24. Кинетика изменения скорости газотделения коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т в процессе вакуумирования при 20 °С

97. Скорости газыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С листового проката сталей, меди и титана, обработанных резанием [9, 13, 20]

| Материал | Обработка | $\tau = 5$ ч | | | | | $\tau = 30$ ч | | | | |
|----------|-----------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|
| | | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент |
| 08 | Отжиг | 8,0 | 35 | 32 | 75 | 50 | 2,0 | 2,5 | 4,5 | 9,0 | 6,0 |
| 10ХСНД | | — | — | — | — | 29 | — | — | — | — | 5,0 |
| 20, ВСтЗ | | — | — | — | — | 20 | — | — | — | — | 3,0 |
| 40 | | 16 | 4,0 | 10 | 30 | 18 | 1,5 | 0,2 | 1,6 | 3,3 | 2,0 |
| У10 | Закалка | 2,5 | 1,3 | 13 | 17 | 5 | 0,9 | 0,1 | 0,8 | 1,8 | 0,5 |
| | | 30 | 8,0 | 32 | 70 | 20 | 17 | 0,2 | 3,0 | 20 | 4,0 |
| М1 | Отжиг | — | — | — | — | 15 | — | — | — | — | 3,5 |
| ВТ1 | | Ниже фона | 12 | 7,0 | 19 | 25 | Ниже фона | 2,0 | 1,5 | 3,5 | 2,9 |

скорости выделения водорода при 20 °С, следовательно, малые суммарные скорости газыделения, значения которых, так же как для меди М1, близки к значениям скоростей газыделения и коррозии для аустенитных коррозионно-стойких сталей. Однако титан и медь, как конструкционный материал, уступают сталям по модулю упругости, вследствие чего снижается жесткость конструкции.

Химическое и термическое окисление листовой коррозионно-стойкой аустенитной стали 12Х18Н10Т (табл. 98) создает тонкие оксидные пленки на поверхности, являющиеся барьером для диффузии водорода, уменьшает скорость газыделения. Особенно эффективно окисление при 600 °С, 3 ч (выдержка попеременно в водородной и в вакуумной среде по 30 мин).

Хромистые коррозионно-стойкие стали (табл. 99) практически не уступают хромоникелевым аустенитным сталям по уровню газыделения и коррозионной стойкости. Недостатком их следует считать несколько более низкую ударную вязкость при криогенных температурах.

Способ обработки давлением и способ очистки поверхности влияет на газыделение листового проката (табл. 100 и 101).

Алюминий и его сплавы являются хорошими конструкционными материалами для вакуумной техники. По скорости газыделения (табл. 102, 103) и коррозионной стойкости во влажной атмосфере они достаточно близки коррозионно-стойким сталям, уступая им по жесткости, но превосходя в теплопроводности. Окисление, так же как и для коррозионно-стойких сталей, уменьшает скорости газыделения. По сравнению с техническим алюминием скорость газыделения несколько больше у сплавов (АЛ2) и сплавов типа АМг.

Диффузионное коррозионно-стойкое хромирование низкоуглеродистых сталей уменьшает скорости газыделения (табл. 104). Нанесение покрытий проводящих при высоких температурах (более 900 °С), что ограничивает применение такого покрытия для сварных конструкций. Ионное насыщение в тлеющем разряде предпочтительнее, так

как поверхность металла нагревается до более низких температур. Для оптимальных режимов ионного насыщения хромом из хроморганики (при 550 °С), ионное изотирование (при 600 °С), а также ионное насыщение кремнием из кремнийорганики (при 180 °С) несколько увеличивает скорости газыделения (в 1,3; 2,5; 2,7 раз соответственно), но создает покрытие коррозионно-стойкое во влажной атмосфере. Эффект повышения коррозионной стойкости наибольший для хромированных покрытий.

Газопламенное напыление алюминия создает на поверхности низкоуглеродистой стали коррозионно-стойкий слой, но для устранения эффекта шероховатости необходимо выглаживание валками или легкое окисление.

Коррозионно-стойкие покрытия эмалями (табл. 105), органические покрытия фторопластом или лаком (табл. 106) эффективно повышают коррозионную стойкость, но скорости газыделения растут на несколько порядков. Коррозионная стойкость, в отличие от металлов, растет с увеличением толщины покрытия, однако при этом повышаются скорости газыделения. На скорости газыделения влияет не только режим нанесения покрытий, но и условия эксплуатации. С увеличением влажности и длительности выдержки в такой среде скорости газыделения в вакууме растут. Кратковременный низкотемпературный прогрев в таких случаях уменьшает скорости газыделения.

Скорость газыделения полимерных материалов (каучук, резина, прорезиненная ткань, фторопласт и др.) больше, чем у сталей, и зависит от толщины материала (табл. 107, 108). Скорости газыделения листовых полимерных материалов приведены в табл. 109.

Скорости газыделения теплоизоляционного и прокладочного вакуумного материала даны при 20 °С (табл. 110). У полиэтилентетрафалата (ПЭТФ) проявляется заметное влияние напыления алюминия на газыделение. При двустороннем напылении скорости газыделения при длительном 30-часовом вакуумировании имеют те же

98. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С листового проката стали 12Х18Н10Т [9, 18, 55, 61]

| Очистка | Режим окисления | Время до испытания | $\tau = 5$ ч | | | | | $\tau = 30$ ч | | | | |
|---------------------------------|---|--------------------|--|------------------|---------------------|-------|------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|
| | | | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент |
| | | | Травление H ₂ SO ₄ | — | 13 ч | 80 | 70 | 80 | 230 | 110 | 10 | 12 |
| Пассивирование HNO ₃ | — | 13 ч | 5,0 | 5,5 | 4,8 | 16 | 9,0 | 1,2 | 1,0 | 0,4 | 2,7 | 1,5 |
| | — | 90 суток | 1,2 | 4,5 | 2,0 | 8,0 | 4,0 | 1,0 | 1,2 | 0,6 | 2,9 | 1,5 |
| | Воздух 100 °С, 1 ч | 13 ч | 4,0 | 2,2 | 1,2 | 7,8 | 4,5 | 0,9 | 0,47 | 0,26 | 1,7 | 0,9 |
| | Воздух 100 °С, 50 ч | 13 ч | 3,0 | 3,5 | 1,7 | 7,5 | 5,0 | 0,2 | 0,45 | 0,12 | 0,77 | 0,5 |
| | Вакуум 600 °С, 3 ч | 13 ч | 0,3 | 1,0 | 0,14 | 1,8 | 1,0 | 0,13 | 0,1 | 0,03 | 0,26 | 0,15 |
| | Вакуум 600 °С, 3 ч | 132 суток | 0,6 | 1,2 | 0,24 | 2,5 | 1,5 | 0,1 | 0,25 | 0,1 | 0,47 | 0,25 |
| | H ₂ /вакуум ¹ 600 °С, 3 ч | 13 ч | 0,3 | 1,0 | 0,14 | 2,0 | 0,8 | 0,10 | 0,03 | 0,02 | 0,17 | 0,08 |

¹ Выдержка по 30 мин попеременно в H₂, затем в вакууме.99. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С листового проката коррозионно-стойких сталей [18, 22]

| Материал | Обработка | $\tau = 5$ ч | | | | | $\tau = 30$ ч | | | | |
|----------|---|----------------|----------------------------|---------------------|-------|------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|
| | | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент |
| | | 08Х13 | Травление + пассивирование | 5,0 | 6,0 | 4,3 | 16 | 10 | 1,3 | 1,5 | 0,5 |
| 3,5 | 2,3 | 2,4 | | 8,3 | 4,5 | 0,75 | 0,45 | 0,6 | 1,9 | 1,0 | |
| 08Х17Т | Окисление: H ₂ /вакуум, 600 °С, 3 ч; на воздухе вылеживание 13 ч | 1,1 | 0,4 | 0,6 | 2,1 | 1,0 | 0,18 | 0,02 | 0,04 | 0,25 | 0,1 |
| 12Х17 | Травление + пассивирование | 7,0 | 5,0 | 5,0 | 1,75 | 7,0 | 1,2 | 0,6 | 0,6 | 2,5 | 2,0 |
| 15Х25Т | Шлифование | 3,5 | 6,0 | 7,6 | 17 | 12 | 0,7 | 0,1 | 1,0 | 1,9 | 1,8 |
| | Травление + пассивирование | 7,0 | 10 | 8,0 | 27 | 14 | 3 | 1,8 | 1,3 | 6,2 | 3,3 |
| | Окисление: воздух, 150 °С, 1 ч; испытание немедленное | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 2,6 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,3 | 0,9 | 0,2 |
| | Окисление: воздух 150 °С, 1 ч; выдержка на воздухе четверо суток | 4,0 | 6,0 | 8,0 | 18 | 10 | 1,5 | 1,0 | 2,1 | 4,2 | 3,5 |

100. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$ м·Па/с) в вакууме при 20 °С листовой стали 12Х18Н10Т для разных способов получения проката [12]

| Способ получения проката и очистки | Микронеровности, мкм | $\tau = 5$ ч | | | | | $\tau = 30$ ч | | | | |
|--|----------------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|
| | | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент |
| | | | | | | | | | | | |
| Горячекатаная, травление + пассивирование | Rz = 50,6 | 3,0 | 14,0 | 6,0 | 23,0 | 10,0 | 1,2 | 2,8 | 0,7 | 4,7 | 2,0 |
| Горячекатаная, травление + шлифование | Ra = 0,10 ÷ 0,26 | 5,5 | 3,0 | 3,0 | 11,5 | 11,0 | 1,5 | 0,8 | 0,3 | 2,6 | 1,5 |
| Холоднокатаная, травление + пассивирование | Rz = 10,3 | 4,0 | 4,5 | 6,0 | 16,5 | 6,5 | 1,3 | 1,0 | 0,7 | 3,0 | 1,5 |
| Холоднокатаная, травление + выглаживание валками | Ra = 0,12 ÷ 0,20 | 4,0 | 6,0 | 2,4 | 13,0 | 6,5 | 0,4 | 0,8 | 0,3 | 1,5 | 0,9 |

101. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$ м·Па/с) в вакууме при 20 °С холоднокатаной листовой стали 12Х18Н10Т после химической очистки поверхности [12]

| Механическая обработка | Химическая очистка | $\tau = 5$ ч | | | | | $\tau = 30$ ч | | | | |
|------------------------|---------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|
| | | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент |
| | | | | | | | | | | | |
| Шлифование | Бензин + ацетон | 3,0 | 4,0 | 6,5 | 13,5 | — | 1,0 | 1,8 | 0,8 | 3,6 | — |
| | Бензин + спирт | 5,5 | 3,0 | 3,0 | 11,5 | 11,0 | 1,5 | 0,8 | 0,3 | 2,6 | 1,5 |
| Выглаживание валками | Бензин + спирт | 4,0 | 6,0 | 2,4 | 13,0 | 6,5 | 4,0 | 0,8 | 0,3 | 1,5 | 0,9 |
| | Бензин + ССl ₄ | 5,0 | 4,0 | 2,0 | 11,0 | — | 5,0 | 0,4 | 0,4 | 1,3 | — |

102. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$ м·Па/с) в вакууме при 20 °С алюминия и его сплавов [55]

| Материал | Обработка | $\tau = 5$ ч | | | | | $\tau = 30$ ч | | | | |
|---------------------------|---|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|
| | | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент |
| | | | | | | | | | | | |
| АД1 (листовой прокат) | Травление (NaOH) | 200 | 250 | 120 | 570 | 300 | 11 | 7,0 | 2,0 | 2,0 | 12 |
| | Травление + пассивирование в HNO ₃ | 9 | 11 | 10 | 30 | 15 | 2,2 | 1,4 | 0,8 | 4,4 | 2,6 |
| | Окисление на воздухе 1 ч при 400 °С | 0,6 | 0,7 | Ниже фона | 1,4 | 0,7 | 0,3 | 0,16 | Ниже фона | 0,46 | 0,3 |
| | То же после 2,5 суток во влажной атмосфере | 7,1 | 5,9 | 9,3 | 23 | 6,0 | 1,1 | 0,22 | 0,87 | 2,2 | 0,9 |
| АЛ2 (литье под давлением) | Травление и пассивирование | 43 | 33 | 52 | 128 | 80 | 18 | 10 | 4,0 | 32 | 18 |
| АЛ2 (вакуумный переплав) | | 38 | 33 | 6,4 | 77 | 45 | 12 | 8 | 0,2 | 20 | 10 |
| САП (листовой прокат) | | 14 | 14 | Ниже фона | 28 | 19 | 2,2 | 2,2 | Ниже фона | 4,4 | 3,2 |

103. Скорости газовыделения для 10-часового вакуумирования при 20 °С окисленных алюминия и его сплавов [11, 21, 55]

| Сплав | Режим окисления | | | $Q_{H_2} \cdot 10^8$, м·Па/с | $Q_{\Sigma} \cdot 10^8$, м·Па/с |
|-----------------------------------|-----------------|------------|--|-------------------------------|----------------------------------|
| | t, °С | τ , ч | Среда | | |
| АД1 | Без окисления | | | 45 | 85 |
| | 200 | 1 | Воздух, испытание немедленное | 6,0 | 24 |
| | 300 | 1 | | 1,5 | 5,0 |
| 400 | 0,9 | | | 3,9 | |
| АД1 АМц АМг АМг3 АМг6 | 200 | 2 | Окисление в испытательной камере, вакуум 10 Па | 3,0 10 13 19 30 | — — — — — |

104. Скорости газыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С коррозионно-стойких слоев и покрытий на низкоуглеродистых сталях [13, 17]

| Осно- ва — сталь | Поверхностный слой или покрытие | Толщина и дополнительная обработка | $\tau = 5$ ч | | | | $\tau = 30$ ч | | | | |
|------------------------|---|---------------------------------------|--------------|------------|-------|-----------------|---------------|------------|-------|-----------------|-----|
| | | | H_2 | $CO + N_2$ | Сумма | Эквива- лент | H_2 | $CO + N_2$ | Сумма | Эквива- лент | |
| 08 | — | — | 0,8 | 35 | 75 | 50 | 2,0 | 2,5 | 4,5 | 9,0 | 6,0 |
| | Диффузионное хромирование и выглаживание | 500 мкм | 4,0 | 3,5 | 12 | 6,0 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | 1,8 | 1,0 |
| | — | — | — | — | — | 20 | — | — | — | — | 2,5 |
| | Хроморганка (ионное покрытие, 550 °С) | 70 мкм | 22 | 0,6 | 31 | 16 | 10 | 0,2 | 2,0 | 12 | 3,3 |
| 20 | Азотирование (ионное $N_2 +$ + 3 % H_2 , 400 °С, 1 ч) | 100 мкм | 90 | 15 | 110 | 34 | 13,5 | 1,5 | 2,2 | 17 | 6,0 |
| | Кремнийорганка ГМДС (ион- ное покрытие, 180 °С) | 6 мкм | 520 | 80 | 690 | 350 | 42 | 28 | 13 | 83 | 40 |
| | Газоламенное алюминием | 400 мкм | 240 | 60 | 340 | 180 | 30 | 15 | 6 | 51 | 28 |
| | Дополнительный прогрев на воздухе, 200 °С, 6 ч перед ис- пытанием | — | — | — | — | 50 | — | — | — | — | 6,6 |
| | Окисление на воздухе 400 °С, 1 ч + 2,5 суток на воздухе | — | 10 | 9,0 | 4,0 | 24 | 9,0 | 1,5 | 0,3 | 4,2 | 3,0 |
| | Выглаживание | — | 10 | 9,7 | 2,0 | 21 | 11 | 0,9 | 2,0 | — | 1,5 |

105. Скорости газыделения ($Q \cdot 10^5$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С коррозионно-стойких эмалей на низкоуглеродистой листовой стали [19]

| Эмаль | Цвет | $\tau = 5$ ч | | | | | $\tau = 30$ ч | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------|--------|------------|-------|-----------------|---------------|--------|------------|-------|-----------------|
| | | H_2 | H_2O | $CO + N_2$ | Сумма | Эквива- лент | H_2 | H_2O | $CO + N_2$ | Сумма | Эквива- лент |
| Полиуре- тановая УР-175 | Красный | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 3,1 | 2,0 | 0,7 | 0,1 | 0,4 | 1,2 | 0,6 |
| | Черный | 2,4 | 1,5 | 1,2 | 5,5 | 3,0 | 0,5 | 0,2 | 0,6 | 1,3 | 1,0 |
| | Белый | 4,5 | 5,0 | 2,7 | 12,2 | 7,0 | 1,0 | 0,6 | 0,7 | 2,3 | 1,3 |
| | Желтый | 18 | 23 | 10 | 52 | 28 | 3,7 | 4,5 | 2,6 | 11 | 8,0 |
| Перхлор- винило- вая ХВ-16 | Кремовый | 2,4 | 3,7 | 2,4 | 8,5 | 9,0 | 0,5 | 1,2 | 1,0 | 2,7 | 1,9 |
| | Белый Фисташко- вый | 9 | 30 | 3 | 42 | 27 | 4,4 | 5,2 | 1,1 | 11 | 7,2 |
| | | — | — | — | — | 30 | 2,1 | 10 | 2,5 | 14 | 6,4 |

106. Скорости газыделения ($Q_{эkv} \cdot 10^6$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С органических покрытий на стали ВСтЗ [17]

| Материал покрытия | Тол- щина, мкм | $t_{нагр}$, °С | Время до испытания | τ , ч | | |
|---|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|---|---------------------------|------|
| | | | | 5 | 30 | |
| Фторо- пласт 3 | Подслой Cr_2O_3 | 70 | 400 | Одна неделя на воздухе | 22 | 6,0 |
| | Без подслоя | 50 | | | 45 | 5,8 |
| Поли- карбонат | Без подслоя | 45 | 450 | | 18 | 5,0 |
| | ГМДС | 3 | 150 | | 11 | 2,4 |
| Лак | УР-231 | 5 | 80 | Однн месяц во влажной комна- те + 120 °С, 5 ч | 4,2 | 0,37 |
| | Фторлон 32л | 5, один слой | 150 | | Одна неделя на воздухе | 7,5 |
| | | | | 30 *1 | 0,38 *1 | |
| | | 15 | | 0,40 | | |
| | | Четыре месяца во влажной комнате | | 30 | 12 | |
| | Одна неделя на воздухе | 7,5 | 1,5 | | | |
| Один месяц во влажной комна- те + 120 °С, 5 ч | 11 | 0,75 | | | | |

*1 Покрытие на стали 08.

107. Скорости газовой выделения ($Q \cdot 10^4$, м·Па/с) каучука и резины после вакуумирования при 40 °С, 20 ч

| Материал | Цвет | Толщина, мм | $\tau = 20$ ч | | | | | Сумма | Эквивалент |
|------------------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------|-----------------|------------------|------------------|-------|------------|
| | | | H ₂ | CO + N ₂ | CO ₂ | H ₂ O | H ₂ O | | |
| Каучук ВКИ-3В | Коричневый | 0,4 | 8,0 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 9,3 | 6,0 | |
| | | 0,6 | 3,9 | 23 | 0,6 | 7,7 | 35 | 25 | |
| | | 0,8 | 15 | 10 | 1,3 | 32 | 60 | 35 | |
| Резина | Зеленый | 0,7 | 18 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 19 | 3,5 | |
| | Светло-серая | 0,7 | 13 | 1,8 | 0,8 | 0,1 | 16 | 5,0 | |
| | Белая | 1,5 | 24 | 5,0 | 1,0 | 0,8 | 31 | 11 | |
| | Двухслойная | 1,4 | 20 | 15 | 3,0 | 1,8 | 40 | 14 | |
| Прорезиненная ткань 7889 | Белая | 0,3 | 8,0 | 2,0 | 0,4 | 0,4 | 11 | 4,0 | |
| | Серо-зеленая | 0,45 | 5,0 | 2,5 | 0,4 | 0,3 | 8,3 | 2,5 | |
| | Светло-зеленая | 0,6 | 14 | 4,0 | 0,1 | 1,0 | 16 | 8,0 | |
| | Темно-зеленая | 0,6 | 40 | 10 | 1,4 | 1,2 | 53 | 20 | |
| Резина, дублированная тканью | Черная | 1,0 | 60 | 19 | 3,0 | 2,5 | 85 | 30 | |
| | Желто-красная | 1,0 | 25 | 5,5 | 3,5 | 1,6 | 38 | 10 | |
| | Красная | 0,6 | 15 | 2,0 | — | 0,4 | 18 | 6,0 | |

108. Скорости газовой выделения ($Q \cdot 10^4$, м·Па/с) резины после длительного вакуумирования

| Материал | Цвет | Толщина, мм | t, °С | τ, ч | $\tau = 20$ ч | | | | | Эквивалент |
|------------------------------|---------|-------------|-------|------|----------------|---------------------|------------------|-------|------------|------------|
| | | | | | H ₂ | CO + N ₂ | H ₂ O | Сумма | Эквивалент | |
| Резина | Зеленый | 0,7 | 20 | 10 | 19 | 3,0 | 0,9 | 23 | 6,0 | |
| | | | | 30 | 6,0 | 0,7 | 0,1 | 6,8 | 2,0 | |
| | | | | 10 | 31 | 1,4 | 0,6 | 33 | 6,0 | |
| | | | | 30 | 12 | 0,5 | 0,1 | 13 | 2,5 | |
| Резина, дублированная тканью | Красный | 0,6 | 20 | 10 | 10 | 4,0 | 0,2 | 14 | 7,0 | |
| | | | | 30 | 5,0 | 0,8 | 0,2 | 6,0 | 1,6 | |
| | | | | 10 | 32 | 5,0 | 0,7 | 38 | 10 | |
| | | | | 30 | 9,0 | 1,0 | 0,3 | 10 | 2,7 | |

109. Скорость газовой выделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С полимерных листовых материалов

| Материал | Толщина | $\tau = 10$ ч | | | | | $\tau = 30$ ч | | | | |
|-----------------------------------|---------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|
| | | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент |
| Полиэтилен-тетрафталат (ПЭТФ) | 12 мкм | — | — | — | — | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,02 | 0,2 | 0,1 |
| Поливинилхлорид | 0,2 мм | — | — | — | — | — | 11 | 0,2 | 3,8 | 15 | 6,0 |
| Эпоксидная смола | 2 мм | — | — | — | — | 90 | — | — | — | — | 40 |
| Политетрафторэтилен-фторопласт 4Д | 2 мм | 6,0 | 90 | 290 | 300 | 180 | 1,8 | 40 | 190 | 200 | 140 |
| Кремнийорганическая резина | 0,7 мм | — | — | — | — | 6000 | 6000 | 100 | 700 | 6800 | 2000 |

110. Скорости газовой выделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С теплоизоляционного ПЭТФ и прокладочного СБШ материала [16, 35]

| Материал (толщина) | $\tau = 5$ ч | | | | | $\tau = 30$ ч | | | | | |
|---|---------------------------|------------------|---------------------|-------|------------|----------------|------------------|---------------------|-------|------------|-----|
| | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент | H ₂ | H ₂ O | CO + N ₂ | Сумма | Эквивалент | |
| ПЭТФ (12 мкм) | 0,9 | 1,6 | — | 2,5 | 1,2 | 0,08 | 0,1 | — | 0,18 | 0,05 | |
| ПЭТФОА (125 мкм), одностороннее напыление алюминием | 3,1 | 5,8 | — | 89 | 5 | 0,2 | 0,4 | — | 0,6 | 0,3 | |
| ПЭТФДА (250 мкм), двустороннее напыление алюминием | 23 | 100 | 5 | 128 | 88 | 0,9 | 2,0 | — | 3,0 | 1,4 | |
| СБШС-Т (плотная стеклобумага) | Без прогрева | 5,0 | 14 | — | 19 | 6 | 0,5 | 0,9 | — | 1,4 | 0,5 |
| | После прогрева 40 °С, 2 ч | 10 | 4,0 | 13 | 27 | 12 | 1,4 | 0,2 | 1,4 | 3,0 | 1,7 |
| СБШ-Т (рыхлая стеклобумага) | После прогрева 40 °С, 2 ч | 3,0 | 1,0 | 11 | 15 | 24 | 1,4 | 0,2 | 2,4 | 4,0 | 2,4 |

значения, что и у листового алюминия. Стеклобумага после кратковременного прогрева при 40 °С заметно увеличивает скорости газыделения из-за углеводородсодержащих газов.

7. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ И ЖАРСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ

Коррозия металлов — самопроизвольное разрушение в результате взаимодействия с окружающей средой.

Электрохимическая коррозия развивается в металлических материалах, которые работают во влажной атмосфере, почве, речной и морской воде, водных растворах солей, щелочей и кислот.

Первым направлением защиты от электрохимической коррозии является нанесение на поверхность деталей электроположительных (иногда благородных) металлов. Второе, более распространенное направление, — нанесение на металлические материалы покрытий из металлов или сплавов, способных пассивизироваться в коррозионной среде, что позволяет значительно (в несколько или десятки раз) снизить коррозионное разрушение. Третье направление состоит в использовании диэлектрических покрытий на металлических материалах, которые исключают работу гальванических пар.

Конструкционные материалы в процессе обработки и эксплуатации при высоких температурах (500—600 °С) подвержены химической коррозии, которая развивается в сухих газах и жидких неэлектролитах. Наиболее часто химическое взаимодействие проявляется в кислородсодержащих средах: сухом воздухе, углекислом газе, водяном паре, кислороде, продуктах сгорания различного топлива. Активная коррозия наблюдается в среде сернистых газов и галогенных средах. Скорость химической коррозии растет с увеличением температуры, интенсивности движения газовой среды, под действием циклических напряжений, термоударов, при наличии движущихся частиц в газовой фазе, радиации и электромагнитных полей.

Для защиты от электрохимической и химической коррозии используются

покрытия на металлической и неметаллической основах, органические и неорганические.

Освоены следующие способы нанесения покрытий:

окрашивание с последующей сушкой для нанесения лакокрасочных покрытий — контактный способ;

нанесение обмазки с последующим отжигом для нанесения металлических, эмалевых и композиционных покрытий — шликерный способ (вжигание); электрохимическое осаждение покрытий из водных растворов, в расплавах солей — катодное восстановление (гальванический способ);

химическое осаждение из растворов и расплавов солей — химический способ;

напыление покрытий: плазменным, детонационным плазменным, ионно-плазменным способами;

плакирование прокаткой, газопресовой сваркой;

осаждение покрытий из газовой фазы в порошковых смесях — порошковый способ, из газового потока — прямоточным или циркуляционным методом [1];

осаждение покрытий из паровой фазы в вакууме [52];

погружение деталей в жидкие металлы и сплавы.

Качество и защитные свойства большинства покрытий определяются плотностью, равномерностью, постоянством состава покрытия на занимаемой поверхности, сцеплением с основой, в отдельных случаях чистотой поверхности покрытия, декоративным цветом и блеском.

Наиболее жесткие требования к сплошности предъявляются к катодным коррозионно-стойким покрытиям, которые изготавливают из более электроположительного материала, чем основа, а также к жаростойким покрытиям.

Катодные покрытия экранируют анодные участки. Вследствие электроположительности они долговечны, но не допускают сквозных пор, царапин, механических повреждений. При наличии несплошности в покрытии основной металл разрушается интенсивнее, чем без покрытия.

Анодные покрытия из электроотрицательных элементов при наличии несплошностей сохраняют защитные свойства.

Для контроля качества покрытий используют методы: визуальные, химические [77], электрофизические и металлографические.

Выбор покрытий должен начинаться с достаточно точного определения состава и состояния коррозионной среды. Детальное изучение микро- и макроусловий является существенным при выборе покрытий.

Важно определить способ нанесения для получения качественного покрытия и при этом не вызвать значительного изменения структуры, физических и механических свойств основы, коробления деталей.

При нанесении покрытия методом погружения кроме деформации возможен отжиг (например, латуни и меди при горячем лужении); наводороживание и охрупчивание при электрохимических видах осаждения; образование хрупких переходных зон при высокотемпературном образовании покрытий и т. д.

Возможность применения того или иного способа нанесения покрытий должна быть определена конструктором также с учетом размеров и геометрических параметров деталей. За исключением окраски с последующей сушкой или отжигом, плазменного напыления, защитные покрытия другими методами могут быть нанесены на детали мелких и средних размеров. При большинстве способов, кроме порошкового, циркуляционного и химического осаждения, получение равномерных покрытий в отверстиях, внутренних полостях, на наружных поверхностях сплошной формы невозможно или технически затруднено.

При проектировании деталей, требующих защиты от коррозии, необходимо учитывать, что они должны быть просты по конструкции, без узких и глубоких отверстий, острых углов.

Покрытия, получаемые плазменным напылением, окулированием в жидкие расплавы, детонационным напылением по равномерности, сплошности, адгезии уступают диффузионным покрытиям из газовой фазы.

Подготовка поверхности деталей перед нанесением покрытий является обязательной операцией, влияющей на сплошность, адгезию и защитные свойства покрытий. Основное требование — прочность сцепления между основой и покрытием — может быть достигнуто, если между ними нет посторонних загрязнений в виде жиров и окислов. В зависимости от состояния поверхности и метода нанесения покрытия подготовку ведут различными способами травления и обезжиривания [36, 43].

В качестве коррозионно-стойких покрытий наиболее широко используются цинк, кадмий, алюминий, хром, никель, свинец, резе олово, благородные металлы, титан и др. Применяются комплексные и многокомпонентные покрытия на их основе [14].

Цинк сравнительно медленно корродирует в атмосфере со скоростью от 1 до 15—20 мкм в год. Оцинкованный металлопродукция является наиболее распространенным материалом с защитным покрытием и используется в атмосферных условиях для защиты листового проката, метизных изделий. Толщина цинковых покрытий на стали при эксплуатации в течение пяти лет составляет в атмосфере промышленных объектов 30 мкм, в сельской местности 7 мкм, в приморских районах 15 мкм, в закрытых помещениях 7—15 мкм.

Хром обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и воде. Хромирование находит широкое применение для защиты от коррозии и эрозии деталей выпускной системы двигателей внутреннего сгорания, коллекторов отсоса газов, реакторов, баков, нейтрализаторов, отблочных колонн и других деталей химической аппаратуры, сварных конструкций теплообменников, крепежных изделий, стальных труб, листов из низкоуглеродистой стали, деталей гидронасосов для перекачки воды, нефти, масел, растворов кислот, щелочей, для повышения коррозионной стойкости электротехнических сталей.

Алюминий стоек в атмосфере. Скорость коррозии в промышленной атмосфере 2—5 мкм в год и со временем затухает. Алюминий, как правило, непригоден для защиты в морской воде,

но стоек в мягкой чистой воде, в почве и кислой химической среде. Интенсивно корродирует в местах малого доступа кислорода, склонен к контактной коррозии со сталью и медными сплавами.

Скорость коррозии кадмия под воздействием коррозионной среды линейно зависит от времени; срок действия покрытия пропорционален толщине. Кадмий обеспечивает хорошую защиту стали при воздействии конденсата в замкнутом пространстве, при погружении в стоячую или мягкую нейтральную воду, в щелочной или кислой средах. Кадмиевое покрытие толщиной 25 мкм защищает сталь в промышленной атмосфере в течение года, а в морской воде — до пяти лет. Благодаря низкому сопротивлению скручивающим усилиям кадмий используется для изделий, имеющих резьбу и подвергающихся частой сборке и разборке. Кадмий предотвращает контактную коррозию деталей с алюминием.

Свинец обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, почве, воде, серной кислоте. Покрытия получают электролитически из растворов кислых фторборатов, фторсиликатов и сульфатов. Толщина свинцовых покрытий может быть 10—100 мкм и более. Свинец надежно защищает от коррозии подземные силовые электрические коммуникации.

Свинцово-оловянистые покрытия устойчивы в атмосфере диоксида серы и оксидов азота.

Наряду с гальваническими покрытиями для защиты сталей от электрохимической коррозии получили распространение диффузионные покрытия Zn, Cr, Al и другими элементами [14].

Диффузионные покрытия могут быть использованы для защиты от коррозии и повышения коррозионной стойкости алюминиевых, медных, титановых и других сплавов [14].

Различные способы, режимы нанесения и защитные свойства коррозионно-стойких покрытий на деталях из стали, алюминия и меди приведены в табл. III—III.

Высокими защитными свойствами в атмосферных условиях при воздействии

кислот и щелочей обладают неметаллические покрытия, в качестве которых используются полиэфир, винилы, полиэтилен, стекломали, оксидные смолы. Основные недостатки таких покрытий связаны со слабой адгезией покрытия с подложкой, отслаиванием и растрескиванием покрытий, развитием коррозии под защитным покрытием при недостаточном сцеплении. В табл. II4 приведены способы нанесения, материалы и защитные свойства неметаллических покрытий.

Жаростойкие металлические и неметаллические покрытия используют для защиты деталей энергетического оборудования, испытывающих воздействие окислительной среды при высоких температурах (табл. II5).

Экономическая эффективность применения покрытий должна удовлетворять соотношению [36]

$$100 \frac{\Delta T}{T} \left(1 - \frac{L}{C}\right) - 100 \frac{\Delta C}{C} > 0,$$

где ΔT — увеличение срока службы конструкции, годы; T — срок службы конструкции, годы; L — стоимость замены конструкции; C — стоимость материалов конструкции; ΔC — добавочная стоимость мероприятий по нанесению покрытий.

Приложение. Условные обозначения способов получения покрытий.

ВИМ. Вакуумная металлизация с индукционным нагревом испаряемого металла отличается от ВРМ более эффективным использованием электроэнергии, однако приходится защищать индуктор от испаряемых металлов с температурой плавления более 1000 °С. Возникает проблема выбора материала для тигля.

ВРМ. Вакуумная металлизация с радиационным нагревом испаряемого металла осуществляется в камере с остаточным давлением не более 0,0133 Па. Пары легкоплавких металлов или сплавов, осаждающиеся на насыщаемый материал, образуют покрытие.

ВЭМ. Вакуумная металлизация с электронно-лучевым нагревом электронными пушками позволяет испарять тугоплавкие металлы, располагаемые в медном водоохлаждаемом цилиндре. Все разновидности вакуумной металлизации (ВРМ, ВИМ, ВЭМ) для получения всестороннего покрытия требуют вращения обрабатываемой детали и подогрева ее для лучшего сцепления покрытия с подложкой.

ДВКС. Диффузионное насыщение в виброкипящем слое осуществляется в специальных установках с вибрирующим контейнером, в которые загружают твердые частицы и детали. В случае азотирования в нагретый контейнер подается аммиак.

ДГП. Прямоточный способ диффузионного насыщения из газовых смесей имеет две разновидности. В первом варианте через печную камеру с диффундирующим элементом или его сплавом пропускают галогенид водорода, галюиды или их смеси с водородом или нейтральными газами. Образующиеся при нагреве галогениды диффундирующего элемента потоком газа переносятся во вторую камеру, где расположены нагретые насыщаемые детали. Отработавшая газовая смесь удаляется в атмосферу или в лучший случае нейтрализуется. При втором варианте в первую камеру установки загружают готовые галогениды или гидриды диффундирующего элемента, через которые пропускают водород или нейтральные газы (аргон, азот).

ДГЦ. Циркуляционный способ диффузионного насыщения. В замкнутой рабочей камере установки отсутствуют нейтральные (балластные) составляющие газовой смеси.

Перенос диффундирующего элемента на обрабатываемые детали осуществляется в результате обратимых химических реакций. По сравнению с порошковым и прямоточным способами циркуляционный является более производительным, безвредным и экономичным.

ДКС. Диффузионное насыщение в «кипящем слое», Псевдоожженная среда в тигле печи получается в результате продувки газом засыпки, состоящей из твердых мелких частиц (например, корунда). Продувая соответствующие газы, в «кипящем слое» проводят цементацию или нитроцементацию стальных изделий. Продувая смесь аргона с йодом через слой, состоящий из порошка оксида алюминия и кремния (10%), получают силицидное покрытие на молибдене.

ДПМ. Разновидность диффузионного насыщения из порошковых смесей. Источником диффундирующего элемента является его оксид. В состав смеси входят восстановитель — алюминий — и активатор. Во избежание перегрева для поглощения теплоты алюмотермической реакции восстановления в смесь вводят «балластную» добавку в виде порошка оксида алюминия.

ДПО. Обычный способ диффузионного насыщения из порошковых смесей с активаторами. Герметизированные контейнеры с обрабатываемыми деталями, засыпанными порошковой смесью, загружают в печь для изотермической выдержки. Порошковая смесь состоит из диффундирующего элемента или сплава на его основе, порошка шамота или оксида алюминия. В качестве активаторов в количестве 1—7% (по массе) добавляют галогениды аммония, чаще хлористый аммо-

111. Коррозионно-стойкие покрытия [14, 43, 48, 73, 78, 80, 81, 83, 85] (способ получения покрытия см. приложение к параграфу 7)

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемый материал | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий |
|---------------------------|---------------------------------|---|--|---|
| ОЭГ | Кадмий, 3—6 | Посадочные поверхности стальных деталей | В цинкислых электролитах (CdO, Cd, NaCN) с температурой 20—35 °С при плотности тока $J = 0,015 \div 0,02$ А/м | Внутри помещений |
| ОЭГ | Цинк, 6—9 | Стальные детали | В щелочных электролитах $[Zn(CN)_2, NaCN, NaOH]$ с температурой 40—50 °С при плотности тока $J = 0,01 \div 0,02$ А/м | То же |
| ОЭГ | Кадмий, 21—24 | Стальные штампованные детали | То же | Тропический климат, внутри помещений |
| ОЭГ | Кадмий, цинк, 3—9 | Стальные резьбовые и крепежные детали с шагом резьбы 0,4—0,8 мм | » | Внутри помещений |
| ХОР | Фосфатное | Стальные пружины, детали сложной формы | Из растворов, содержащих препарат МАЖЕФ | То же |
| ПНП | Медь, 100—200 | Стальные детали | Распыление пистолетом-металлизатором | Защита стали от цементации в науглероживающей среде |
| ПНП | Алюминий, 100—200 | Стальные металлоконструкции | То же | Защита от коррозии в атмосферных условиях |

| | | | | |
|-----|------------------------------|--|---|--|
| ПНП | Цинк, до 200; кадмий, до 300 | Детали, элементы конструкций мостов, портовых и гидротехнических сооружений, морских и речных судов. Опоры электрических передач | То же | В атмосферных условиях, при воздействии паров пресной и морской воды |
| ДРМ | Цинк, 20—40 | Стальные трубопроводы, нефтепроводы, шайбы, болты, детали сложного профиля | Диффузионное цинкование с последующим хромированием | В условиях влажной атмосферы, воздействия морской воды |
| ОЭГ | Кадмий, цинк, 9—12 | Стальные пружины с диаметром проволоки до 1 мм | — | В атмосфере и внутри помещений |
| ОЭГ | Кадмий, цинк, 12—15 | Стальные пружины с диаметром проволоки более 1 мм | — | То же |
| ОЭГ | Цинк, кадмий, 6—30 | Стальные детали, требующие защиты от коррозии при сохранении электропроводности | — | То же |
| ОЭГ | Олово, 9—12 | Стальные детали | Из кислых или щелочных электролитов | В среде сероуглерода и при контакте с серой |
| ОЭГ | Свинец, 200 | Стальные детали | Из сульфатных и фторборатных электролитов | Химическое производство, серная кислота |
| ХОР | Никель, 9—24 | То же | Осаждение никеля из раствора $NiCl_2 \cdot 6H_2O, Na_2H_2PO_4 \times 10H_2O, CH_3COONa$ | Детали машин и приборов сложной формы и с глухими отверстиями |

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемый материал | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий |
|---------------------------|--|---|---|--|
| ДГП | Слой оксинитридов и оксикарбонитридов | Детали из сталей и титановых сплавов | Обработка в среде аммиака с автоматическим поддержанием степени диссоциации при температуре 400—600 °С | Повышение коррозионной стойкости и износостойкости |
| ПНП | Сплавы никеля и кобальта | Детали из чугуна и инструмент | Нанесение покрытий с помощью плазменной установки Colmoloy Fusewelder путем напыления порошка и одновременного оплавления | Повышение коррозионной стойкости, термостойкости, износостойкости. Восстановление изношенных деталей |
| ДРС | Нитриды и сульфиды железа | Детали из чугуна и сталей | Процесс SUR—SULF диффузионное нитросульфидирование в соляных ваннах при 560—570 °С | Повышение износостойкости и коррозионной стойкости |
| КЭП | Сплав (90—93) % Ni + (7—10) % P с дисперсными включениями синтетических алмазов диаметром 0,1—10 мкм | Стальные детали | Электролитическое осаждение | Повышение коррозионной стойкости и износостойкости деталей насосов, текстильного оборудования |
| ПНП | Молибден и другие тугоплавкие металлы | Стальные и чугунные детали, порошковые кольца, пальцы цилиндров | Плазменная металлизация | Повышение коррозионной стойкости и износостойкости |

16 ДПО, ДПИ
В. Н. Арамазов и др.

| | | | | |
|-----|--------------------|--|--|--|
| | Хром, азот, 80—120 | Детали из сталей 12Х18Н9Т, работающие в условиях повышенных температур, эрозийного изнашивания | Хромирование в смеси: 70 % Cr, 29 % Al ₂ O ₃ , 1 % NH ₄ Cl при 1060 °С, 15—18 ч. Азотирование при 1060 °С, 3 ч в среде азота особой чистоты | — |
| ДМП | Хром, 60—90 | Алюминиевые сплавы АЛ2, Д16 | Хромирование в смеси: 98 % (30 % Al ₂ O ₃ + 70 % (85 % Cr ₂ O ₃ + 15 % Al)) + 2 % NH ₄ Cl при 500 °С, 10 ч | Скорость коррозии сплава АЛ2 в 10 %-ной HNO ₃ снижается в 2 раза, сплава Д16 в 1,5 раза; в 30 %-ной H ₂ SO ₄ : сплава АЛ2 — в 4 раза, сплава Д16 — в 1,5 раза. Испытания в течение 75 ч |
| ДМП | Хром, 28 | Алюминиевый сплав АМц | То же | Скорость коррозии в 10 %-ной HNO ₃ снижается в 1,5 раза, в 30 %-ной H ₂ SO ₄ — в 2 раза |
| ДМП | Железо, титан | Медь М1, латунь Л62 | Ферротитанирование при 700 °С, 6 ч | Снижение скорости коррозии сплава М1 в 20 %-ной HCl в 30 раз, сплава Л62 в 4 раза при времени испытания 300 ч |
| ДМП | Титан | Стали 35Л, 45, чугуны СЧ18, ВЧ 50 | Титанирование при 1000—1200 °С, 4—6 ч в смеси: 93 % (30 % Al ₂ O ₃ + 70 % (70 % TiO ₂ + 30 % Al)) + 5 % AlF ₃ + 2 % NH ₄ Cl | Практически не корродируют, наблюдаются следы коррозии |
| ДМП | Кремний, хром, 185 | Титан ВТ1 | Диффузионное насыщение при 900 °С, 4 ч | Снижение скорости коррозии в 35 %-ной HCl при 20 °С за время 50 ч в 2 раза |

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемый материал | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий | |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------|--|--|--------|
| ДПО | Хром | Железо | Состав смеси: 96,2 % (21 % Al_2O_3 + 79 % Фх025) + 3,8 % NH_4Cl ; 1200 °C; 6 ч Состав смеси: 97,2 % (27 % Al_2O_3 + 73 % Фх025) + 2,7 % NH_4Cl ; 1075 °C, 6 ч | Δm , г/м ² : 20 — в HNO_3 , 2 — в NaCl за 75 ч при 20 °C 97 — в HNO_3 , 1 — в NaCl за 75 ч при 20 °C | |
| | » | У8 | | | |
| ДПМ | Хром, алюминий | Железо | Состав смеси: 95,8 % (37,5 % Al_2O_3 + 62,5 % (62 % Cr_2O_3 + 38 % Al) + 4,2 % NaF; 1060 °C; 6,5 ч Состав смеси: 95,8 % (37 % Al_2O_3 + 63 % (63 % Cr_2O_3 + 37 % Al) + 4,2 % NaF; 1040 °C; 5,5 ч Состав смеси: 97 % (50 % Al_2O_3 + 50 % (65 % SiO_2 + 35 % Al) + 3 % NaF; 1000 °C, 6 ч То же Состав смеси: 98 % (40 % Al_2O_3 + 60 % (25 % Al + 75 % (85 % Cr_2O_3 + 15 % SiO_2))) + 2 % NH_4Cl ; 1050 °C, 7 ч То же Состав смеси: 96,6 % (36,5 % | Δm , г/м ² : 973 — в HNO_3 , 17 — в NaCl за 75 ч при 20 °C Δm , г/м ² : в HNO_3 — 87, в NaCl — 15 за 75 ч при 20 °C Δm , г/м ² : 1540 — в HNO_3 , 5 — в NaCl за 75 ч при 20 °C Δm , г/м ² : 463 — в HNO_3 , 2 — в NaCl за 75 ч при 20 °C Δm , г/м ² : 23 — в HNO_3 , 2 — в NaCl за 75 ч при 20 °C Δm , г/м ² : 10 — в HNO_3 , 3 — в NaCl за 75 ч при 20 °C Δm , г/м ² : 266 — в HNO_3 , | |
| | » | То же | | | У8 |
| | » | Алюминий, кремний | | | Железо |
| | » | То же | | | У8 |
| | » | Хром, кремний | | | Железо |
| » | То же | У8 | | | |
| » | Титан, алюминий | Железо | Состав смеси: 96,6 % (36,5 % | | |

Al_2O_3 + 63,5 % (41 % TiO_2 + 59 % Al) + 3,4 % AlF_3 ; 1080 °C, 7 ч 2 — в NaCl за 75 ч при 20 °C

Обозначение. Δm — потеря массы.

112. Коррозионно-стойкие покрытия для деталей из алюминия и его сплавов [43, 48]

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемые детали | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение |
|---------------------------|---|--|---|--|
| ОЭГ | Медь—никель; общая толщина 15—27 | Детали приборов и машин, требующие декоративной отделки и защиты от коррозии | Медь из цинкистых, пирофосфатных и фторборатных электролитов, никель из электролита типа Уоттса | В любых условиях |
| | Кадмий, 9—12 | Детали, находящиеся в контакте с медными деталями | — | Внутри помещений и в условиях повышенной влажности |
| ОЭГ | Свинец, 51—54 | Детали машин | Из сульфатных и фторборатных электролитов | В контакте с H_2SO_4 |
| | Хром, 51—54 | Детали машин из литейных сплавов | — | В контакте со щелочами |
| ХОР | Оксидно-фосфатное, 2 | Детали из деформируемых и литейных сплавов | — | Внутри помещений и в атмосфере |
| | Оксидное и с наполнением в хромпике, 10 | Детали из коррозионно-стойких сплавов АМг, АМц, деформируемых сплавов АК-4, АК-6, Д16, В95 | Анодное окисление в хромпике | Внутри помещений |
| | Оксидное | Детали, требующие декоративной обработки | Анодное окисление в H_2SO_4 с последующим окрашиванием в различных красителях | В атмосферных условиях |

113. Коррозионно-стойкие покрытия для деталей из меди и медных сплавов [43, 48, 82]

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемые детали | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий |
|---------------------------|---------------------------------|--|--|---|
| ОЭГ | Никель, 3—6 | Детали высокой точности | В ванне: $H_2SO_4 \cdot 7H_2O$, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$, H_3BO_3 при плотности тока $J = 0,025 \div 0,1$ А/м ² | Внутри помещений |
| ОЭГ, ХОР | Кадмий, 9—24 | Детали, сопрягаемые с алюминием и коррозионно-стойкими сталями | Гальваническое осаждение с последующим хромированием | Снижение контактной коррозии. Внутри помещений. В атмосфере и внутри помещений тропического климата |
| | Олово, 3—12 | Резьбовые детали в контакте с алюминием и коррозионно-стойкими сталями | В щелочном электролите при плотности тока $J = 0,09 \div 0,1$ А/м и температуре 60—90 °С | Внутри помещений |
| | Никель, 6—12 | Детали с точностью 3—7-го качества | В высокохлористом электролите типа Уоттса | То же |
| | Никель, 3—12 | Резьбовые детали | То же | В атмосфере и внутри помещений |
| | Никель, 3—12 | Пружины, мембраны | » | То же |
| | Кадмий, 6—12; олово, 9—12 | Пружины | — | » |

484
Материалы, устойчивые к температуре в рабочей среде

| | | | | |
|-----|--|---|--|--|
| ОЭГ | Никель + хром; общая толщина 3—6, 9—12 | Детали высокой точности, резьбовые детали | Никель в электролите типа Уоттса, хром в стандартном электролите CrO_3 , H_2SO_4 | Внутри помещений |
| | Никель, хром, 6—9, 21—24 | Детали со свободными размерами | То же | Внутри помещений, во влажной атмосфере |
| | Золото, 1—2, 6—9, 12—15, 18—21 | Ювелирные изделия, корпуса часов | В цианистых калиевых электролитах | В любых условиях |
| | Никель, 6, кадмий, 3; общая толщина 9—12 | Детали, работающие при температурах до 300 °С | — | — |
| | Кадмий, 24—30 | Детали машин и приборов | В цианистых электролитах | Влажная атмосфера, морские условия |
| | Хром, 30—33 | Детали машин | В электролите CrO_3 , H_2SO_4 при плотности тока 0,1 А/м и температуре 45—50 °С | Контакт с паром |
| ХОР | Никель, 9—15 | Детали сложной формы | — | Внутри помещений и в условиях повышенной влажности |
| | Оксидное черное, до 2 | Детали приборов, крепежные детали | Химическое оксидирование | Внутри помещений |

Коррозионно-стойкие и жаростойкие покрытия
485

114. Коррозионно-стойкие неметаллические покрытия [24, 33, 79, 82]

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемый материал | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий |
|---------------------------|---------------------------------|--|--|--|
| ПЛ | Поливинилхлорид, 200—300 | Листовая сталь шириной до 1 м, толщина $(0,5 \div 1,0) \times 10^{-3}$ м | Приклеивание поливинилхлоридной пленки на предварительную поверхность листа клеем ВИЛАД-6К | Устойчив в 50 %-ной H_2SO_4 , 5—10 %-ной HNO_3 и HCl , 10 %-ной $NaCl$, в хромовом ангидриде, аммиаке, бензине. Теплостойкость $+70^\circ C$. Хладостойкость $-40^\circ C$ |
| ДШ | Эмаль | Стальные трубы | Отжиг шликера скоростным печным нагревом | Устойчив в условиях атмосферной и подземной коррозии. Срок службы в 4—5 раз выше, чем труб из стали типа X18H10T |
| | Полнэтилен, 2050—5000 | Стальные трубы диаметром до 1,5 м | — | Устойчив в агрессивных средах; хладостойкость до $-80^\circ C$. Недостаток — слабая адгезия к стали, возможно растрескивание при транспортировании газа и нефти под большим давлением |
| | Стеклоэмаль | Трубы горячего водоснабжения | — | Увеличение срока службы теплопроводов в 5—6 раз. Подземные трубопроводы |

| | | | | |
|----|--|--|---|---|
| ДШ | Эпоксидные смолы ЭД-16, 70—20; титановый порошок | Стали, железобетон | Окрашивание поверхности слоем 0,8—1 мм с последующей полимеризацией в течение 12—16 ч | Увеличение срока службы в 5—6 раз. Строительные конструкции, емкости гальванических ванн |
| | Полиэфир, винилы, эпоксидные смолы с наполнителем в виде стеклянных чешуек. Толщина покрытий до 3 мм | Стали | Окрашивание поверхности шликером с последующей сушкой или полимеризацией | Устойчивы в условиях химической и электрохимической коррозии. Нефтехимические производства, мостостроение |
| ПЛ | SiO_2 на растворной связке, 10—15 | Электропроводящие материалы, материалы термoeлектрических датчиков | Отжиг при $850^\circ C$, 30 с | Устойчивы в условиях электрохимической и газовой коррозии |
| | Al_2O_3 на растворной связке, 10—15 | | Отжиг при $800^\circ C$, 30 с | |
| | Cr_2O_3 на растворной связке | | Отжиг при $800^\circ C$, 25 с | |
| | Виниловая пленка на клеевой основе, 100—250 | Стальные и алюминиевые листы | Приклеивание пленки | Материал с покрытием характеризуется гибкостью при деформировании, допускает глубокую вытяжку |
| — | Эпоксидная смола с добавками отвердителя, пигментов наполнителя и других компонентов | Стальные трубы больших диаметров | Нанесение порошка на горячий металл с одновременным оплавлением | Устойчиво в условиях атмосферной и подземной коррозии, высокая механическая прочность |

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемый материал | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий |
|---------------------------|---|--|--|--|
| ПН | Эпоксидная смола | Стальные трубы диаметром 0,2—2 м | Одновременная намотка стальной ленты эпоксидной смолы и стеклоткани | Трубопроводы для питьевой воды, сточных вод, транспортирование газа и нефти под давлением |
| — | Покрытие на основе смолы PUR/TAR, 1500 | Трубы | — | Высокая коррозионная стойкость, износостойкость, теплостойкость, эластичность, хорошая адгезия к металлу |
| ПН | Покрытие «Poliken»: слой грунтовки, противокоррозионная липкая лента, внешняя защитная пленка | Стальные трубы | — | Устойчив к химической и электрохимической коррозии и механическим повреждениям |
| ПЛ | Полиэтилен | Глубоководные основания мостов и морских причалов из коррозионно-стойкой стали | Приклеивание полиэтиленовой пленки с помощью модифицированных полиэтиленовых клеящих веществ | Срок службы в 4 раза выше, чем труб из коррозионно-стойкой стали |

115. Жаростойкие покрытия [15, 32, 38, 39, 56, 60, 63, 72, 84]

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемый материал | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|--|---|
| ДПО | Кремний, 110—120 | Молибден | Силицирование в порошковой смеси (60 % Si + 35 % шамота + 3 % NH ₄ Cl) при температуре 1100 °С, 8 ч | Жаростойкость при 1700 °С, 50 ч |
| ДРМ | Кремний, 340 | Молибден | Силицирование в расплаве медь — 16,5 % Si при температуре 1300 °С, 2 ч | Жаростойкость при 1600 °С, 250 ч |
| ДГП | Кремний и бор | Молибден с 0,5 % титана | 1. Борирование в потоке трехфтористого бора с расходом газа 2 л/мин при 1100 °С, 1 ч 2. Силицирование в тетрахлориде кремния при 1100 °С, 6 ч | Жаростойкость при 1200 °С, 2942 ч |
| ДГЦ | Кремний, 120 | Молибден М4 | Силицирование циркуляционным методом в исходной среде (SiCl ₄ : H ₂ = 1 : 1, аргон, кристаллический кремний) при общем давлении 10 ⁶ Па в течение 8—9 ч. Температура молибдена 1125 °С, кремния 1200 °С | Жаростойкость при 1300 °С, 220 ч |

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемый материал | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------|---|---|
| ДПЦ, ИХТО | Кремний, 100—120 | Молибден М4 | Силицирование циркуляционным методом в тлеющем разряде в среде SiCl_4 , Si при давлении 200—260 Па в течение 2—2,5 ч. Температура молибдена 1300 °С, кремния 1100 °С | Жаростойкость при 1300 °С, 450 ч |
| ДРМ | Алюминий, кремний, хром 200—300 | Сплав ВМ1 | Диффузионное насыщение из расплава с температурой 830—850 °С в течение 8 мин | Жаростойкость при 1300 °С, 250 ч |
| ДПО | Кремний, 40 | Вольфрам | Силицирование в порошковой смеси (кремний + 10 % NaF + 5 % NH_4Cl) при 1065 °С, 8 ч | Жаростойкость при 1815 °С, 10 ч |
| ДПО | Кремний, титан, 38—76 | Ниобий и его сплавы | Насыщение из порошковой смеси (67—75 % кремния и титана в отношении 1 : 1, 20—25 % Al_2O_3 , 5—9 % AlF_3) в токе аргона при 930—1040 °С, 16 ч. Окислительный отжиг при 980 °С, 25 ч | Жаростойкость при 982 °С, 5000 ч |

| | | | | |
|-----|---|--|--|---|
| ДПО | Кремний, бор, хром, 50 | С103 (Nb + 10 % Hf + Ti), Д31 (Nb + 10 % Ti) | Насыщение из порошковой смеси в две стадии: 1. силицирование в смеси (60 % Si, 6—10 % активатора, остальное Al_2O_3) при 1150 °С, 16 ч; 2. хромоборирование в смеси (30 % Cr, 30 % ферробора, 4 % активатора, остальное Al_2O_3) при 1200 °С, 16 ч | Жаростойкость при 1425 °С, 11,4—14,5 ч (при испытании образцы через каждый час охлаждали с 1425 °С и снова нагревали) |
| ДПО | Бор, кремний, 100 | Ta + 30 % Nb + 7,5 % V | Насыщение из порошковой смеси в две стадии: 1. борирование с добавкой NaF при 1205 °С, 4 ч; 2. силицирование с добавкой NaF при 1315 °С, 6 ч | Жаростойкость при 1480 °С, 115 ч |
| ПНП | Al_2O_3 со стекловидной пленкой | Ниобий, тантал | Al_2O_3 наносится плазменным методом, затем наносится стекловидный шлак в воде и спекается при 1482 °С | Стойкость покрытия при 1370 °С 150 ч, высокая термостойкость |
| ДПО | Алюминий | Жаропрочные сплавы | Насыщение алюминием из смеси (98 % ферроалюминия + 2 % NH_4Cl). Размер гранул порошковой смеси 2—4 мм | Покрытие используется при температурах 850—1100 °С для лопаток газовых турбин |
| ДПО | Алюминий, хром, кремний | То же | Насыщение в смеси (45 % Al_2O_3 + 50 % (70 % Al + 15 % Cr + 15 % Si)) + 5 % NH_4Cl при 850 °С, 5 ч | Высокая жаростойкость и сопротивление сульфидной коррозии |

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемый материал | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий |
|---------------------------|--|---------------------|--|--|
| ДПО | Алюминий, хром | Жаропрочные сплавы | Состав смеси для нанесения покрытия на внутреннюю поверхность лопаток: 45 % Cr, 10 % Al, 0,5 % NH ₄ Cl, остальное Al ₂ O ₃ . Смесь для внешней засыпки: 20 % Cr, 11 % Al, 14 % Si, 0,5 % NH ₄ Cl, остальное Al ₂ O ₃ . Покрытие наносится при 982 °С, 5 ч в среде водорода | Повышение жаростойкости внутренних и наружных поверхностей полых лопаток ГТД |
| ДШ | Алюминий, хром, р. з. м. | То же | Шликер состава (25—50 % Cr, остальное соединения алюминия с р. з. м.) на органической связке отжигается при 1100 °С, 2—3 ч в водороде | Повышение жаростойкости лопаток турбин путем улучшения сцепления оксидной пленки с покрытием |
| ДШ | Алюминий, хром, иттрий | То же | Состав шликера: 85—91 % Al, 8—10 % Cr, 1—5 % никельиттриевой лигатуры с 20 % иттрия | Лопатки турбин |
| ОЭГ | Платина, 7; алюминий. Общая толщина покрытия 50—70 | То же | Платина наносится в электролите гексахлороплатиновой кислоты, фосфорнокислого аммония и диитрийфосфата. Алюминирование в смеси (5 % Al + 95 % Al ₂ O ₃) при 1100 °С, 2,5 ч в среде водорода | Высокая жаростойкость. Улучшение сцепления оксида с покрытием. Снижение напряжений в оксидной пленке. Лопатки турбин |
| ДШ | Алюминий, платина | То же | Состав шликера: 50 % Al, 50 % Pt. Отжиг в вакууме при 1200 °С, 0,5 ч | Большой расход платины |
| ВЭМ | Никель + 20—35 % Cr + 15—20 % Al + 0,5—0,3 % Y, 120—150 | То же | Покрытие наносят на спецоборудовании в вакууме 1,33·10 ⁻² Па при температуре деталей 950 ± 30 °С, 5—10 мин. Для устранения радиальных пор покрытие подвергается наклепу стеклянными шариками диаметром 200 мкм | Высокие жаростойкость и пластичность. Наличие пор и невысокая связь покрытия с подложкой |
| ВЭМ | Кобальт + 26—32 % Cr + 3—9 % Al + 0—1 % Y | То же | То же | Повышенная термостойкость покрытий. Лопатки турбин |
| ВЭМ | Никель + 26÷35 % Co + 14÷22 % Cr + 10÷13 % Al + 0,01÷1,0 Y | То же | » | Стойкость к сульфидной коррозии в 2—2,5 раза выше алюминидных покрытий из порошков. Лопатки турбин |
| КИБ | Кобальт — хром — алюминий — иттрий | То же | Катодное распыление ионами аргона материала покрытия в вакууме 1,3·10 ⁻¹ Па с последующим осаждением его на подложку | Отличное сцепление с подложкой. Отсутствие пор в покрытии |

| Способ получения покрытия | Материал, толщина покрытия, мкм | Защищаемый материал | Условия и режимы получения покрытий | Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий |
|---------------------------|---|--|---|--|
| ПНП в вакууме | Кобальт + 29 % Cr + 6 % Al + 1 % Y, 127—178 | Жаропрочный сплав IN — 738 | Напыление в потоке аргона и гелия порошком сплава с размером частиц 37 мкм; закалка в вакууме при 1121 °С, 2 ч и старение в аргоне при 843 °С, 24 ч | При температуре 871 °С стойкость в 5 раз выше, чем у незащищенного сплава |
| ДШ, ДПО | Кобальт — хром — алюминий — никель — иттрий | Жаропрочный сплав Reиэ 125 | Нанесение шликера (55 % Co, 20 % Ni, 25 % Cr, 0,5 % Y) с отжигом в порошковой смеси для алитирования. Покрытие содержит 15—17 % Al | Защитные покрытия аналогичны электроионо-лучевому покрытию подобного состава |
| ВЭМ | Никель + 18 % Cr + 12 % Al + 0,3 % Y, 123 | Жаропрочный эвтектический сплав: никель + 19,7 % Nb + 6 % Cr + 2,5 % Al | | Стойкость к газовой коррозии при циклической смене температуры 1000 ч при 1093 °С |
| ДРМ | Алюминий — хром — кремний | Молибден ВМ1 | Покрытие наносится в расплаве Al—Cr—Si—Mo при 830—850 °С, 8 мин | Жаростойкость при 1350 °С, 250 ч; при 1500 °С, 30 ч |
| ДПО | Алюминий — хром — кремний, 50 | Ниобиевые сплавы: 1. Nb + 1 % Zr 2. Nb + 10 % Hf + 1 % Ti 3. Nb + 10 % Mo + 10 % Ti | Диффузионное насыщение в две стадии: силицирование в смеси (60 % Si, 6—10 % активатора, Al ₂ O ₃ остальное) при 1150 °С, 16 ч; хромоалитирование в смеси (35 % Cr, 20 % Al, 4 % активатора, Al ₂ O ₃ остальное) при 1260 °С, 16 ч | При термоциклировании по режиму: 1425 ± 25 °С, стойкость покрытий на сплавах: 1. 8,8 ч 2. 9,0 ч 3. 10,9 ч |

| | | | | |
|----------|--|------------------------|--|---|
| ДПО | Алюминий — кремний | Медные сплавы | Насыщение при 600—800 °С, 2—6 ч в смеси 50 % (40—60 % Al + (60—40 %) Si) + 48 % Al ₂ O ₃ + 2 % NH ₄ Cl | При 900 °С жаростойкость в 4 раза выше, чем алитированных |
| ДГП, ДПО | Алюминий — хром | Медь | Алитирование прямоточным методом при 950 °С, 2 ч в среде AlCl ₃ ; хромирование при 1000 °С, 8 ч в порошковой смеси (50 % Cr + 43 % Al ₂ O ₃ + 7 % NH ₄ Cl) | Повышение стойкости сопла плазматрона в 2—4 раза |
| ДПО | Алюминий, 70—210 | XH35T, XH10K, X16H25M6 | Алитирование при 1050 °С, 6—8 ч в смеси (99 % FeAl + 1 % NH ₄ Cl); старение при 750—800 °С, 6—10 ч | Детали энергетического оборудования |
| ДПО | Хром — борид циркония ZrB ₂ | Тантал | — | При 2100 °С стойкость 6—20 мин |
| ДПО | Двухслойное: первый слой — хром или CrAl; второй слой — кремний или SiCr | Молибден | — | При 1600 °С стойкость 3—5 ч |
| ДКС | Кремний | Ниобиевый сплав FS—82 | Насыщение деталей в среде йода и порошка кремния при 1040 °С, 3 ч в герметичной реторте | При 1500 °С стойкость покрытия 3 ч |

ний, которые значительно ускоряют процесс диффузионного насыщения вследствие образования субгалогенидов диффундирующего элемента.

ДРМ. Диффузионное насыщение из легированных металлических расплавов. Протравленные и промытые изделия после небольшой выдержки в слое флюса погружают на некоторое время в расплав. После охлаждения на воздухе для ответственных изделий проводят диффузионный отжиг при 950—1000 °С.

ДРС. Диффузионное насыщение из расплавов солей. В расплав, состоящий из смеси солей хлористого бария и натрия, добавляют диффундирующий элемент и его галогениды. Во время изотермической выдержки деталей при 1000—1200 °С происходит диффузионное насыщение (например, хромирование).

ДШ. Диффузионное насыщение из суспензий (шликерный способ) заключается в том, что суспензию наносят окраской, окунаем или пульверизацией на хорошо очищенные поверхности деталей, а после сушки на воздухе отжигают в вакууме, аргоне или в воздушной атмосфере. Температура и время отжига в печах определяют толщину диффузионного покрытия. Суспензию готовят из тонких порошков диффундирующих элементов и органического (жидкого) связующего.

ДЭП. Диффузионное насыщение из паст отличается от шликерного способа высокой производительностью вследствие скоростного электронагрева ТВЧ поверхности обрабатываемой детали, на которую нанесен слой пасты. Пасту готовят из тонких порошков диффундирующего элемента, флюса (например, криолит) и связующего (на-

пример, гидролизированный этилсиликат). В состав различных паст входят, как правило, галоидные соединения, которые активизируют диффузионное насыщение.

ДЭС. Электролизный способ диффузионного насыщения из расплавов солей основан на пропускании постоянного тока через расплав соли. Обрабатываемая деталь является катодом, а графитовый электрод или тигель печи — анодом. В результате протекающих в ванне электролизных процессов диффузионное насыщение интенсифицируется. Наиболее разработанным является способ электролизного борирования в расплаве буры.

ИЛ. Ионное легирование (имплантация) поверхности становится возможным при больших энергиях бомбардирующих ионов. Ускорители, дающие пучки ионов бора с энергией в несколько сот килоэлектронвольт, позволяют получить глубину имплантации в кремний всего 1 мкм. Для более тяжелых ионов и больших глубин имплантации требуются более мощные ускорители. Можно «вбивать» атомы любого элемента в любой материал.

ИХТО. Ионная химико-термическая обработка — прогрессивный способ азотирования, цементации, нитроцементации, силицирования, алитирования и т. д. в ионизированных газовых средах. В специальных установках все поверхности обрабатываемых деталей (катодов) бомбардируются ионами диффундирующих элементов в плазме глеющего разряда, в результате чего происходит очистка, разогрев и диффузионное насыщение деталей. Для высокотемпературных процессов (цементация, силицирование и др.) вводится дополнительный ра-

диационный нагрев деталей. В результате автоматизированного управления процессом получают диффузионные покрытия высокого качества.

КИБ. Конденсация покрытия при ионной бомбардировке осуществляется в специальных установках («Булат», «Пуск» и др.). После ионной очистки обрабатываемой поверхности (катода) распыленные электродугой частицы металла соединяются с подаваемым в установку газом (например, азотом) и осаждаются на изделие (например, в виде нитрида титана).

КЭП. Композиционные электролитические покрытия отличаются от обычных гальванических тем, что содержат мелкие твердые частицы (до 100 мкм), придающие покрытию износостойкие или антифрикционные свойства. В электролит вводят карбиды, нитриды, бориды, оксиды, сульфиды и другие частицы в зависимости от назначения покрытия.

ЛПЛ. Лазерное поверхностное легирование позволяет осуществлять локальную химико-термическую обработку при скоростном нагреве поверхности лазерным лучом. Диффундирующий элемент в виде порошка, составляющей пасты или гальванического покрытия наносится на обрабатываемую поверхность детали или поступает из окружающей ее газовой среды.

ОЭГ. Электролитическое осаждение металлов (гальваническое покрытие). Перед нанесением гальванического покрытия поверхности детали необходимо тщательно очистить (обезжирить и протравить). Плотность тока на поверхности катода (детали), температура и состав электролита обеспечивают заданное качество покрытия. Гальваничес-

ким способом можно осаждавать не только металлы, но и сплавы.

ПЛ. Плакирование листами металла. Осуществляется на прокатных станах при соответствующей подготовке плакируемой поверхности. Полимерные листы приклеивают к защищаемой стальной поверхности.

ПН. Плакирование намоткой. Производится на специальных станках. Используется металлическая или полимерная лента.

ПНП. Плазменное напыление покрытий. Этот способ отличается большой производительностью и универсальностью, так как в плазменную высокотемпературную струю аргона, направленную на обрабатываемую поверхность изделия, можно вводить смеси порошков любых тугоплавких материалов. Однако и плазменные покрытия имеют значительную пористость (около 10 %).

СД. Детонационный способ позволяет получить беспористые покрытия на наружных поверхностях изделий. Обрабатываемую поверхность обстреливают горячими частицами (около 3000 °С) материала покрытия. В стволе специальной установки периодически взрывается смесь ацетилена с кислородом.

ХОГ. Химическое осаждение из газовых смесей осуществляется в реакторах при 700—1000 °С, куда загружаются обрабатываемые детали. Через реактор с определенной скоростью продувается газовая смесь, которая, например, при осаждении нитрида титана может состоять из тетрахлорида титана, водорода и азота, а при осаждении оксида алюминия — из треххлористого алюминия, углекислого газа и водорода. Этим способом получают многослойные по-

крытия на твердых сплавах, состоящие, например, из слоев оксида алюминия, нитрида титана и карбида титана.

ХОР. Химическое осаждение из растворов. Основано на выделении металлов из солей химическими восстановителями. Например, никелирование осуществляется в результате взаимодействия хлористого никеля с гипофосфитом.

ЭПЛ. Электронное покрытие поверхности легирование основано на электрофизическом переносе материала анода на катод — деталь. Слои покрытия формируются в короткое время при больших скоростях нагрева и охлаждения из жидкой и паровой фазы с вкраплениями твердых частиц при взаимодействии с кислородом и азотом воздуха. На обкладках конденсатора установки вначале накапливается электрическая энергия, которая затем мгновенно освобождается между вибрирующим анодом и деталью.

8. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ

Криогенная техника используется в металлургии, химической промышленности, ракетной и авиационной технике, приборостроении, криобиологии, криомедицине и т. д.

Криогенная техника по функциональному назначению связана с получением сжиженных газов (кислорода, азота, водорода, гелия, инертных, а также природных на основе органических соединений), их транспортированием и хранением в сжиженном состоянии или использованием в качестве рабочих тел.

Ниже указаны температуры кипения сжиженных газов при нормальном давлении, которые одновременно указывают на температурные области применения конструкционных материалов в криогенной технике.

Газ. Метан Кислород Аргон Фтор
род

$t_{кип}$, °С —161 —183 —185 —188
Газ. Азот Неон Водород Гелий
род

$t_{кип}$, °С —196 —246 —253 —269

Основными требованиями к сталям и сплавам, работающим при низких температурах, являются следующие: малая чувствительность к хрупкому разрушению при низких температурах, определяемая запасом пластичности и вязкости;

высокая прочность при 20 °С, которая определяет надежность и металлоемкость конструкций, а также количество хладагента, требуемого для их захлаживания;

технологичность при металлургическом и машиностроительном переделе.

При решении вопроса о пригодности материала по механическим свойствам обычно определяют предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение и сужение на гладких образцах и образцах с концентратором напряжений в виде надреза или трещины, ударную вязкость, порог хладноломкости, критерии Ирвина K_{Ic} и G_{Ic} , критическое раскрытие трещины.

В зависимости от назначения к стали и сплаву могут предъявляться требования по коррозионной стойкости, магнитности или немагнитности, значению коэффициента линейного расширения, теплопроводности, вакуумплотности и т. д.

В криогенной технике широко используются стали различных классов, сплавы на основе алюминия, меди, реже титана.

Стали. Среди сталей аустенитного класса наибольшее распространение нашли стали типа 18-10 (химический состав по ГОСТ 5632-72) (08X18H9T, 12X18H9T, 12X18H10T, 08X18H10T, 03X18H11, 12X18H9). На рис. 25 показаны механические свойства этой группы материалов при 20, —196 и —253 °С в зависимости от содержания никеля. Изменения механических свойств отражают влияние никеля на структуру стали в диапазоне от 20 до —253 °С; это влияние выражается

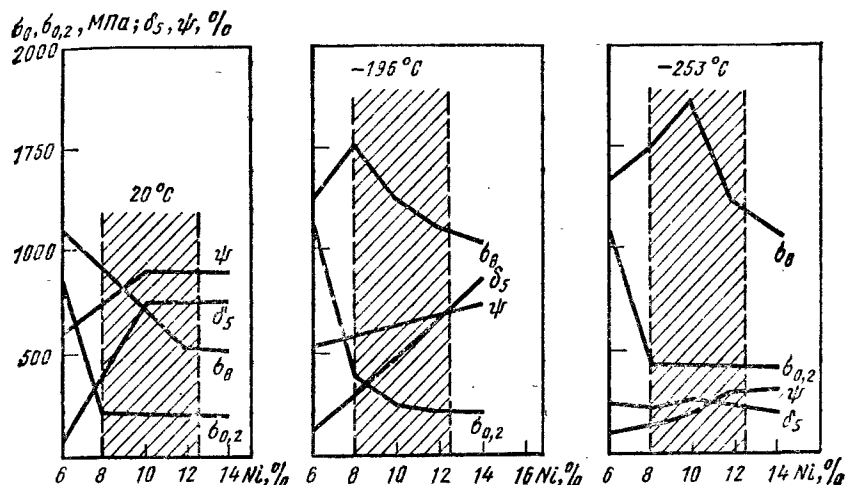


Рис. 25. Механические свойства стали с 0,03 % С и 18 % Сг и различным содержанием никеля при 20, —196 и —253 °С; термическая обработка — закалка с 1050 °С в воду; заштрихованные области — возможное содержание никеля в сталях типа 18—10 [71]

в стабилизации аустенита относительно ($\gamma \rightarrow \delta$)-превращения при нагреве до вакалку, а также относительно мартенситного превращения при охлаждении и пластической деформации.

Стали 12X18H9T, 12X18H10T, 03X18H11 используют для создания широкой номенклатуры изделий, работающих при температуре от 800 до —269 °С, изготавливаемых методами горячей и холодной пластической деформации с использованием различных видов сварки и пайки. Термическую обработку сварных и паяных соединений, как правило, не применяют.

Сталь 12X18H9 используют для изготовления упругочувствительных элементов, работающих при криогенных температурах (пружины, мембраны, сильфоны и т. д.); эта сталь хорошо шлифуется и полируется; однако сварные и паяные соединения из этой стали почти всегда требуют термической обработки во избежание снижения пластичности и охрупчивания при криогенных температурах. Механические свойства, типичные для наиболее распространенной стали 12X18H10T, приведены в табл. 116 и 117.

Сталь 07X21H5AГ7 (ЭП 222) (химический состав по ГОСТ 5632-72) предназначена для изготовления сварных и несварных изделий, работающих при температуре от 400 до —253 °С. Типичные изделия: подвески в кислородных установках, крепеж, цепи, шпиндели, тонкостенные сварные и паяные конструкции, изготавливаемые методами горячей и холодной деформации.

По сравнению со сталями типа 18-10 сталь 07X21H5AГ7 обладает более высокой прочностью.

После закалки от 1000—1050 °С сталь имеет аустенитную структуру с 5—15 % δ -феррита; при нагреве до 600—800 °С в аустените преимущественно по границам зерен выделяется карбидная фаза типа $Cr_{23}C_6$; присутствие карбидной сетки оказывает отрицательное влияние на ударную вязкость, особенно при низких температурах. В связи с этим изделия, которые подверглись в процессе технологических операций нагреву в интервале 600—800 °С, должны подвергаться термической обработке, состоящей в вакалке с 1000—1050 °С в воду.

116. Механические свойства прутковой стали 12X18H10T при температуре от 20 до -269° С [71]

| t, °С | σ_B | σ_B^H | $\sigma_{0,2}$ | δ_5 | ψ | KCU | KCT |
|-------|------------|--------------|----------------|------------|--------|-----|-----|
| | МПа | | | % | | | |
| 20 | 647 | 832 | 268 | 75 | 84 | 3,6 | 2,8 |
| -70 | 1005 | 1335 | 315 | 53 | 79 | 3,5 | 2,7 |
| -100 | 1077 | 1502 | 322 | 50 | 77 | 3,2 | 2,2 |
| -196 | 1467 | 2067 | 402 | 46 | 71 | 3,0 | 1,7 |
| -253 | 1850 | 2095 | 490 | 40 | 63 | 2,8 | 1,3 |
| -269 | 1871 | 2097 | 495 | 41 | 57 | — | — |

Примечание. σ_B^H — образец с надрезом.

117. Механические свойства тонколистовой стали 12X18H10T [71]

| Обработка | t _{исп.} , °С | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ_5 , % | KCU | KCT |
|--------------------------------------|------------------------|------------|----------------|----------------|-----|-----|
| | | МПа | | | | |
| Закалка с 1100°С на воздухе | 20 | 650 | 260 | 46 | 2,1 | 0,9 |
| | -196 | 1470 | 470 | 37 | 2,5 | 0,7 |
| | -253 | 1520 | 540 | 26 | 2,3 | 0,6 |
| Нагартовка прокаткой на 60% при 20°С | 20 | 1330 | 1200 | 10 | 0,5 | 0,2 |
| | -196 | 1770 | 1530 | 32 | 0,6 | 0,2 |
| | -253 | 1840 | 1630 | 24 | 0,8 | 0,2 |

118. Механические свойства стали 07X21H5AG7 при температуре от 20 до -253° С [71]

| t, °С | $E \times 10^{-4}$ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | σ_B^H | δ | ψ | KCU | KCV | KCT |
|-------|--------------------|------------|----------------|--------------|----------|--------|------|------|------|
| | | МПа | | | | | | | |
| 20 | 20,7 | 760 | 420 | 630 | 59 | 60 | 1,50 | 1,40 | 1,20 |
| -70 | 20,9 | 880 | 635 | 805 | 52 | 55 | — | — | — |
| -196 | 21,6 | 1300 | 1000 | 1140 | 48 | 34 | 1,4 | 1,2 | 0,9 |
| -253 | 22,1 | 1530 | 1240 | 800 | 12 | 10 | 1,20 | 0,95 | 0,80 |

Механические свойства стали 07X21H5AG7 представлены в табл. 118 и 119.

Сталь 07X21H5AG7 технологична при аргодуговой сварке вольфрамовым электродом с присадкой и без

присадки, плавящимся электродом в среде гелия высокой чистоты, при автоматической сварке под флюсом АН-26. В качестве присадочного материала применяют проволоку марок Св-10X16H25AM6

119. Влияние холодной пластической деформации на механические свойства стали 07X21H5AG7 [71]

| Степень обжатия, % | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ_5 , % | Степень обжатия, % | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ_5 , % |
|--------------------|------------|----------------|----------------|--------------------|------------|----------------|----------------|
| | МПа | | | | МПа | | |
| 0 | 766 | 463 | 59 | 40 | 1250 | 1180 | 12 |
| 10 | 830 | 675 | 42 | 60 | 1365 | 1299 | 7 |
| 20 | 1104 | 1104 | 20 | — | — | — | — |

Св-08X15H23B7Г7М2; сталь удовлетворительно сваривается со сталями 12X18H10T, 12X21H5T, 07X16H6 и др.

Сталь 03X20H16AG6 предназначена для изготовления сварных крупнобаритных емкостей и резервуаров, находящихся длительное время под давлением при периодической смене температур от 20 до -269°С; допускается применение стали при температуре от 600 до -259°С без ограничения давления.

Химический состав следующий (мас. доли, %): C ≤ 0,025; Si ≤ 0,6; Mn 6-7,5; Cr 20-25; Ni 15-16,5; N 0,15-0,28; S ≤ 0,02; P ≤ 0,025.

Для стали 03X20H16AG6 характерна стабильно аустенитная структура во всем диапазоне температур: от нагрева под горячую пластическую обработку до температуры сжиженного гелия (-269°С). Пластическая деформация при 20°С и криогенных температурах также не вызывает фазовых превращений мартенситного типа. По указанным причинам сталь остается немагнитной.

Единственной фазовой реакцией, протекающей в стали, является выделение карбидной и нитридной фаз ($Cr_{23}C_8$ и CrN) при нагреве в интервале 600-850°С; первые выделения этих фаз по границам зерен обнаруживаются после выдержки 1 ч, что приводит к снижению ударной вязкости при криогенных температурах. Легирование стали азотом и наличие стабильного аустенита дает возможность получить одновременно достаточно высокую для аустенитной стали прочность при 20°С и высокий запас пластичности и вязкости при низких температурах (табл. 120 и 121).

Сталь 03X20H16AG6 сваривается ручной дуговой сваркой, ручной и автоматической аргодуговой, автоматической сваркой под флюсом. Стойкость стали к образованию трещин удовлетворительная.

Сталь 07X16H6 (ЭП 288) аустенитно-мартенситного класса (химический состав по ГОСТ 5632-72) применяется для изготовления нагруженных деталей, работающих от 20 до -253°С.

120. Механические свойства стали 03X20H16AG6 при температурах от 20 до -269° С (термическая обработка: закалка с 1000° С в воду) [71]

| t, °С | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | σ_B^H | σ_B^{TP} | σ_B^{TP}/σ_B | δ_5 | ψ | KCU | KCV | KCT |
|-------|------------|----------------|--------------|-----------------|--------------------------|------------|--------|------|------|------|
| | МПа | | | | | | | | | |
| 20 | 780 | 410 | 1280 | 670 | 0,86 | 52 | 75 | 2,20 | 1,60 | 1,40 |
| -196 | 1550 | 900 | 2000 | 1250 | 0,81 | 48 | 44 | 1,20 | 1,00 | 1,00 |
| -253 | 1930 | 1360 | 2700 | 1290 | 0,67 | 31 | 27 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |
| -269 | 1500 | 1000 | — | — | — | 25 | 21 | 0,80 | — | — |

121. Влияние холодной пластической деформации на механические свойства стали 03X20H16AG6 (термическая обработка: закалка с 1000 °С в воду) [71]

| Степень обжатия, % | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ_{5t} , % |
|--------------------|------------|----------------|-------------------|
| | МПа | | |
| 0 | 675 | 370 | 52 |
| 10 | 780 | 590 | 38 |
| 20 | 880 | 820 | 18 |
| 40 | 1060 | 950 | 8 |
| 60 | 1200 | 1160 | 5 |

При кратковременной выдержке максимальной температура эксплуатации стали 500 °С, а при длительной выдержке 400 °С.

После нагрева до 1000 °С и охлаждения в воде или на воздухе до 20 °С структура стали состоит из 10–50 % мартенсита (остальное аустенит). Охлаждение предварительно нормализованной или закаленной стали до –70 °С

122. Механические свойства стали 07X16H6 при низких температурах [71]

| $t, ^\circ\text{C}$ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | σ_B^H | σ_B^{TP} | K_{IC}^H МПа·м ^{1/2} | σ_B^{TP}/σ_B | δ_5 | ψ | ψ^H | КСУ | КСУ | КСТ |
|---------------------|------------|----------------|--------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------|------------|--------|----------|-----|-----|-----|
| | МПа | | | | | | | | | | | |

Прутки диаметром 15 мм; термическая обработка: закалка с 980 °С, воздух, обработка холодом при –70 °С, 2 ч, отпуск при 250 °С, 1 ч, воздух

| | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|-----|------|----|----|----|------|------|------|
| 20 | 1230 | 1040 | 2100 | 1240 | 105 | 1,0 | 21 | 67 | 30 | 1,30 | 1,00 | 0,85 |
| –70 | 1340 | 1150 | 2350 | 1230 | 138 | 0,92 | 20 | 68 | 35 | 1,10 | 0,84 | 0,64 |
| –100 | 1420 | 1230 | 2440 | 1280 | — | 0,90 | 25 | 68 | 28 | 0,96 | 0,80 | 0,60 |
| –196 | 1690 | 1490 | 2890 | 1500 | 126 | 0,89 | 23 | 66 | 27 | 0,80 | 0,60 | 0,35 |
| –253 | 1920 | 1760 | 3000 | 920 | 130 | 0,50 | 12 | 50 | 8 | 0,70 | 0,50 | 0,25 |

Прутки диаметром 16 мм; термическая обработка: закалка с 1000 °С, вода, обработка холодом при –70 °С, 3 ч, отпуск при 410 °С, 1 ч

| | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|---|---|---|----|----|---|---|---|---|
| 20 | 1270 | 1100 | 2080 | — | — | — | 10 | 67 | — | — | — | — |
| –196 | 1730 | 1480 | 2740 | — | — | — | 17 | 58 | — | — | — | — |
| –253 | 2060 | 1830 | 2190 | — | — | — | 15 | 51 | — | — | — | — |

в течение 2 ч повышает содержание мартенситной составляющей до 70–80 %; охлаждение до более низкой температур, например до –196 °С, к дополнительному превращению не приводит; обратное превращение $\alpha \rightarrow \gamma$ начинается в стали примерно при 500 °С.

В интервале 600–800 °С по границам аустенитных зерен выделяются карбиды хрома (Cr_{23}C_6); карбидная реакция может начаться уже при медленном охлаждении в данном интервале температур, тем более при изотермической выдержке. Образование карбидной сетки приводит к снижению пластичности и ударной вязкости при криогенных температурах.

Механические свойства стали 07X16H6 приведены в табл. 122.

Сталь 07X16H6 обладает хорошей технологичностью при аргодуговой сварке вольфрамовым электродом без присадки и с присадкой, плавящимся электродом в среде гелия и смеси аргона с 15–20 % углекислого газа. Для выполнения сварных соединений, подвергаемых упрочняющей термической обработке, в качестве присадоч-

ного материала применяют сварочную проволоку 07X16H6; при этом минимальная температура эксплуатации сварных соединений –253 °С.

Сталь 0H9 [химический состав (мас. доли, %): С ≤ 0,10; Mn 0,3–0,60; Si 0,15–0,35; Ni 8,5–10,0; S ≤ 0,15; P ≤ 0,02] широко применяется за рубежом и в меньшей степени у нас; она предназначена для изготовления крупногабаритных и других сварных резервуаров, используемых для хранения и транспортирования сжиженных газов с температурой кипения не ниже –196 °С.

После нормализации с температуры $A_{c3} + 30$ °С сталь имеет структуру мартенсита с 10–15 % аустенита.

Термическая обработка стали 0H9 может осуществляться по двум режимам:

1. Двойная нормализация с 900 и 790 °С, высокий отпуск при 550–600 °С.

2. Закалка с 810–830 °С в воду, высокий отпуск при 550–600 °С.

Механические свойства стали 0H9 приведены в табл. 123.

Смягчающей термической обработкой для стали 0H9 является длительный отпуск при 500–550 °С.

Сварку листов или других полуфабрикатов, прошедших окончательную термическую обработку, ведут с присадочным материалом из аустенитной стали.

Сплав 36НХ относится к типу инварных, т. е. имеет малоизменяющийся и низкий температурный коэффициент линейного расширения (рис. 26). Сплав применяют в сварных конструкциях, работающих в условиях циклической смены температур от 20 до –253 °С, например, для изготовления бескомпенсационных криотрубопроводов. Химический состав сплава следующий (мас. доля, %): С ≤ 0,05; Si ≤ 0,3; Mn 0,3–0,6; Ni 35,0–37,0; Cr 0,4–0,6; Cu 0,25; S 0,02; Fe — остальное. В закаленном состоянии (800–1000 °С) сплав имеет структуру γ -твердого раствора, которая устойчива против мартенситного превращения при длительном нагружении при температурах до –253 °С.

Для максимальной стабилизации коэффициента рекомендуется следующий

123. Механические свойства стали 0H9 при низких температурах [71]

| $t, ^\circ\text{C}$ | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ_5 | ψ | K_{IC} , МДж/м ² | B^{*1} , % |
|---------------------|------------|----------------|------------|--------|----------------------------------|--------------|
| | МПа | | % | | | |

Режим 1

| | | | | | | |
|------|------|-----|----|----|------|-----|
| 20 | 720 | 520 | 28 | 82 | 2,53 | 100 |
| –196 | 1100 | 820 | 26 | 65 | 1,29 | 90 |

Режим 2

| | | | | | | |
|------|-----|-----|----|----|------|-----|
| 20 | 600 | 450 | 27 | 79 | 1,96 | 100 |
| –196 | 900 | 800 | 22 | 62 | 0,98 | 70 |

*1 B — доля волокна в изломе ударного образца.

режим: закалка с 840–850 °С; отпуск для снятия внутренних напряжений при 310–330 °С, 1 ч, воздух; стабилизирующий отпуск при 100 °С, 48 ч, воздух.

Хранение изделий на открытом воздухе допускается только в упакованном виде с применением ингибиторов.

Механические и физические свойства сплава 36НХ приведены в табл. 124 и 125.

Сплав 36НХ толщиной до 4 мм сваривается аргодуговой сваркой проволокой 36НГТ и 36НГ6 и неплавя-

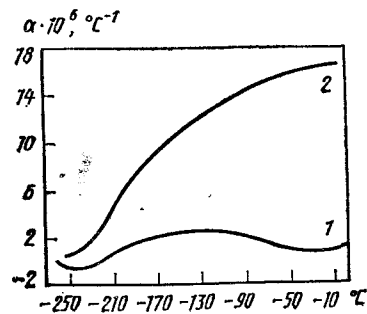


Рис. 26. Температурная зависимость коэффициента теплового линейного расширения сплава 36НХ (1) и стали 12Х18Н10Т (2) [71]

124. Влияние режима термической обработки на механические свойства сплава 36НХ [71]

| Термическая обработка | t_c °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU , МДж/м ² |
|---|-------------|------------|----------------|----------|--------|-------------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Закалка с 950 °С, 5 мин, вода | 20 | 428 | 257 | 50,0 | 80 | 2,82 |
| | -196 | 843 | 571 | 42,6 | 72,6 | 2,04 |
| | -253 | 987 | 705 | 62,9 | 67,0 | 1,69 |
| Закалка с 950 °С, 5 мин, воздух | 20 | 447 | 272 | 44,0 | 80,9 | 3,00 |
| | -196 | 830 | 572 | 42,9 | 72,9 | 1,91 |
| | -253 | 976 | 703 | 62,4 | 67,0 | 1,63 |
| Закалка с 830 °С, 5 мин, воздух | -196 | 846 | 584 | 40,8 | 76,4 | 1,70 |
| Закалка с 830 °С, 5 мин, воздух + + 315 °С, 1 ч | -196 | 865 | 585 | 41,4 | 76,8 | — |
| Закалка с 950 °С, 5 мин, воздух + + 315 °С, 1 ч | -196 | 857 | 599 | 39,6 | 76,9 | 1,84 |
| Закалка с 1000 °С, 5 мин, вода | -196 | 821 | 574 | 36,2 | 71,9 | 1,85 |
| Закалка с 1090 °С, 5 мин, вода + + 760 °С, 5 мин, вода | -196 | 770 | 566 | 40,4 | 72,4 | 2,02 |

125. Температурный коэффициент линейного расширения ($\alpha \cdot 10^6$, °С⁻¹) сплава 36НХ после различных режимов термической обработки [71]

| Термическая обработка | $\alpha_{\min 1}$ | $\alpha_{\min 2}$ | α_{\max} | α | $\alpha_{\text{ср}}$ |
|---|-------------------|-------------------|-----------------|----------|----------------------|
| Холодная прокатка с обжатием 63 % | -2,3 | 0,4 | 1,45 | 0,6 | 0,5 |
| Закалка с 850 °С, 3 мин, вода | — | 0,7 | 1,68 | 0,9 | 0,7 |
| То же + отпуск при 315 °С, 12 мин | — | 0,95 | 1,92 | 1,1 | 0,9 |
| Закалка с 950 °С, 3 мин, воздух | — | 1,3 | 2,1 | 1,5 | 1,4 |
| Отжиг при 950 °С | -1,9 | 1,55 | 2,22 | 1,8 | 1,6 |
| Отжиг при 600 °С, 5 ч, охлаждение до 100 °С, 90 ч | -1,8 | 2,26 | 2,68 | 2,46 | 1,8 |

Примечание. $\alpha_{\min 1}$ — минимальный коэффициент линейного расширения в интервале -248 ÷ -240 °С; $\alpha_{\min 2}$ — минимальный коэффициент линейного расширения в интервале -23 ÷ -3 °С; α_{\max} — максимальный коэффициент линейного расширения в интервале -153 ÷ -123 °С; α — коэффициент линейного расширения при 20 °С; $\alpha_{\text{ср}}$ — средний коэффициент линейного расширения в интервале -253 ÷ +20 °С.

щились электродами. Сварные соединения не требуют термической обработки.

Алюминий и его сплавы. В металлоконструкциях криогенной техники доля алюминия и его сплавов составляет примерно 30 % общего объема используемого металла.

Для алюминия характерно отсутствие порога хладноломкости, сохранение высокой пластичности с понижением температуры (а иногда даже ее повышение), малая зависимость прочности от температуры ниже нуля, коррозионная стойкость на воздухе и в окислительных средах, высокая тепло- и электропроводность. Эти свойства алюминия в той или иной степени наследуются его сплавами; это и оправдывает их широкое распространение в криогенной технике.

В табл. 126 приведены механические свойства отожженного алюминия АД1 (1013) (химический состав по ГОСТ 4784—74). Термическая обработка технического алюминия заключается в отжиге при 350—400 °С с охлаждением на воздухе.

Технический алюминий хорошо сваривается газовой, аргонодуговой, контактной сваркой.

Технический алюминий используют во всем диапазоне температур ниже 150 °С для труб теплообменных аппаратов и других мало нагруженных деталей и узлов. Среди деформируемых сплавов алюминия в криогенной технике наибольшее распространение получили сплавы системы Al—Mg—магналин (АМг5, АМг6 и др.), а также сплавы на основе более сложных систем легирования: с добавками меди, магния, марганца и др. (АВ, Д16, 1201, АК6 и др.).

В криогенной технике применяют также литейные алюминиевые сплавы, главным образом силумины, легированные 6—13 % Si. Ниже приведена характеристика наиболее употребляемых сплавов алюминия.

Сплав АМг5 (химический состав по ГОСТ 4784—74) применяют для нагруженных деталей, в том числе сварных: обечаек, днищ, фланцев, трубных решеток и других металлоизделий, работающих при температуре -253 ÷ -150 °С.

126. Механические свойства отожженного алюминия АД1 [57]

| t_c °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ_s | ψ | KCU , МДж/м ² |
|-------------|------------|----------------|------------|--------|-------------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 70 | 30 | 36 | 89 | 0,9 |
| -196 | 160 | 40 | 50 | 60 | 1,6 |
| -253 | 250 | 50 | 40 | 50 | 2,0 |

Термическая обработка сплава: отжиг при 305—340 °С, охлаждение на воздухе. После такой обработки сплав имеет механические свойства, указанные в табл. 127.

Чаще всего для изготовления сварных металлоизделий применяют аргонодуговую сварку.

Сплав Д16 (химический состав по ГОСТ 4784—74) обладает высокой прочностью; однако при этом он имеет пониженную стойкость против равномерной и межкристаллитной коррозии, а также коррозии под напряжением.

В криогенной технике сплав Д16 применяют для нагруженных несвариваемых деталей (крепеза, фланцев и т. д.), работающих в интервале температур -253 ÷ 230 °С. Промежуточная термическая обработка сплава Д16 состоит в отжиге при 380—430 °С с охлаждением до 275—250 °С со скоростью не более 30°/ч, далее на воздухе.

Окончательная термическая обработка состоит в закалке с температуры

127. Механические свойства сплава АМг5 при низких температурах [57]

| t_c °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ_s | ψ | KCU , МДж/м ² |
|-------------|------------|----------------|------------|--------|-------------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 300 | 130 | 23 | 42 | 0,40 |
| -183 | 390 | 150 | 40 | 39 | 0,30 |
| -196 | 420 | 160 | 44 | 37 | 0,30 |
| -253 | 520 | 170 | 33 | 28 | 0,30 |

128. Механические свойства сплава Д16 при низких температурах (термическая обработка: закалка + естественное старение) [57]

| t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ ₅ , % |
|-------|----------------|------------------|--------------------|
| | МПа | | |
| 20 | 470 | 300 | 19 |
| -73 | 490 | 300 | 22 |
| -196 | 560 | 380 | 27 |
| -253 | 660 | 450 | 16 |

129. Механические свойства сплава 1201 при низких температурах [термическая обработка (лист): закалка, правка листа с деформацией 1—3 %, искусственное старение при 180 °C, 18 ч] [57]

| t, °C | σ _B | σ _{0,2} | σ _B ^H | δ, % | σ _B ^H /σ _B |
|-------|----------------|------------------|-----------------------------|------|---|
| | МПа | | | | |
| 20 | 440 | 350 | 550 | 8 | 1,25 |
| -196 | 550 | 400 | 650 | 10 | 1,18 |
| -253 | 650 | 470 | 710 | 12 | 1,11 |

130. Механические свойства отожженной меди М3 при низких температурах [57]

| t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|-------|----------------|------------------|----|----|-------------------------|
| | МПа | | % | | |
| 20 | 200 | 60 | 45 | 85 | 1,70 |
| -183 | 300 | 80 | 50 | 84 | 2,10 |
| -196 | 330 | 80 | 52 | 83 | 2,10 |
| -253 | 470 | 130 | 58 | 74 | 2,10 |

500 °C в воду и естественного старения при 20 °C в течение 90—100 ч (табл. 128); нагартованные листы после холодной прокатки непосредственно подвергают искусственному старению при температуре 130 °C в течение 20 ч.

Сплав 1201 [химический состав (мас. доли, %): Cu 5,8—6,8; Mn 0,2—0,4; Zr 0,10—0,25; V 0,05—0,15; Ti 0,02—0,10] принадлежит к упрочняемым свариваемым сплавам алюминия. Сплав 1201 применяют для изготовления сварных металлоизделий: обечаек, днищ, фланцев и т. д., работающих в интервале температур —253÷200 °C (в случае кратковременного нагружения до 300 °C).

Смягчающей термической обработкой сплава является отжиг при температуре 350—370 °C в течение 2—4 ч с охлаждением на воздухе.

Упрочняющая термическая обработка состоит в закалке с температуры 540 °C в воду с последующим искусственным старением при 150—190 °C, 18 ч (табл. 129).

Сплав 1201 сваривают аргонодуговым, гелиево-дуговым, электронно-лучевым, шовным и точечным способами.

Медь и ее сплавы являются материалами, которые одними из первых стали применяться в криогенной технике. Для меди характерна высокая пластичность и вязкость до температуры, близких к абсолютному нулю; при испытаниях в области криогенных температур медь не показывает даже признаков хрупкого разрушения; чистая медь имеет высокую теплопроводность и коррозионную стойкость в атмосферных условиях и многих агрессивных средах.

Техническая медь М1, М2, М3 (химический состав по ГОСТ 859—78) применяется для изготовления металлоизделий криогенной техники, работающих при температурах от абсолютного нуля до 250 °C, в том числе днищ, обечаек трубчатых теплообменников. Листовую медь используют для внутренних емкостей и экранов сосудов Дьюара для хранения и транспортирования сжиженных газов.

В табл. 130 представлены механические свойства технической меди при низких температурах.

Техническая медь применяется в отожженном (мягком) состоянии (температура отжига составляет 500—700 °C), а также после холодной нагартовки.

Основной вид соединений — пайка на мягких (типа ПОС) и твердых (типа

131. Механические свойства латуни Л63 при низких температурах (пруток диаметром 10—12 мм) [57]

| Термическая обработка | t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|-----------------------|-------|----------------|------------------|----|----|-------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Без термообработки | 25 | 430 | 220 | 25 | 68 | — |
| | -196 | 570 | 300 | 32 | 61 | — |
| | -269 | 670 | 380 | 36 | 66 | — |
| Отжиг | 20 | 360 | 135 | 55 | 62 | 1,20 |
| | -104 | 410 | 152 | 72 | 67 | 1,30 |
| | -196 | 510 | 183 | 79 | 66 | 1,50 |

ПСр) припоях. Можно получать и сварные соединения, что, однако, связано с рядом трудностей. В криогенной технике применяют ручную сварку плавящимся электродом (например, «Комсомолец-100»); применяется сварка под слоем флюса и в защитных газах. При толщине сечения изделия более 10 мм сварку проводят с подогревом.

Латунь Л63 (химический состав по ГОСТ 15527—70) применяется в криогенной технике при температурах —253÷250 °C в мягком и полутвердом состоянии (обечайки, днища, фланцы и др.). После холодной деформации латунь Л63 подвергают отжигу при 600—700 °C; для снятия внутренних напряжений применяют отжиг при 270—285 °C.

Механические свойства этой латуни приведены в табл. 131.

Сплав имеет удовлетворительную свариваемость; применяют автоматическую сварку с присадочным материалом из бронзы БрОЦ4—3 и флюсом АН-20. При сварке деталей сложной конфигурации или толщиной более 10 мм необходим предварительный нагрев.

Латунь Л63 проявляет хорошую технологичность при пайке оловянисто-свинцовыми припоями (ПОС 40) и свинцово-серебряными типа ПСр1,5.

Бронза БрАЖМц 10—3—1,5 относится к деформируемым и литейным материалам на основе системы медь—алюминий (10 %) — железо (3 %) — марганец (1,5 %) (химический состав

по ГОСТ 18175—78). Сплав используют для изготовления деталей, работающих при —196÷150 °C в условиях статической и циклической нагрузок, когда требуется малый коэффициент трения (шестерни, втулки, арматура, фасонное литье и т. д.).

В деформированном состоянии сплав применяется непосредственно после горячей пластической деформации и после закалки с отпуском (табл. 132).

Смягчающей термической обработкой для сплава БрАЖМц 10—3—1,5 является отжиг при температуре 700 °C ± 50 °C с охлаждением с печью.

Соединения из сплава выполняются сваркой и пайкой.

При сварке деталей толщиной до 4 мм применяются все виды дуговой сварки без предварительного подогрева; при автоматической сварке используют флюс АН-20 и проволоку близкого состава.

Пайку осуществляют на низкотемпературных оловянисто-свинцовых и высокотемпературных серебряных припоях.

Титан и его сплавы. Для криогенной техники титан и его сплавы относительно новые материалы, однако их применение с каждым годом расширяется. Титан и его сплавы, обладая достаточно высокой прочностью при 20 °C (на уровне аустенитных и других сталей), имеют удовлетворительную пластичность и ударную вязкость при криогенных температурах.

Преимуществом титана является малая плотность (4500 кг/м³), что обес-

132. Механические свойства бронзы БрАЖМц 10—3—1,5 при низких температурах [57]

| Полуфабрикат | Термическая обработка | t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ |
|---|--|-------|----------------|------------------|----|----|
| | | | МПа | | | |
| Пруток пресованный диаметром 65 мм*1 | Без термической обработки | 20 | 580 | 200 | 28 | 31 |
| | | -183 | 710 | 280 | 24 | 32 |
| | | -196 | 730 | 300 | 26 | 32 |
| Пруток диаметром 65 мм, перекованный на квадрат размером 12×12 мм | Без термической обработки | 20 | 760 | 410 | 23 | 30 |
| | | -183 | 920 | 510 | 22 | 30 |
| | | -196 | 950 | 560 | 16 | 21 |
| | Закалка с 850 °C в воду | 20 | 830 | 340 | 17 | 20 |
| | | -183 | 980 | 480 | 16 | 19 |
| | | -196 | 1000 | 460 | 12 | 17 |
| | Закалка с 850 °C в воду, отпуск при 400 °C | 20 | 820 | 340 | 22 | 35 |
| | | -183 | 930 | 420 | — | — |
| | | -196 | 950 | 450 | — | — |
| | Отжиг при 700 °C | 20 | 620 | 310 | 29 | 36 |
| | | -183 | 730 | 390 | 27 | 29 |
| | | -196 | 740 | 400 | 26 | 27 |

*1 Ударная вязкость, МДж/м²

| | | | |
|-------|------|------|------|
| t, °C | 20 | -183 | -196 |
| KCU | 1,0 | 0,90 | 0,85 |
| KCV | 0,65 | 0,55 | — |

печивает его сплавам удельную прочность более высокую, чем прочность многих сталей и алюминиевых сплавов. Высокая удельная прочность сплавов титана необходима для изготовления деталей и узлов летательных аппаратов.

Титан немагнитен и, следовательно, может применяться в криоэнергетике для изготовления электрических машин, использующих сверхпроводящие материалы.

Технический титан BT1-0 (химический состав по ОСТ 1-90013-78) применяют для изготовления несварных и сварных конструкций (обечаек, фланцев и т. д.), работающих под да-

влением в интервале температур -269÷250 °C.

Технический титан используется в отожженном состоянии; отжиг выполняется при 520—540 °C; желательны нагрев полуфабрикатов или деталей осуществлять в вакуумных печах или в печах с защитной атмосферой.

В отожженном состоянии технический титан имеет механические свойства, приведенные в табл. 133.

Технический титан хорошо сваривается; при этом сварку осуществляют аргонодуговым способом при малой погонной энергии. Для однородных соединений или соединений с алюминием применяют пайку в вакууме,

аргоне, диффузионную. Наилучшие свойства паяных соединений достигаются присадкой серебра.

Титан обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и окислительных средах.

Сплав BT5-1 (химический состав по ОСТ 1-90013-78) предназначен для изготовления деталей и узлов, в том числе сварных, работающих под давлением в интервале температур -253÷500 °C. Сплав в основном используется в отожженном состоянии; отжиг проводится при 700—750 °C.

После отжига сплав BT5-1 имеет механические свойства, указанные в табл. 134.

Сплав технологичен при сварке: аргонодуговой под слоем флюса, электрошлаковой и др. При изготовлении из сплава BT5-1 крепежа последний подвергается окислению при 890 °C в течение 6 ч.

Сплав OT4-1 (химический состав по ГОСТ 1-90013-78) предназначен для изготовления деталей и узлов, в том числе сварных, сосудов и т. д., работающих при -196÷350 °C; в от-

133. Механические свойства технического титана BT10— при низких температурах (термическая обработка: отжиг) [57]

| Полуфабрикат | t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|------------------------|-------|----------------|------------------|----|----|-------------------------|
| | | МПа | | | | |
| Лист толщиной 1 мм | 20 | 460 | 380 | 30 | — | — |
| | -196 | 870 | 690 | 50 | — | — |
| | -253 | 1200 | 820 | 43 | — | — |
| Пруток диаметром 20 мм | 20 | 470 | 400 | 30 | 65 | 2,0 |
| | -196 | 920 | 700 | 48 | 60 | 2,2 |
| | -253 | 1310 | 920 | 24 | 17 | 1,3 |

134. Механические свойства сплава BT5-1 при низких температурах (термическая обработка: отжиг при 720 °C) [57]

| Полуфабрикат | t, °C | σ _B | σ _{0,2} | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|------------------------|-------|----------------|------------------|-----|----|-------------------------|
| | | МПа | | | | |
| Пруток диаметром 20 мм | 20 | 820 | 800 | 21 | 55 | 1,0 |
| | -196 | 1320 | 1310 | 16 | 27 | 0,40 |
| | -253 | 1580 | 1400 | 15 | 9 | 0,40 |
| Лист толщиной 2 мм | 20 | 940 | 770 | 13 | — | — |
| | -196 | 1440 | 1220 | 27 | — | — |
| | -253 | 1780 | 1550 | 8 | — | — |
| | -269 | 1630 | 1590 | 2,5 | — | — |
| Лист толщиной 3 мм | 20 | 780 | — | 13 | — | — |
| | -196 | 1300 | — | 14 | — | — |
| | -269 | 1400 | — | 3 | — | — |

135. Механические свойства сплава ОТ4—1 при низких температурах [57]

| Полуфабрикат | t, °C | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|----------------------------|-------|------------|----------------|----------|--------|----------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Лист отожженный при 650 °C | 20 | 700 | 580 | 11 | — | — |
| | —196 | 1150 | 940 | 15 | — | — |
| | —253 | 1390 | 1130 | 7 | — | — |
| | —269 | 1330 | 1090 | 11 | — | — |
| Лист отожженный при 750 °C | 20 | 650 | 510 | 21 | 42 | 50 |
| | —196 | 1080 | 830 | 17 | 21 | 23 |
| | —253 | 1370 | 1150 | 15 | 11 | 27 |
| | | | | | | |

дельных случаях, когда содержание легирующих элементов (алюминия и марганца) находится на нижнем пределе, допускается применение сплава, начиная с —253 °C.

Сплав используется в виде труб, листа и других полуфабрикатов в отожженном состоянии; температура отжига 740—760 °C.

Для снятия наклепа применяют отжиг при 640—660 °C, а для снятия внутренних напряжений — при 520—560 °C.

Свойства отожженного сплава ОТ4—1 приведены в табл. 135.

Сплав ОТ4—1 сваривается аргонодуговой сваркой, сваркой под слоем флюса, контактной сваркой; термообработка сварных соединений не обязательна.

Список литературы

- Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка в активизированных газовых средах. М.: Машиностроение, 1979. 224 с.
- Баниных О. А., Ковнерский Ю. К., Зудин И. Ф. Хромомарганцевые теплоустойчивые стали с алюминием. М.: Наука, 1965. 103 с.
- Беляев Р. А. Окись бериллия. М.: Атомиздат, 1980. 224 с.
- Бобро Ю. Г. Легированные чугуны. М.: Metallurgiya, 1976. 288 с.
- Бобылев А. В. Механические и технологические свойства металлов:

Справочник. М.: Metallurgiya, 1987. 208 с.

6. Бялобжевский А. В., Цирлин М. С., Красилов Б. И. Высокотемпературная коррозия и защита сверхуглепластиков металлов. М.: Атомиздат, 1977. 224 с.

7. Васильева Е. В., Воронова Т. А., Горбова А. С. Новые способы повышения прочностных свойств ниобия// Труды МВТУ. 1983. № 280. С. 27—37.

8. Ватрушин Л. С., Осинцев В. Г., Козырев А. С. Бескислородная медь. М.: Metallurgiya, 1982. 192 с.

9. Влияние концентрации и параметров диффузии на выделение водорода из металлов в вакууме при температурах 20 ... 500 °C/В. И. Макарова, Г. В. Скибина. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. Харьковский физико-технический институт АН УССР, 1983. Вып. 2. С. 70—73.

10. Влияние окисления в различных средах на газовыделение стали 12Х18Н10Т в вакууме/В. И. Макарова, А. Н. Сафонова, Г. В. Скибина, В. И. Ерохина//Изв. вузов. Машиностроение. 1979. № 10. С. 110—114.

11. Влияние поверхностных окислов на диффузию водорода и газовыделение алюминия/В. Г. Антонов, А. А. Зябрев, В. И. Макарова, А. Н. Сафонова, Г. В. Скибина: Электронная техника. Серия Материалы, 1977, вып. 8. С. 23—28.

12. Влияние различных способов обработки поверхности на газовыделе-

ние стали 12Х18Н10Т в вакууме/В. И. Макарова, А. Н. Сафонова, Г. В. Скибина//Изв. вузов. Машиностроение. 1980. № 1. С. 92—96.

13. Возможности применения хромированной малоуглеродистой стальной ленты/А. Н. Сафонова, Ю. К. Белов, В. И. Макарова, Г. В. Скибина//Изв. вузов. Машиностроение. 1978. № 7. С. 116—120.

14. Ворошин Л. Г. Антикоррозионные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1981. 296 с.

15. Высокотемпературные неорганические покрытия/Под ред. Дж. Гуменика: Пер. с англ. М.: Metallurgiya, 1968. 330 с.

16. Газовыделение алюминиевой полимерной пленки в вакууме при пониженных температурах/А. Н. Сафонова, В. И. Макарова, В. П. Шатохин, Г. В. Скибина, В. И. Ерохина//Электронная техника. 1982. Вып. 2. С. 68—70.

17. Газовыделение покрытий из алюминия, нанесенного газопламенным методом/В. И. Макарова, Г. В. Скибина, А. И. Жигулев. М.: 1987. 6 с. Деп. в ВИНТИ 17.07.87 № 5207—В87.

18. Газовыделение коррозионных сталей, подвергнутых высокотемпературному окислению/В. И. Макарова, А. Н. Сафонова, Г. В. Скибина, В. И. Ерохина//Электронная техника. Материалы. 1979. Вып. 6. С. 31—35.

19. Газовыделение малоуглеродистой стали с коррозионно-стойкими покрытиями/Г. В. Скибина, Е. В. Андронов, В. И. Макарова, А. Н. Сафонова, В. И. Ерохина//Электронная техника. Материалы. 1981. Вып. 5. С. 4—7.

20. Газовыделение и закономерность процесса выделения водорода из металлов в вакууме при 20 °C/В. И. Макарова, Г. В. Скибина//Вопросы атомной науки и техники. Серия Общая и ядерная физика. Харьковский физико-технический институт АН УССР. 1980. Вып. 4. С. 72—76.

21. Газовыделение нержавеющей стали и алюминиевых сплавов в динамическом высоком вакууме/В. И. Макарова, А. А. Зябрев, Г. В. Скибина//Электронная техника. Материалы. 1972. Вып. 4. С. 18—23.

22. Газовыделение коррозионно-стойких сталей аустенитного и ферритного классов/В. И. Макарова, А. Н. Сафонова, Г. В. Скибина//Изв. вузов. Машиностроение. 1979. № 9. С. 100—105.

23. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978. 272 с.

24. Еремича З. И. Производство и применение металлопродукции с антикоррозионными покрытиями в УССР. Киев: 1984. Сер. II. УкрНИИТИ, 36 с.

25. Жаропрочные сплавы меди: Справочник металлста. М.: Машиностроение, 1976. Т. 2. С. 459—463.

26. Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы: Каталог продукции черной металлургии. М.: Черметинформация, 1976. 100 с.

27. Жаростойкость конструкционных материалов энергомашиностроения/В. И. Никитин, И. П. Комиссарова, М. Б. Ревзюк. Руководящие указания. Л.: НПО ЦКТИ, 1978. Вып. 38. 235 с.

28. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Metallurgiya, 1976. 472 с.

29. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Цирконовые сплавы в атомной энергетике. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.

30. Захаров М. В., Захарова А. М. Жаропрочные сплавы. М.: Metallurgiya, 1972. 384 с.

31. Защита строительных конструкций и технологического оборудования от коррозии: Справочник строителя. М.: Стройиздат, 1981. 180 с.

32. Г. В. Земсков, Р. Л. Коган. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1978. 208 с.

33. Зубарев П. И., Сухарева Л. А. Структура и свойства полимерных покрытий. М.: Химия, 1982. 256 с.

34. Ибрагимов Ш. Ш., Кирсанов В. В., Пятилетов Ю. С. Радиационные повреждения металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.

35. Исследования кинетики газоразделения теплоизоляционных материалов в вакууме при температурах от нуля до 20 °C/В. И. Макарова, В. П. Шатохин, А. Н. Сафонова,

- Г. В. Скибина, В. И. Ерохина//Электронная техника. Материалы. 1980. Вып. 6. С. 106—111.
36. Картер В. И. Металлические противокоррозионные покрытия: Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1980. 167 с.
37. Кинетика газовой выделенной железа в процессе длительных изотермических выдержек в вакууме/В. И. Макарова, Г. В. Скибина, А. Н. Сафонов//Электронная техника. Материалы. 1975. Вып. 1. С. 9—16.
38. Коломыцев П. Т. Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 204 с.
39. Коломыцев П. Т. Жаростойкие диффузионные покрытия. М.: Металлургия, 1979. 269 с.
40. Конструкционные материалы ядерных реакторов/Под общ. ред. Н. М. Бекорвайного. М.: Атомиздат, 1977. 256 с.
41. Копецкий Ч. В. Структура и свойства тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1974. 206 с.
42. Коррозионно-стойкие сплавы на основе железа и никеля/Е. А. Ульянов, Т. В. Свистунова, Ф. Л. Левин. М.: Металлургия, 1986. 262 с.
43. Лайнер В. И. Защитные покрытия металлов. М.: Металлургия, 1974. 558 с.
44. Ланская К. А. Высокохромистые жаропрочные стали. М.: Металлургия, 1976. 216 с.
45. Ланская К. А. Жаропрочные стали. М.: Металлургия, 1969. С. 246.
46. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1985. 255 с.
47. Либерман Л. Я., Пейсихис М. М. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлостроении. Ч. I, II, III. Л.: ОНТИ ЦКТИ. 1967. 600 с.
48. Любимов Б. В. Защитные покрытия изделий. Л.: Машиностроение, 1969. 214 с.
49. Магнелиевые сплавы: Справочник. Ч. I /Под ред. М. Б. Альтмана и др. М.: Металлургия, 1978. 232 с.
50. Ма Б. М. Материалы ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1987. 408 с.
51. Масленков С. Б. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1983. 192 с.

52. Мовчан Б. А., Малащенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наукова думка, 1983. 231 с.
53. Николаев А. К., Новиков А. И., Розенберг В. М. Хромовые бронзы. М.: Металлургия, 1983. 177 с.
54. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
55. Роль диффузии в процессе выделения водорода из металлов в вакууме при комнатной температуре/В. И. Макарова, Г. В. Скибина, А. Н. Сафонов// Новые сплавы и методы упрочнения деталей машин/Под ред. Арзамасова, МВТУ. 1981. С. 142—157.
56. Самсонов Г. В., Эпик А. П. Тугоплавкие покрытия. Изд. 2-е, М.: Металлургия, 1973. 400 с.
57. Солнцев Ю. П., Степанов Г. А. Материалы в криогенной технике: Справочник. Л.: Машиностроение, 1982. 312 с.
58. Солонина О. А., Глазунов С. Г. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 445 с.
59. Сплавы для нагревателей/Л. Л. Жуков, И. М. Племинникова, М. Н. Миронова и др. М.: Металлургия, 1985. 145 с.
60. Сплавы на основе тугоплавких металлов//Металловедение и термическая обработка. М.: 1968. 171 с.
61. Способ изготовления сварных непрогрываемых вакуумных камер/В. И. Макарова, А. Н. Сафонов, Г. В. Скибина, Е. С. Фролов, В. И. Куприянов, Е. В. Чубаров, А. Я. Борисов, Е. В. Андронов. Автор. свид. № 863679 от 14.05.1981. Бюлл. изобрет. 1981. № 34.
62. Сухотин А. М. и Зотиков В. С. Химическое сопротивление материалов: Справочник. Л.: Химия, 1975. 408 с.
63. Тамарин Ю. А. Жаростойкие диффузионные покрытия лопаток ГТД. М.: Машиностроение, 1978. 133 с.
64. Томашов Н. Д. Титан и коррозионно-стойкие сплавы на его основе. М.: Металлургия, 1985. 80 с.
65. Томашов Н. Д., Чернова Г. П. Теория коррозии и коррозионно-стойкие конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1986. 360 с.

66. Тугоплавкие и редкие металлы и сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1977. 240 с.
67. Тугоплавкие металлы и сплавы/Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов, К. Б. Поварова и др. М.: Металлургия, 1986. 352 с.
68. Туфанов Д. Г. Коррозионная стойкость сталей, сплавов и чистых металлов. М.: Металлургия, 1982. 352 с.
69. Ульянов Е. А. Коррозионно-стойкие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1980. 208 с.
70. Ульянов Е. А., Свистунова Т. В., Левин Ф. Л. Коррозионно-стойкие сплавы на основе железа и никеля. М.: Металлургия, 1986. 262 с.
71. Ульянов Е. А., Сорокина Н. А. Стали и сплавы для криогенной техники: Справочник. М.: Металлургия, 1984. 206 с.
72. Усынин Г. Б., Кусмарцев Е. В. Реакторы на быстрых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 288 с.
73. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник/Под ред. Л. С. Ляховича. М.: Металлургия, 1981. 424 с.
74. Чехов А. П. Коррозионная стойкость материалов: Справочник. Днепрпетровск. Проминь, 1980. 150 с.
75. Щедров К. П., Гакман Э. Л. Жаростойкие материалы: Справочное пособие. М.—Л.: Машиностроение, 1965. 166 с.
76. Электротермическое оборудование: Справочник. 11-е изд./Под общей ред. А. П. Альтгаузена. М.: Энергия, 1980. 416 с.
77. Ямпольский А. М. Контроль качества защитных покрытий. Изд. 2-е. Л.: Машиностроение, 1966. 155 с.
78. Diamonds in nickel wear coating Metal Progress. 1981. 120. № 5. P. 92—94.
79. Ellinger. Anticorrosive coatings a review, Finishing Industries, 1982. 6. N 6. P. 26.
80. Fours a pour traitements thermiques industriels sous atmosphere protectrice. Проспект фирмы S. A. du Fous Electricie Delemont (Швейцария).
81. The Fuseweld process. Проспект фирмы Wold Colmonoy Ltd. (Англия).
82. Habib K. H. Vergleich der verschieden artiger Oberflächenschutzschichten. VDI—Berichte. 1984. P. 87—96.
83. SUR—SULF. Проспект фирмы Centre Stephanoide
84. Meckelburg E. Schutzüberzüge für den Betrieb bei hohen Temneturen—Fachberichte für Oberflächen. 1971. 9. N 3. P. 103—105.
85. Plasma—Pulver Auftragschweißen wirtschaftlich, Praktiker, 1984. 36. N 4. S. 197.

F. МАТЕРИАЛЫ
ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Общие требования и классификация. Проводниковый материал с удельным электрическим сопротивлением при нормальных условиях не более $0,1 \times 10^{-8}$ Ом·м называют материалом высокой проводимости (ГОСТ 22265—76). Основными показателями проводниковых материалов являются: высокая удельная электрическая проводимость и обратный ей по величине показатель — удельное электрическое сопротивление; температурный коэффициент удельного электрического сопротивления и работа выхода электрона из проводника (ГОСТ 19880—74).

Материалы высокой проводимости применяют в электротехнике, приборостроении для изготовления обмоточных и монтажных проводов, различного рода токоведущих частей и т. п.

Эти материалы должны обладать следующими свойствами: малым удельным электрическим сопротивлением, высокими механическими свойствами, хорошими технологическими параметрами и стойкостью против окисления.

Материалы высокой проводимости классифицируют по группам: медь, сплавы меди с оловом (бронзы), сплавы меди с цинком (латуни), алюминий, серебро и прочие металлы и сплавы. В особую группу выделяют материалы для электрических контактов. В табл. 1 приведены свойства наиболее распространенных металлов высокой проводимости.

Электрическая проводимость металлов, являясь структурно-чувствительным параметром, в значительной степени зависит от примесей (рис. 1, 2).

Медь является широко распространенным материалом для проводников, так как в полной мере отвечает общим

требованиям, предъявляемым к материалам высокой проводимости как по физическим, так и по механическим свойствам и технологичности. Наибольшую электрическую проводимость имеет чистая медь (рис. 2). Химический состав меди и свойства нормированы ГОСТ 859—78. Медь поставляют в мягком (отожженном) и твердом состоянии (табл. 2).

Для электротехнических целей применяют наиболее чистую техническую катодную медь марок МОк (99,95 % Cu), МГк (99,9 % Cu), МГу (99,9 % Cu); бескислородную медь марок МООб (99,9 % Cu), М1б (99,95 % Cu); переплавленную медь марки М1 (99,9 % Cu) и др.

Из меди марок МООб, М1б, МГу изготавливают медные слитки (ГОСТ 193—79). Из медных слитков этих марок и медного сплава с серебром марки МСО, Г (0,08—0,12 % Ag, примеси — не более 0,1 %, остальное — медь) для пластин коллекторов электрических машин, электромеханизмов и электроприборов изготавливают профили трапециевидальной формы высотой, нормированной по размерному ряду в диапазоне 4—112 мм. Твердость по Бригеллю профилей первой категории из медных слитков составляет 700 МПа, из медного сплава — 840 МПа. Прокаткой из слитков получают медную катанку круглого сечения диаметром 6—12 мм. Относительное удлинение катанки диаметром до 10 мм включительно составляет 30—33 %, катанки диаметром свыше 10 мм — 35—37 % [40].

Из медной катанки изготавливают проволоку круглого сечения диаметром 0,020—9,42 мм в мягком (ММ) и твердом (МТ) состоянии и для воздушных линий электрической связи (МС). Сортамент, механические и электрические свойства проволоки — по ГОСТ 2112—79 (табл. 3).

1. Физические свойства металлов высокой проводимости [5]

| Металл | $\rho \cdot 10^8$, Ом·м | $TK\rho \cdot 10^4$, °C ⁻¹ | λ , Вт/(м·°C) | $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ | Φ , эВ | $T_{пл}$, °C | $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ |
|-------------|--------------------------|--|-----------------------|--|-------------|---------------|--|
| Серебро Ag | 0,016 | 40 | 415 | 19 | 4,4 | 961 | 10,50 |
| Медь Cu | 0,0172 | 43 | 390 | 16 | 4,3 | 1083 | 8,94 |
| Золото Au | 0,024 | 38 | 293 | 14 | 4,8 | 1063 | 19,30 |
| Алюминий Al | 0,028 | 42 | 209 | 24 | 4,3 | 657 | 2,70 |
| Бериллий Be | 0,040 | 60 | 167 | 13 | 3,9 | 1284 | 1,85 |
| Магний Mg | 0,045 | 42 | 167 | 26 | 3,6 | 651 | 1,74 |
| Иридий Ir | 0,054 | 41 | 146 | 6,5 | — | 2410 | 22,50 |
| Вольфрам W | 0,055 | 46 | 168 | 4,4 | 4,5 | 3380 | 19,30 |
| Молибден Mo | 0,057 | 46 | 151 | 5,1 | 4,2 | 2620 | 10,20 |
| Цинк Zn | 0,059 | — | 111 | 31 | — | 420 | 7,14 |
| Кобальт Co | 0,062 | 60 | 79 | 12 | — | 1492 | 8,71 |
| Никель Ni | 0,073 | 65 | 95 | 13 | 5,0 | 1455 | 8,90 |
| Кадмий Cd | 0,076 | 42 | 93 | 30 | 4,0 | 321 | 8,65 |
| Индий In | 0,090 | 47 | 25 | 25 | — | 156 | 7,28 |
| Железо Fe | 0,098 | 60 | 73 | 11 | 4,5 | 1535 | 7,87 |
| Платина Pt | 0,105 | 39 | 71 | 9 | — | 1773 | 21,40 |
| Олово Sn | 0,120 | 41 | 65 | 23 | 4,4 | 232 | 7,31 |

Примечание. $TK\rho$ — температурный коэффициент электрического сопротивления.

2. Физические и механические свойства меди (ГОСТ 859—78)

| Марка меди (состояние) | $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | σ_B , МПа | $T_{пл}$, °C | δ , % |
|---------------------------|--|------------------|---------------|--------------|
| ММ (мягкая отожженная) | 8,90 | 250—300 | 1083 | 18—50 |
| МТ (твердая неотожженная) | 8,95 | 350—480 | 1080 | 0,5—4 |

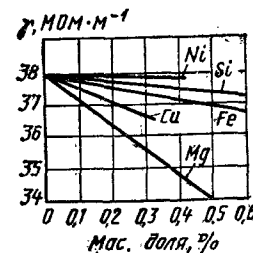


Рис. 1. Влияние примесей на изменение удельной электрической проводимости алюминия [11]

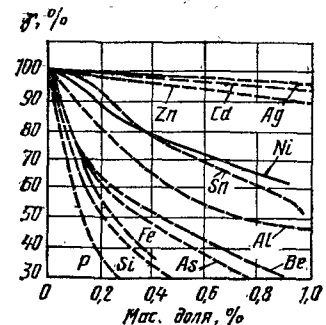


Рис. 2. Влияние примесей на изменение удельной электрической проводимости меди, принятой за 100 % [5]

3. Свойства медной проволоки круглого сечения (ГОСТ 2112—79)

| Свойства | Марка проволоки | Диаметр проволоки, мм | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------------|---------|---------------|
| | | 0,020—1,00 | 2,0—4,0 | 1,00—9,42 |
| σ_B , МПа | ММ | 200—290 | — | 200—270 |
| | МТ | 400—450 | — | 360—400 |
| | МС | — | 430—440 | — |
| δ , % | ММ | 6—30 | — | 30—35 |
| | МТ | 0,6 | — | 1,0—2,0 |
| | МС | — | 1,5 | — |
| $\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м | ММ | 0,01724 | 0,01724 | 0,01724 |
| | МТ, МС | 0,0180 | — | 0,0177—0,0178 |

Из медной катанки изготавливают также проволоку прямоугольного сечения (табл. 4), ленты, мягкие и твердые шины нормированных размеров и свойств (ГОСТ 434—78). Размеры поставляемых изделий по сторонам сечения (a — меньшая сторона, толщина; b — большая сторона, ширина) приведены ниже:

| | По стороне a , мм |
|---------------------|---------------------|
| Проволока | 0,80—5,60 |
| Ленты | 0,10—3,53 |
| Шины | 4,00—30,00 |
| | По стороне b , мм |
| Проволока | 2,00—30,00 |
| Ленты | 8,0—100,00 |
| Шины | 16—120. |

4. Механические свойства изделий из медной катанки (ГОСТ 434—78)

| Размер по меньшей стороне сечения a , мм | δ , %, не менее | | | σ_B , МПа, не менее | |
|--|------------------------|----------|-----------|----------------------------|-----------|
| | Проволока ПММ | Шины ШММ | Ленты ЛММ | Проволока ПМТ | Ленты ЛМТ |
| До 0,80 | — | — | — | 301 | 294 |
| Св. 0,80 до 1,32 | 30 | — | 30 | 301 | 294 |
| » 1,32 » 3,35 | 32 | — | 32 | 264 | 264 |
| » 3,35 » 7,00 | 34 | 34 | 34 | 255 | 255 |
| » 7,00 » 10,00 | 35 | 35 | — | 255 | 255 |
| » 10,00 | — | 35 | — | — | — |

Горячекатаные и холоднокатаные медные листы и холоднокатаные полосы имеют регламентированные размеры (по ГОСТ 495—77). Диапазон размеров изделий приведен в табл. 5.

Листы и полосы бывают мягкие, полутвердые и твердые из меди марок М1, М1р, М2, М2р, М3 и М3р по ГОСТ 859—78. Механические свойства их приведены в табл. 6.

Для изготовления фольгированных диэлектриков электролитическим осаждением применяют медную фольгу ФМЭ (неоксидированная), ФМЭО (оксидированная нормальной шероховатости), ФМЭОШ (оксидированная повышенной шероховатости). Химический состав фольги соответствует ме-

5. Размеры (в мм) медных листов и полос (ГОСТ 495—77)

| Параметр | Холоднокатаные | | Горячекатаные листы |
|----------|----------------|----------|---------------------|
| | листы | полосы | |
| Толщина | 0,4—12,0 | 0,4—0,6 | 3,0—25,0 |
| Ширина | 600—1000 | 40—600 | 600—3000 |
| Длина | 1500—2000 | 500—2000 | 1000—6000 |

ди М1 по ГОСТ 859—78. Фольгу поставляют в виде рулонов и листов регламентированных размеров (по ГОСТ 14958—69). Толщина оксидированного слоя на фольге ФМЭО и ФМЭОШ составляет 0,15—0,35 мм. Фольгу ФМЭО и ФМЭОШ изготавливают из фольги ФМЭ.

Для изготовления деталей методом порошковой металлургии предназначен медный порошок, применяемый в электротехнической, машиностроительной и химической промышленности. Марки и химический состав порошка регламентированы ГОСТ 4960—75. Порошок поставляют в стабилизированном (марки ПМС) и нестабилизированном (марки типа ПМ) состоянии. Удельное электрическое сопротивление медного порошка ПМА не превышает $25 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Сплавы меди находят широкое применение благодаря лучшим по сравнению с медью механическим свойствам. Важнейшими из сплавов меди являются

бронзы (сплавы меди с оловом или некоторыми другими металлами), из них лучшие — бериллиевая и кадмиевая. Бериллиевые бронзы применяют для изготовления токоведущих пружин, шеткодержателей, скользящих контактов, электродов и т. п., кадмиевые бронзы — для изготовления контактов, троллейных проводов и коллекторных пластин. Они обладают большим сопротивлением истиранию, рабочая температура их до 250 °С. Сплавы меди с цинком (латуни) имеют существенно худшие электрические свойства. Из бериллиевой бронзы БрБ2 (1,8—2,1 % Ве) изготавливают пружки тянутые в мягком и твердом состоянии и прессованные с механическими свойствами, указанными в табл. 7.

Алюминий применяют для проводов воздушных линий электропередачи, в распределительных устройствах, для кабелей, обмоток трансформаторов и электрических машин, электромагнитов и т. п. Используют его и как кон-

6. Механические свойства медных листов и полос (ГОСТ 495—77)

| Способ изготовления | Состояние материала | σ_B , МПа | δ , % не менее | НВ, МПа |
|---------------------|---------------------|------------------|-----------------------|---------|
| Холоднокатаные | Твердое | 290, не менее | 3 | 950 |
| | Полутвердое | 250—310 | 12 | 750 |
| | Мягкое | 200—260 | 36 | 550 |
| Горячекатаные | — | 200, не менее | 30 | 600 |

7. Механические свойства прутков из бронзы БрБ2 [40]

| Диаметр прутков, мм | Способ изготовления | Состояние металла | σ_B , МПа | δ , % не менее | НВ, МПа |
|---------------------|---------------------|-------------------|------------------|-----------------------|----------------|
| 5—40 | Тянутые | Мягкий | 400—600 | 25 | 1000—1500 |
| 5—15 | Тянутые | Твердый | 750—1000 | 1,0 | 1500, не менее |
| 16—40 | Тянутые | Твердый | 650—900 | 1,0 | 1500, не менее |
| 42—100 | Прессованные | Прессованный | 450 | 20 | — |

струкционный и защитный (обмотки кабелей) материал.

Алюминий дешевле меди, которая к тому же является дефицитным материалом. Кроме того, алюминий существенно легче меди (плотности $2,70 \times 10^3$ и $8,94 \cdot 10^3$ кг/м³ соответственно) и стоек к окислению. Большим преимуществом алюминия является возможность анодного оксидирования (анодирования), при котором на его поверхности возникает слой оксидной изоляции, выдерживающей температуру выше температуры плавления алюминия. Недостатком алюминия по сравнению с медью является более низкая удельная электрическая проводимость. Алюминий легко подвержен электролитической коррозии и его механическая прочность на 30% меньше, чем у меди. По сравнению с медью он труднее паяется из-за оксидной пленки на поверхности, имеющей высокое электрическое сопротивление.

Марки и химический состав первичного алюминия нормированы ГОСТ 11069—74. В зависимости от химического состава первичный алюминий подразделяют на алюминий особой чистоты (А999), высокой чистоты (А995, А99, А97, А95) и технической чистоты (А85, А8, А7, А7Е, А6, А5Е, А5, А0).

Из первичного алюминия высокой и технической чистоты изготавливают чушки регламентированного сортамента и массы (ГОСТ 11070—74).

Из алюминия А995, А99, А97, А7Е и А5Е производят слитки, предназначенные для изготовления проволоки для кабелей и проводов, а также проволоки для сварочных и других целей. Форма, размеры и масса слитков нормированы ГОСТ 4004—64.

Прокаткой из слитков получают алюминиевую катанку АКЛП-5ПТ, АКЛП-7ПТ в полутвердом состоянии; непрерывным литьем и прокаткой получают катанку АКЛП-5Т в твердом состоянии. Катанку изготавливают из алюминия А5Е и А7Е с нормированными размерами, механическими свойствами и удельным электрическим сопротивлением (табл. 8) по ГОСТ 13843—78 Е.

Для неизолированных проводов линий электропередачи из алюминиевой катанки изготавливают проволоку АМ (мягкая), АПТ (полутвердая), АТ (твердая), АТп (твердая повышенной прочности) с нормированными размерами и механическими свойствами (табл. 9) по ГОСТ 6132—79.

Для электротехнических целей из алюминия АД0 и алюминиевого сплава АД31 изготавливают прессованные шины (с термической обработкой и без термической обработки) регламентированных типоразмеров по ГОСТ 15176—89. Механические свойства их приведены в табл. 10.

Для деталей с повышенными механическими свойствами используют сплавы алюминия, в основном сплавы

8. Свойства алюминиевой катанки (ГОСТ 13843—78 Е) (для первой категории)

| Диаметр, мм | σ_B , МПа, не менее | | | δ , %, не менее | | | $\rho_l \cdot 10^6$, Ом·м, не более | |
|-------------|----------------------------|--------------------|---------|------------------------|--------------------|----------|--------------------------------------|---------|
| | АК | АКЛП-5ПТ, АКЛП-7ПТ | АКЛП-5Т | АК | АКЛП-5ПТ, АКЛП-7ПТ | АКЛП-5ПТ | АКЛП-5ПТ | АКЛП-5Т |
| 9,0; 9,5 | 83,0 | 83,0 | 95,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 0,02815 | 0,02813 |
| 11,5—15,5 | 78,0 | 78,0 | — | 15,0 | 15,0 | — | — | — |
| 18,0—19,0 | — | 74,0 | — | — | 15,0 | — | — | — |
| 23,0; 25,0 | — | 64,0 | — | — | 15,0 | — | — | — |

9. Механические свойства проволоки диаметром 0,6—10,0 мм из алюминиевой катанки (ГОСТ 6132—79)

| Свойства | АТ | АПТ | АМ | АТп *1 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| σ_B , МПа | 147—167 | 88—137 | 73,5—98 | 167—191 |
| δ , % | 1,0—2,0 | 2,0—3,0 | 15—25 | 1,5—2,0 |
| $\rho_l \cdot 10^6$, Ом·м | 0,0283 | 0,0283 | 0,0280 | 0,0283 |

*1 Для проволоки диаметром 1,5—4,5 мм.

10. Свойства образцов вырезанных из прессованных шин (ГОСТ 15176—89)

| Марка алюминия и сплава | Состояние поставки шин | σ_B | σ_T | δ , % | $\rho_l \cdot 10^6$, Ом·м |
|-------------------------|---------------------------------------|------------|------------|--------------|----------------------------|
| | | МПа | | | |
| АД0 | Без термической обработки | 60—70 | — | 15 | 0,0290 |
| АД31 | Закаленные и естественно состаренные | 130 | 60 | 13 | 0,0350 |
| АД31 | Закаленные и искусственно состаренные | 200 | 150 | 8 | 0,0325 |

11. Свойства рабочего слоя порошковых контакт-деталей (для первой категории) [40]

| Марка контакт-деталей | $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | НВ, МПа | $\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м, не более |
|-----------------------|--|-----------|--------------------------------------|
| КМК-Б45 | 11,8—12,4 | 1200—1500 | 7,5 |
| КМК-Б25 | 13,2—14,4 | 1800—2200 | 9,0 |
| КМК-А45 | 13,4—14,0 | 1000—1500 | 4,2 |
| КМК-А25 | 14,8—15,6 | 1700—2200 | 4,6 |

типа Al—Mg—Si—Fe, Al—Mg—Si—Fe—Zn.

Железо (сталь). В качестве проводникового материала применяют мягкую сталь с содержанием углерода 0,10—0,15%. Сталь используют для изготовления проводов воздушных линий электропередачи небольших мощностей, для шин, рельсов трамваев, электрических железных дорог. Поверхность стальных проводов покрывают цинком с целью защиты их от коррозии [5]. В качестве токопроводящей жилы в кабелях используют углеродистую качественную проволоку оцинкованную (тип КО) и без покрытия (тип КС) (ГОСТ 792—67). Проволоку изготавливают диаметром 0,5—6,0 мм из низкоуглеродистой стали по ГОСТ 1050—74 и ГОСТ 4543—71. Временное сопротивление разрыву для проволоки всех диаметров не менее 362 МПа (для оцинкованной проволоки) и 392 МПа (для проволоки без покрытия); удельное электрическое сопротивление проволоки не более $0,15 \times 10^{-6}$ Ом·м при 20°C.

Серебро имеет наименьшее удельное электрическое сопротивление из группы металлических проводников, но является остродефицитным материалом. Его используют в виде микропроводников, гальванических покрытий в ответственных ВЧ- и СВЧ-устройствах, слаботочных контактов.

Материалы для электрических контактов должны одновременно удовлетворять требованиям: иметь высокие значения дугостойкости, твердости, удельной электрической проводимости, теплопроводности, химической стойкости; должны быть устойчивы к атмосферной коррозии и микро-

климату, существующему в коммутационном устройстве. Контакты регламентированных типоразмеров изготавливают из материалов на основе порошкового вольфрамо-никелевого сплава, пропитанного жидким серебром или медью; на основе серебра (60—95%), легированного кадмием, графитом, оксидом кадмия, оксидом меди, оксидом никеля [40]. Для контактов используют также сплавы Cu—Cr, Cu—Ag—Cd, Ag—Pd, Au—Pt—Ag, Pt—Ni, Pt—W, Pt—Ir, Pt—Rh и др. Контакты изготавливают в основном методами порошковой металлургии. Часто используют биметаллические контакты, состоящие из подложки дешевого металла и поверхностного слоя из благородного металла.

В табл. 11 приведены свойства контакт-деталей, изготовленных пропиткой порошковых заготовок из вольфрамо-никелевого сплава.

2. СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сверхпроводимость — явление, включающее в том, что электрическое сопротивление некоторых материалов исчезает при уменьшении температуры ниже некоторого значения, зависящего от материала и от магнитной индукции.

Сверхпроводник (ГОСТ 19880—74) — вещество, основным свойством которого является способность при определенных условиях быть в состоянии сверхпроводимости. Температура, при которой происходит переход из нормального состояния в сверхпроводящее, называется критической температурой (T_c). Токи, созданные в сверхпроводящих кольцах, протекают без

измеримого изменения в течение года после их начального возбуждения. Сверхпроводящее состояние можно разрушить не только повышением температуры образца, но и помещением его во внешнее магнитное поле. Это поле называется критическим полем (B_c), и его величина зависит от температуры, при которой находится образец. Сверхпроводящее состояние может быть разрушено и магнитным полем, созданным током, протекающим через образец. Плотность тока, при которой разрушается состояние сверхпроводимости, называется критической (J_c). Желательно иметь сверхпроводники с максимально высокими критическими параметрами.

Сверхпроводимость является сверхтекучестью «электронной жидкости», образованной валентными электронами. Электроны имеют полужеткий спин, т.е. являются фермионами и подчиняются статистике Ферми-Дирака. Благодаря взаимодействию электронов проводимости с колебаниями кристаллической решетки (фононами), между электронами возникает притяжение, которое может превзойти силы кулоновского отталкивания. Два электрона, имеющих равные и противоположно направленные импульсы и спины, образуют связанное состояние (куперовскую пару). Куперовские пары имеют целый спин (бозоны) и претерпевают бозе-эйнштейновскую конденсацию с образованием сверхтекучей электронной жидкости. Перестройка электронов проводимости приводит к появлению в спектре электронов на уровне поверхности Ферми энергетической щели, в которой нет квантовых состояний системы. Ширина щели $2\Delta(T)$ равна энергии связи куперовской пары при данной температуре. Она максимальна при -273°C (порядка 10^{-3} — 10^{-4} эВ), уменьшается при повышении температуры и равна нулю при $T = T_c$. При температуре абсолютного нуля все электроны проводимости сверхпроводника связаны в куперовские пары. При повышении температуры число куперовских пар уменьшается и становится равным нулю при $T = T_c$. При наложении внешнего электрического поля связанный коллектив куперовских пар

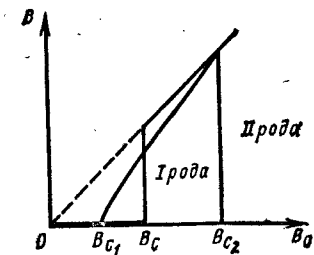


Рис. 3. Зависимость внутреннего магнитного поля от внешнего магнитного поля для сверхпроводников I и II рода

начинает двигаться как единое целое.

Сверхпроводники относятся к двум основным группам: сверхпроводники I рода — все чистые сверхпроводящие металлы (кроме технеция, ванадия и ниобия) и сверхпроводники II рода — чистые технеций, ванадий, ниобий, сверхпроводящие сплавы и соединения.

Сверхпроводники I рода являются идеальными диамагнетиками. Постоянное магнитное поле не проникает в образец (за исключением тонкого поверхностного слоя), находящийся в сверхпроводящем состоянии, и «выталкивается» из образца при переходе в сверхпроводящее состояние во внешнем магнитном поле — так называемый эффект Мейссенера. Следствием эффекта Мейссенера является то, что по поверхности сверхпроводника, находящегося во внешнем магнитном поле, всегда течет ток.

Сверхпроводники II рода, как и сверхпроводники I рода, характеризуются температурой перехода в сверхпроводящее состояние T_c , но имеют два критических поля (рис. 3). Ниже нижнего критического магнитного поля B_{c1} сверхпроводник ведет себя как сверхпроводник I рода. При внешнем магнитном поле $B_{c1} < B_0 < B_{c2}$ внутри сверхпроводника появляется магнитное поле в виде квантовых вихревых нитей. Каждая такая нить представляет собой длинный тонкий цилиндр, вытянутый вдоль направления внешнего магнитного поля. Внутри вихря куперовские пары разрушены и материал находится в нормальном состоянии. Вокруг цилиндра течет незатухающий сверхпроводящий ток

12. Критические характеристики некоторых соединений типа A15 [28]

| Соединение | T_c , °C | B_{c2} , Тл, при 277 °C | Соединение | T_c , °C | B_{c2} , Тл, при -269 °C |
|--------------------|------------|---------------------------|--------------------|------------|----------------------------|
| Ta ₃ Sn | -265 | 7,24 | Nb ₃ Sn | -255 | 23,5 |
| Nb ₃ Ge | -250 | 34,0 ± 1,0 | Nb ₃ Au | -261 | 23,5 (-273 °C) |
| Nb ₃ Ga | -252 | 33,6 | V ₃ Si | -256 | 22,8 |
| Nb ₃ Al | -254 | 29,5 | V ₃ Ga | -256 | 21 |

(сверхток) такого направления, что создаваемое им магнитное поле совпадает с направлением внешнего магнитного поля. Магнитные вихри образуют в поперечном сечении правильную треугольную решетку, и каждый из вихрей несет один квант магнитного потока, численно равный

$$\Phi = \frac{hc}{2e} = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб.}$$

Такое состояние сверхпроводника называется «смешанным» и характеризуется частичным проникновением магнитного поля в образец. При достижении второго критического поля B_{c2} вихри заполняют все сечение образца и происходит его переход в нормальное состояние.

В присутствии проходящего («транспортного») тока на вихревые нити потока действует сила Лоренца, которая вызывает движение вихрей в направлении, перпендикулярном току. Это приводит к рассеянию энергии, т. е. к появлению омического сопротивления, и означает, что у однородного сверхпроводника II рода, находящегося в смешанном состоянии, критический ток равен нулю. В неоднородном сверхпроводнике, имеющем дефекты различного вида, превышающие атомные размеры (границы зерен, скопления дислокаций, включения другой фазы и т. д.), вихри могут закрепляться. Эти дефекты называются центрами пиннинга, а закрепление на них вихрей — пиннингом.

Неидеальные сверхпроводники II рода называются жесткими сверхпроводниками или сверхпроводниками III рода. Эти сверхпроводники характеризуются высокими значениями кри-

тических плотностей токов и, следовательно, высокими критическими значениями магнитных полей. Отжиг сверхпроводящих материалов после механической обработки, приводящий к уменьшению концентрации центров пиннинга, снижает критическую плотность тока. Кривые намагничивания жестких сверхпроводников в смешанном состоянии имеют неглубокую гистерезиса.

Известно более 1000 сверхпроводящих сплавов и соединений и число их постоянно растет.

Широко исследованы двухкомпонентные сверхпроводящие сплавы простых монотектических, эвтектических, перитектических систем и систем с непрерывной растворимостью. Исследование систем Nb—Ti и Nb—Zr, образующих ряд твердых растворов в широком диапазоне концентраций, показало, что у многих сплавов при гелевых температурах сверхпроводимость сохраняется до высоких значений магнитного поля. Критические характеристики сплавов зависят от механической и термической обработки сплавов, а также от наличия примесей и легирующих элементов.

Для систематизации сверхпроводящих соединений их классифицируют по группам с одиотипными кристаллическими структурами, поскольку этот фактор является одним из фундаментальных. Известные сверхпроводящие соединения принадлежат более чем к пятидесяти структурным типам. Наиболее высокими сверхпроводящими характеристиками обладают соединения типа A15, B1, C15, C14, фазы Шевреля.

В табл. 12 приведены критические характеристики некоторых сверхпро-

водящих интерметаллических соединений типа A15. В этом классе материалов находятся все сверхпроводники с рекордным значением T_c . В соединениях типа A15 наблюдаются аномалии в температурной зависимости электропроводности и магнитной восприимчивости. У многих соединений, например V₃Si, V₃Ga, Nb₃Sn, происходит низкотемпературный фазовый переход мартенситного типа. Соединения Nb₃Ga, Nb₃Ge и Nb₃Al в сверхпроводящем состоянии с высокой критической температурой являются метастабильными, и именно с метастабильностью этих соединений связывается высокое значение T_c . Промышленное применение нашли сплавы Nb₃Sn и V₃Ga.

Кристаллическую структуру типа NaCl (B1) имеют бориды, нитриды, карбиды и гидриды переходных металлов IIIA—VIA подгрупп Периодической системы элементов. В этом классе материалов находятся сверхпроводящие соединения с самой высокой температурой плавления. Наиболее высокими T_c обладают карбиды и нитриды VA и VIA подгрупп. Как правило, эти соединения гомогенны в широких областях концентраций: максимальные значения T_c соответствуют стехиометрическому составу с резким падением T_c при отклонении от стехиометрии. Из тройных соединений этого класса наибольший интерес вызывают карбонитриды ниобия состава NbN_xC_{1-x}. Максимум характеристика соответствует составу NbN_{0,7}C_{0,3} ($T_c = -255$ °C; $B_{c2}(0) = 16$ Тл; $J_c = 8 \cdot 10^{10}$ А/м²). Критическая плотность тока сверхпроводящих материалов на основе карбонитридов ниобия

превосходит J_c остальных известных сверхпроводников. Критические характеристики некоторых соединений типа B1 приведены в табл. 13.

Соединения типа фаз Лавеса состава AB₂ с плотноупакованной кубической структурой типа MgCu₂ (C15) и гексагональной структурой типа MgZn₂ (C14) различаются разной последовательностью чередования одинаковых слоев атомов А- и В-компонентов. Плотнейшая упаковка реализуется при отношении радиусов $r_A/r_B = \sqrt{3}/\sqrt{2}$.

В образовании сверхпроводящих фаз Лавеса участвуют практически все переходные металлы (за исключением инобия) и отсутствуют фазы с участием бора, углерода, азота, фосфора, что свидетельствует о металлическом характере связи в этих фазах. Максимальное значение T_c для фаз Лавеса достигается при стехиометрическом составе. Температуры перехода в сверхпроводящее состояние для некоторых фаз Лавеса приведены в табл. 14.

Фазы Шевреля — кристаллические структуры тройных халькогенидов переходных металлов. Для этих фаз характерно существование сверхпроводимости и антиферромагнетизма; каждый тип упорядочения может предшествовать другому при охлаждении образца. В соединении PbMo₆S₈ была установлена критическая температура —258 °C и рекордное значение критического поля $B_{c2} = 60$ Тл. Из соединения PbMo₆S₈ можно делать как пленки, так и проволоку.

Перспективными материалами являются сверхпроводящие металлические стекла, которые получают быстрой закалкой из жидкого состояния. Эти материалы обладают высокой проч-

13. Критические характеристики некоторых соединений типа B1 [34]

| Соединение | T_c , °C | B_{c2} , Тл | Соединение | T_c , °C | B_{c2} , Тл, при -273 °C |
|------------|------------|----------------|------------|------------|----------------------------|
| MoC | -259 | 5,2 (-269 °C) | ZrN | -262 | 0,3 |
| NbC | -261 | 2,0 (-269 °C) | HfN | -264 | — |
| TaC | -263 | 0,46 (-272 °C) | TaN | -264 | — |
| TiC | -270 | — | VN | -264 | — |
| δ-NbN | -256 | 25,0 (-272 °C) | UN | -267 | — |

14. Температура перехода фаз Лавеса в сверхпроводящее состояние [28]

| Структурный тип C15 | | | | Структурный тип C14 | | | |
|------------------------|------------|-------------------|------------|---------------------|------------|-------------------|------------|
| Соединение | T_c , °C | Соединение | T_c , °C | Соединение | T_c , °C | Соединение | T_c , °C |
| Hf(V, Nb) ₂ | -263 | CaIr ₂ | -267 | TaJ ₂ | -263 | ThRe ₂ | -268 |
| HfV ₂ | -264 | LaRu ₂ | -267 | ZrTc ₂ | -265 | YO ₂ | -268 |
| ZrV ₂ | -264 | SrRh ₂ | -267 | ZrRe ₂ | -266 | ScOs ₂ | -268 |
| ThIr ₂ | -267 | BaRh ₂ | -267 | HfRe ₂ | -267 | ScRe ₂ | -269 |
| CaRh ₂ | -267 | SrIr ₂ | -267 | HfTc ₂ | -267 | LuOs ₂ | -270 |
| GeRu ₂ | -267 | ZrIr ₂ | -269 | ThTc ₂ | -268 | ZrOs ₂ | -270 |

ностью и определенной степенью деформируемости. Максимальная $T_c = -269$ °C получена для металлических стекол состава $(Mo_{0,8}Re_{0,2})_{80}P_{10}V_{10}$.

Крупномасштабное применение сверхпроводимости связано с уменьшением массы и габаритов магнитных систем, уменьшением энергетических затрат при получении магнитных полей высокой напряженности. Термоядерный синтез, МГД-генераторы, индуктивные накопители энергии, генераторы и двигатели переменного и постоянного тока, трансформаторы, ЛЭП постоянного и переменного тока, высокоскоростные поезда, обогащение руд — далеко не полный перечень областей возможного использования сверхпроводящих материалов.

15. Сверхпроводящий скрученный многожильный провод из ниобий-титанового сплава HT-50 [19]

| Тип провода | Диаметр провода, мм | Число жил | Диаметр жилы, мкм | Кoeffициент заполнения, % | Критический ток в поле 5 Тл при -269 °C, А | Критическая плотность тока $\times 10^{-9}$ А/мм ² в поле 5 Тл | Шаг скрутки, мм |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|--|---|-----------------|
| ПНТ-0,5-37 и т. п. | 0,5; 0,7; 0,85; 1,0; 1,2; 1,5 | 35; 55; 61 | 40—200 | 30—50 | 60—1300 | (1,1—1,5) | 25 |
| ПНТ-0,5-24 и т. п. | 0,5; 0,7; 0,85; 1,0; 1,2; 1,5 | 24; 37; 48; 55; 61 | 30—160 | 30—50 | 60—1300 | (1,1—1,5) | 25 |
| ПНТ-0,45-121 | 0,45 | 121 | 30 | 50 | 90—130 | (1,1—1,6) | 10 |
| ПНТ-0,45-168 | 0,45 | 168 | 25 | 40 | 85—110 | (1,3—1,6) | 10 |
| ПНТ-0,45-199 | 0,45 | 199 | 25 | 50 | 100—130 | (1,3—1,7) | 10 |
| ПНТ-0,5-1045 | 0,5 | 1045 | 10 | 40 | 90—140 | (1,1—1,7) | 5 |
| ПНТ-1,0-1045 | 1,0 | 1045 | 20 | 40 | 360—560 | (1,1—1,4) | 10 |
| ПНТ-0,85-3025 | 0,85 | 3025 | 10 | 40 | 250—310 | (1,1—1,4) | 10 |
| ПНТ-0,33-1 | 0,33 | 1 | 240—250 | 70 | 80—100 | (1,3—1,7) | — |

Сверхпроводящие изделия (соленоиды, кабели), изготовленные из сверхпроводящих проводов, имеют более низкие критические токи, чем проволоки, использованные для их изготовления. Это явление получило название деградации. Допустимое значение рабочего тока в сверхпроводящем изделии зависит от потерь энергии в сверхпроводящих проводах. Это гистерезисные потери в сверхпроводящих волокнах; потери, вызванные собственным магнитным полем проволоки; вихревые потери в жиле, вызванные индуцированными токами между проволоками и др. Энергетические потери приводят к тепловыделению в сверхпроводнике, и, если температура поднимается выше критической, в сверхпроводнике воз-

16. Многожильные сверхпроводящие модули и фольга на основе сплава HT-50 [19]

| Тип изделия | Поперечное сечение, мм | Диаметр сверхпроводящей жилы, мкм | Число жил | Шаг скрутки, мм | Кoeffициент заполнения, % | Критический ток в поле 6 Тл при -269 °C, А |
|---------------|------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------|---------------------------|--|
| МНТ-2/2-456 | 2×2 | 40 | 456 | 20 | 15 | 360 |
| МНТ-3/1-456 | 3×1 | 40 | 456 | 30 | 15 | 390 |
| МНТ-3,5/2-361 | 3,5×2 | 80 | 361 | 30 | 30 | 1480 |
| МНТ-5/2-456 | 5×2 | 70 | 456 | 50 | 15 | 750 |
| МНТ-6/6-1200 | 6×6 | 40 | 1200 | 50 | 20 | 6000 |
| ФНТ-100/0,2 | 100×0,2 | — | — | — | 90 | $5 \cdot 10^9$ *1, А/м ² |

*1 Критическая плотность тока без внешнего магнитного поля.

никает участок нормальной фазы, который при недостаточном теплоотводе может привести к переходу всего изделия в нормальное состояние. Для предотвращения разрушения сверхпроводимости вследствие тепловыделений тонкие сверхпроводящие нити располагают в матрице из нормального металла (чаще всего меди), обладающего высокой электрической проводимостью и теплопроводностью. Для больших систем обмотки изготовляют с охлаждающими каналами, обеспечивающими отвод теплоты от проводов через металл-проводник.

В табл. 15 и 16 приведены основные характеристики типовых многожильных сверхпроводящих проводов и модулей на основе ниобий-титанового сплава HT-50, выпускаемых серийно в промышленных условиях и изготовляемых методом совместной деформации сверхпроводников с матрицей. Указанные многожильные провода и шины были использованы для изготовления большого числа сверхпроводящих магнитных систем. В табл. 17 приведены характеристики сверхпроводящих шин, полученных методом гальванического сращивания медью

17. Сверхпроводящие электролитические шины на основе сплава HT-50 [19]

| Тип шины | Ширина, мм | Толщина, мм | Диаметр провода, мм | Число сверхпроводников | Кoeffициент заполнения, % | Критический ток в поле 5 Тл при -269 °C, А |
|------------------------|------------|-------------|---------------------|------------------------|---------------------------|--|
| ШНТ-1,5/1,1 и т. п. | 1,5—5,0 | 1,1 | 0,5 | 3—10 | 15—20 | 400—1400 |
| ШНТ-2,1/1,3 и т. п. | 2,1—7,0 | 1,3 | 0,7 | 3—10 | 15—20 | 800—2800 |
| ШНТ-2,6/1,5 и т. п. | 2,6—8,5 | 1,5 | 0,85 | 3—10 | 15—20 | 1100—4000 |
| ШНТ-3,0/1,6 и т. п. | 3,0—10,0 | 1,6 | 1,0 | 3—10 | 15—20 | 1600—5600 |
| ШНТ-50/3 | 50 | 3,0 | 0,85 | 60 | 10—12 | 20—24 |
| ШНТ-10/1,2 | 10 | 1,2 | 0,33 | 30 | 10—12 | 800—1200 |
| ШНТ-10/1 | 10 | 1,0 | 0,33 | 30 | 10—12 | 800—1200 |
| ШНТ-10/1,2 | 10 | 1,2 | 0,85 | 10 | 30 | 2600—3100 |

18. Многожильные сверхпроводящие провода на основе интерметаллических соединений [19]

| Тип провода | Сверхпроводящее вещество | Диаметр или сечение, мм | Длина: метр, жил; ммк | Число жил | Критический ток, А, в поле, Тл | | | Критическая плотность тока $\times 10^{-3}$, А/мм ² , в поле, Тл | | | | |
|---|--------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------|--------------------------------|--------|------|--|------|------|------|-------|
| | | | | | 7,0 | 8,5 | 12 | 15 | 7,0 | 8,5 | 12 | 15 |
| | | | | | | | | | | | | |
| ПНО-1-7225 ПВГ-0,24-361 ПВГ-0,47-361 ПНО-0,16/1,93-6859 ПНО-1-575 ПНО-1-650 ПНО-3,5/3,5 ПНО-80/8 | Nb ₃ Sn | 1 | 5 | 7225 | 550 | 500 | 240 | 94 | 0,7 | 0,64 | 0,30 | 0,12 |
| | V ₃ Ga | 0,24 | 5 | 361 | — | 28 | — | — | — | 0,62 | — | — |
| | V ₃ Ga | 0,47 | 10 | 361 | — | 107 | — | — | — | 0,6 | — | — |
| | Nb ₃ Sn | 0,16×1,93 | 0,7 | 6859 | — | 200 | — | — | — | 0,65 | — | — |
| | Nb ₃ Sn | 1,0 | — | 575 | — | 1 340 | 340 | 90 | 1,7 | 1,22 | 0,43 | 0,115 |
| | Nb ₃ Sn | 1,0 | 22 | 650 | — | 750 | 200 | 73 | 0,95 | 0,70 | 0,25 | 0,093 |
| | Nb ₃ Sn | 3,5×3,5 | 5 | 7225×3 | — | 1 650 | 720 | — | — | — | — | — |
| | Nb ₃ Sn | 30×3 | 5 | 7225×25 | — | 12 000 | 6000 | — | — | — | — | — |

сверхпроводящих проводов, а в табл. 18 — различных многожильных проводов на основе Nb₃Sn и V₃Ga, полученных по методу «бронзовой технологии».

3. РЕЗИСТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие требования и классификация. Материалом высокого электрического сопротивления (резистивным) называют проводниковый материал с удельным электрическим сопротивлением при нормальных условиях не менее $0,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

По области применения резистивные материалы разделяют на три основные группы. Первая группа — материалы для резисторов (медные, медно-никелевые, никелевые, никель-хромовые; пленочные, проволоочные, углеродистые); вторая группа — материалы для термоэлектродов термопар и удлиняющих проводов (сплавы на основе Ni, Cu—Ni, Pt, Pt—Rh, W—Re; неметаллические порошковые материалы); третья группа — материалы для нагревателей (сплавы на основе Ni—Cr, Fe—Cr—Al, порошковые керамические материалы).

В зависимости от области применения к резистивным материалам предъявляют дополнительные требования, например, по температурному коэффициенту электрического сопротивления $T_{кр}$, жаростойкости и др.

Материалы для резисторов (резистивные материалы общего назначения). Основные требования к материалам для резисторов: низкий температурный коэффициент электрического сопротивления, низкая термоэлектродвижущая сила в паре с медью, высокая стабильность электрического сопротивления во времени. Различают сплавы для проволоочных, ленточных резисторов (технических и прецизионных) и материалы для непроволочных резисторов (пленочные, углеродистые). Резистивные материалы общего назначения широко используют в приборостроении, электротехнике для изготовления технических резисторов (регулирующие и пусковые резисторы, нагрузочные элементы), для прецизионных резисторов (образцо-

вые сопротивления, различные элементы электроизмерительных приборов, катушки сопротивления, шунты, обмотки потенциометров).

Сплавы для проволоочных резисторов. Основными сплавами для технических резисторов являются медно-никелевые (сплав ТБ марки МН16, мельхиор марки МН19, нейзильбер марки МНЦ 15—20); для прецизионных резисторов — сплавы на медной основе (манганин марки МНМц 3—12; МНМцАЖ 3—12—0,3—0,3 и константан марки МНМц 40—1,5) и сплавы на никелевой основе (марки Х20Н80-ВИ, 80ХЮД-ВИ, Х15Н60, ЭП277-ВИ). Для изготовления высокоточных прецизионных сопротивлений используют резистивные сплавы на основе благородных металлов Au, Ag, Pt, Pd; составы сплавов и свойства приведены в [11].

Составы сплавов, сортамент и свойства изделий регламентированы. Химический состав медно-никелевых сплавов определен ГОСТ 492—73, а сплавов на никелевой основе — ГОСТ 10994—74.

Промышленность изготавливает резистивную стандартную проволоку: холоднодеформированную из сплава нейзильбер МНЦ 15—20 диаметром 0,10—5,0 мм в мягком, полутвердом и твердом состоянии (ГОСТ 5220—78); проволоку из сплава манганин МНМц 3—12 в твердом состоянии диаметром 0,020—6,0 мм, а из сплавов МНМц 3—12 и МНМцАЖ 3—12—0,3—0,3 в мягком состоянии диаметром 0,05—6,0 мм (ГОСТ 10155—75); холоднотянутую константановую неизолированную проволоку из сплава МНМц 40—1,5 диаметром 0,020—0,09 мм в твердом состоянии и диаметром 0,09—5,00 мм в мягком состоянии для работы при температуре не выше 500 °С (ГОСТ 5307—77). Свойства резистивной проволоки из медно-никелевых сплавов приведены в табл. 19, а сплавов на никелевой основе — в табл. 20.

Для малогабаритных резистивных элементов в приборах используют промышленную стандартную проволоку (на тончайшую диаметром 0,009—0,09 мм и тончайшую диаметром 0,09—0,4 мм) из прецизионных никель-

хромовых сплавов Х20Н80-ВИ, Н80ХЮД-ВИ, Х20Н80, ЭП277-ВИ. Проволоку поставляют в отожженном состоянии. Сортамент, электрические и механические свойства проволоки в зависимости от диаметра нормированы ГОСТ 8803—77, свойства ее приведены в табл. 20.

Непроволочные резистивные материалы разделяют на пленочные металлургические, пленочные на основе оксидов, силицидов, карбидов и неметаллические — углеродистые. Пленочные резистивные материалы используют в микроэлектронике, в микросхемах, интегральных схемах и других устройствах. Непроволочные резисторы широко применяют в автоматике, измерительной и вычислительной технике, в различных областях электротехники. Свойства некоторых пленочных и углеродистых резистивных материалов приведены в табл. 21 и 22.

Материалы для электронагревателей. Общие требования к сплавам для электронагревательных элементов: высокая жаростойкость, высокое электрическое сопротивление в сочетании с низким температурным коэффициентом сопротивления, пластичность для промышленного получения изделий различного сортамента (проката, проволоки, ленты) и нагревателей.

Основные промышленные металлургические элементы электрических нагревателей изготавливают из железохром-алюминиевых и никель-хромовых прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением марок Х15Ю, Х23Ю5Т, Х23Ю5, Х27Ю5Т, Х15Н60, Х15Н60-Н, Х23Н80-Н (химический состав по ГОСТ 10994—74) и ХН7ЮЮ (химический состав по ГОСТ 5632—72). Механические, физические свойства, живучесть и максимальная рабочая температура сплавов для нагревательных элементов приведены в табл. 23—26 соответственно.

Живучесть прецизионных сплавов с заданным электрическим сопротивлением для электронагревательных элементов определяется по ГОСТ 2419—78 на проволоочных образцах диаметром 0,8 мм в условиях частых переменных нагревов до заданной тем-

19. Свойства проволоки из медно-никелевых сплавов

| Сплав | Состояние материала | Диаметр проволоки, мм | δ , % | σ_B , МПа, не менее | $\rho_l \cdot 10^6$, Ом·м |
|--|---------------------|-----------------------|------------------|----------------------------|----------------------------|
| Нейзильбер МНЦ 15—20 (ГОСТ 5220—78) | Мягкое | 0,10—0,20 | 15 | 343 | — |
| | | 0,25—0,50 | 20 | | |
| | | 0,60—1,0 | 25 | | |
| | Полутвердое | 1,10—5,00 | 30 | 441 | |
| | | 0,60—1,00 | 3 | | |
| | 1,10—5,00 | 5 | | | |
| Твердое | 0,10—0,50 | — | 686—1078 | | |
| | 0,60—1,00 | | | | |
| | 1,10—2,00 | | | | |
| Константан МНМц 40—1,5 (ГОСТ 5307—77) | Мягкое | 0,10—0,45 | 15 | 450—650 | 0,465 ± 0,015 |
| | | 0,50—5,00 | 20 | 450—650 | |
| | Твердое | 0,020—5,00 | — | 650 | 0,490 ± 0,030 |
| | | — | — | — | — |
| Манганин МНМц 3—12 (ГОСТ 10155—75) | Мягкое | 0,05—0,09 | 10, не менее | — | 0,48 ± 0,05 |
| | Твердое | 0,02—0,04 0,05—6,0 | — 9, не более | — | |
| МНМцАЖ 3—12—0,3—0,3 | Мягкое | 0,10—6,0 | 15, не менее | — | 0,47 ± 0,05 |

20. Свойства сплавов на никелевой основе для резисторов и тензорезисторов (ГОСТ 8803—77) [24]

| Сплав | $\rho_l \cdot 10^6$, Ом·м | $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ | σ_B , МПа | δ , % | Интервал рабочих температур, °C |
|-------------|----------------------------|--|------------------|--------------|---------------------------------|
| ЭП277-ВИ | 1,29—1,40 | 14 | >900 | 12—20 | —60—(+150) |
| Н80ХЮД-ВИ | 1,28—1,35 | 14 | 900—1000 | 8—18 | —60—(+150) |
| Х15Н60 | 1,09—1,12 | — | — | 12—20 | — |
| Х20Н80, | 0,98—1,10 | — | — | 12—20 | — |
| Х20Н80-ВИ | — | — | — | — | — |
| Н63ГХ с Ga | 1,7—1,8 | 15 | 1100—1300 | 10—12 | +20—(+150) |
| НМ10ХС | 1,5—1,6 | 14 | — | — | —196—(+200) |
| Х20Н75Ю-ВИ | 1,3—1,4 | 14 | 850—950 | 10—18 | —70—(+300) |
| НМ23ХЮ-ИЛ | 1,5—1,6 | 12 | >1200 | >18 | —196—(+430) |
| НМ20ЮФ с Ge | 1,7—1,8 | 12 | >1300 | 8—15 | —269—(+430) |
| Х20Н73ЮМ-ВИ | 1,4—1,5 | 14 | 900—1000 | 10—18 | —196—(+430) |
| НМ10ХЮ с Ge | 1,6—1,65 | 12,5 | 1100—1250 | >18 | —196—(+400) |
| НМ23ЮФ-ВИ | 1,5—1,6 | 12 | >1300 | 8—15 | —196—(+430) |
| Х21Ю5ФМ-ВИ | 1,4—1,5 | 14 | >800 | 8—12 | —196—(+480) |

21. Свойства пленочных резистивных материалов [11]

| Материал пленки | Удельное поверхностное сопротивление ρ_h , Ом | $TK\rho_h \cdot 10^4$, °C ⁻¹ | Допустимая мощность рассеяния $P_{доп} \cdot 10^4$, Вт·м ² | Изменение сопротивления за 100 ч $\Delta\rho_h/\rho_h$, % |
|------------------------------------|--|--|--|--|
| Металлические пленки | | | | |
| Хром | 200—500 | 0,6—1,8 | 2 | 1,6—3,2 |
| Х20Н80 | 50—300 | —3—(+2) | 1 | 1—1,3 |
| Тантал | 10—200 | —1—(+1) | 2—4 | — |
| Нитрид тантала | 10—300 | —0,5—(+1) | 2—4 | <0,3 |
| Металлооксидные пленки | | | | |
| Оксид олова | 400—1 000 | ±5 | — | ≤2 |
| Пленки сплавов, содержащих кремний | | | | |
| РС3001 | 800—3 000 | ≤1 | 2—5 | ≤1 |
| МЛТ-3М | 100—20 000 | ±(1,2—2,4) | 1 | ±0,5 |

Примечание. $TK\rho_h$ — температурный коэффициент ρ_h .

22. Свойства графита и пиролитического углерода [5]

| Материал | $\rho_l \cdot 10^6$, Ом·м | $\rho \cdot 10^{-8}$, кг/м ³ | $TK\rho \cdot 10^4$ | $\alpha \cdot 10^6$ |
|-----------------------------|----------------------------|--|---------------------|---------------------|
| | | | °C ⁻¹ | |
| Поликристаллический графит | 8 | 2,26 | —10 | 7,5 |
| Монокристалл графита: | | | | |
| вдоль базисных плоскостей | 0,4 | 2,24 | —9 | 6,6 |
| поперек базисных плоскостей | 100 | 2,24 | —400 | 2,6 |
| Пиролитический углерод | 10—50 | 2,10 | —2 | 6,5—7,0 |

пературы и охлаждений до потемнения поверхности. Живучесть определяется временем до перегорания образцов и характеризует жаростойкость материала в условиях частых теплосмен.

Из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением изготавливают: холоднотянутую проволоку диаметром 0,2—7,0 мм; холоднокатаную ленту толщиной 0,1—3,0 мм; круглые калиброванные холоднотянутые профили и теплотинутые профили диаметром 8—10 мм; сортовой горячекатаный прокат круглого сечения диаметром 6—30 мм и теплока-

танный прокат квадратного сечения; плющеную ленту толщиной 0,1—1,0 мм и шириной 0,5—5,0 мм (ГОСТ 12766.1—77 — ГОСТ 12766.5—77). Проволоку и ленту поставляют в мягком термически обработанном состоянии. Размеры и предельные отклонения размеров продукции из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением регламентированы ГОСТ 2771—81 — для проволоки, ГОСТ 10234—77 — для плющенной ленты.

Серийно выпускаются нагреватели из керамических матери-

23. Механические свойства прецизионных сплавов для электронагревателей в зависимости от температуры испытания (20, 800, 1200 °С) (ГОСТ 12766.1—77)

| Сплав | Термическая обработка | Температура, °С | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|---------------------|----------------------------|-----------------|------------|----------------|----------|--------|
| | | | МПа | | % | |
| X23Ю5, X23Ю5Т | 760 °С, 30 мин, вода | 20 | 645 | 540 | 23 | 72 |
| | | 800 | 117 | — | 58 | 94 |
| | | 1200 | 8,8 | — | — | — |
| X27Ю5Т | 760 °С, 30 мин, вода | 20 | 663 | 534 | 15,9 | — |
| | | 800 | 87,1 | — | 75,9 | 97,4 |
| | | 1200 | 8,8 | — | 117,7 | — |
| X15Н60, X15Н60-Н | 950 °С, 30 мин, вода | 20 | 645 | 264 | 31,9 | 59,8 |
| | | 800 | 166 | 127 | 33,3 | 50,5 |
| | | 1200 | 28,4 | — | 17,0 | 32,9 |
| X20Н80-Н | 1200 °С, 20 мин, воздух | 20 | 656 | — | 45,4 | 61,0 |
| | | 800 | 215 | — | 70,1 | 72,5 |
| | | 1200 | 22,5 | — | 101,8 | 98,0 |
| X7ЮЮ | 1000 °С, 20 мин, вода | 10 | 813 | — | 37,5 | — |
| | | 800 | 392 | — | 14,0 | — |
| | | 1200 | 32,4 | — | 143,0 | — |

24. Физические свойства сплавов (ГОСТ 12766.1—77)

| Параметр | Сплав | | | | | |
|--|-----------|-------|--------|-------------|--------|----------|
| | X15Ю5 | X23Ю5 | X23Ю5Т | X27Ю5Т | X15Н60 | X20Н80-Н |
| $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | 7,26 | 7,25 | 7,21 | 7,19 | 8,2 | 8,4 |
| $T_{пл}$, °С | 1500 | 1500 | 1500 | 1510 | 1390 | 1400 |
| Структура | Ферритная | | | Аустенитная | | |
| Магнитность | Магнитная | | | Немагнитная | | |
| $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ | 16 | 15 | 15 | 15 | 17 | 18 |
| λ , Вт/м | 16,8 | 16,8 | 16,8 | 16,8 | 12,6 | 16,8 |

алов для печей сопротивления (из карбида кремния и дисилицида молибдена с рабочей температурой до 1500 °С и до 1700 °С соответственно). Типы и размеры электронагревателей из карбида кремния регламентированы ГОСТ 16139—76.

Преимущественное применение на-

ходят нагреватели из карбида кремния как более дешевые и термостойкие по сравнению с нагревателями из дисилицида молибдена. Предельные рабочие температуры в различных газовых средах для керамических нагревателей указаны в табл. 27.

25. Живучесть и другие свойства изделий из прецизионных сплавов (ГОСТ 12766.1—77—ГОСТ 12766.5—77)

| Сплав | Температура испытания, °С | Живучесть, ч, не менее | | $\rho \cdot 10^4$, Ом·м | δ , % не менее *1 |
|----------|---------------------------|------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|
| | | номинальная | повышенная | | |
| X15Ю5 | 1120 | 100 | — | 1,24—1,34 | 16 |
| X23Ю5 | 1200 | 120 | 150 | 1,30—1,40 | 12 |
| X23Ю5Т | 1200 | 120 | 150 | 1,34—1,45 | 12 |
| X27Ю5Т | 1300 | 60 | 90 | 1,37—1,47 | — |
| X15Н60-Н | 1120 | 100 | 200 | 1,07—1,17 | 20 |
| X20Н80-Н | 1175 | 100 | 200 | 1,06—1,17 | 20 |
| КН7ЮЮ | 1200 | 80 | 100 | 1,25—1,35 | 15 |

*1 Для проволочных резисторов диаметром более 6 мм.

26. Максимальные рекомендуемые рабочие температуры (в °С) нагревательных элементов, работающих на воздухе (ГОСТ 12766.1—77)

| Сплав | Диаметр или толщина продукции, мм | | | | |
|----------|-----------------------------------|------|------|------|-------------|
| | 0,2 | 0,4 | 1,0 | 3,0 | 6,0 и более |
| X15Ю5 | 750 | 850 | 900 | 950 | 1000 |
| X23Ю5 | 950 | 1025 | 1100 | 1150 | 1200 |
| X23Ю5Т | 950 | 1075 | 1225 | 1350 | 1400 |
| X27Ю5Т | 950 | 1075 | 1200 | 1300 | 1350 |
| X15Н60-Н | 900 | 950 | 1000 | 1075 | 1125 |
| X20Н80-Н | 950 | 1000 | 1100 | 1150 | 1200 |
| КН7ЮЮ | 950 | 1000 | 1100 | 1175 | 1200 |

27. Предельные рабочие температуры керамических нагревателей [22]

| Газовая среда | Предельная рабочая температура, °С, для нагревателей | | Газовая среда | Предельная рабочая температура, °С, для нагревателей | | |
|----------------------------------|--|-------------------|----------------------------------|--|-------------------|------|
| | SiC | MoSi ₂ | | SiC | MoSi ₂ | |
| Инертные газы (He, Ar, Ne и др.) | 1500 | 1650 | Оксид углерода | 1300 | 1500 | |
| | | | | Сухой водород | 1250 | 1350 |
| Азот | 1470 | 1500 | Влажный водород; точка росы, °С: | | | |
| Кислород | 1400 | 1700 | | 10 | 1300 | 1400 |
| Углекислый газ | 1450 | 1700 | | 20 | — | 1500 |
| Оксид азота | — | 1650 | 35 | — | 1600 | |
| Диоксид азота | — | 1700 | Вакуум; $13,8 \cdot 10^{-2}$ Па | 1200 | — | |
| Сернистый ангидрид | — | 1600 | Вакуум; $6,65 \cdot 10^{-2}$ Па | 1100 | — | |

Нагреватели из карбида кремния изготовляют следующих типов: сплошные типа КЭН Б, КЭН БС размером соответственно $d = 12 \div 32$ мм, $L_{\text{раб}} = 190 \div 560$ мм и $d = 25$ мм, $L_{\text{раб}} = 300 \div 400$ мм; трубчатые типа КЭН А, КЭН ВП диаметром 8—30 мм с активной рабочей длиной 200—1200 мм. Нагреватели из MoSi_2 изготовляют U-образной формы из-за повышенной ползучести при рабочих температурах и в печи их размещают вертикально. Нагреватели из MoSi_2 предназначены для работы в окислительной среде благодаря высокой жаростойкости, которая обеспечивается образованием при нагреве на поверхности непрерывной стекловидной пленки SiO_2 . При недостаточном содержании кислорода в рабочей среде защитный слой разрушается. Нагреватели из SiC неработоспособны в среде водорода из-за образования летучих силианов. Нагреватели из SiC и MoSi_2 рекомендуется эксплуатировать непрерывно с целью повышения их долговечности. Частые охлаждения способствуют изменению объема в результате превращения при нагреве диоксида кремния, находящегося в порах, и приводят к разрушению нагревателей.

Материалы для термоэлектродов термопар и удлиняющих проводов. Основные требования к материалам для термоэлектродов термопар:

достаточно большая термоэлектродвижущая сила (термоЭДС); температура плавления выше предельной рабочей температуры не менее чем на 50—150 °С;

коррозионная устойчивость в рабочих средах;

достаточная прочность и пластичность для изготовления проволоки.

Для всех металлических термопар, за исключением имеющих в составе термоэлектродов молибден и вольфрам, образующих при нагреве летучие оксиды, рекомендуемой рабочей атмосферой является окислительная. Термопары, приведенные в табл. 28, могут использоваться в инертной атмосфере и в вакууме. Последние вместе с восстановительной являются рекомендуемой атмосферой средой экс-

плуатации термопар, содержащих в составе термоэлектродов молибден и вольфрам.

Состав сплавов, свойства и сортамент термоэлектродной проволоки, типы, размеры и свойства термопреобразователей широкого промышленного использования стандартизованы. Химический состав никелевых и медно-никелевых сплавов для термоэлектродов соответствует ГОСТ 492—73. Рабочие температуры термопреобразователей представлены в табл. 28.

Проволоку для термоэлектродов термопар из сплавов хромель Т марки НХ9,5, алюмель марки НМцАК 2—2—1, копель марки МНМц 43—0,5 изготовляют диаметром 0,2—5,0 мм с механическими свойствами, приведенными в табл. 29. Проволоку для термоэлектродов термопар ПР10/0, ПР30/6 изготовляют по ГОСТ 10821—75 из химически чистой платины марки ПЛТ и сплавов платины с родием (марок ПР-6, ПР-10, ПР-30) диаметром 0,1—1,0 мм и поставляют в отожженном состоянии. Проволоку из меди марки не ниже М1Е и сплава копель МНМц 34—0,5 для низкотемпературных термопар (от —200 до +100 °С) изготовляют диаметром 0,2—0,5 мм и поставляют в отожженном (мягком) состоянии со свойствами, указанными в табл. 30. Электрическое сопротивление проволоки из сплава копель составляет $(0,47 \pm 0,05) 10^{-6}$ Ом·м.

Термопреобразователи термопары для измерения температуры. Для получения информации о температуре в диапазоне —200÷2500 °С используют термоэлектрические преобразователи с металлическими термопарами типов ТВР, ТПР, ТПП, ТХА, ТХК (по материалу термоэлектродов термопар). Различают термопреобразователи нескольких исполнений: по отношению к внешней среде (обыкновенные, водозащищенные, взрывобезопасные, защищенные от агрессивной среды); по устойчивости к механическим воздействиям (обыкновенные, виброустойчивые); по условиям эксплуатации (кратковременного многократного применения, погружаемые, поверхностные и др.). Диапазоны измеряемых температур

28. Диапазон рабочих температур проволочных термопреобразователей (ГОСТ 3044—84)

| Тип термопреобразователя | Марка сплава термоэлектродов и обозначение термопары | Диапазон измеряемой температуры при длительном применении, °С | Предельная температура при кратковременном применении, °С |
|--------------------------|--|---|---|
| ТМК | Мель—копель М1—МНМц 43—0,5 | —200÷+100 | 100 |
| ТХК (ГОСТ 1790—77) | Хромель—копель НХ9,5—МНМц 43—0,5 | —200÷+600 | 800 |
| ТХА (ГОСТ 1790—77) | Хромель—алюмель НХ9,5—НМцАК 2—2—1 | —200÷+1000 | 1300 |
| ТПП (ГОСТ 10821—75) | Платинородий—платина ПР10—ПРО (ПР10/0) | 0—1300 | 1600 |
| ТПР (ГОСТ 10821—75) | Платинородий—платинородий ПР30—ПР6 (ПР30/6) | 300—1600 | 1800 |
| ТВР | Вольфрам—рений ВР5—ВР20 (ВР5/20) | 0—2000 | 2500 |

Примечание. В обозначении термопары первым (или числителем) указывается положительный термоэлектрод. Указанные ГОСТы нормируют изготовление проволоки соответствующих термоэлектродов.

29. Механические свойства проволоки при температуре 20 ± 5 °С [31] (ГОСТ 1790—77)

| Материал | Диаметр проволоки, мм | σ_B , МПа, не менее | δ , %, не менее |
|-----------|------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Хромель Т | 0,2; 0,3 | 490 | 15 |
| | 0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5,0 | | 20 |
| Алюмель | 0,2; 0,3 | 441 | 20 |
| | 0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5,0 | | 25 |
| Копель | 0,2; 0,3 | 392 | 15 |
| | 0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5,0 | | 20 |
| Мель | 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 | 200 | 20 |

30. Механические свойства проволоки для термоэлектродов при низких температурах [31]

| Материал | Температура, °С | σ_b | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|----------|-----------------|------------|----------------|----------|--------|
| | | МПа | | % | |
| Копель | 20 | 414 | 135 | 40 | 77 |
| | -10 | 454 | 126 | 47 | 78 |
| | -40 | 465 | 144 | 43 | 78 |
| | -80 | 496 | 152 | 48 | 78 |
| | -120 | 529 | 165 | 48 | 74 |
| | -180 | 616 | 181 | 57 | 76 |
| Мель | 20 | 215 | 58 | 48 | 76 |
| | -10 | 219 | 60 | 40 | 79 |
| | -40 | 231 | 62 | 47 | 77 |
| | -80 | 264 | 68 | 47 | 74 |
| | -120 | 282 | 73 | 45 | 70 |
| | -180 | 400 | 78 | 58 | 77 |

соответствуют указанным в табл. 28. Устойчивость термопреобразователей к механическим воздействиям определяется ГОСТ 12997—84. У всех термопреобразователей маркируется положительный термоэлектрод.

Кабельные термоэлектрические преобразователи с хромель-алюмелевыми термоэлектродными (типа КТХАС — в стальной оболочке, типа КТХАСп — в оболочке из жаропрочного сплава) используют для измерения температур от -50 до +1300 °С и с хромель-копелевыми термоэлектродными (типа КТХКС) для измерения температур от -50 до +800 °С в газообразных, жидких и твердых средах, не агрессивных к материалу (коррозионно-стойкая сталь или сплав) оболочки термопреобразователя. Типы, конструкции, размеры и основные параметры термопреобразователей соответствуют ГОСТ 23847—79. Кабельные термопреобразователи предназначены для работы в вакууме, при нормальном и избыточном давлении измеряемой среды до 40 МПа. Термоэлектроды однопроволочные из сплавов хромель Т, алюмель или копель изготавливают по ГОСТ 1790—77. Термоэлектроды изолированы друг от друга и от оболочки минеральной изоляцией. У всех кабельных термопре-

образователей вывод положительного термоэлектрода закрашивают красной нитроэмалью.

Для измерения низких температур в диапазоне от -259,34 до 0 °С используют платиновые образцовые термометры сопротивления (ГОСТ 12877—76) с чувствительным элементом из платины Pt10.

Температуру в окислительных средах до 2200 °С измеряют с помощью термопар с термоэлектродными из иридия и его сплавов ИР40/0, ИР50/0, ИР60/0 [31].

Для удлиняющих проводов термопар используют проволоку из никелевого и медно-никелевых сплавов. Проволоку изготавливают из сплава хромель К, медно-никелевых сплавов копель, константан и сплава ТП диаметром 0,2—2,5 мм. Отклонения диаметров — по ГОСТ 1791—67. Проволоку поставляют в мягком (отожженном) состоянии с окисленной поверхностью. Основные свойства проволоки для удлиняющих проводов приведены в табл. 31.

Неметаллические высокотемпературные термопары с электродом из тугоплавких соединений. Характеристики термопар приведены в табл. 32. Термопары из

31. Свойства проволоки для удлиняющих проводов термопар (ГОСТ 1791—67)

| Сплав | ТермоЭДС в паре с образцом меди при температуре свободного конца проволоки 0 °С и рабочего конца 100 °С, мВ | $\rho_t \cdot 10^8$, Ом·м, при 20 °С | Диаметр проволоки, мм | σ_b , МПа | δ , % |
|------------|---|---------------------------------------|------------------------|------------------|--------------|
| | | | | не менее | |
| Хромель К | +2,09 | 0,67 ± 0,05 | 0,2; 0,3 0,4—2,5 | 490 | 15 20 |
| Копель | -4,77 | 0,47 ± 0,02 | 0,2; 0,3 0,4—2,5 | 390 | 15 20 |
| Константан | -4,10 | 0,465 ± 0,015 | 0,2—0,3 0,4—2,5 | 390 | 10 15 |
| ТП | -0,64 | 0,025 ± 0,003 | 0,20—0,67 0,70—2,50 | 200 | 20 25 |

32. Характеристики неметаллических термопар [22]

| Термопара | t_{max} , °С | α_T при $t > 600$ °С, мкВ/°С | Примечания |
|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|--|
| C/TiC | 2500 | 65 | 1. α_T — коэффициент термоЭДС. 2. В обозначении термопары числитель указывает наружный электрод, знаменатель — внутренний. |
| C/NbG | 2500 | 26 | |
| C/ZrB ₂ | 2000 | 65 | |
| ZrB ₂ /ZrG | 2000 | 9 | |
| MoSi ₂ /WSi ₂ | 1700 | 8 | |

33. Свойства сплавов зарубежных фирм для нагревателей [17, 24, 30]

| Сплав | Отечественный аналог | t_{max} в воздушной среде, °С | $\rho_t \cdot 10^8$, Ом·м | R_{1000}/R_{30} * | σ_b , МПа | δ , % не менее |
|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------|------------------|-----------------------|
| VDM, Vacuumshmelze (ФРГ) | | | | | | |
| Кроникс 80 экстра | X20H80-N | 1200 | 1,09 | 1,049 | 635—785 | 30 |
| Вахронум 80 | X20H80 | 1250 | 1,12 | — | — | — |
| Кроникс 70 | XH70Ю | 1275 | 1,16 | 1,035 | 700—900 | 25 |
| Вахронум 70 | XH70Ю | 1250 | 1,20 | — | — | — |
| Кронифер II экстра | X15H60-N | 1200 | 1,11 | 1,100 | 650—750 | 30 |
| Вахронум 60 | X15H60-N | 1200 | 1,13 | — | — | — |

Продолжение табл. 33

| Сплав | Отечественный аналог | t_{\max} в воздушной среде, °C | $\rho \cdot 10^6$, Ом·м | R_{1000}/R_{20}^{*1} | σ_B , МПа | δ , % не менее |
|--|----------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------|-----------------------|
| Кронифер III экстра | XH20ЮС | 1150 | 1,04 | 1,250 | 600—750 | 30 |
| Кронифер IV экстра | XH20ЮС | 1100 | 0,95 | 1,330 | 600—750 | 30 |
| Алюхром 0 | X23Ю5Т | 1350 | 1,44 | 1,035 | 600—800 | 12 |
| Алюхром 1 | X27Ю5Т | 1300 | 1,37 | 1,060 | 600—800 | 12 |
| Алюхром W | X15Ю5 | 1100 | 1,25 | 1,140 | 600—800 | 18 |
| Kanthal, Bulten—Kantal (Швеция) | | | | | | |
| Никротал 80 | X20H80-N | 1200 | 1,09 | 1,049 | 635—785 | 25 |
| Никротал 70 | XH70Ю | 1250 | 1,17 | — | — | — |
| Никротал 60 | X15H60-N | 1125 | 1,11 | 1,110 | 635—785 | 25 |
| Никротал 40 | XH20ЮС | 1100 | 1,04 | 1,230 | 635—785 | 25 |
| Никротал 20 | XH20ЮС | 1050 | 0,95 | 1,320 | 635—785 | 25 |
| Кантал А-1 *2 | X23Ю5Т | 1375 | 1,45 | 1,036 | 635—835 | 12 |
| Кантал А *3 | X27Ю5Т | 1330 | 1,39 | 1,056 | 635—835 | 12 |
| Кантал DSD | X23Ю5 | 1280 | 1,35 | 1,068 | 635—835 | 12 |
| Алькротал | X15Ю5 | 1050 | 1,25 | 1,110 | 590—685 | 18 |

*1 R_{1000}/R_{20} — поправочный коэффициент электрического сопротивления; числа 1000, 20 — температура, °C.

*2 Лента.

*3 Проволока.

тугоплавких соединений широкого распространения не получили, так как требуется градуировка для каждой термодары.

Зарубежные аналоги. Свойства сплавов зарубежных фирм для электронагревателей приведены в табл. 33.

4. МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие требования и классификация. В соответствии с ГОСТ 19693—74 магнитотвердыми называют ферро- и ферромагнитные материалы с коэрцитивной силой по индукции не менее 4 кА/м.

Основными показателями свойств магнитотвердых материалов являются удельная магнитная энергия W , равная половине произведения индукции и напряженности магнитного поля BH , соответствующих заданной точке

на кривой размагничивания, и максимальная удельная магнитная энергия $W_{\max} = 0,5 (BH)_{\max}$. От этого показателя (W_{\max}) зависит объем магнита, необходимого для создания магнитного поля в заданном воздушном зазоре. Чем больше удельная магнитная энергия, тем меньше объем, а следовательно, и масса магнита. В нормативных документах иногда использована величина $(BH)_{\max}$. К основным показателям относят также проницаемость возврата μ_B — дифференциальную магнитную проницаемость на прямой возврата.

Магнитотвердые материалы должны иметь максимальные значения следующих параметров: коэрцитивной силы H_c , максимальной удельной магнитной энергии W_{\max} , остаточной индукции B_r .

Магнитотвердые материалы применяют в станкостроении, автомобиле-

строении, в электротехнике, приборостроении, радиоэлектронной технике. Их используют для производства машин постоянного тока, для роторов машин, синхронных машин, шаговых двигателей; для элементов с внешней и внутренней памятью; для носителей и аппаратуры магнитной записи и воспроизведения гармонических и импульсных сигналов.

Магнитотвердые материалы классифицируют по составу и основному способу получения на следующие группы: магнитотвердые легированные мартенситные стали; литые магнитотвердые сплавы; деформируемые магнитотвердые сплавы; порошковые магнитотвердые материалы (металлические, ферро- и ферриоксидные, магнитоэластические, магнитоэластические); сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов. Табл. 34 позволяет оценить выделенные группы магнитотвердых материалов по диапазону нормированных магнитных параметров.

Легированные мартенситные стали (на основе Fe—Cr, Fe—Cr—W, Fe—Cr—Co и др.) являются наиболее дешевым материалом для постоянных магнитов. Однако они имеют невысокие магнитные свойства, в связи с чем применение их ограничено. В наибольшей степени используют магнитотвердые ферриты и сплавы системы Fe—Al—Ni, Fe—Al—Ni—Co. Эти сплавы имеют хорошие магнитные свойства, но характеризуются высокой твердостью и хрупкостью. Вследствие этого постоянные магниты из них изготовляют литьем или методами порошковой металлургии. Сплавы этой группы, содержащие кобальт, в несколько раз дороже сплавов на бескобальтовой Fe—Al—Ni основе. Широко распространенными материалами для постоянных магнитов являются ферриты.

Магнитотвердая легированная сталь предназначена для изготовления постоянных магнитов неотвечественного назначения. Легированную магнитотвердую сталь (марки типа Е) изготовляют с содержанием углерода 0,90—1,05%. Основные легирующие элементы: (2,80—10,0)% Cr, (5,15—16,5)% Co, (5,20—6,20)% W, (1,20—

1,70)% Mo, (0,17—0,40)% Si, (0,30—0,60)% Ni. Химический состав, сортмент и свойства (H_{CB} , B_r , H_B) изделий нормированы ТУ 14-1-4487—88. Из легированной магнитотвердой стали изготовляют горячекатаные или кованные прутки с диаметром или стороной квадрата до 70 мм включительно и прямоугольные прутки толщиной до 25 мм включительно и шириной до 50 мм включительно. Прутки поставляют в термически обработанном состоянии или без термической обработки. В табл. 35 указаны свойства легированной магнитотвердой стали.

Литые магнитотвердые материалы — это в основном сплавы на основе Fe—Al—Ni, Fe—Al—Ni—Co. Марки сплавов, химический состав, тип кристаллической структуры (равноосная, столбчатая, монокристаллическая), наличие магнитной анизотропии регламентированы ГОСТ 17809—72. Свойства сплавов приведены в табл. 36. Сплавы используют для магнитов измерительных приборов, автоматических и акустических устройств, электрических машин, магнитных муфт, опор, тормозов.

Высококоэрцитивное состояние сплавов обеспечивается выделением при отпуске после закалки сильно высокодисперсной фазы, преимущественно анизотропной. На рис. 4—7 приведены кривые размагничивания некоторых материалов. Прямые на этих рисунках соединяют начало координат с точкой $(BH)_{\max}$ (ГОСТ 17809—72).

Деформируемые магнитотвердые сплавы. Предназначены для постоянных магнитов, для активной части роторов гистерезисных электродвигателей, для элементов памяти систем управления автоматизации связи, для носителей магнитной записи информации. Магнитотвердые деформируемые материалы на основе сплавов Fe—Cr—Co предназначены для изготовления постоянных магнитов толщиной не более 50 мм и диаметром не более 100 мм. Материал изготовляют литым (Л), горячекатаным (ГК), холоднокатаным (ХК) и поставляют в виде круглых и квадратных прутков, полос, труб, цилиндров и колец. В зависимости от направленности магнитных свойств

84. Характеристики размагничивания магнитотвердых материалов различных групп *1

| Группа | Марка | W_{\max} , кДж/м ³ | B_r , Тл | H_{cB} , кА/м |
|-----------------------------------|------------|---------------------------------|------------|-----------------|
| Легированные стали | EX3 | 0,595 | 0,95 | 4,775 |
| | EX9K15M2 | 1,035 | 0,80 | 11,94 |
| Литые сплавы: Fe—Al—Ni | ЮНД4 | 3,6 | 0,50 | 40 |
| | ЮНД8 | 5,1 | 0,60 | 44 |
| Fe—Al—Ni—Co | ЮНДК15 | 6,0 | 0,75 | 48 |
| | ЮНДК35Т5АА | 40 | 1,05 | 115 |
| Деформируемые сплавы: Fe—Cr—Co | 28X10K | 3,5 | 0,8 | 10 |
| | 22X15KA | 28 | 1,5 | 47 |
| Pt—Co (литой) | ПлК78 | 39,8—43,8 | 0,75 | 270 |
| Порошковые сплавы: Fe—Al—Ni | ММК-1 | 3,0 | 0,60 | 24 |
| | ММК-2 | 3,5 | 0,48 | 39 |
| Fe—Al—Ni—Co | ММК-3 | 4,0 | 0,52 | 44 |
| | ММК-11 | 16 | 0,70 | 128 |
| Феррит бария | 4БИ145 | 2,0 | 0,17 | 95 |
| | 28БА190 | 14,0 | 0,39 | 185 |
| Феррит стронция | 28СА250 | 14,0 | 0,39 | 240 |
| Sm—Co Sm, Pr—Co | КС37А | 65 | 0,82 | 540 |
| | КСП37А | 72,5 | 0,90 | 500 |

*1 Данные приведены для материалов стандартных марок с минимальными и максимальными значениями магнитных параметров W_{\max} и H_{cB} среди промышленных стандартизованных сплавов классификационных групп. Свойства сплава Pt—Co не нормированы.

35. Магнитные свойства и твердость термически обработанной стали [24, 33]

| Сталь | H_{cB} , А/м | B_r , Тл | НВ, МПа | $(BH)_{\max}$, Тл·м/кА | $\rho_s \cdot 10^6$, Ом·м | σ_b , МПа |
|----------|----------------|------------|-----------|-------------------------|----------------------------|------------------|
| EX3 | 4 775 | 0,95 | 2290—2850 | 1,19 | 0,29 | 2060 |
| EB6 | 4 775 | 1,00 | 2550—3210 | 1,31 | 0,30 | 2060 |
| EX5K5 | 7 165 | 0,85 | 2690—3410 | 1,59 | 0,30 | 2060 |
| EX9K15M2 | 11 937 | 0,80 | 2850—3410 | 2,07 | 0,28 | 2060 |

36. Магнитные свойства магнитотвердых литых сплавов на Fe—Al—Ni—Co основе (ГОСТ 17809—72)

| Марка сплавов | $(BH)_{\max}$, кДж/м ³ | H_{cB} , кА/м | B_r , Тл | $(B/H) \cdot 10^{-3}$ в точке $(BH)_{\max}$, Тл·м/кА |
|---------------|------------------------------------|-----------------|------------|---|
| | не менее | | | |
| ЮНД4 | 7,2 | 40 | 0,50 | 12,0—16,0 |
| ЮНД8 | 10,2 | 44 | 0,60 | 13,0—16,0 |
| ЮНТС | 8,0 | 58 | 0,43 | 7,0—10,0 |
| ЮНДК15 | 12,0 | 48 | 0,75 | 15,5—18,0 |
| ЮНДК18 | 19,4 | 55 | 0,90 | 15,0—20,0 |
| ЮНДК18С | 28,0 | 44 | 1,10 | 22,0—28,0 |
| ЮН13ДК24С | 36,0 | 36 | 1,30 | 30,0—33,0 |
| ЮН13ДК24 | 36,0 | 40 | 1,25 | 25,0—27,5 |
| ЮН14ДК24 | 36,0 | 48 | 1,20 | 20,0—22,0 |
| ЮН15ДК24 | 36,0 | 52 | 1,15 | 15,0—17,5 |
| ЮН13ДК25А | 56,0 | 44 | 1,40 | 27,5—30,0 |
| ЮН14ДК25А | 56,0 | 52 | 1,35 | 24,0—25,0 |
| ЮН13ДК25БА | 56,0 | 48 | 1,40 | 26,5—27,5 |
| ЮН14ДК25БА | 56,0 | 58 | 1,30 | 21,5—24,0 |
| ЮН15ДК25БА | 56,0 | 62 | 1,25 | 16,5—21,5 |
| ЮНДК34Т5 | 28,0 | 92 | 0,75 | 8,0—11,0 |
| ЮНДК35Т5Б | 32,0 | 98 | 0,75 | 8,0—10,0 |
| ЮНДК35Т5 | 36,0 | 110 | 0,75 | 7,0—8,0 |
| ЮНДК35Т5БА | 72,0 | 110 | 1,02 | 8,0—9,0 |
| ЮНДК35Т5АА | 80,0 | 115 | 1,05 | 8,0—9,0 |
| ЮНДК38Т7 | 36,0 | 135 | 0,75 | 4,5—5,5 |
| ЮНДК40Т8 | 36,0 | 145 | 0,70 | 3,5—4,5 |
| ЮНДК40Т8АА | 64,0 | 145 | 0,90 | 4,0—5,0 |

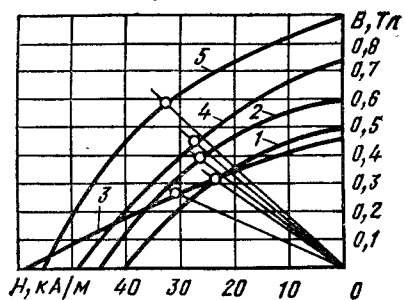


Рис. 4. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:
1 — ЮНД4; 2 — ЮНД8; 3 — ЮНТС; 4 — ЮНДК15; 5 — ЮНДК18

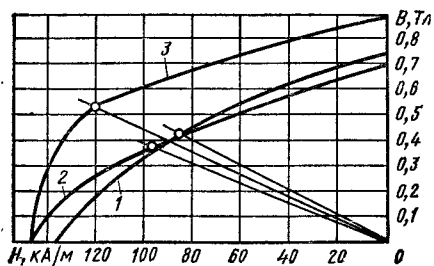


Рис. 5. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:
1 — ЮНДК38Т7; 2 — ЮНДК40Т8; 3 — ЮНДК40Т8АА

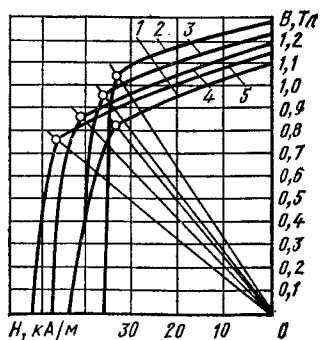


Рис. 6. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:
1 — ЮНДК18С; 2 — ЮН13ДК24С; 3 — ЮН13ДК24; 4 — ЮН14ДК24; 5 — ЮН15ДК24

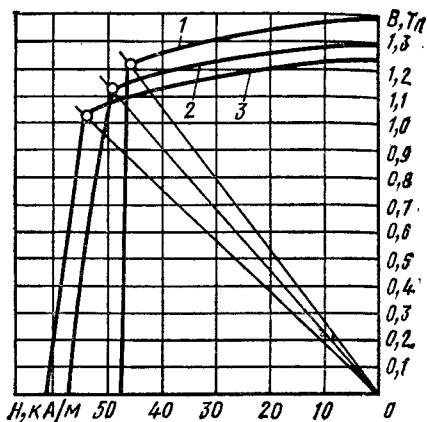


Рис. 7. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:
1 — ЮН13ДК25БА; 2 — ЮН14ДК25БА; 3 — ЮН15ДК25БА

материалы подразделяют на анизотропные и изотропные. Химический состав сплавов, сортамент и магнитные свойства материалов нормированы ГОСТ 24897—81. Магнитные характеристики материалов приведены в табл. 37, физико-механические — в табл. 38. Высококоэрцитивное состояние Fe—Cr—Co сплавов достигается образованием в результате термической обработки высокодисперсных анизотропных включений сильномагнитной фазы FeCo в слабомагнитной матрице FeCr.

Из прецизионного сплава марки ЭИ708-ВИ изготавливают холоднотянутую проволоку диаметром 0,03 и 0,05 мм, предназначенную для записи и воспроизведения гармонических сигналов, контроля магнитной записи и головок. Химический состав сплава марки ЭИ708-ВИ нормирован ГОСТ 10994—74, рабочие свойства проволоки — ГОСТ 18834—83. Проволока обладает коррозионной стойкостью в условиях морского тумана при влажности 100 %, температуре 40 °С в течение 56 суток. Рабочая температура от —60 до +70 °С. Магнитные свойства: H_c не менее $(47,7 \cdot 10^3 \div 79,5 \cdot 10^3)$ А/м, $B_r = (0,2 \div 0,5)$ Тл. Механические

37. Магнитные характеристики магнитотвердых деформируемых сплавов (ГОСТ 24897—81)

| Сплав | $(BH)_{\max}$, кДж/м ³ | $H_c B_r$, кА/м | B_r , Тл | $(B/H) \cdot 10^{-3}$ в точке $(BH)_{\max}$, Тл·м/кА | μ_B |
|-----------|------------------------------------|------------------|------------|---|---------|
| 28X10K | 7 | 20 | 0,8 | 30—40 | 5—8 |
| 28X10KA | 26 | 38 | 1,1 | 25—30 | 3,5—5 |
| 25X15K | 10 | 24 | 0,9 | 30—40 | 5—8 |
| 25X15KA | 32 | 40 | 1,2 | 25—30 | 3,5—5 |
| 23X15K5ФА | 38 | 42 | 1,25 | 25—30 | 3,5—4,5 |
| 30X23K | 12 | 50 | 0,75 | 15—20 | 4—5 |
| 30X23KA | 30 | 55 | 1,00 | 15—20 | 3—4 |
| 22X15KA | 56 | 47 | 1,5 | 28—33 | 3—4 |
| 23X15KA | 34 | 40 | 1,23 | 30—35 | 3,5—5 |
| 25X12K2БА | 35 | 40 | 1,25 | 28—33 | 3,5—5 |
| 23X14K3ФА | 36 | 41 | 1,27 | 30—35 | 3,5—5 |
| 32X12KДТ | 24 | 48 | 1,05 | 18—22 | 3—4,5 |

38. Физико-механические свойства Fe—Cr—Co сплавов в высококоэрцитивном состоянии (ГОСТ 24897—81)

| Состояние материала | σ_B | σ_T | δ | ψ | HRC |
|-------------------------------|------------|------------|----------|--------|-------|
| | МПа | | % | | |
| Литой | 196 | 490 | 1 | 3 | 32—41 |
| Горячекатаный, холоднкатанный | 785—883 | 569—686 | 3—5 | 7 | 32—41 |

Примечание. Плотность сплавов $(7,65 \div 7,70) \cdot 10^3$ кг/м³.

свойства: σ_B — не менее 1960 МПа; δ — не более 2 %.

Порошковые магнитотвердые материалы. Спеканием порошков получают дисперсионно-твердеющие сплавы системы Fe—Al—Ni—Co. Спекание магнитов, формованных из шихты этих сплавов, проводят в вакууме при температуре 1200—1300 °С в течение 1—5 ч; остаточная пористость при этом составляет 3—7 % и приводит к снижению параметра W_{\max} . Изготовление беспористых порошковых магнитов методом горячего прессования обеспечивает повышение магнитных свойств.

Спеченные магниты имеют мелкозернистую структуру, однородные маг-

нитные свойства и превышают по прочности литые. Порошковая металлургия обеспечивает возможность изготовления магнитов различных типоразмеров. Недостатком этого метода является повышенная стоимость исходных порошков.

Порошковые магниты используют в узлах, работающих при ударных и вибрационных нагрузках. Магнитные и механические свойства порошковых металлических сплавов приведены в табл. 39.

В табл. 40 представлены свойства магнитотвердых ферритов. Ферриты используют в качестве постоянных магнитов в электротехнике, радиотехнике, станкостроении, автомобилестро-

39. Магнитные и механические свойства порошковых магнитных сплавов Fe—Al—Ni—Co [29]

| Магнит | | B_r , Тл | H_c , кА/м | W_{\max} , кДж/м ³ | $\sigma_{сж}$ | σ_n |
|-----------|------------|------------|--------------|---------------------------------|---------------|------------|
| литой | порошковый | | | | | |
| не менее | | | | | | |
| ЮН | ММК-1 | 0,60 | 24 | 3,0 | 2000 | 400 |
| ЮНД4 | ММК-2 | 0,48 | 39 | 3,5 | 2000 | 400 |
| ЮНДК3 | ММК-3 | 0,52 | 44 | 4,0 | 1700 | 300 |
| ЮНДК12А | ММК-4 | 0,76 | 52 | 7,5 | 1700 | 300 |
| ЮНДК12Б | ММК-5 | 0,60 | 44 | 4,7 | 1700 | 300 |
| ЮНДК15 | ММК-6 | 0,65 | 44 | 5,0 | 1700 | 300 |
| ЮНДК24Т1 | ММК-7 | 1,2 | 54 | 14 | 1200 | 250 |
| ЮНДК23 | ММК-8 | 1,10 | 40 | 14 | 1200 | 250 |
| ЮНДК34Т5А | ММК-9 | 0,75 | 80 | 12 | 1000 | 200 |
| ЮНДК34Т5Б | ММК-10 | 0,80 | 100 | 15 | 1000 | 200 |
| ЮНДК38Т7 | ММК-11 | 0,70 | 128 | 16 | 1000 | 200 |

40. Магнитные свойства магнитотвердых ферритов [23]

| Феррит | B_r , Тл | $H_{сВ}$ | $H_{сJ}$ | W_{\max} , кДж/м ³ | Феррит | B_r , Тл | $H_{сВ}$ | $H_{сJ}$ | W_{\max} , кДж/м ³ |
|---------|------------|----------|----------|---------------------------------|---------|------------|----------|----------|---------------------------------|
| | | | | | | | | | |
| 4БИ145 | 0,17 | 95 | 145 | 2,0 | 25БА170 | 0,38 | 165 | 170 | 12,5 |
| 6БИ240 | 0,19 | 125 | 240 | 3,0 | 28БА170 | 0,39 | 165 | 170 | 14,0 |
| 7БИ215 | 0,21 | 125 | 215 | 3,5 | 28БА190 | 0,39 | 185 | 190 | 14,0 |
| 7БИ300 | 0,20 | 135 | 300 | 3,5 | 21СА320 | 0,34 | 240 | 320 | 10,5 |
| 9БА205 | 0,24 | 135 | 205 | 4,5 | 24СА200 | 0,37 | 195 | 220 | 12,0 |
| 14БА255 | 0,29 | 185 | 255 | 7,0 | 27СА220 | 0,38 | 215 | 220 | 13,5 |
| 15БА300 | 0,30 | 200 | 300 | 7,5 | 28СА250 | 0,39 | 240 | 250 | 14,0 |
| 16БА190 | 0,30 | 185 | 190 | 8,0 | 22РА220 | 0,36 | 215 | 220 | 11,0 |
| 18БА220 | 0,33 | 210 | 220 | 9,0 | 25РА150 | 0,38 | 145 | 150 | 12,5 |
| 18БА300 | 0,32 | 220 | 300 | 9,0 | 25РА170 | 0,38 | 165 | 170 | 12,5 |
| 19БА260 | 0,33 | 225 | 260 | 9,5 | 25РА180 | 0,39 | 175 | 180 | 12,5 |
| 22БА220 | 0,36 | 215 | 220 | 11,0 | 28РА180 | 0,40 | 185 | 190 | 14,0 |
| 24БА210 | 0,37 | 205 | 210 | 12,0 | 11КА135 | 0,24 | 130 | 135 | 5,5 |
| 25БА150 | 0,38 | 145 | 150 | 12,5 | 14КА135 | 0,28 | 130 | 135 | 7,0 |

Примечание. В обозначении марки ферритов цифры, стоящие перед буквами, соответствуют значению $(BH)_{\max} = 2W_{\max}$. Первая буква после цифр Б, С, К, Р означает бариевый, стронциевый, кобальтовый и содержащий редкоземельные добавки феррит соответственно; вторая буква означает: И — изотропный, А — анизотропный. Цифры после букв соответствуют значению $H_{сJ}$.

41. Сортамент сплава ПЛК-78 [24]

| Вид продукции | Поперечные размеры, мм |
|---------------|---------------------------------------|
| Проволока | $\varnothing 0,4-3,2$ |
| Полосы | $(0,5 \div 3,7) \times (10 \div 100)$ |
| Прутки | $\varnothing 6-20$ |
| Трубы | $\varnothing 30 \times 5$ |

сокая стоимость ограничивает применение этих сплавов.

Сортамент литого сплава системы Pt—Co марки ПЛК-78, содержащего 76,5—79,0 % Pt (остальное кобальт), представлен в табл. 41. Сортамент химический состав сплава нормируется техническими условиями. Сплав поставляют без термической обработки на высококоэрцитивное состояние. Рекомендуемые режимы термической обработки приведены в [24].

При изготовлении магнитов широко используют порошковую металлургию. Порошковый сплав Pt—Co подвергают холодной деформации; после закалки сплав легко обрабатывается резанием. Рабочая температура для порошковых Pt—Co материалов до 350 °С. Высококоэрцитивное состояние сплавов Pt—Co возникает в результате появления упорядоченной тетрагональной фазы с высокой энергией магнитной анизотропии. Физические свойства Pt—Co сплавов в высококоэрцитивном состоянии приведены в табл. 42.

42. Свойства сплавов Pt—Co

| Свойства | Литой сплав [24] | Порошковый сплав [22] |
|---|------------------|-----------------------|
| B_r , Тл | 0,7—0,8 | 0,7 |
| $H_{сВ}$, кА/м | 225—310 | 280 |
| $(BH)_{\max}$, Тл·м/кА | 79,6—87,6 | 76 |
| $H_{сJ}$, кА/м | 400 | — |
| B_r/B_{\max} | 0,5 | — |
| $\theta_{\mu}^{\mu} \rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | 1,2 | — |
| | 15,0—16,0 | 520—530 |
| | | 14,8—15,2 |

ными, для создания различного рода технической аппаратуры — магнитных сепараторов, муфт, вентилялей. Недостатком ферритов является существенная зависимость характеристик от температуры и недостаточная механическая прочность. Их преимущества по сравнению с металлическими материалами — более высокая коэрцитивная сила, низкая плотность, высокое электрическое сопротивление. Оксидные магниты дешевле и не содержат дефицитных элементов. Наибольшее практическое использование имеют гексаферриты бария и ферриты кобальта. В феррите кобальта со структурой шпинели после термической обработки в магнитном поле формируется одноосевая анизотропия, что и является причиной его высокой коэрцитивной силы. Свойства ферритов регламентируются ГОСТ 24063—80.

Металлопластические магниты изготавливают смешением металлических порошков, например, из сплавов Fe—Al—Ni—Co с диэлектриком, формируют прессованием и обжигают при температуре 120—180 °С. Механические свойства металлопластических магнитов в несколько раз выше, чем у литых, магнитные свойства пониженные.

Металлоэластичные магниты изготавливают на резиновой основе в виде шнура, лент, полос. В качестве наполнителя используют феррит бария, сплавы кобальта с РЗМ, другие высококоэрцитивные порошки. Ориентировочные свойства эластичных магнитов с наполнителем из феррита бария следующие [23]: $B_r = 0,245$ Тл, $H_{сВ} = 33$ кА/м, $H_{сJ} = 195$ кА/м, $W_{\max} = 2$ кДж/м³, $\rho_1 = 10^4$ Ом·м. Сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов. Магнитотвердые материалы изготавливают на основе сплавов благородных металлов: Ag—Mn—Al, Pt—Fe, Pt—Co, Pt—Pd—Co. Большая коэрцитивная сила сплавов на основе благородных металлов обуславливает высокую стабильность магнитов из этих материалов. Используют сплавы только для постоянных магнитов очень малых размеров, в основном в виде тонких пластин, для точных приборов. Вы-

43. Магнитные свойства спеченных магнитотвердых сплавов Co-РЗМ (ГОСТ 21559—76)

| Марка | B_r , Тл | H_{cB} , кА/м | H_{cJ} , кА/м | $(BH)_{max}$, кДж/м ³ |
|--------|------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|
| | не менее | | | |
| КС37 | 0,77 | 540 | 1300 | 110 |
| КС37А | 0,82 | 560 | 1000 | 130 |
| КСП37 | 0,85 | 520 | 800 | 130 |
| КСП37А | 0,90 | 500 | 640 | 145 |

Методами порошковой металлургии изготавливают сплавы на основе кобальта с редкоземельными элементами марок КС37, КС37А (36,0—38,5 % самария) и марок КСП37, КСП37А (36,0—38,5 % самария с празеодимом). Основные магнитные свойства этих сплавов приведены в табл. 43.

5. МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие требования и классификация. Магнитомягким называют магнитный материал с коэрцитивной силой по индукции не более 4 кА/м (ГОСТ 19693—74). Магнитомягкие материалы имеют высокое значение начальной магнитной проницаемости, способны намагничиваться до насыщения и в слабых полях. Используются в основном для изготовления магнитопроводов переменного магнитного поля. Применяются в электромашиностроении, трансформаторостроении, в электротехнической и радиотехнической промышленности, измерительной технике, системах автоматики и телемеханики, вычислительной технике. К магнитомягким материалам относят ферромагнитное особо чистое железо, низкоуглеродистые электротехнические стали (нелегированные и кремнистые), прецизионные низкокоэрцитивные сплавы на железной и железоникелевой основе, порошковые ферро- и ферримагнитные и композиционные

магнитодиэлектрические материалы, которые классифицируют по основному нормируемому магнитному параметру.

Низкоуглеродистые электротехнические нелегированные стали. Технически чистым называют железо с суммарным содержанием примесей до 0,08—0,1 %, в том числе углерода до 0,05 %. Железо имеет малое удельное электрическое сопротивление, обладает повышенными потерями на вихревые токи, в связи с чем применение его ограничено в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока (полюсные наконечники, магнитопроводы реле). Технически чистое железо является основным компонентом большинства магнитных материалов. Магнитные свойства железа (табл. 44) определяются количеством и составом примесей, наиболее вредными из которых являются углерод, кислород, сера, азот и водород.

Особо чистое железо получают двумя методами: электролизом раствора сернистого или хлористого железа и термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$. Полученное железо называют соответственно электролитическим и карбонильным. Карбонильное железо используют в виде порошка в качестве ферромагнитной фазы высокочастотных магнитодиэлектриков и в виде листов различной толщины.

Электротехническую нелегированную сталь изготавливают в виде горячекатаных листов (толщиной 2,0—3,9 мм), холоднокатаных листов (толщиной 0,5—3,9 мм, шириной 500—1250 мм) и лент (толщиной 0,1—2,0 мм) по ГОСТ 3836—83. Содержание основных элементов в стали не превышает: 0,04 % С, 0,3 % Si; 0,3 % Mn; остальное железо. Сталь применяют в магнитных цепях электрических аппаратов и приборов. Магнитные свойства стали (табл. 45) определяют на термически обработанных образцах: максимальная температура отжига 950 °С, максимальное время охлаждения до 600 °С, 10 ч. Старение (увеличение коэрцитивной силы образцов) стали марок 11832, 21832, 11864, 21864,

44. Состав и магнитные свойства железа [5]

| Железо | Содержание примесей, % | | Магнитные свойства | | |
|---|------------------------|----------|--------------------|-------------|-------------|
| | Углерод | Кислород | μ_n | μ_{max} | H_c , А/м |
| Технически чистое | 0,020 | 0,060 | 250 | 7 000 | 64,0 |
| Электролитическое | 0,020 | 0,010 | 600 | 15 000 | 28,0 |
| Карбонильное | 0,005 | 0,005 | 3 300 | 21 000 | 6,4 |
| Переплавленное в вакууме электролитическое | 0,010 | — | — | 61 000 | 7,2 |
| Обработанное в водороде | 0,005 | 0,003 | 6 000 | 200 000 | 3,2 |
| Обработанное в водороде особо тщательно | — | — | 20 000 | 340 000 | 2,4 |
| Монокристалл чистейшего железа, обработанный в водороде особо тщательно | — | — | — | 1 430 000 | 0,8 |

Обозначения: μ_n — относительная начальная магнитная проницаемость; μ_{max} — относительная максимальная магнитная проницаемость; H_c — коэрцитивная сила.

11880, 11848, 21880, 11895, 21895 не превышает 6 А/м.

Холоднокатаную ленту и листовую сталь изготавливают без термической обработки (нагартованными). Горячекатаную сталь изготавливают с травленной поверхностью.

Сортовую электротехническую нелегированную сталь изготавливают следующих марок: 10864, 20864, 10880, 20880, 10895, 20895, 11864, 21864, 11880, 21880, 11895, 21895 (ГОСТ 11036—75). Сталь поставляют без термической обработки. В обозначении марки первая цифра указывает класс по виду обработки давлением (1 — горячекатаная и ковкая; 2 —

калиброванная). Остальные четыре цифры аналогичны обозначениям для марок тонколистовой электротехнической нелегированной стали (указаны в примечании к табл. 45). Магнитные свойства стали, определенные на термически обработанных образцах, приведены в табл. 46. Коэффициент старения стали марок 11880, 21880, 11895, 21895 не более 10 %. Механические свойства приведены в табл. 47.

Электротехническая кремнистая сталь (ГОСТ 21427.0—75) классифицируется по следующим параметрам: по структурному состоянию — первая цифра в обозначении марки (1 — горячекатаная

45. Магнитные свойства электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 3836—83)

| Сталь | Толщина, мм, включительно | H_c , А/м, не более | μ_{max} |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------|
| 10895, 20895, 11895, 21895 | 0,1—3,9 | 95 | 3000 |
| 10880, 20880, 11880, 21880 | 0,1—3,9 | 80 | 4000 |
| 10864, 20864, 11864, 21864 | 0,1—3,9 | 64 | 4500 |
| 10848, 20848, 11848, 21848 | 0,7—3,9 | 48 | 4800 |
| 10832, 20832, 11832, 21832 | 0,7—3,9 | 32 | 5000 |

Примечания: 1. Магнитная индукция при напряженности магнитного поля: 1,38 Тл при 500 А/м; 1,62 Тл при 2500 А/м; 1,71 Тл при 5000 А/м; 1,81 Тл при 10 000 А/м.

2. В обозначении марки (пятизначное число) цифры означают: первая цифра — класс по структурному состоянию и виду прокатки (1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная); вторая цифра — тип по содержанию кремния (0 — сталь нелегированная без нормирования коэффициента старения; 1 — сталь нелегированная с нормированным коэффициентом старения; третья цифра — группу по основной нормируемой характеристике (8 — коэрцитивная сила); четвертая и пятая цифры — количественное значение основной нормируемой характеристики (для восьмой группы — значение коэрцитивной силы в целых единицах А/м).

46. Магнитные свойства сортовой электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 11036—75)

| Сталь | H_c в разомкнутой цепи, А/м, не более | Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, в замкнутой цепи, А/м | | |
|----------------------------|---|--|------|------|
| | | 500 | 1000 | 2500 |
| 10895, 20895, 11895, 21895 | 95 | 1,32 | 1,45 | 1,54 |
| 10880, 20880, 11880, 21880 | 80 | 1,36 | 1,47 | 1,57 |
| 10864, 20864, 11864, 21864 | 64 | 1,40 | 1,50 | 1,60 |

47. Механические свойства сортовой электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 11036—75)

| Сталь | σ_B , МПа, не менее | δ | ψ | H_B , МПа, не более |
|---|----------------------------|----------|--------|-----------------------|
| | | % | | |
| Горячекатаная (на термически обработанных образцах) | 270 | 24 | 60 | 1310 |
| Калиброванная | 350 | 4 | — | — |

изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой; по содержанию кремния — вторая цифра в марке (содержание кремния в %: цифры 0 — до 0,04; 1 — св. 0,4 до 0,8 включ.; 2 — св. 0,8 до 1,8 включ.; 3 — св. 1,8 до 2,8 включ.; 4 — св. 2,8 до 3,8 включ.; 5 — св. 3,8 до 4,8 включ.); по основной нормируемой характеристике — третья цифра в марке (0 — удельные потери p при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц: 1 — $p_{1,5/50}$; 2 — $p_{1,0/400}$; 6 — магнитная индукция B в слабых магнитных полях при напряженности 0,4 А/м; 7 — B_{10}). Вместе первые три цифры означают тип стали, четвертая — порядковый номер типа стали.

Сталь предназначена для магнитных цепей электрических машин, трансформаторов, аппаратов и приборов.

Промышленность выпускает холоднокатаную электротехническую тонколистовую анизотропную сталь (ГОСТ 21427.1—83), изотропную сталь (ГОСТ 21427.2—83) и холоднокатаную стальную анизотропную ленту (ГОСТ 21427.4—78). Холоднокатаную анизотропную сталь изготавливают в виде рулонов и листов толщиной 0,27—0,80 мм и лент толщиной 0,05—0,20 мм и 0,27—0,50 мм. Тонколистовую сталь и ленты поставляют в термически обработанном состоянии (за исключением нелегированной стали) с электроизоляционным термостойким покрытием и без покрытия. Магнитные свойства стали соответствуют указанным в табл. 48 и 49.

Электрическое сопротивление холоднокатаной анизотропной электротехнической стали составляет $(0,45 \pm 0,50) \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Прецизионные сплавы. Прецизионные магнитомягкие сплавы классифицируют на восемь групп (ГОСТ 10160—75), из них семь групп — классы по основному магнитному параметру, восьмая группа — коррозионно-стойкие сплавы. В табл. 50 приведены свойства прецизионных магнитомягких сплавов. Химический состав сплавов соответствует ГОСТ 10994—74. Магнитные свойства прецизионных магнитомягких сплавов приведены в табл. 51—57 по классификационному группам и в табл. 58 — для сплавов на основе Fe—Al—Si.

Ферромагнитные материалы. Низкокоэрцитивные ($H_c < 4$ кА/м) ферриты — оксидные ферритмагнетики делят на четыре класса: 1) магнитомягкие ферриты никель-цинковой и марганец-цинковой систем для радиочастот; 2) ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ); 3) магнито-стрикционные ферриты; 4) сверхвысококачественные ферриты (СВЧ).

Ферриты изготавливают методами порошковой металлургии по технологии, включающей операции синтеза ферритового порошка из исходных компонентов (оксидов, солей), формование прессовок (заготовок) и высокотемпературное спекание. Особовысокоплотные ферриты с регулируемым размером зерна изготавливают с использованием метода горячего прессования.

48. Свойства электротехнической холоднокатаной изотропной тонколистовой стали при толщине листа 0,5 мм

| Сталь | Удельные магнитные потери, Вт/кг, не более | | Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, А/м | | | $\rho_{1,10^4}$, Ом·м |
|-------|--|-----------------|--|------|--------|------------------------|
| | $\rho_{1,0/50}$ | $\rho_{1,5/50}$ | 1000 | 2500 | 10 000 | |
| 2011 | 3,5 | 8,0 | 1,49 | 1,60 | 1,80 | 0,14 |
| 2012 | 2,9 | 6,5 | 1,50 | 1,62 | 1,82 | 0,14 |
| 2013 | 2,5 | 5,6 | 1,54 | 1,65 | 1,85 | 0,14 |
| 2014 | 2,2 | 5,0 | 1,52 | 1,62 | 1,82 | 0,14 |
| 2111 | 3,5 | 8,0 | 1,46 | 1,58 | 1,78 | 0,17 |
| 2112 | 2,6 | 6,0 | 1,46 | 1,60 | 1,77 | 0,17 |
| 2211 | 2,6 | 5,8 | 1,40 | 1,56 | 1,76 | 0,25 |
| 2212 | 2,2 | 5,0 | 1,42 | 1,60 | 1,77 | 0,25 |
| 2311 | 1,9 | 4,4 | 1,38 | 1,54 | 1,74 | 0,40 |
| 2312 | 1,75 | 4,0 | 1,40 | 1,56 | 1,74 | 0,40 |
| 2411 | 1,6 | 3,6 | 1,37 | 1,49 | 1,73 | 0,50 |
| 2412 | 1,3 | 3,1 | 1,35 | 1,50 | 1,70 | 0,50 |
| 2413 | — | 2,9 | 1,35 | 1,50 | 1,70 | 0,50 |

49. Свойства электротехнической холоднокатаной анизотропной стали

| Сталь | Удельные магнитные потери, Вт/кг, не более | | | Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, А/м | | |
|-------|--|-----------------|------------------|--|------|------|
| | $\rho_{1,5/50}$ | $\rho_{1,7/50}$ | $\rho_{1,5/400}$ | 100 | 400 | 2500 |
| 3411 | 1,75 | — | — | — | — | 1,75 |
| 3412 | 1,50 | — | — | — | — | 1,80 |
| 3413 | 1,30 | — | — | — | 1,58 | 1,85 |
| 3414 | 1,10 | — | — | — | 1,60 | 1,80 |
| 3415 | 1,03 | — | — | — | 1,61 | 1,90 |
| 3404 | — | 1,60 | — | — | 1,60 | — |
| 3405 | — | 1,50 | — | — | 1,61 | — |
| 3406 | — | 1,43 | — | — | 1,62 | — |
| 3407 | — | 1,36 | — | — | 1,68 | — |
| 3408 | — | 1,30 | — | — | 1,71 | — |

Тонколистовая сталь (ГОСТ 21427.1—83)
(для листа толщиной 0,35 мм)

| | | | | | | |
|------|------|------|---|---|------|------|
| 3411 | 1,75 | — | — | — | — | 1,75 |
| 3412 | 1,50 | — | — | — | — | 1,80 |
| 3413 | 1,30 | — | — | — | 1,58 | 1,85 |
| 3414 | 1,10 | — | — | — | 1,60 | 1,80 |
| 3415 | 1,03 | — | — | — | 1,61 | 1,90 |
| 3404 | — | 1,60 | — | — | 1,60 | — |
| 3405 | — | 1,50 | — | — | 1,61 | — |
| 3406 | — | 1,43 | — | — | 1,62 | — |
| 3407 | — | 1,36 | — | — | 1,68 | — |
| 3408 | — | 1,30 | — | — | 1,71 | — |

Стальная лента (ГОСТ 21427.4—78)
(для ленты толщиной 0,15 мм)

| | | | | | | |
|------|---|---|------|---|------|------|
| 3421 | — | — | 23,0 | — | 1,30 | 1,70 |
| 3422 | — | — | 20,0 | — | 1,40 | 1,75 |
| 3423 | — | — | 19,0 | — | 1,55 | 1,82 |
| 3424 | — | — | 18,0 | — | 1,55 | 1,82 |
| 3425 | — | — | 17,0 | — | 1,65 | 1,82 |

50. Свойства и другие параметры прецизионных магнитомягких сплавов (ГОСТ 10160—75)

| Сплав | HB | σ_B | σ_T | E, ГПа | δ | ψ | θ , °C | $\rho_{1,10^4}$, Ом·м |
|---|---------------|------------|------------|--------|----------|--------|---------------|------------------------|
| | | | | | | | | |
| Группа I. Сплавы с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых полях | | | | | | | | |
| 79НМ | 2100/1200 | 1050/500 | 1000/150 | 210 | 3/50 | — | 430 | 0,55 |
| 80НХС | 2400/1300 | 950/550 | 900/150 | — | 4/40 | 15 | 330 | 0,62 |
| 83НФ | — | 950/550 | —/150 | 220 | — | — | 360 | 0,70 |
| 81НМА | 2600/1600 | 1300/650 | 1250/250 | 210 | 2/50 | — | 260 | 0,80 |
| Группа II. Сплавы с высокой магнитной проницаемостью и повышенным удельным электрическим сопротивлением | | | | | | | | |
| 50НХС | 1900/1250 | 900/500 | 850/150 | — | 2/40 | — | 360 | 0,90 |
| Группа III. Сплавы с повышенной магнитной проницаемостью и повышенной индукцией технического насыщения | | | | | | | | |
| 45Н | 1700/1300 | 750/— | 750/— | 200 | 3/— | 15/— | 450 | 0,54 |
| 50Н | 1700/1300 | 800/450 | 700/150 | 160 | 3/35 | 15/60 | 500 | 0,45 |
| Группа IV. Сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса (обладают анизотропией магнитных свойств) | | | | | | | | |
| 50НП | 1700/1300 | 800/450 | 700/150 | 160 | 3/35 | 15/60 | 500 | 0,45 |
| 68НМП | 2300/1200 | 950/550 | —/150 | — | 3/50 | 5/— | 580 | 0,45 |
| 34НКМП | 1550/1300 | 950/550 | 900/— | — | 4/40 | 5/40 | 580 | 0,50 |
| 35НКХСП | 1700/1300 | 900/500 | 900/150 | 170 | 4/40 | — | 560 | 0,60 |
| 40НКМП | —/1000 | 1000/550 | 1000/150 | 180 | 4/50 | — | 580 | 0,55 |
| 65НП | 2000/1300 | 900/550 | 900/150 | 190 | 3/40 | — | 600 | 0,25 |
| Группа V. Сплавы с высокой магнитной индукцией технического насыщения | | | | | | | | |
| 27КХ | HRC 40/HRB 90 | 1100/600 | —/300 | 220 | 2/20 | — | 940 | 0,20 |
| 49КФ, | HRC 35/HRB 90 | 1350/500 | —/350 | 220 | 1/1 | — | 960 | 0,40 |
| 49К2ФА, | | | | | | | | |
| 49К2Ф | | | | | | | | |
| Группа VI. Сплавы с низкой остаточной магнитной индукцией | | | | | | | | |
| 47НК | 1600/1300 | 900/500 | —/150 | 200 | 3/40 | — | 700 | 0,20 |
| 47НКХ | — | 900/500 | — | — | 3/35 | — | 600 | 0,48 |
| 64Н | 2000/1300 | 900/550 | 900/150 | 190 | 3/40 | 10/— | 600 | 0,20 |
| Группа VII. Сплавы с высокой магнитной проницаемостью при однополярном намагничивании | | | | | | | | |
| 78НЗМ | 2100/1200 | 1050/500 | 1000/150 | 210 | 3/50 | — | 460 | 0,50 |
| Группа VIII. Сплавы с высокой коррозионной стойкостью | | | | | | | | |
| 16Х | 1850/— | 400/250 | —/200 | 220 | 5/25 | —/65 | 680 | 0,44 |
| 36КНМ | 1700/— | —/500 | —/250 | — | —/45 | —/70 | 570 | 0,48 |

Примечание. В числителе приведены свойства сплавов до термической обработки, в знаменателе — после нее.

51. Магнитные свойства прецизионных магнитомягких сплавов I группы марок 79НМ и 80НХС (ГОСТ 10160—75)

| Толщина или диаметр, мм | Сплав 79НМ | | | Сплав 80НХС | | |
|-------------------------|------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|
| | μ_n | μ_{max} | H_c , А/м, не более | μ_n | μ_{max} | H_c , А/м, не более |
| | не менее | | | не менее | | |

Холоднокатаные ленты и листы (класс 1)

| | | | | | | |
|------------|--------|---------|-----|--------|---------|-----|
| 0,005 | 7 000 | 30 000 | 8,0 | 8 000 | 30 000 | 8,0 |
| 0,01 | 14 000 | 60 000 | 5,6 | 14 000 | 50 000 | 5,6 |
| 0,02 | 16 000 | 70 000 | 4,0 | 18 000 | 70 000 | 4,0 |
| 0,05; 0,08 | 16 000 | 90 000 | 3,2 | 20 000 | 90 000 | 3,2 |
| 0,10; 0,15 | 20 000 | 120 000 | 2,4 | 22 000 | 120 000 | 2,4 |
| 0,20 | 22 000 | 130 000 | 1,6 | 28 000 | 130 000 | 1,6 |
| 0,35; 0,5 | 25 000 | 150 000 | 1,6 | 35 000 | 150 000 | 1,2 |
| 1,0 | 25 000 | 150 000 | 1,6 | 30 000 | 170 000 | 1,0 |
| 1,5 | 22 000 | 130 000 | 1,6 | 25 000 | 150 000 | 1,2 |
| 2,0; 2,5 | 22 000 | 130 000 | 1,6 | 25 000 | 150 000 | 1,2 |

Горячекатаные листы (класс 1)

| | | | | | | |
|------|--------|--------|-----|--------|--------|-----|
| 3—22 | 20 000 | 80 000 | 3,2 | 20 000 | 70 000 | 3,2 |
|------|--------|--------|-----|--------|--------|-----|

Прутки

| | | | | | | |
|-------|--------|--------|-----|---|---|---|
| 8—100 | 20 000 | 80 000 | 3,2 | — | — | — |
|-------|--------|--------|-----|---|---|---|

52. Магнитные свойства прецизионных магнитомягких сплавов II группы марки 50НХС и III группы марки 50Н (ГОСТ 10160—75)

| Толщина или диаметр | Сплав 50НХС | | | Сплав 50Н | | |
|---------------------|-------------|-------------|-----------------------|-----------|-------------|-----------------------|
| | μ_n | μ_{max} | H_c , А/м, не более | μ_n | μ_{max} | H_c , А/м, не более |
| | не менее | | | не менее | | |

Холоднокатаные ленты (класс 1)

| | | | | | | |
|------------|------|--------|----|------|--------|----|
| 0,005 | — | — | — | 1000 | 8 000 | 56 |
| 0,01 | — | — | — | 1300 | 10 000 | 40 |
| 0,02 | — | — | — | 1500 | 15 000 | 20 |
| 0,05; 0,08 | 2000 | 20 000 | 20 | 2000 | 20 000 | 16 |
| 0,10; 0,15 | 2300 | 25 000 | 16 | 2500 | 25 000 | 13 |
| 0,20 | 2300 | 30 000 | 12 | 3000 | 28 000 | 10 |
| 0,35; 0,5 | 2600 | 35 000 | 10 | 3200 | 30 000 | 8 |
| 1,0 | 3000 | 30 000 | 12 | 3000 | 20 000 | 10 |

Горячекатаные листы (класс 1)

| | | | | | | |
|------|------|--------|----|---|---|---|
| 3—22 | 2500 | 20 000 | 24 | — | — | — |
|------|------|--------|----|---|---|---|

Прутки

| | | | | | | |
|-------|------|--------|----|---|---|---|
| 8—100 | 2500 | 20 000 | 24 | — | — | — |
|-------|------|--------|----|---|---|---|

53. Магнитные свойства некоторых сплавов IV группы (ГОСТ 10160—75)

| Толщина или диаметр, мм | B_r/B_{800} | μ_{max} | H_c , А/м, не более | B_r/B_{800} | μ_{max} | H_c , А/м, не более |
|-------------------------|---------------|-------------|-----------------------|---------------|-------------|-----------------------|
| | не менее | | | не менее | | |

Холоднокатаные ленты (класс 1)

| Сплав 50НП | | | | Сплав 34НКМП | | |
|------------|------|--------|----|--------------|---------|-----|
| 0,005 | 0,80 | 15 000 | 40 | 0,90 | 15 000 | 80 |
| 0,01 | 0,83 | 20 000 | 32 | 0,92 | 35 000 | 24 |
| 0,02 | 0,85 | 40 000 | 20 | 0,90 | 40 000 | 16 |
| 0,05 | 0,85 | 40 000 | 18 | 0,87 | 60 000 | 12 |
| 0,1 | 0,85 | 40 000 | 18 | 0,85 | 100 000 | 8 |
| 0,2 | — | — | — | 0,85 | 120 000 | 6,4 |
| 0,35; 0,5 | — | — | — | 0,85 | 120 000 | 6,4 |

Сплав 65НП

Сплав 40НКМ

| | | | | | | |
|------|------|---------|-----|------|---------|-----|
| 0,01 | — | — | — | 0,93 | 100 000 | 6,4 |
| 0,02 | 0,90 | 70 000 | 6,4 | 0,93 | 200 000 | 4,0 |
| 0,05 | 0,90 | 100 000 | 3,2 | 0,92 | 300 000 | 3,2 |
| 0,1 | 0,90 | 200 000 | 2,8 | 0,93 | 400 000 | 2,4 |
| 0,2 | 0,90 | 250 000 | 2,4 | — | — | — |

Обозначение B_r/B_{800} — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса при $H_c = 800$ А/м.

54. Магнитные свойства прецизионных сплавов V группы (ГОСТ 10160—75)

| Сплав | Толщина или диаметр, мм | B , Тл, в полях, А/м | | H_c , А/м, не более |
|-------|-------------------------|------------------------|--------|-----------------------|
| | | 2500 | 15 000 | |
| | | не менее | | |

Холоднокатаная лента

| | | | | |
|--------|------------------|------|------|-----|
| 27КХ | 0,20; 0,35; 0,70 | 1,80 | 2,15 | — |
| 49К2Ф | 0,20 | — | 2,25 | 160 |
| 49К2ФА | 0,10 | 2,20 | — | 140 |

Прутки и поковки

| | | | | |
|------|--------|------|------|-----|
| 27КХ | 30—100 | 1,75 | 2,05 | — |
| 49КФ | 10—80 | 1,90 | 2,10 | 160 |

55. Магнитные свойства прецизионных сплавов VI группы (холоднокатаные ленты) (ГОСТ 10160—75)

| Сплав | Толщина, мм | μ_H , не менее | μ_{\max}/μ_H | B_T/B_{800} | $T\mu_{\max}^{*1}$ %, (°C) ⁻¹ |
|-------|-----------------|-----------------------|--------------------|---------------|---|
| | | | не более | | |
| 47НК | 0,01; 0,02; 0,1 | 900 | 1,15 | 0,05 | 0,06 |
| 47НКХ | 0,02; 0,1 | 1500 | 1,20 | 0,05 | 0,03 |
| 64Н | 0,01; 0,02; 0,1 | 2000 | 1,20 | 0,07 | 0,06 |

*1 $T\mu_{\max}$ для интервала температур от -60 до $+120$ °С.

56. Магнитные свойства прецизионных сплавов VII группы (холоднокатаные ленты) (ГОСТ 10160—75)

| Сплав | Толщина, мм | B_{800} , Тл, не менее | B_T/B_{800} , не более | Импульсная проницаемость в поле, А/м | |
|-------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------|
| | | | | 20 | 80 |
| 79НМЗ | 0,005 | 0,8 | 0,45 | 5000 | — |
| | 0,1 | 0,8 | 0,30 | 7000 | — |
| | 0,02 | 0,08 | 0,25 | 8000 | — |
| 68НМ | 0,02 | 1,15 | 0,2 | — | 6000 |

Примечание. Температурный коэффициент импульсной проницаемости в интервале температур от -60 до $+60$ °С, для сталей 79НМЗ и 68НМ составляет $0,25$, % · (°C)⁻¹.

57. Магнитные свойства прецизионных сплавов VIII группы [24]

| Сплав | μ_{\max} | B_{100} | B_{2500} | B_{10000} | H_C , А/м |
|-------|--------------|-----------|------------|-------------|-------------|
| | | Тл | | | |
| 16Х | 7 000—15 000 | 0,6—1,2 | 1,2—1,45 | 1,45—1,65 | 12—64 |
| 36КНМ | 4 500—6 000 | 1,3 | 1,45 | — | 40—65 |

Примечание. Цифровой индекс при B указывает напряженность магнитного поля в А/м.

58. Магнитные свойства сплавов на основе Fe—Al—Si [23, 24]

| Сплав | μ_H | μ_{\max} | H_C , А/м |
|--|-----------------------------|---------------|-------------|
| Альсифер 0,6 Si + 5,4 Al (остальное Fe) | 35 400 | 117 000 | 1,76 |
| Промышленный альсифер | 6000—7000 (после отжига) | — | — |
| Сплавы альфенол: | | | |
| 12Ю | 1 000 | — | 24 |
| 12Ю-ВИ | 10 000 | — | — |
| 16Ю-ВИ | 5500—8000 | 40 000—50 000 | — |

Основные области применения ферритов — радиоэлектронная техника, вычислительная техника, техника связи, приборостроение.

По технологии изготовления, эксплуатационным характеристикам и экономическим показателям ферриты имеют преимущества перед металлургическими сплавами. Высокое электрическое сопротивление [(1÷1) · 10¹³ Ом · м] обуславливает успешное их использование в полях высокой частоты. Физико-механические свойства в сочетании с технологической возможностью получения структуры с заданным кристаллическим зерном обеспечивают высокую износостойкость ферритов в контакте с абразивным материалом, в частности, при магнитной записи информации.

Промышленность изготавливает ферритовые сердечники кольцевые, трубчатые, дисковые, стержневые, подстроечные, Ш-, П-, Е-, Г-, О-, П-образные, сложной конфигурации, для магнитных головок.

Магнитомягкие ферриты для радиочастот по назначению и магнитным свойствам классифицируют на десять групп [18]. В табл. 59 в соответствии с классификацией приведены плотность и электромагнитные свойства ферритов промышленных марок никель-цинковой (группы марок НН, НТ, ВН, ННС) и марганец-цинковой (группы НМ, МТ, НМС) систем семи групп. Восьмая группа объединяет ферриты для датчиков температуры с заданной точкой Кюри. Эта группа включает ферриты

марок 1200НН, 1200НН1, 1200НН2, 1200НН3, 800НН, имеющие точку Кюри (°C) соответственно 70, 90, 60, 75, 185. В девятую и десятую группы входят соответственно ферриты для магнитного экранирования марок 800ВНРП, 200ВНРП и ферриты для перестраиваемых контуров мощных радиотехнических устройств (группы марок ВНП) с магнитной проницаемостью в диапазоне 10—300.

Размерные ряды кольцевых сердечников из магнитомягких ферритов и ферритов ППГ установлены ГОСТ 16541—76. Кольцевые сердечники из магнитомягких ферритов изготавливают с наружным диаметром 3—180 мм, внутренним диаметром 2—115 мм, высотой 1,5—12 мм. Кольцевые сердечники из марганец-цинковых ферритов нетермостабильных марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ, 4000НМ, 6000НМ изготавливают по ГОСТ 14208—77 нормированных размеров, термостабильных марок — по ГОСТ 17141—76. Марганец-цинковые нетермостабильные ферритовые сердечники предназначены для магнитопроводов, применяемых в изделиях электронной техники производственно-технического назначения и народного потребления. Сердечники предназначены для работы в слабых синусоидальных полях напряженностью 8—24,0 А/м и на частотах от 0,06 МГц (для сердечников из феррита марки 6000НМ) до 1,0 МГц (для сердечников из феррита марки 1000НМ). Сердечники могут применяться в элементах и устройствах аппаратуры,

59. Свойства магнитомягких ферритов для радиочастот [18]

| Феррит | μ_n | $(\text{tg } \delta / \mu_n) \cdot 10^6$, не более, при | | | $f_{кр}$, МГц, при $\text{tg } \delta$ | | Параметры петли гистерезиса в статическом режиме | | | | | | ρ_t , Ом·м | θ , °С не менее | $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ |
|--|--------------|---|-----|----------------|--|-------|---|-------------------------------------|-------------------|---------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------------|---|
| | | H , А/м | | f_c , МГц | 0,1 | 0,002 | μ_{max} | H , А/м, при μ_{max} | при $H = 800$ А/м | | | | | | |
| | | 0,8 | 8 | | | | | | B_r , Тл | B_r , Тл | H_c , А/м | | | | |
| I группа. Ферриты общего назначения | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100НН | 100±20 | 125 | — | 7 | 30 | 15 | 850 | 120 | 0,44 | 0,290 | 56 | 10 ⁶ | 300 | 4,7—5,0 | |
| 400НН | 400±50 | 18 | 50 | 0,1 | 3,50 | 1,50 | 1100 | 64 | 0,25 | 0,120 | 64 | 10 ⁴ | 120 | 4,7—4,9 | |
| 400НН1 | 400±80 | 12 | 25 | 0,1 | 6,0 | 3,90 | 1400 | 100 | 0,28 | 0,160 | 48 | 10 ³ | 300 | 4,7—4,9 | |
| 600НН | 600±100 | 22 | 75 | 0,1 | 1,5 | 0,70 | 1600 | 56 | 0,31 | 0,140 | 32 | 10 ⁴ | 110 | 4,8—5,0 | |
| 1000НН | 1000±200 | 50 | 150 | 0,1 | 0,40 | — | 3000 | 32 | 0,27 | 0,150 | 20 | 10 ⁴ | 110 | 4,8—5,1 | |
| 1000НМ | 1000±200 | 15 | 45 | 0,1 | 0,60 | 0,20 | 1800 | 40 | 0,35 | 0,110 | 20 | 0,50 | 200 | 4,4—4,6 | |
| 1500НМ | 1500±300 | 15 | 45 | 0,1 | 0,60 | 0,10 | 2500 | — | 0,35 | 0,110 | 24 | 0,50 | 200 | 4,4—4,6 | |
| 2000НН | 2000±100 | 85 | 270 | 0,1 | 0,10 | — | 7000 | 12 | 0,25 | 0,120 | 8 | 10 | 70 | 4,8—5,1 | |
| 2000НМ | 2000±300 | 15 | 45 | 0,1 | 0,50 | 0,05 | 3500 | 20 | 0,38 | 0,130 | 24 | 0,50 | 200 | 4,4—4,6 | |
| 3000НМ | 3000±500 | 35 | 60 | 0,1 | 0,10 | 0,002 | 3500 | 20 | 0,35 | 0,120 | 12 | 0,50 | 140 | 4,6—4,8 | |
| II группа. Термостабильные ферриты | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7ВН | 7±1 | 680 | — | 70 | 220 | 150 | 15 | 4400 | 0,07 | 0,06 | 2240 | 10 ⁶ | 450 | 3,8 | |
| 20ВН | 20±4 | 300 | — | 30 | 120 | 65 | 45 | 2000 | 0,20 | 0,10 | 1000 | 10 ⁶ | 450 | 3,7—4,0 | |
| 30ВН | 30±5 | 170 | — | 30 | 200 | 110 | 90 | 1600 | 0,26 | 0,070 | 520 | 10 ³ | 450 | 4,5—4,8 | |
| 50ВН | 50±10 | 180 | — | 20 | 70 | 40 | 170 | 800 | 0,30 | 0,200 | 360 | 10 ⁴ | 450 | 4,5—4,8 | |
| 100ВН | 100±20 | 135 | — | 18 | 35 | 25 | 280 | 480 | 0,36 | 0,150 | 280 | 10 ⁵ | 400 | 4,5—4,8 | |
| 150ВН | 150±20 | 135 | — | 12 | 25,0 | 15 | 330 | 520 | 0,35 | 0,150 | 240 | 10 ⁴ | 400 | 4,5—4,8 | |
| 700НМ | 700±200 | 80 | — | 3 | 5,0 | 2,0 | 1900 | 128 | 0,38 | 0,050 | 240 | 20 | 240 | 4,3 | |
| 1000НМ3 | 1000±200 | 5 | 15 | 0,1 | 1,80 | 0,60 | 2000 | 80 | 0,33 | 0,100 | 28 | 10 | 200 | 4,3—4,7 | |
| 1500НМ1 | 1500±300 | 15 | 45 | 0,1 | 0,60 | 0,10 | 3000 | 32 | 0,35 | 0,100 | 16 | 5,0 | 200 | 4,3—4,7 | |
| 1500НМ3 | 1500±300 | 5 | 15 | 0,1 | 1,50 | 0,30 | 3000 | 48 | 0,38 | 0,080 | 16 | 20 | 200 | 4,3—4,7 | |
| 2000НМ1 | 2000±300 | 15 | 45 | 0,1 | 0,50 | 0,050 | 3500 | 32 | 0,38 | 0,120 | 16 | 5,0 | 200 | 4,3—4,7 | |
| III группа. Высокопроницаемые ферриты | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4000НМ | 4 000±800 | 35 | 60 | 0,1 | 0,10 | 0,005 | 7 000 | 16 | 0,35 | 0,130 | 8 | 0,50 | 125 | 4,6—4,8 | |
| 6000НМ | 6 000±1200 | 45 | 75 | 0,03 | 0,003 | — | 10 000 | 12 | 0,35 | 0,110 | 8 | 0,10 | 110 | 4,6—4,8 | |
| 10000НМ | 10 000±5000 | 35 | 90 | 0,02 | 0,050 | 0,020 | 17 000 | 8 | 0,35 | 0,110 | 4 | 0,01 | 110 | 4,9—5,0 | |
| 20000НМ | 20 000±5 000 | 10 | 30 | 0,01 | 0,005 | — | 35 000 | 4 | 0,35 | 0,11 | 2,0 | 0,01 | 110 | 4,9—5,1 | |
| IV группа. Ферриты для телевизионной техники | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2500НМС1 | — | — | — | — | 0,40 | 0,16 | 4800 | 40 | 0,45 | 0,10 | 16 | 1,0 | 200 | — | |
| 3000НМС | — | — | — | — | 0,36 | 0,10 | 4800 | 32 | 0,45 | 0,10 | 12 | 1,0 | 200 | — | |
| V группа. Ферриты для импульсных трансформаторов | | | | | | | | | | | | | | | |
| 300НН1 | 300±50 | — | — | — | 2,00 | — | 300 | 240 | 0,30 | 0,28 | 160 | 10 | 240 | 4,7—4,9 | |
| 350НН1 | 350±75 | — | — | — | 2,50 | — | 1000 | 80 | 0,26 | 0,12 | 48 | 10 ⁷ | 180 | 4,7—4,9 | |
| 450НН1 | 450±50 | — | — | — | 1,00 | — | 2100 | 56 | 0,37 | 0,160 | 40 | 10 ³ | 230 | 4,7—4,9 | |
| 1000НН1 | 1000±100 | — | — | — | 0,50 | — | 3000 | 32 | 0,30 | 0,090 | 16 | 10 ³ | 120 | 4,7—4,9 | |
| 1100НН1 | 1100±250 | — | — | — | 0,40 | — | 3000 | 32 | 0,27 | 0,080 | 20 | 10 | 110 | 4,7—4,9 | |
| 1100НМ1 | 1100±150 | — | — | — | 0,30 | — | 3000 | 32 | 0,40 | 0,150 | 24 | 0,10 | 180 | 4,7—4,9 | |
| VI группа. Ферриты для широкополосных трансформаторов | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50ВНС | 50±10 | — | — | — | 80 | 70 | 170 | 800 | 0,17 | 0,020 | 4,8 | 10 ⁴ | 480 | 4,7—4,9 | |
| 90ВНС | 90±10 | — | — | — | 40 | 30 | 340 | 640 | 0,28 | 0,080 | 152 | 10 ⁴ | 400 | 4,7—4,9 | |
| 200ВНС | 200±20 | — | — | — | 11 | 5 | 650 | 280 | 0,31 | 0,080 | 64 | 10 ⁴ | 350 | 4,7—4,9 | |
| 300ВНС | 300±30 | — | — | — | 8 | 4 | 850 | 220 | 0,32 | 0,130 | 80 | 10 ⁴ | 250 | 4,7—4,9 | |
| VII. Ферриты для магнитных головок | | | | | | | | | | | | | | | |
| 500НТ | 500±100 | — | — | — | 0,50 | — | — | — | 0,35 | 0,200 | 32 | 10 ³ | 150 | 5,3 | |
| 500НТ1 | 500±100 | — | — | — | 2 | — | — | — | 0,35 | 0,210 | 48 | 10 ³ | 150 | 5,3 | |
| 1000НТ | 1000±100 | — | — | — | 0,2 | — | — | — | 0,32 | 0,140 | 16 | 10 ² | 140 | 5,3 | |
| 1000НТ1 | 1000±100 | — | — | — | 0,8 | — | — | — | 0,32 | 0,150 | 32 | 10 ³ | 140 | 5,3 | |
| 2000НТ | 2000±400 | — | — | — | 0,10 | — | — | — | 0,27 | 0,120 | 8 | 10 | 90 | 5,3 | |
| 2000МТ | 2000±1000 | — | — | — | 0,20 | — | — | — | 0,35 | 0,150 | 5 | 1,0 | 110 | 5,1 | |
| 500МТ | 500±100 | — | — | — | — | — | — | — | 0,48 | — | 20 | 0,10 | 240 | 5,1 | |
| 1000МТ | 1000±200 | — | — | — | — | — | — | — | 0,50 | — | 20 | 1,0 | 240 | 5,1 | |
| 5000МТ | 5000±1000 | — | — | — | — | — | — | — | 0,35 | 0,150 | 5 | 0,10 | 110 | 5,1 | |

Обозначения: $\text{tg } \delta$ — тангенс угла магнитных потерь; $\text{tg } \delta / \mu_n$ — относительный тангенс угла магнитных потерь; $f_{кр}$ — критическая частота; H — напряженность магнитного поля; θ — температура (точка) Кюри.

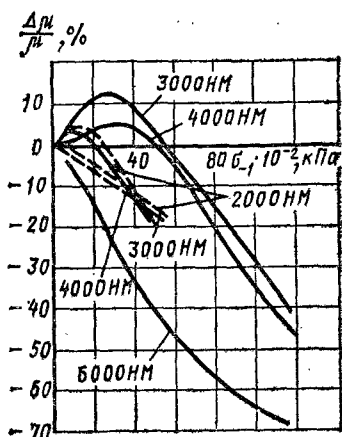


Рис. 8. Зависимость магнитной проницаемости ферритов от механических напряжений:

сплошная линия — $H = 0,4$ А/м; штриховая — $H = 8$ А/м

эксплуатирующейся в условиях воздействия на них механических факторов (по ГОСТ 16962—71); вибрационных нагрузок частотой от 1 до 5000 Гц с ускорением не более 392 м/с², одиночных ударов с ускорением не более

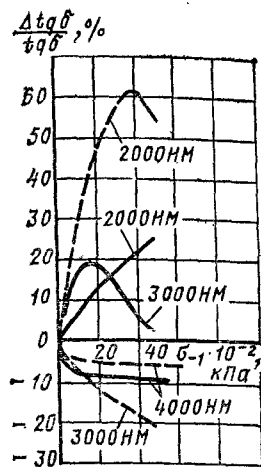


Рис. 9. Зависимость тангенса угла магнитных потерь ферритов от механических напряжений:

сплошная линия — $H = 0,8$ А/м; штриховая — $H = 8$ А/м

$1471,5$ м/с², линейных (центробежных) нагрузок с ускорением не более 4905 м/с².

При воздействии на сердечник механических нагрузок в них возникают механические напряжения, вызывающие отклонение электромагнитных параметров. На рис. 8 и 9 представлены зависимости отклонения магнитных параметров сердечников от сжимающих напряжений, действующих перпендикулярно направлению силовых линий намагничивающего поля при нормальной температуре окружающей среды. Не рекомендуется прикладывать к сердечникам растягивающие или сжимающие нагрузки, действующие параллельно плоскости кольца. Отклонение начальной магнитной проницаемости при воздействии на сердечник механических нагрузок обратно. После воздействия механической нагрузки значение начальной магнитной проницаемости сразу же возвращается к значению, несколько превышающему исходное (в ненагруженном состоянии сердечника). С течением времени это превышение исчезает. Сердечники могут эксплуатироваться в течение 50 000 ч. Предел прочности сердечников $\sigma \cdot 10^{-3}$, кПа: при растяжении — 9,8; при сжатии — 147; при изгибе — 29,4. Максимальная рабочая температура: 155 °С — для ферритов марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ; 125 °С — для ферритов марок 3000НМ, 4000НМ; 100 °С — для феррита марки 6000НМ. Наименьшее значение температуры окружающего воздуха минус 60 °С.

Сердечники из ферритов марок 400НН, 150ВН, 30ВН, применяемые в магнитных антеннах радиовещательных приемников, изготавливают по ГОСТ 11082—75. Сердечники предназначены для работ на частотах 2,6; 12,0; 100 МГц (соответственно ферритовые сердечники марок 400НН, 150ВН, 30ВН). Сердечники изготавливают двух типов: стержневые круглого сечения (С) и пластинчатые (П) с регламентированным типоразмером. Сердечники выдерживают без разрушения статическую нагрузку, приложенную к середине сердечника перпендикулярно его оси, равную $29,43$ Н — для сердечников типа П

60. Основные свойства ферритов ППГ [23]

| Феррит | H_c , А/м | B_r , Тл | H_T/H_c *1 | θ , °С | ρ , Ом·м, не менее |
|-----------------------------|-------------|------------|--------------|---------------|-------------------------|
| Ферриты системы Li—Na | | | | | |
| 100П | 143—1194 | 0,2—0,28 | 0,75 | 630 | $1 \cdot 10^6$ |
| 101П | 143—1194 | 0,2—0,28 | 0,75 | 630 | $1 \cdot 10^6$ |
| 104П | 143—1194 | 0,24—0,32 | 0,75 | 600 | $5 \cdot 10^5$ |
| 105 | 56—1194 | 0,2—0,32 | 0,75 | 500 | $1 \cdot 10^6$ |
| Ферриты системы Mg—Mn—Ca | | | | | |
| 300П | 12—56 | 0,19—0,27 | 0,75 | 250 | $2 \cdot 10^3$ |
| Ферриты системы Li—Mg—Mn | | | | | |
| 3ВТ | 223—227 | 0,19—0,27 | 0,75 | 500 | $5 \cdot 10^5$ |
| 5ВТ | 346—450 | 0,18—0,26 | 0,75 | 500 | $1 \cdot 10^6$ |
| Ферриты системы Mg—Mn | | | | | |
| 2,1ВТ | 151—199 | 0,16—0,23 | 0,72 | 240 | $5 \cdot 10^4$ |
| 1,3ВТ | 92—123 | 0,18—0,26 | 0,75 | 250 | $5 \cdot 10^3$ |
| Ферриты системы Mg—Mn—Zn—Ca | | | | | |
| 0,9ВТ | 64—80 | 0,20—0,30 | 0,75 | 230 | $2 \cdot 10^2$ |
| 0,3ВТ | 20—28 | 0,17—0,25 | 0,70 | 170 | $1 \cdot 10^4$ |
| 0,27ВТ | 17—25 | 0,16—0,23 | 0,72 | 110 | $2 \cdot 10^3$ |
| 0,16ВТ | 10—16 | 0,16—0,23 | 0,72 | 130 | $5 \cdot 10^3$ |
| 0,12ВТ | 7,9—11,0 | 0,16—0,23 | 0,65 | 110 | $6 \cdot 10^4$ |

*1 H_T/H_c — отношение напряженности поля трогания к коэрцитивной силе.

и 49 Н — для сердечников типа С. Рабочая температура окружающего воздуха от -45 до $+70$ °С. Длительность эксплуатации сердечников 50 000 ч. При эксплуатации сердечников допускается воздействие нормированных вибрационных нагрузок, одиночных и многократных ударов. Не рекомендуется допускать возникновения в сердечниках статических напряжений, превышающих 3000 кПа.

У ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса (ферриты ППГ) отношение остаточной индукции и максимальной индукции на предельной статической петле гистерезиса не менее 0,85 (ГОСТ 23618—79). Сердечники из ферритов ППГ с малой коэрцитивной силой ($H_c < 40$ А/м) применяют, как правило, в переключающих и накопительных элементах и магнит-

ных усилителях, а сердечники с большой коэрцитивной силой (H_c более 40 А/м) — в оперативных запоминающих устройствах. Размерный ряд кольцевых сердечников из ферритов ППГ установлен ГОСТ 16541—76. Кольцевые сердечники имеют наружный диаметр 0,3—10,0 мм и высоту 0,06—5,0 мм включительно. Кольцевые сердечники из ферритов ППГ применяют в устройствах автоматизации и вычислительной техники. Ферриты ППГ по химическому составу разделяют на пять групп. В табл. 60 приведены свойства ферритов ППГ. Интервал рабочей температуры этих ферритов от -60 до $+70$ °С.

Магнитострикционные ферриты имеют сильно выраженную магнитостриксию в слабых переменных магнитных полях. Применяются в прецизионных фильтрах, в том

61. Основные свойства магнитоотрицательных никель-кобальтовых ферритов [23]

| Феррит | $K_{св}$, % | Q | $v_{п} \cdot 10^{-3}$ | $v_{к} \cdot 10^{-3}$ | t , °С, для определения ТКЧ | ТКЧ $\cdot 10^4$ |
|--------|--------------|------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
| | | | м/с | | | |
| 601С | 13,0 | 2800 | 5,4—5,75 | — | 20—60 20—5 | -3 ÷ +15 -10 ÷ +60 |
| 602С | 12,0 | 2500 | — | 3,1—3,6 | +20 ÷ -10 20—70 +20 ÷ -10 | -15 ÷ +15 -60 ÷ +60 |
| 605С | 12,0 | 2800 | 5,4—5,75 | — | +20 ÷ -10 20—50 | -12 ÷ +12 |
| | 10,0 | 2000 | — | 3,1—3,5 | +20 ÷ -60 20—85 | -25 ÷ +25 |
| | 10,0 | 2000 | — | 3,1—3,5 | +20 ÷ -10 20—50 | -14 ÷ +14 |
| 606С | 12,0 | 3500 | 5,4—6,0 | — | +20 ÷ -60 20—85 | 0 ÷ +60 -10 ÷ +10 |
| | 10,5 | 4500 | — | 3,3—3,6 | +20 ÷ -60 20—85 | -25 ÷ +25 |

Обозначения: Q — добротность; $v_{п}$, $v_{к}$ — скорости распространения продольных и крутильных колебаний соответственно; ТКЧ — температурный коэффициент резонансной частоты.

числе широкополосных, в качестве преобразователя колебаний магнитного поля в механические (продольные или крутильные) и наоборот. Способность ферритового материала преобразовывать магнитную энергию в упругую омеивают с помощью коэффициента магнитомеханической связи $K_{св}$, определяющего соотношение энергии, превращенной в упругую, в всей подведенной магнитной энергии: $K_{св}^2 = W_{упр}/W_{магн}$. Магнитоотрицательные ферриты изготавливают на основе никелевых ферритов, имеющих отрицательную константу магнитной кристаллографической анизотропии, с различными малыми добавками: $CoO \sim 1,25\%$ мол. доли, $SnO \sim 0,15\%$ мол. доли, $V_2O_5 \leq 0,5\%$ мол. доли. Наиболее эффек-

тивной является добавка CoO , так как феррит кобальта, обладая положительной константой кристаллографической анизотропии K_1 , образует с ферритом никеля твердый раствор, имеющий константу K_1 , близкую к нулю. Точка Кюри этих ферритов 530—590 °С. Свойства магнитоотрицательных ферритов приведены в табл. 61.

Сверхвысокочастотные ферриты (ферриты СВЧ) характеризуются малыми магнитной кристаллографической анизотропией и коэрцитивной силой, очень высоким удельным электрическим сопротивлением (10^4 — 10^{12} Ом·м). Основным параметром СВЧ ферритов является величина ΔH — ширина кривой ферромагнитного резонанса, определяющая

эффективность использования ферритов в устройствах СВЧ (вентили, фазовращатели, циркуляторы). СВЧ-ферриты используют в диапазоне частот от сотен мегагерц до тысяч гигагерц (длины волн от метров до миллиметров).

СВЧ-ферриты по химическому составу и основному рабочему диапазону длин волн разделяют на шесть групп. В соответствии с классификацией в табл. 62 представлены свойства ферритов этих групп.

Магнитодиэлектрические материалы. Магнитодиэлектриком называют магнитный материал, в котором связкой является диэлектрик, а наполнителем — магнитомягкий металлический или ферритовый порошок (ГОСТ 23618—79). В качестве металлического наполнителя применяют карбонильное железо, размольтые сплавы альсифер и пермаллой. Электроизоляционная пленка, создаваемая специальной технологией нанесения на ферромагнитные частицы органического или неорганического материала, снижает потери на вихревые токи магнитодиэлектрических композиционных материалов, тем самым обеспечивая возможность их использования для деталей, работающих при высоких частотах (до сотен мегагерц при высокой стабильности магнитных свойств). Изделия

магнитодиэлектриком называют магнитный материал, в котором связкой является диэлектрик, а наполнителем — магнитомягкий металлический или ферритовый порошок (ГОСТ 23618—79). В качестве металлического наполнителя применяют карбонильное железо, размольтые сплавы альсифер и пермаллой. Электроизоляционная пленка, создаваемая специальной технологией нанесения на ферромагнитные частицы органического или неорганического материала, снижает потери на вихревые токи магнитодиэлектрических композиционных материалов, тем самым обеспечивая возможность их использования для деталей, работающих при высоких частотах (до сотен мегагерц при высокой стабильности магнитных свойств). Изделия

62. Основные свойства СВЧ-ферритов [23]

| Феррит | B_s , Тл | H_c , А/м | μ' | θ , °С | ϵ' | $tg \delta \times 10^3$ | $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | ρ_s , Ом·м | ΔH , кА/м | |
|--------|------------|-------------|--------|---------------|-------------|-------------------------|--|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | | | | | | $\lambda=3$ см | $\lambda=10$ см |

Иттриевые ферриты-гранаты (для низкочастотной области диапазона СВЧ)

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-----|-----|-----|------|---|------|---------------------|---|-----|
| 10СЧ6 | 0,175 | 56 | 100 | 280 | 14,8 | 7 | 5,02 | $1,2 \cdot 10^{10}$ | — | 4,8 |
| 30СЧ3 | 0,120 | 64 | 80 | 230 | 14,6 | 6 | 5,01 | $3,8 \cdot 10^9$ | — | 5,6 |
| 30СЧ6 | 0,130 | 80 | 70 | 280 | 15 | 3 | 5,40 | $3,1 \cdot 10^8$ | — | 8 |
| 40СЧ2 | 0,075 | 56 | 50 | 180 | 14,4 | 5 | 4,97 | $5,1 \cdot 10^{11}$ | — | 4,8 |
| 40СЧ4 | 0,085 | 200 | 30 | 280 | 15,5 | 3 | 5,60 | $9,9 \cdot 10^{10}$ | — | 13 |
| 40СЧ5 | 0,065 | 48 | — | 170 | 14,5 | 4 | 4,96 | — | — | 4,8 |
| 60СЧ | 0,047 | 80 | 30 | 150 | 14 | 4 | 4,92 | $9,0 \cdot 10^9$ | — | 4,8 |
| 80СЧ | 0,030 | 160 | 20 | 120 | 13,5 | 3 | 4,91 | $1,6 \cdot 10^9$ | — | 4,8 |
| 90СЧ | 0,021 | 40 | — | 100 | 13 | 3 | 4,88 | — | — | 4,0 |

Литиевый феррит

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|----|----|-----|----|---|------|------------------|---|----|
| 10СЧ9 | 0,070 | 80 | 20 | 180 | 13 | 3 | 4,89 | $3,0 \cdot 10^8$ | — | 15 |
|-------|-------|----|----|-----|----|---|------|------------------|---|----|

Магнетные ферриты (для средней части сантиметрового диапазона длин волн)

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-----|----|-----|------|---|------|------------------|-----|---|
| 2СЧ1 | 0,200 | 320 | 20 | 300 | 11,3 | — | 4,05 | $5,0 \cdot 10^8$ | 42 | — |
| 3СЧ | 0,178 | 400 | 13 | 320 | 11,6 | — | 4,1 | $5,5 \cdot 10^8$ | 52 | — |
| 3СЧ1 | 0,170 | 480 | 13 | 380 | 8,2 | — | 3,6 | $1,9 \cdot 10^7$ | 57 | — |
| 3СЧ2 | 0,110 | 560 | 10 | 300 | 6,5 | — | 3,1 | $4,1 \cdot 10^8$ | 64 | — |
| 3СЧ5 | 0,230 | 240 | 50 | 260 | 12,5 | — | 4,20 | $3,9 \cdot 10^8$ | 32 | — |
| 3СЧ6 | 0,330 | 32 | 80 | 180 | 13 | — | 4,70 | $1,1 \cdot 10^9$ | 8 | — |
| 3СЧ7 | 0,190 | 200 | 20 | 320 | 12,2 | — | 4,30 | $3,2 \cdot 10^8$ | 24 | — |
| 3СЧ9 | 0,340 | 32 | 50 | 210 | 13,2 | — | 4,60 | $1,0 \cdot 10^4$ | 9,6 | — |
| 3СЧ15 | 0,220 | 160 | 15 | 370 | 12 | — | 4,50 | $4,7 \cdot 10^7$ | 32 | — |
| 4СЧ3 | 0,110 | 800 | 8 | 350 | 5,4 | — | 2,55 | $1,6 \cdot 10^9$ | 64 | — |
| 4СЧ4 | 0,170 | 280 | 25 | 300 | 10,5 | — | 3,90 | $4,8 \cdot 10^8$ | 40 | — |
| 4СЧ5 | 0,120 | 640 | 15 | 340 | 8,0 | — | 3,05 | $7,0 \cdot 10^8$ | 64 | — |
| 4СЧ11 | 0,220 | 160 | 21 | 300 | 9,5 | — | 4,20 | — | 24 | — |

Продолжение табл. 62

| Феррит | B_s , Гл | H_c , А/м | μ' | θ , °С | ϵ' | $tg \delta \times 10^3$ | $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | ρ_{11} , Ом·м | ΔH , кА/м | |
|--|------------|-------------|--------|---------------|-------------|-------------------------|--|--------------------|-------------------|-----------------|
| | | | | | | | | | $\lambda=3$ см | $\lambda=10$ см |
| Никелевые ферриты (для миллиметрового диапазона и коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн) | | | | | | | | | | |
| 1С4 | 0,450 | 200 | 100 | 300 | 12,2 | — | 4,85 | $8,2 \cdot 10^4$ | 33,5 | — |
| 1С42 | 0,290 | 320 | 20 | 450 | 12,5 | — | 4,95 | $1,7 \cdot 10^7$ | 22,0 | — |
| 1С43 | 0,440 | 240 | 80 | 420 | 11,0 | — | 4,40 | $1,3 \cdot 10^3$ | 32 | — |
| 1С44 | 0,480 | 88 | 80 | 420 | 12,3 | — | 5,05 | $4,8 \cdot 10^6$ | 13,5 | — |
| 1С47 | 0,490 | 120 | 140 | 320 | 12,5 | — | 4,95 | — | 13,5 | — |
| 2С4 | 0,220 | 720 | 12 | 500 | 10,0 | — | 4,5 | $5,9 \cdot 10^4$ | 56 | — |
| 2С44 | 0,450 | 120 | 50 | 440 | 12,5 | — | 5,0 | $5,3 \cdot 10^6$ | 9,6 | — |
| 3С48 | 0,450 | 320 | 50 | 370 | 11,2 | — | 4,75 | $8,7 \cdot 10^4$ | 36 | — |
| 3С416 | 0,340 | 120 | — | 370 | 12,7 | — | 5,10 | — | 9 | — |
| 4С48 | 0,230 | 350 | 12 | 450 | 12,2 | — | 5,05 | $7,9 \cdot 10^2$ | 48 | — |
| 4С49 | 0,320 | 360 | 30 | 450 | 11,0 | — | 5,0 | $2,0 \cdot 10^6$ | 22 | — |
| 4С410 | 0,220 | 320 | 22 | 500 | 12,4 | — | 5,10 | $7,8 \cdot 10^7$ | 17,5 | — |
| 5С4 | 0,310 | 96 | 90 | 350 | 12 | — | 5,10 | $3,0 \cdot 10^6$ | 11 ⁶ | — |

Магниеые ферроалюминаты (для длинноволновой части диапазона СВЧ)

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-----|----|-----|-----|----|------|------------------|----|------|
| 4С4 | 0,080 | 440 | 8 | 280 | 4,5 | — | 3,0 | $9,0 \cdot 10^5$ | 72 | — |
| 4С41 | 0,100 | 400 | 10 | 280 | 5,5 | — | 3,20 | $4,0 \cdot 10^5$ | 56 | — |
| 4С46 | 0,120 | 320 | 15 | 280 | 10 | — | 3,75 | $3,6 \cdot 10^6$ | 48 | — |
| 6С41 | 0,145 | 80 | 65 | 180 | 12 | — | 4,20 | $3,0 \cdot 10^6$ | — | 10,4 |
| 8С41 | 0,175 | 360 | 12 | 280 | 9,6 | 3 | 3,85 | $1,5 \cdot 10^5$ | — | 32 |
| 10С4 | 0,080 | 400 | 10 | 270 | 10 | 2 | 4,00 | $2,0 \cdot 10^7$ | — | 32 |
| 30С42 | 0,110 | 80 | 30 | 150 | 10 | 15 | 4,20 | $1,7 \cdot 10^6$ | — | 13 |
| 30С44 | 0,085 | 160 | 35 | 120 | 10 | 3 | 4,00 | $7,2 \cdot 10^6$ | — | 8 |

Никелевые и магниеые феррохромиты (для длинноволновой части диапазона СВЧ в высоком уровне мощности)

| | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-----|----|-----|------|---|------|------------------|----|------|
| 4С42 | 0,075 | 520 | 9 | 280 | 6,2 | — | 3,00 | $5,2 \cdot 10^6$ | 56 | — |
| 10С41 | 0,065 | 320 | 13 | 160 | 8 | 4 | 3,20 | $6,8 \cdot 10^5$ | — | 24 |
| 10С48 | 0,065 | 128 | 20 | 140 | 9,5 | 3 | 3,80 | $5,8 \cdot 10^5$ | — | 16 |
| 10С412 | 0,110 | 640 | 10 | 300 | 9,8 | 7 | 4,60 | $5,2 \cdot 10^4$ | — | 20 |
| 15С4 | 0,120 | 720 | 9 | 320 | 4,8 | 6 | 4,5 | $6,8 \cdot 10^4$ | — | 36 |
| 15С41 | 0,055 | 200 | 20 | 150 | 6,8 | 3 | 3,00 | $3,2 \cdot 10^6$ | — | 24 |
| 30С4 | 0,070 | 280 | 13 | 160 | 9,5 | 2 | 3,90 | $3,3 \cdot 10^6$ | — | 17,6 |
| 30С41 | 0,130 | 240 | 25 | 240 | 11,2 | 5 | 4,40 | $3,0 \cdot 10^6$ | — | 13 |
| 40С4 | 0,085 | 72 | 60 | 90 | 10,2 | 2 | 4,30 | $9,7 \cdot 10^6$ | — | 7 |

Примечание. $B_s = \mu_0 J_s$ — измерено при напряженности поля 400—640 кА/м; H_c определено на кольцевых образцах при напряженности поля в образце 4 кА/м; μ' при $f = 1,1$ МГц; $tg \delta$ при $f = 3000$ МГц. Все измерения проведены при 20 °С.

Обозначения: μ' , ϵ' — действительные части магнитной и диэлектрической проницаемости соответственно; $tg \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; ΔH — ширина резонансной кривой.

63. Свойства магнитодиэлектриков

| Материал | $\mu_{нд}$ | $\mu_{эф}$ | Магнитные потери, не более | | $\delta_r \cdot 10^4$, мА | $\delta_r \cdot 10^6$, 1/Гц | $\delta_r \cdot 10^6$, 1/Гц | $\delta_r \cdot 10^6$ | f, кГц | Температурный коэффициент магнитной проницаемости |
|--|------------|------------|----------------------------|-------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------|---|
| | | | $tg \delta \cdot 10^3$ | $H=4,8$ А/м | | | | | | |
| Кольцевые сердечники из прессованного порошкообразного альсифера (ГОСТ 8763—77) | | | | | | | | | | |
| ТЧ90 | 79—91 | — | 83,5 | 83,9 | $\delta_r \cdot 10^4$ | 3,0 | 3,0 | 0,02 | 0,02 | 20—70 |
| ТЧ60 | 53—63 | — | 27,4 | 27,7 | 1,1 | 2,0 | 2,0 | 0,07 | 0,07 | 20—70 |
| ТЧК55 | 48—58 | — | 27,4 | 27,7 | 0,81 | 2,0 | 2,0 | 0,07 | 0,07 | 20—70 |
| ВЧ32 | 28—33 | — | 9,9 | 10,0 | 0,38 | 1,2 | 1,2 | 0,20 | 0,20 | 20—60 |
| ВЧ22 | 19—24 | — | 4,6 | 4,7 | 0,25 | 2,0 | 2,0 | 0,70 | 0,70 | 20—70 |
| ВЧК22 | 19—24 | — | 4,6 | 4,7 | 0,25 | 2,0 | 2,0 | 0,70 | 0,70 | 20—70 |
| Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа (ГОСТ 13610—79) | | | | | | | | | | |
| Р-10 | 13—15 | 2,9 | — | — | $\delta_r \cdot 10^6$ | 0,15—0,25 | 0,15—0,25 | 10 | 10 | —60—+100 |
| Р-20 | 12—14 | 2,95 | — | — | 3—5 | 2,0—3,5 | 2,0—3,5 | 20 | 20 | —60—+100 |
| Р-100 | 9—10 | 1,55 | — | — | 1,5—2,5 | 0,05—0,1 | 0,05—0,1 | 100 | 100 | —60—+100 |
| Р-100Ф | 10,5—12 | 1,60 | — | — | 1,25—1,85 | 0,15—1,2 | 0,15—1,2 | 100 | 100 | —60—+100 |
| ПК | 11,0—13,0 | 2,90 | — | — | 1,2—2,0 | 0,05—0,1 | 0,05—0,1 | 20 | 20 | —60—+100 |
| Магнитодиэлектрики на основе пермаллоя [23] | | | | | | | | | | |
| П250 | 230 | — | — | — | $\delta_r \cdot 10^5$ | 3 | 3 | 0,03 | 0,03 | —60—+85 |
| П140 | 140 | — | — | — | 8,2 | 2 | 2 | — | — | —20—+70 |
| П100 | 100 | — | — | — | 6,3 | 2 | 2 | — | — | —60—+85 |
| П60 | 60 | — | — | — | 3,1 | 1,5 | 1,5 | — | — | —60—+85 |
| ПК100 | 100 | — | — | — | 1,9 | 2 | 2 | — | — | —60—+85 |
| ПК60 | 60 | — | — | — | 3,1 | 1,5 | 1,5 | — | — | —60—+85 |

Обозначения: $\mu_{эф}$ — эффективная магнитная проницаемость; δ_r , $\delta_r \cdot 10^6$ — углы потерь на гистерезис, вихревые токи, на последствие соответственно; $T_{кр}$ — температурный коэффициент магнитной проницаемости.

64. Свойства магнитомягких сплавов зарубежных фирм с начальной магнитной проницаемостью $\geq 40\ 000$ [24]

| Сплав | Основные элементы, кроме железа, % | Толщина продукта, мм | μ_n | μ_{max} | H_c , А/м | B_s , Тл | θ , °С | Номер условного обозначения стандарта, фирмы страны *1 |
|-------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------|---------------|--|
| PB-2S | 45,0 Ni, Mo | — | 10 000—40 000 | 100 000—200 000 | — | 1,40—1,50 | 400 | 4 |
| E4 | 75,5—78,5 Ni, Mo, Cr, Cu | 0,2 | 40 000 | — | — | 0,6—0,8 | 270—400 | 1 |
| Гиперм 767 | 75,5—78 Ni, Mo, Cr, Cu | — | 45 000 | 100 000 | — | 0,8 | 400 | 2 |
| Муметалл | 75,0 Ni, Mo, Cr, Cu | 0,2 | 45 000 | 120 000 | 1,2 | 0,8 | 400 | 3 |
| YEP-H | — | — | 40 000 | 100 000 | 1,6 | 0,48 | — | 6 |
| FeNi 77—40 | 77—76 Ni, Mo, Cr, Cu | — | 45 000 | 120 000 | 2,0 | 0,8 | 410 | 13 |
| YEP-C | — | — | >40 000 | >150 000 | 1,6 | 0,70 | — | 6 |
| Пермаллой C | 77,0 Ni | 0,1 | 25 000—50 000 | 70 000—150 000 | 2,4 | 0,8 | 380 | 11 |
| TMG | 79,0 Ni, 4 Mo | — | 30 000—50 000 | 200 000—300 000 | 0,8—1,3 | 0,83—0,86 | 460 | 5 |
| TMC | 79,0 Ni, Mo, Cu | 0,5 | 30 000—70 000 | 100 000—200 000 | 0,8—1,6 | 0,65—0,75 | 350 | 5 |
| PC-1, PC-2 | 78,0 Ni, Mo, Cr | — | 35 000—80 000 | 130 000—300 000 | 1,6—0,4 | 0,65—0,75 | 350 | 4 |
| PC-3 | 80,0 Ni, Mo | — | 35 000—80 000 | 150 000—350 000 | 1,6—0,4 | 0,75—0,85 | 400 | 4 |
| P50000 | 76,9—77,2 Ni; 4,0—4,2 Mo | 0,2 | 50 000 | 80 000 | 1,2 | 0,70 | 430 | 12 |
| Гиперм 53 | 50,0 Ni | 0,1 | 50 000 | 120 000 | — | 1,5 | 470 | 2 |
| Пермакс M | 50,0 Ni | 0,1 | 50 000 | 125 000 | 1,2 | 1,5 | — | 3 |
| Сатимфи | 53,0 Ni | 0,1 | 50 000 | 125 000 | 1,2 | 1,50 | — | 7 |
| Пермемфи I | 78,0 Ni, Mo | 0,1 | 50 000 | 140 000 | 1,2 | 0,8 | — | 7 |
| НуМи 80 | 80,0 Ni, 4,0 Mo | Пруток | 50 000 | 200 000 | 1,6 | 0,73 | 460 | 9 |
| Муметалл | 77,0 Ni, Mo | — | 50 000 | 240 000 | 1,0 | 0,77 | 350 | 8 |
| Пермаллой супер C | 77,0 Ni | 0,1 | 50 000—100 000 | 200 000—300 000 | 4,8 | 0,8 | 380 | 11 |
| TMH | 79,0 Ni, 5 Mo | — | 50 000 | 300 000 | 1,3 | 0,86 | — | 5 |
| Сплав № 3 | 75,0—78,0 Ni, 2,0—3,0 Cr, 4,0—6,0 Cu | 0,63 0,15 | >55 000 >65 000 | >250 000 375 000 | <1,2 0,64 | — | — | 10 |

Продолжение табл. 64

| Сплав | Основные элементы, кроме железа, % | Толщина продукта, мм | μ_n | μ_{max} | H_c , А/м | B_s , Тл | θ , °С | Номер условного обозначения стандарта, фирмы страны *1 |
|-----------------|------------------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------|------------|---------------|--|
| Сплав № 4 | 79,5—8,0 Ni; 3,75—4,8 Mo | 0,63 0,15 0,05 | >55 000 >80 000 95 000 | >250 000 >250 000 350 000 | <1,2 <1,2 0,48 | — | — | 10 |
| Гиперном | 80,0 Ni; 4,75 Mo | — | 60 000 | — | — | — | — | 9 |
| Вакумент | 80,0 Ni; 5,0 Mo | 0,025— | 60 000 | — | — | — | 460 | 9 |
| НуМи 800 | — | 0,20 | — | — | — | — | — | — |
| FeNi 77-60 | 77—76 Ni, Mo, Cr, Cu | — | 65 000 | 150 000 | 1,5 | 0,8 | 410 | 13 |
| Криоперм Z | 70,0—80,0 Ni | 0,1 | 65 000 | 160 000 | 1,2 | 0,80 | — | 3 |
| Сатмуметалл | 50,0 Ni | 0,1 | 65 000 | 240 000 | 2,0 | 1,5 | 550 | 8 |
| P70000 | — | 0,2 | 70 000 | 100 000 | 0,8 | 0,70 | 430 | 12 |
| Пермемфи 2 | 78,0 Ni, Mo | 0,1 | 75 000 | 200 000 | 0,8 | 0,8 | — | 7 |
| Вакоперм 100 | 75,0 Ni, Mo, Cr, Cu | 0,2 | 75 000 | 250 000 | 0,8 | 0,8 | 400 | 3 |
| Гиперм 900 | 75,5—78 Ni, Mo, Cr, Cu | — | 80 000 | 150 000 | 0,8 | 0,8 | 400 | 2 |
| FeNi 77-80 | 77—76 Ni, Mo, Cr, Cu | — | 85 000 | 180 000 | 1,2 | 0,8 | 410 | 13 |
| YEP-F | — | — | >80 000 | >300 000 | 0,8 | 0,70 | — | 6 |
| FeNi 77-100 | 77—76 Ni, Mo, Cr, Cu | — | 110 000 | 250 000 | 1,0 | 0,8 | 410 | 13 |
| Пермемфи 3 | 78,0 Ni, Mo | 0,1 | 110 000 | 250 000 | 0,56 | 0,8 | — | 7 |
| Супермуметалл | 77,0 Ni, Mo | — | 127 000 | 350 000 | 0,55 | 0,77 | 350 | 8 |
| Пермемфи 4 | 78,0 Ni, Mo | 0,1 | 130 000 | 300 000 | 0,4 | 0,8 | — | 7 |
| Ультралерм 10 | 75,0 Ni, Mo, Cr, Cu | 0,05 | 130 000 | 300 000 | 0,4 | 0,78 | 400 | 3 |
| Гиперм-максимум | 75,5—78 Ni, Mo, Cr, Cu | — | 140 000 | 280 000 | — | 0,8 | 400 | 2 |

*1 1 — DIN 41301—67; ФРГ. 2 — Fr. Krupp, Widia—Fabrik; ФРГ. 3 — Vacuumshmelze; ФРГ. 4 — Sumitomo Special Metals; Япония. 5 — Tohoku Metals Industries; Япония. 6 — Hitachi Metals; Япония. 7 — Société Metallurgique d'Imphy; Франция. 8 — Telcon Metals; Великобритания. 9 — Carpenter Technology; США. 10 — ANSJ/ASTM 0753—78; США. 11 — International Telephone and Telegraph; США. 12 — Csepèti Fémmü; ВНР. 13 — TGL 27010—73; ГДР.

получают путем холодного прессования при давлении 600—2000 МПа с последующей термической обработкой для снятия напряжений и стабилизации магнитных свойств. Магнитодиэлектрики применяют в катушках индуктивности и трансформаторах для аппаратуры проводной связи и радиосвязи, в радиоэлектронных устройствах.

Магнитодиэлектрики изготавливаются на основе карбонильного железа (ГОСТ 13610—79), кольцевые сердечники — из прессованного порошкообразного альсифера (ГОСТ 8763—77), магнитодиэлектрики — на основе пермаллоя. Сердечники из порошкообразного альсифера имеют регламентированные размеры: наружный диаметр 15—75 мм, внутренний диаметр 7—46 мм, высоту 4,8—16,8 мм. Предел прочности сердечника при изгибе не менее 4900 кПа. Сердечники можно эксплуатировать в условиях воздействия на них вибрационных нагрузок с диапазоном частот 1—5000 Гц и максимальными ускорениями до 392 м/с². Начальная магнитная проницаемость сердечника от воздействия механических нагрузок практически не зависит. Временная нестабильность магнитной проницаемости сердечников при эксплуатации в регламентированных рабочих режимах за 50 000 ч находится в пределах $\pm 5\%$. Свойства магнитодиэлектриков соответствуют указанным в табл. 63.

Зарубежные аналоги магнитомягких сплавов. Свойства магнитомягких сплавов зарубежных фирм представлены в табл. 64.

6. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ТЕПЛОВЫМИ СВОЙСТВАМИ

Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Во многих областях техники требуются материалы, позволяющие сохранять стабильные размеры изделий или их регламентированное изменение при определенных температурных диапазонах эксплуатации. Этим требованиям отвечают сплавы, относящиеся к классу материалов с особыми тепловыми свойствами. Основной

характеристикой сплавов является температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). В свою очередь все сплавы, в зависимости от физической природы, определяющей ТКЛР, делят на ферромагнитные и немагнитные. Ферромагнитные сплавы разработаны на железоникелевой основе, немагнитные — на основе хрома, никеля, титана, циркония, меди, марганца с добавками различных легирующих элементов.

К ферромагнитным сплавам с минимальным значением ТКЛР относят сплавы с ТКЛР ниже $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Сплавы пластичны, поддаются механической обработке, сварке и пайке. Их применяют для изготовления деталей измерительных приборов, криогенных установок, в качестве составляющих термобиметаллов, базисных деталей лазеров. Марки и сортамент сплавов, выпускаемых промышленностью, представлены в табл. 65.

Химический состав сплавов 36Н, 32НКД, 32НК-ВИ, 35НКГ, 39Н определен ГОСТ 10994—74, нормы ТКЛР, а также химический состав и значения ТКЛР сплавов 32НК-ЭЛ, 35НКГ, 36НГТ приведены в работе [24].

Температурный коэффициент линейного расширения (α) некоторых сплавов приведен в табл. 66.

В качестве материалов с минимальными значениями ТКЛР могут использоваться аморфные металлические сплавы.

Сплавы 35НКГТ и 39Н выпускаются в том же сортаменте, что и сплав 36Н.

Ферромагнитные сплавы с низким ТКЛР характеризуются значениями коэффициента α от 3 до $7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Марки сплавов и их сортамент приведены в табл. 67.

Температурные коэффициенты линейного расширения некоторых сплавов представлены в табл. 68.

Химический состав сплавов, за исключением марок 38НК и 30НКФ, приведен в ГОСТ 10994—74. Значения ТКЛР и сортамент, а также химический состав сплавов марок 38НК, 30НКФ даны в справочном материале [24].

Сплавы с низким ТКЛР применяют в соединениях с керамикой, в вакуум-

65. Марки и сортамент ферромагнитных сплавов с минимальным ТКЛР [24]

| Сплав | Сортамент | Толщина или диаметр, мм |
|--------------|----------------------|---|
| 36Н и 36Н-ВИ | Лента | 0,1—2,5 |
| | Полоса | 2,8—2,2 |
| | Шлифованные прутки | 10—30 |
| | Горячекатаные прутки | 8—200 |
| | Проволока | 0,1—3,5 |
| 32НКД | Горячекатаные прутки | 8—200 |
| 32НК-ВИ | Лента | 0,1—2,5 |
| 32НК-ЭЛ | Холоднокатаные трубы | 90 |
| 36НХ | Трубная заготовка | 85—160 180 215 |
| | Холоднокатаные трубы | 25×2; 36×2; 56×2; 70×2; 100×3; 100×2; 150×2,5; 200×2,5; 220×4; 250×4,5 |
| 35НКГ | Лента | 0,5—0,8 |
| 36НГТ | Проволока | 2,0—4,0 |

но-плотных соединениях со стеклами, низкотемпературными припоями, клеями.

Эффект образования качественного соединения обуславливается тем, что при нагреве сплава на его поверхности образуется оксидная пленка, которая взаимодействует с керамикой или сма-

чивается стеклом при температурной пайке.

Ферромагнитные сплавы со средним значением ТКЛР [до $15 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$] находят применение при создании соединений с керамикой типа 22ХС «Полдикор», высокотемпературными припоями, а также с «мягкими» стеклами. Из сплава 57Н-ВИ, ТКЛР которого близок ТКЛР сталей и чугунов, изготавливают отсчетные шкалы высокоточных координатно-расточных станков. В табл. 69 представлены марки сплавов и их сортамент. Значения ТКЛР некоторых сплавов даны в табл. 70. Химический состав сплавов задан ГОСТ 10994—74. ТКЛР и сортамент для сплавов марок 31НК, 24НК, 50НЗХЮ даны в справочной литературе [24].

Немагнитные сплавы с минимальным и низким значениями ТКЛР (марки

66. Свойства ферромагнитных сплавов с минимальным ТКЛР [7, 24]

| Сплав | Интервал температур, $^\circ\text{C}$ | $\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, не более |
|---------|---------------------------------------|--|
| 36Н | -60÷+100 | 1,5 |
| 32НКД | -60÷+100 | 1,0 |
| 35НКГ | +20÷+100 | 2,2—2,8 |
| 32НК-ВИ | +20÷+100 | 1,0 |

67. Марки и сортамент ферромагнитных сплавов с низким ТКЛР [24]

| Сплав | Сортамент | Толщина или диаметр, мм |
|----------|--|----------------------------------|
| 42Н | Лента | 0,1—2,5 |
| 42НА-ВИ | Проволока | 0,1—36 |
| 44Н, 46Н | Лента | 0,4—1,0 |
| 38НК | Лента Проволока Горячекатаные и кованые прутки | 0,3; 0,5 3,0—5,0 13,0—60,0 |
| 30НКД | Полоса | 2,8—2,2 |
| 29НК | Шлифованные прутки Трубка | 1,0—30 1,0—70,0 |
| 30НКФ | Горячекатаные и кованые прутки | 16,2—60 |

68. Свойства ферромагнитных сплавов с низким ТКЛР [24]

| Сплав | $\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, в интервале температур, $^\circ\text{C}$ | |
|-------|--|---------|
| | 20—300 | 20—400 |
| 38НК | 3,0—3,8 | 5,0—5,8 |
| 30НКД | 3,3—4,3 | 3,8—4,6 |
| 29НК | 4,6—5,5 | 4,5—5,2 |

95ХК и 96Х) используют для изготовления изделий с высокой стабильностью размеров, не вносящих искажений в магнитные поля и обладающих высокой твердостью и коррозионной стойкостью. ТКЛР сплавов составляет $(1 \div 6) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале температур до $100 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Для создания соединений с «мягкими» стеклами и керамикой, а также в качестве конструкционного материала с заданным ТКЛР используют немагнитные сплавы со средними значениями этого коэффициента. В табл. 71

69. Марки и сортамент ферромагнитных сплавов со средним значением ТКЛР [24]

| Сплав | Сортамент | Толщина или диаметр, мм |
|-------|--------------------|-------------------------|
| 34НК | Шлифованные прутки | 1,0—30 |
| 31НК | Лента Полоса | 0,3—1,0 5,0 |
| 24НК | Лента Полоса | 0,8 16,0 |

Продолжение табл. 69

| Сплав | Сортамент | Толщина или диаметр, мм |
|---------------------------------------|--|---------------------------|
| 33НК, 38НКД, 47НХ, 48НХ, 47НЗХ, 47НХР | Горячекатаные или кованые прутки | 8—200 |
| 50НЗХЮ | Лента | 0,3—0,8 |
| 18ХТФ | Лента | 0,6—2,5 |
| 58Н-ВИ | Полоса Шлифованные прутки Горячекатаные и кованые прутки | 2,8—22 1,0—30 8—200 |
| 52Н, 47НД | Горячекатаные и кованые прутки | 8—200 |

70. Свойства ферромагнитных сплавов со средним значением ТКЛР [24]

| Сплав | $\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, в интервале температур, $^\circ\text{C}$ | |
|-------|--|-----------|
| | 200—300 | 200—500 |
| 34НК | 7,4—8,4 | 7,2—8,0 |
| 38НКД | 7,1—7,9 | 8,2—9,0 |
| 47НХ | 7,6—8,4 | 8,3—9,5 |
| 47НХР | 8,4—9,2 | 10,7—11,5 |
| 47НД | 9,2—10,1 | 9,7—10,5 |

приведены сплавы и поставляемый промышленностью сортамент. Находят также примененные сплавы 93ЦТ на циркониевой основе и сплавы 72ТФ, 75ТМ на титановой основе. Свойства некоторых сплавов приведены в табл. 72.

В качестве немагнитных материалов с высоким ТКЛР применяют сплавы 56ДГНХ и 70ГНДХ. Эти сплавы имеют ТКЛР более $15 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале температур от $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ до температуры плавления. Из сплавов изготавливают детали, тепловое расширение которых должно согласованно соответствовать тепловому расширению деталей из

71. Марки и сортамент немагнитных сплавов со средним значением ТКЛР [24]

| Сплав | Сортамент | Толщина или диаметр, мм |
|---------|--|------------------------------|
| 75НМ-ВИ | Холоднокатаная лента | 0,1—0,015 |
| 80НМВ | Холоднокатаная лента Кованые прутки Холоднокатаная проволока | 0,03—2,5 20—60 1,0—5,0 |
| 80НМВХЗ | Холоднотянутая проволока | 1,0—5,0 |
| 76НХВГ | | 3,0—5,0 |

72. Свойства немагнитных сплавов со средним значением ТКЛР [24]

| Сплав | $\alpha \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$, в интервале температур, $^\circ\text{C}$ | |
|---------|--|-----------|
| | 20—300 | 20—800 |
| 75НМ-ВИ | 11,5—12,0 | — |
| 80НМВ | 11,7—12,2 | 12,8—13,3 |
| 80НМВХЗ | 11,7—12,2 | 13,0—13,5 |

73. Свойства сплавов с низким температурным коэффициентом модуля упругости [24]

| Сплав | $E, \text{ГПа}$ | $\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$ |
|---------|-----------------|--|
| 42НХТЮ | 177—186 | 9,5 |
| 44НХТЮ | 177—181 | 8,0 |
| 42НХТЮА | 177—181 | 9,0 |
| 43НКТЮ | 167—172 | 8,2 |
| 45НХТ | 177—196 | 7,0 |
| 37Н11Х | 181 | 9,0 |
| 36Н11Х | 177 | 9,0 |

алюминиевых сплавов, а также используют их в качестве компонента термометаллов.

Сплав 56ДГНХ поставляют в виде кованых прутков диаметром 25—50 мм, сплав 70ГНДХ — в виде кованых полос размером 38×92×300 мм.

Сплавы с заданным температурным коэффициентом модуля упругости. Сплавы характеризуются низким температурным коэффициентом модуля упругости, который весьма чувствителен к химическому составу и термической обработке [7].

Свойства наиболее распространенных сплавов приведены в табл. 73. Они находят применение для изготовления упругих элементов (спирали, пружины, сальфоны и т. д.) высокоточных приборов, обеспечивающих малую температурную погрешность при эксплуатации. Сплавы поставляются по ГОСТ 14117—85, ГОСТ 14118—85, ГОСТ 14119—85, а некоторые из них — по ТУ [24].

7. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводник — это материал, основным свойством которого является сильная зависимость его электрической проводимости от воздействия внешних факторов, таких, как температура, электрическое поле, свет и т. д. (ГОСТ 19880—74).

Полупроводниковый материал предназначен для использования его полупроводниковых свойств (ГОСТ 22622—77).

Полупроводники бывают простые и сложные. Полупроводник, основной состав которого образован атомами одного химического элемента, будет простым. Полупроводник, основной состав которого образован атомами двух или большего числа химических элементов, будет сложным.

В полупроводниках носителями заряда, обуславливающими электрическую проводимость, являются дырки проводимости и электроны. Полупроводник, не содержащий примесей, влияющих на его электропроводность, называется собственным полупроводником. Электропроводность собственного полупроводника в равновесном состоянии обусловлена как дырками проводимости, так и электронами проводимости, причем их концентрации равны. Полупроводник, электропроводность которого определяется примесями, называется примесным полупроводником. Полупроводник, электрическая проводимость которого обусловлена в основном перемещением дырок проводимости, будет дырочным полупроводником. У электронного полупроводника проводимость обусловлена в основном электронами проводимости.

Свойства полупроводников объяснены в зонной теории твердых тел. Для электронов в твердых телах имеются разрешенные и запрещенные зоны энергии. В каждой из разрешенных зон энергия изменяется дискретным образом и число энергетических состояний ограничено. Если валентная зона заполнена электронами полностью, а следующая зона разрешенных энергий (зона проводимости) — пуста и интервал запрещенных энергий (ши-

рина запрещенной зоны ΔE) не превышает 1—3 эВ, то такие твердые тела будут полупроводниками. При -273°C электрическая проводимость таких веществ равна нулю. В результате какого-либо энергетического воздействия (температуры, излучения) электроны из валентной зоны могут быть переведены в зону проводимости. В полупроводнике возникают носители заряда: электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Электрическая проводимость полупроводников увеличивается с повышением температуры и определяется соотношением

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E/kT),$$

где ΔE — ширина запрещенной зоны; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Известно около 1000 простых и сложных полупроводников. Многие из них используются для изготовления различных электронных приборов и микросхем, СВЧ-генераторов, фоточувствительных и преобразовательных приборов, лазеров, термисторов, термоэлементов, тензочувствительных элементов, датчиков Холла и др. Обычно полупроводниковые материалы, предназначенные для использования в электронике, изготавливают в виде монокристаллических слитков согласно ГОСТ 4.64—80.

Свойства полупроводниковых приборов определяются свойствами исходных материалов. Для полупроводниковых материалов, выпускаемых промышленностью, применяются те или иные из показателей качества, установленных ГОСТ 4.64—80 (номенклатура показателей).

Простые полупроводники. Из простых полупроводников наиболее широкое применение нашли кремний и германий. Некоторые физико-химические свойства германия и кремния приведены в табл. 74.

Для изготовления разнообразных приборов требуются полупроводниковые материалы с различными свойствами. Ниже при описании марок полупроводниковых материалов, выпускаемых промышленностью, после характеристик монокристаллических слитков в скобках приводится условное обозначение характеристики. Для каждого типа

полупроводникового материала установлены и контролируются показатели качества, определенные ГОСТ 4.64—80. Группы и подгруппы марок материала имеют различный набор численных значений показателей качества.

Слитки монокристаллического кремния (ТУ 48-4-295—82), предназначенные для производства полупроводниковых приборов и микросхем, получают методом Чохральского (К) (ОКП 17 7211) с ориентацией продольной оси монокристаллического слитка [111], [100], [013] диаметром $42 \pm \frac{3}{2}$ — $102,5 \pm \frac{3}{2}$ мм и базовой длиной 60—150 мм или бестигельной зонной плавкой (БК) (ОКП 17 7221) с ориентацией [111] диаметром 23—46 мм и длиной 40—70 мм. Отклонение плоскости торцового среза слитка кремния от плоскости ориентации (α) не должно превышать 3° . Концентрация атомов оптически активного кислорода (N_2) должна быть не более $1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ в слитках кремния, полученных бестигельной зонной плавкой, и $7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ в слитках, полученных методом Чохральского.

Слитки монокристаллического кремния, легированные бором (Б) или алюминием (А), изготовляют дырочного (Д) типа электрической проводимости, и легированные фосфором (Ф), сурьмой (С) или мышьяком (М), а также фосфором и золотом (ФЗ) — электронного типа. Технические требования на слитки могут быть уточнены или изменены по согласованию между изготовителем и потребителем.

Пример условного обозначения слитков: 1А1 кц КДБ 7,5/2,5—76 ТУ 48-4-295—82, где 1А1 — подгруппа марок; кц — индексы дополнительных требований; КДБ — монокристаллический слиток кремния, выращенный по методу Чохральского, дырочного типа электрической проводимости, легированный бором; 7,5 — номинал удельного электрического сопротивления, Ом·см; 2,5 — время жизни неравновесных носителей заряда, мкс; 76 — диаметр, мм.

В табл. 75 и 76 приведены некоторые электрофизические параметры слитков монокристаллического кремния.

В зависимости от группы и подгруппы марки техническими условиями допускается: отклонение средних значений удельного электрического сопро-

74. Физико-химические свойства кремния и германия [21, 33, 39]

| Свойства | Si | Ge |
|---|--------------------------------|--------------------------------|
| Относительная атомная масса | 28,0855 | 72,60 |
| Постоянная решетки при 25 °С, нм | $0,543072 \pm 1 \cdot 10^{-6}$ | $0,565754 \pm 1 \cdot 10^{-6}$ |
| $\rho \cdot 10^{-3}$ при 25 °С, кг/м ³ | 2,32902 | 5,32674 |
| Твердость по Моосу | 7,0 | 6,25 |
| Микротвердость, ГПа | 10,4 | 7,6 |
| Температура, °С: | | |
| плавления | 1415 ± 3 | 937,2 |
| кипения | 2600 | 2700 |
| Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ | 2,33 | 5,75 |
| Теплопроводность при 25 °С, Вт/(м·°С) | 109 | 58,3 |
| Молярная теплоемкость, Дж/(моль·°С): | | |
| при -193 °С | 5,20 | 11,1 |
| при 27 °С | 19,5 | 22,9 |
| в жидком состоянии | 31,0 | 31,4 |
| Температура Дебая, °С: | | |
| при -193 | 266 | 80 |
| при 27 | 416 | 133 |
| Молярная теплота плавления, кДж/моль | $49,9 \pm 0,8$ | $37,1 \pm 0,2$ |
| Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м | 0,72 | 0,6 |
| Упругие постоянные, ГПа, при 25 °С: | | |
| C_{11} | 167 | 129 |
| C_{12} | 65,2 | 48,3 |
| C_{44} | 79,6 | 66,8 |
| Скорость распространения продольных звуковых волн, м/с | $9,15 \cdot 10^3$ [111] | $5,4 \cdot 10^3$ [110] |
| Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м | $2,3 \cdot 10^3$ | 0,68 |
| Концентрация собственных носителей заряда при 20 °С, м ⁻³ | $3 \cdot 10^{16}$ | $2,5 \cdot 10^{19}$ |
| Ширина запрещенной зоны, эВ: | | |
| при -213 °С | 1,21 | 0,78 |
| при 25 °С | 1,12 | 0,75 |
| Подвижность при 27 °С, м ² /(В·с): | | |
| электронов | $(1350 \pm 100) 10^{-4}$ | $3800 \cdot 10^{-4}$ |
| дырок | $(480 \pm 15) 10^{-4}$ | $1800 \cdot 10^{-4}$ |
| Эффективная масса дырок: | | |
| тяжелых | $0,5m_0$ | $0,379m_0$ |
| легких | $0,16m_0$ | $0,042m_0$ |
| Диэлектрическая проницаемость статическая (низкочастотная) | 12,5 | 16 |
| Магнитная восприимчивость | $-0,13 \cdot 10^{-4}$ | $-0,12 \cdot 10^{-6}$ |

75. Основные электрофизические параметры слитков монокристаллического кремния, полученных методом Чохральского (ТУ 48-4-295—82)

| Группа марки | Подгруппа марки | $\rho_n \cdot 10^2$, Ом·м | $(\rho_{n1} - \rho_{n2}) 10^2$, Ом·м | Тип электропроводности | Легирующий элемент |
|--------------|-----------------|----------------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------|
| 1А | 1—3 | От 1 до 15 вкл. | — | Э, Д | Ф, Б |
| 2А | 1—3 | Св. 15 до 45 » | — | Э, Д | Ф, Д |
| 3А | 1—3 | От 0,005 до 1 | — | Э, Д | Ф, Б |
| 3А | 4—5 | — | 0,002—0,006 | Э | М |
| 3Б | 1—3 | От 0,003 до 0,1 | — | Э | С, М |

Обозначения: ρ_n — номинальное значение удельного электрического сопротивления (УЭС); $(\rho_{n1} - \rho_{n2})$ — интервал номинальных значений удельного электрического сопротивления.

76. Основные электрофизические параметры слитков монокристаллического кремния, полученного бестигельной зонной плавкой (ТУ 48-4-295—88)

| Группа марки | Подгруппа марки | $\rho_n \cdot 10^2$, Ом·м | $(\rho_{n1} - \rho_{n2}) \times 10^2$, Ом·м | Тип электропроводности | Легирующий элемент | Плотность дислокаций, см ⁻² , не более |
|--------------|-----------------|----------------------------|--|------------------------|--------------------|---|
| 1А | 1—3 | От 1 до 15 вкл. | — | Э | Ф | От $2 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^4$ |
| 1Б | 1—2 | » 1 » 15 » | — | Э | Ф | $1 \cdot 10^4$ |
| 2А | 1—3 | Св. 15 » 45 » | — | Э | Ф | $1 \cdot 10^4$ |
| 2В | 1 | От 40 » 75 » | — | Э | Ф | $1 \cdot 10^4$ |
| 2Г | 1—2 | — | 50—140 | Э | Ф | $1 \cdot 10^4$ |
| 2Д | 1 | — | 100—250 | Э | Ф | $1 \cdot 10^4$ |
| 2Е | 1—4 | — | 500—2000 и выше | Д | Б | $5 \cdot 10^4$ |
| 2Ж | 1 | — | 1,5—3,5 | Д | Б | $5 \cdot 10^4$ |
| 3А | 1—4 | От 0,012 до 1 вкл. | — | Э | Ф | От $2 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^4$ |
| 4А | 1—2 | » 0,02 » 0,2 » | — | Д | А | — |
| 5А | 1 | » 3 » 18 » | — | Э | Ф | От $2 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^4$ |

твления торцов от номинального значения $\delta \rho_n = 15 \div 35 \%$; радиальное отклонение удельного электрического сопротивления от среднего значения по торцу слитка $\delta \rho_R = 10 \div 20 \%$; относительное отклонение средних значений удельного электрического сопротивления по длине слитка 20—35 %.

Кремний монокристаллический, полученный методом бестигельной плавки (ТУ 48-4-466—85), предназначен для производства полупроводниковых приборов (ПЭС, БИС, СБИС). Слитки монокристаллического кремния, легированные фосфором, изготавливают электронного (Э) типа электрической проводности, а легированного бором —

дырочного (Д). Монокристаллические слитки не должны иметь дислокаций и свирлевых дефектов. Концентрация атомов оптически активного кислорода (N_{O_2}) не должна превышать $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, концентрация оптически активного углерода (N_{C}) — не более $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Слитки имеют диаметр 78 ± 2 мм и длину не менее 80 мм. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) монокристаллического кремния различных марок и ориентация продольной оси монокристаллического слитка приведены в табл. 77. Допустимое относительное отклонение средних значений УЭС торцов от номинального значения УЭС составляет 20 % для марок КВЭ и 25 % для марок КВД. Допустимое радиальное отклонение УЭС от среднего значения по торцу не более 10 %.

Время жизни неравновесных носителей заряда зависит от номинального УЭС слитка и для электронного типа электрической проводимости составляет (в мкс): для номинального УЭС от 0,01 до 0,5 Ом·м — не менее $400\tau_{\text{H}}$; св. 0,5 до 1,00 Ом·м — не менее $200\tau_{\text{H}}$; св. 1,00 до 1,50 Ом·м — не менее $150\tau_{\text{H}}$; для дырочного типа электрической проводимости от 0,01 до 0,4 Ом·м — не менее $400\tau_{\text{H}}$; св. 0,4 до 1,50 Ом·м — не менее $200\tau_{\text{H}}$.

Монокристаллический кремний в слитках (ГОСТ 19658—81, ОКП 17 7930), предназначенный для приготовления пластин-подложек, используемых в производстве эпитаксиальных структур и структур металл—диэлектрик—полупроводник, легированный бором (Б) (марки ЭКДБ), изготавливают дырочного типа электрической проводимости (Д), и легированный фосфором (Ф) (марки ЭКЭФ) или сурьмой (С)

(марки ЭКЭС) — электронного типа электрической проводимости (Э) с плотностью дислокаций не более 10^6 м^{-2} . Ориентация продольной оси монокристаллического слитка кремния [111] или [100]. Предельное отклонение плоскости торцового среза монокристаллических слитков от плоскости ориентации не должно превышать 3° . Номинальные диаметры слитков $62,5 \pm 3$, $78,5 \pm 3$ и $102,5 \pm 3$ мм. Концентрация кислорода в слитках кремния диаметром 62,5 и 78,5 мм не должна превышать $7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, а в слитках диаметром 102,5 мм — $1 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Слитки кремния с удельным электрическим сопротивлением более 0,03 Ом·м должны иметь время жизни неравновесных носителей заряда: для электронного типа электрической проводимости — не менее 7,5 мкс, для дырочного — не менее 2,5 мкс. Десять групп марок слитков монокристаллического кремния характеризуются различным номинальным удельным электрическим сопротивлением (0,00005—0,4 Ом·м), относительным отклонением средних значений удельного электрического сопротивления торцов от номинального значения на 20—40 % и различным относительным отклонением удельного электрического сопротивления от среднего значения по торцу слитка на 10—20 %.

Монокристаллический кремний, предназначенный для производства полупроводниковых источников тока (ТУ 48-4-258—80, ОКП 17 7215), изготавливается в виде монокристаллических слитков, полученных по методу Чохральского, диаметром 40—55 мм и длиной не менее 50 мм. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111] или по согласованию с

77. Удельное электрическое сопротивление и ориентация продольной оси монокристаллического слитка для различных марок кремния (ТУ 48-4-466—85)

| Марка | $\rho_{\text{H}} \cdot 10^2$, Ом·м | Ориентация | Марка | $\rho_{\text{H}} \cdot 10^2$, Ом·м | Ориентация |
|-------|-------------------------------------|------------|-------|-------------------------------------|------------|
| КВЭ1 | От 1 до 50 вкл. | [111] | КВД1 | От 1 до 50 вкл. | [111] |
| КВЭ2 | » 1 » 50 » | [100] | КВД2 | » 1 » 50 » | [100] |
| КВЭ3 | Св 50 » 150 » | [111] | КВД3 | Св. 50 » 150 » | [111] |
| КВЭ4 | » 50 » 150 » | [100] | КВД4 | » 50 » 150 » | [100] |

потребителем [100]. Плотность дислокаций для всех марок не должна превышать $5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$.

Кремний КСД — солнечный дырочного типа электрической проводимости, легированный бором; значения УЭС 0,003—0,03 Ом·м либо 0,05—0,45 Ом·м.

Кремний КСЭ — солнечный электронного типа электрической проводимости, легированный фосфором; значения УЭС 0,006—0,25 Ом·м. Время жизни неравновесных носителей заряда зависит от УЭС слитков.

Монокристаллический кремний, полученный бестигельной зонной плавкой, легированный фосфором в процессе нейтронной активации, предназначенный для производства силовых полупроводниковых приборов, выпускается либо марки БО — бестигельный однороднолегированный (ТУ 48-4-449—83), либо марки КОФ — кремний однородный, легированный фосфором (ТУ 48-4-443—83, ОКП 17 7222).

Слитки монокристаллического кремния марки БО имеют диаметр $54 \pm 0,05$ мм, длину не менее 100 мм. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 2° . Слитки имеют электронный тип электрической проводимости, интервал УЭС 1,30—1,50 Ом·м, время жизни неравновесных носителей заряда не менее 70 мкс. Плотность дислокаций не более 10^6 м^{-2} . Свирлевые дефекты отсутствуют. Концентрация атомов оптически активного кислорода не более $1 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, оптически активного углерода не более $4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Слитки монокристаллического кремния марки КОФ имеют диаметр 44, 54, 60 либо 84 мм с погрешностью ± 1 мм. Ориентация оси слитка [111], отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° . Имеются два интервала номинальных значений УЭС: 0,40—2,00 и 2,10—3,50 Ом·м. Время жизни неравновесных носителей заряда (в мкс) должно быть не менее половины УЭС (в Ом·см) для номинальных значений УЭС 0,70—2,00 Ом·м и не менее 30 мкс для номинальных значений УЭС 0,40—0,60 Ом·м. Время жизни неравновесных носителей заряда в слитках с номи-

нальным УЭС 2,10—3,50 Ом·м должно быть не менее 100 мкс. Плотность дислокаций в слитках не более 10^6 м^{-2} . Концентрация оптически активных кислорода и углерода не должна превышать $5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Допустимое относительное отклонение средних значений УЭС торцов от номинального значения и допустимое относительное отклонение УЭС от среднего значения по торцу слитка не должно превышать соответственно 12 и 7 % для слитков с номинальным значением УЭС 0,40—2,00 Ом·м и 15 и 10 % для слитков с номинальным значением УЭС 2,10—3,50 Ом·м.

Монокристаллический кремний для фотоприемников (ТУ 48-4-363—75) получают как методом бестигельной зонной плавки (ОКП 17 724 марки КВ), так и методом Чохральского (ОКП 17 7214 марки КЧ), дырочного и электронного типа электрической проводимости (легированы бором и фосфором соответственно).

Некоторые электрофизические свойства кремния, предназначенного для фотоприемников, приведены в табл. 78. Диффузионная длина неравновесных носителей заряда

$$L = 10^{-2} \sqrt{D\tau},$$

где $D = 35,36 \text{ см}^2/\text{с}$ для кремния дырочного типа электрической проводимости и $D = 13 \text{ см}^2/\text{с}$ для кремния электронного типа электрической проводимости. Концентрация оптически активного кислорода должна быть не более $1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ для марок КВ и $7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ для марок КЧ. Кроме приведенных величин, слитки кремния различаются геометрическими размерами.

Монокристаллический кремний, полученный методом бестигельной зонной плавки из поликристаллического кремния водородного восстановления (ТУ 48-4-253—73, ОКП 17 7221), предназначенный для производства полупроводниковых приборов, выпускается марки КВД (кремний водородный дырочного типа электрической проводимости).

Слитки монокристаллического кремния марки КВД поставляются диаметром 18—23 мм и длиной не менее 30 мм. Ориентации продольной оси монокри-

78. Некоторые электрофизические свойства кремния, предназначенного для фотоприемников (ТУ 48-4-363—75)

| Кремний | $\rho_{\Sigma} \cdot 10^2, \text{ Ом}\cdot\text{м}$ | $(\rho_{\text{H1}} - \rho_{\text{H2}}) \times 10^2, \text{ Ом}\cdot\text{м}$ | Тип электропроводимости | Плотность дислокаций, м^{-2} , не более | Диффузионная длина, мм, не менее |
|---------|---|--|-------------------------|--|----------------------------------|
| КБ1 | — | 80—140 | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,3 |
| КБ2 | — | 80—140 | Э | $1 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^8$ | 0,3 |
| КБ3 | — | 100—250 | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,3 |
| КБ4 | — | 100—250 | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,3 |
| КБ5 | 20 | — | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,3 |
| КБ6 | 20 | — | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,3 |
| КБ7 | — | 2000 и выше | Д | $5 \cdot 10^8$ | 0,3 |
| КБ8 | От 5 до 50 вкл. | — | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,16 |
| КБ9 | Св. 50 » 100 » | — | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,25 |
| КБ10 | » 100 » 200 » | — | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,35 |
| КБ11 | » 200 » 400 » | — | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,35 |
| КБ12 | » 400 » 600 » | — | Э | $1 \cdot 10^5$ | 0,35 |
| КЧ1 | 40 | — | Д | $1 \cdot 10^6$ | 0,3 |
| КЧ2 | 7,5 | — | Э | $1 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^8$ | 0,5 |

галлического слитка [111], отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° . Плотность дислокаций не более $5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$; концентрация атомов оптически активного кислорода не более $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Монокристаллический моносилановый кремний (ТУ 48-4-504—88), предназначенный для производства р-диодов и магнитодетекторов, изготов-

79. Удельное электрическое сопротивление моносиланового кремния (ТУ 48-4-504—88)

| Марка | $\rho_1, \text{ Ом}\cdot\text{м}$, не менее | Марка | $\rho_1, \text{ Ом}\cdot\text{м}$, не менее |
|-------|--|--------|--|
| КМД-1 | 10 | КМД-6 | 60 |
| КМД-2 | 20 | КМД-10 | 100 |
| КМД-3 | 30 | КМД-20 | 200 |
| КМД-4 | 40 | КМЭ-1 | 10 |
| КМД-5 | 50 | | |

ляется методом бестигельной зонной плавки в вакууме или газовой среде электронного или дырочного типа электрической проводимости.

Удельное электрическое сопротивление марок кремния дырочного типа электрической проводимости (КМД) и электронного типа электрической проводимости (КМЭ) приведено в табл. 79. Допустимое относительное отклонение УЭС от среднего значения по длине слитка не более 35%; время жизни неравновесных носителей заряда не более 500 мкс для всех марок. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111], отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° . Плотность дислокаций не более $4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$; концентрация атомов оптически активного кислорода не более $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Поликристаллический зонноочистенный германий (ГОСТ 16154—80) марок ГПЗ 1 и ГПЗ 2 предназначен для изготовления легированных монокристаллов германия, для получения сплавов,

производства заготовок оптических деталей и других целей.

Монокристаллы германия, предназначенные для производства полупроводниковых приборов, легированные сурьмой, изготавливают (ГОСТ 16153—80) электронного типа электрической проводимости (ГЭ) и легированные галлием дырочного типа электрической проводимости (ГД). Диаметр монокристаллических слитков 28—40 мм, длина не менее 50 мм. Интервал номинальных УЭС 0,001—0,45 Ом·м. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111]; предельное отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 2° .

Номинальные УЭС монокристаллических слитков выбирают в соответствии с ГОСТ 8032—84 по следующим рядам: для УЭС 0,0001—0,1 Ом·м — (0,1; 0,12; 0,15; 0,2; 0,25; 0,31; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0) · 10^{-2} Ом·м; для УЭС 0,01—0,10 Ом·м — (1,1; 1,4; 1,8; 2,2; 2,8; 3,5; 4,5; 5,6; 7,1; 9,0) · 10^{-2} Ом·м; для УЭС 0,10—0,45 Ом·м — (11,2; 14; 18; 22,4; 28; 35,5; 45) · 10^{-2} Ом·м.

Монокристаллические слитки германия по допускаемому отклонению удельного электрического сопротивления от выбранного номинала и по плотности дислокаций делят на три подгруппы. Для подгруппы 1 допускаемое отклонение УЭС от выбранного номинала не должно составлять более $\pm 25\%$, для подгруппы 2 — более $\pm 20\%$ и для подгруппы 3 — более $\pm 15\%$.

Плотность дислокаций для подгруппы 1 должна составлять не более $5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$, для подгруппы 2 — не более $2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$, для подгруппы 3 — не более $8 \cdot 10^7 \text{ м}^{-2}$.

Подвижность носителей заряда в монокристаллических слитках германия в зависимости от УЭС и типа электрической проводимости должна соответствовать нормам, указанным в табл. 80.

Монокристаллический германий, легированный золотом (З), сурьмой и золотом (СЗ), галлием и золотом (ГЗ) (ТУ 48-4-291—74, ОКП 17 7441), предназначенный для производства полупроводниковых приборов, поставляется в виде слитков электронного (Э) типа электрической проводимости и дыроч-

80. Подвижность носителей заряда в монокристаллических слитках германия (ГОСТ 16153—80)

| $\rho_1 \cdot 10^2, \text{ Ом}\cdot\text{м}$ | Подвижность носителей заряда при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, не менее | |
|--|---|-------|
| | Электроны | Дырки |
| От 0,1 | 0,18 | 0,13 |
| до 0,23 вкл. | | |
| Св. 0,24 | 0,23 | 0,14 |
| до 0,49 вкл. | | |
| Св. 0,50 | 0,26 | 0,15 |
| до 0,89 вкл. | | |
| Св. 0,9 | 0,31 | 0,16 |
| до 2,4 вкл. | | |
| Св. 2,5 | 0,33 | 0,17 |
| до 5,9 | | |
| Св. 6,0 | 0,34 | 0,17 |
| до 15,9 | | |
| Св. 16,0 | 0,36 | 0,17 |
| до 45,0 | | |

ного (Д) типа электрической проводимости. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° . Некоторые электрофизические свойства германия приведены в табл. 81. Монокристаллические слитки выращивают диаметром 18—35 мм и длиной св. 30 мм.

Монокристаллический германий, легированный фосфором, электронного типа электрической проводимости (ТУ 48-4-396—77, ОКП 17 7443), предназначенный для производства подложек эпитаксиальных структур (марки ГЭФ-0,001) и полупроводниковых приборов (марка ГЭФ-0,005), выпускают с номинальным значением УЭС не более 0,000012 и 0,00005 Ом·м соответственно. Монокристаллические слитки германия марки ГЭФ-0,001 имеют диаметр 20 мм и длину не менее 50 мм; слитки германия марки ГЭФ-0,005 имеют диаметр 25 мм и длину не менее 25 мм. Ориентация продольной оси монокристаллических слитков [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости

81. Электрофизические свойства германия (ТУ 48-4-291—74)

| Марка | $\rho_n \cdot 10^3$, Ом·м | Отклонение ρ_n от номинала, % | Плотность дислокаций, $м^{-2}$, не более | Расчетная концентрация золота, $м^{-3}$, не менее |
|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---|--|
| ГДЗ 0,6 | 0,6 | ± 10 | $5 \cdot 10^7$ | $5 \cdot 10^{21}$ |
| ГДЗ 0,7 | 0,7 | ± 10 | $5 \cdot 10^7$ | $4 \cdot 10^{21}$ |
| ГДГЗ 0,6 | 0,6 | ± 10 | $5 \cdot 10^7$ | $4,5 \cdot 10^{21}$ |
| ГДГЗ 3 | 3,0 | ± 10 | $4 \cdot 10^7$ | $(2 \div 5) \cdot 10^{20}$ |
| ГЭСЗ 0,16 | 0,16 | ± 20 | $5 \cdot 10^8$ | $4 \cdot 10^{21}$ |
| ГЭСЗ 0,20 | 0,20 | ± 20 | $5 \cdot 10^8$ | $4 \cdot 10^{21}$ |
| ГЭСЗ (2,0 \div 3,0) $\pm 15\%$ | 2,0—3,0 | ± 15 | $5 \cdot 10^8$ | $6 \cdot 10^{20}$ |
| ГЭСЗ (2,0 \div 3,0) $\pm 20\%$ | 2,0—3,0 | ± 20 | $5 \cdot 10^8$ | $6 \cdot 10^{20}$ |
| ГЭСЗ 6,0 $\pm 25\%$ | 6,0 | ± 25 | $5 \cdot 10^8$ | $6 \cdot 10^{20}$ |

ориентации не более 2° . Плотность дислокаций для марки ГЭФ-0,001 не более $3 \cdot 10^7 м^{-2}$, для марки ГЭФ-0,005 не более $5 \cdot 10^8 м^{-2}$.

Сложные полупроводники типа АПШВ используются для изготовления диодов, транзисторов, сверхвысокочастотных приборов на основе эффекта Гана, модуляторов инфракрасного излучения, приемников излучения, солнечных батарей, лазеров, датчиков Холла, магниторезисторов и других приборов.

В табл. 82 приведены некоторые физико-химические свойства фосфидов, арсенидов и антимонидов галлия и индия. Эти соединения имеют кубическую решетку типа цинковой обманки (пространственная группа $T_d^2 - F43m$).

Сложные полупроводники типа АПШВ выпускаются промышленностью в широком ассортименте. Для характеристики отдельных марок полупроводников используются буквенно-цифровые обозначения. Первыми двумя буквами обозначается собственно полупроводник: АГ — арсенид галлия, ФГ — фосфид галлия, ГС — антимонид галлия, ИМ — арсенид индия, ФИ — фосфид индия, ИС — антимонид индия. Справа добавляется буква, обозначающая тип электропроводности: Э — электронный, Д — дырочный. Для арсенида галлия после АГ добавляется буква Н для слитков, полученных горизонтальной направленной кристаллизацией, или Ч — для слитков, полученных по методу Чохральского, Далее

идет буква, обозначающая легирующую примесь: Т — теллур, О — олово, Ц — цинк, Г — германий, К — кремний, Х — хром, М — марганец. После набора прописных букв идут цифры и строчные буквы, характеризующие различные параметры материала. Расшифровка значений марок дана в соответствующих технических условиях.

Арсенид галлия (ОСТ 4.032.015—80) применяется для производства электронных приборов и эпитаксиальных структур. Арсенид галлия выпускается как в виде поликристаллических слитков (марка АГН-1), так и в виде монокристаллических слитков (остальные марки). Выращивают монокристаллы либо горизонтальной направленной кристаллизацией, либо вытягиванием по методу Чохральского из-под флюса. В качестве легирующих примесей используют теллур, олово, цинк и кремний. Монокристаллические слитки, легированные цинком, имеют дырочный тип электрической проводимости, остальные — электронный. Слитки арсенида галлия различных марок различаются концентрацией основных носителей заряда (ОНЗ), допустимым отклонением концентрации ОНЗ (табл. 83) от номинального значения (10—80%), номинальными значениями диаметров слитков (20—50 мм), плотностью дислокаций ($5 \cdot 10^7 - 8 \cdot 10^8 м^{-2}$). Ориентация продольной оси монокристаллических слитков [111], [100], [110]. Отклонение плоскости торцового среза

82. Некоторые физико-химические свойства полупроводниковых соединений типа АПШВ [33, 39]

| Параметр | GaP | GaAs | GaSb | InP | InAs | InSb |
|---|---------|----------|---------|---------|----------|---------|
| Относительная молекулярная масса | 100,69 | 144,64 | 191,47 | 145,79 | 189,74 | 236,57 |
| Постоянная решетки при 25 °С, нм | 4,07 | 5,32 | 5,65 | 4,78 | 5,67 | 5,78 |
| Твердость по минералогической шкале | 0,54506 | 0,565315 | 0,60954 | 0,58687 | 0,605838 | 0,64789 |
| Микротвердость, ГПа | 5 | 4,5 | 4,5 | — | 4 | 3,8 |
| Температура плавления, °С | 9,5 | 7,6 | 4,7 | 4,4 | 3,3 | 2,35 |
| Удельная теплота плавления, кДж/кг | 1467 | 1238 | 706 | 1058 | 942 | 530 |
| Удельная теплосмкость при 27 °С, Дж/(кг·°С) | 1220 | 730 | 340 | 590 | 390 | 203 |
| Температура Дебая, °С | 437 | 320 | 254 | 312 | 252 | 209 |
| Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6, °С^{-1}$ | 77 | 44 | 33 | 68 | 27 | 17 |
| Температура Дебая, °С | 4,7 | 5,39 | 6,1 | 4,6 | 4,68 | 4,9 |
| Ширина запрещенной зоны, эВ: при 27 °С | 173 | 71 | —7 | 48 | —24 | —71 |
| при —273 °С | 2,26 | 1,43 | 0,70 | 1,35 | 0,36 | 0,18 |
| Приведенная эффективная масса $m_{эфф}/m_0$: электронов | 2,34 | 1,52 | 0,813 | 1,42 | 0,425 | 0,236 |
| легких дырок | 0,35 | 0,068 | 0,047 | 0,073 | 0,025 | 0,0155 |
| тяжелых дырок | 0,17 | 0,087 | 0,052 | 0,078 | 0,025 | 0,02 |
| Подвижность носителей заряда при 27 °С, $м^2/(В \cdot с)$: электроны | 0,67 | 0,48 | 0,35 | 0,4 | 0,41 | 0,4 |
| дырки | 0,019 | 0,95 | 0,40 | 0,46 | 3,30 | 7,80 |
| Удельное электрическое сопротивление, Ом·м | 0,012 | 0,045 | 0,14 | 0,015 | 0,046 | 0,075 |
| Показатель преломления | 0,01 | 0,004 | ~0,0009 | 0,005 | 0,0003 | 0,00024 |
| Низкочастотная диэлектрическая проницаемость | 3,45 | 3,58 | 3,79 | 3,27 | 3,52 | 3,96 |
| Упругие постоянные, ГПа [4]: C_{11} | 11,12 | 12,53 | 15,63 | 12,35 | 14,55 | 17,72 |
| C_{12} | 141,2 | 118,8 | 88,5 | 102,2 | 86,5 | 67,2 |
| C_{13} | 62,53 | 53,8 | 40,4 | 57,6 | 48,5 | 36,6 |
| C_{44} | 70,47 | 59,4 | 43,2 | 46,0 | 39,6 | 30,2 |

83. Концентрация основных носителей заряда (ОНЗ) в слитках арсенида галлия (ОСТ.4.032.015—80)

| Марка | Концентрация ОНЗ, m^{-3} | Марка | Концентрация ОНЗ, m^{-3} |
|--------|---------------------------------------|--------|---|
| АГЧ | Не более $1 \cdot 10^{22}$ | АГЧО-1 | $1,5 \cdot 10^{22} - 2,5 \cdot 10^{24}$ |
| АГН-1 | » » $2 \cdot 10^{22}$ | АГЧО-2 | $1 \cdot 10^{23} - 4 \cdot 10^{24}$ |
| АГН-2 | » » $2 \cdot 10^{22}$ | АГЧО-3 | $2,5 \cdot 10^{24} - 5 \cdot 10^{24}$ |
| АГЧТ-1 | $5 \cdot 10^{22} - 4 \cdot 10^{24}$ | АГЧЦ-1 | $1,5 \cdot 10^{23} - 2 \cdot 10^{25}$ |
| АГЧТ-2 | $5 \cdot 10^{22} - 8 \cdot 10^{24}$ | АГЧЦ-2 | $2 \cdot 10^{25} - 6,5 \cdot 10^{25}$ |
| АГЧТ-3 | $4 \cdot 10^{24} - 1 \cdot 10^{25}$ | АГЧЦ-3 | $6,5 \cdot 10^{25} - 9 \cdot 10^{25}$ |
| АГНК | $9 \cdot 10^{23} - 3,5 \cdot 10^{24}$ | АГЧЦ-4 | $9 \cdot 10^{25} - 1,2 \cdot 10^{26}$ |

84. Подвижность основных носителей заряда (нижний предел) для арсенида галлия, легированного теллуром, оловом, цинком и нелегированного при температуре $(23 \pm 2)^\circ C$ (ОСТ 4.032.015—80)

| Концентрация ОНЗ, m^{-3} | Подвижность носителей заряда, $m^2/(B \cdot c)$, при легирующих примесях | | | |
|----------------------------|---|-------|--------|-------------------------------|
| | Теллур | Олово | Цинк | Нелегированный арсенид галлия |
| $1 \cdot 10^{22}$ | — | — | — | 0,50 |
| $2 \cdot 10^{22}$ | — | — | — | 0,48 |
| $4 \cdot 10^{22}$ | — | — | — | 0,44 |
| $6 \cdot 10^{22}$ | — | 0,39 | — | 0,42 |
| $8 \cdot 10^{22}$ | 0,39 | 0,38 | — | — |
| $1 \cdot 10^{23}$ | 0,38 | 0,37 | 0,0170 | — |
| $2 \cdot 10^{23}$ | 0,36 | 0,34 | 0,0160 | — |
| $4 \cdot 10^{23}$ | 0,34 | 0,31 | 0,0140 | — |
| $6 \cdot 10^{23}$ | 0,32 | 0,29 | 0,0135 | — |
| $8 \cdot 10^{23}$ | 0,30 | 0,28 | 0,0120 | — |
| $1 \cdot 10^{24}$ | 0,25 | 0,22 | 0,0100 | — |
| $4 \cdot 10^{24}$ | 0,20 | 0,16 | 0,0080 | — |
| $6 \cdot 10^{24}$ | 0,17 | — | 0,0065 | — |
| $8 \cdot 10^{24}$ | 0,14 | — | 0,0055 | — |
| $1 \cdot 10^{25}$ | — | — | 0,0050 | — |
| $5 \cdot 10^{25}$ | — | — | 0,0040 | — |
| $1 \cdot 10^{25}$ | — | — | 0,0030 | — |

от плоскости ориентации не более 3° . Подвижность основных носителей заряда должна соответствовать табл. 84.

Арсенид галлия, легированный кремнием, выпускается пяти марок (АГНК-1—АГНК-5) с номинальной концентрацией ОНЗ $9 \cdot 10^{23} - 3,5 \times 10^{24} m^{-3}$; подвижность ОНЗ не ниже $0,12 m^2/(B \cdot c)$. Плотность дислокаций $1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8 m^{-2}$.

Выпускаются четыре марки арсенида галлия (полуизолирующий, легированный хромом, кислородом и индием) с УЭС не менее $1 \cdot 10^5 Om \cdot m$ и арсенид галлия для модуляторов марки АГЧПМ с УЭС не менее $5 \cdot 10^5 Om \cdot m$.

Монокристаллический фосфид галлия, предназначенный для производства полупроводниковых приборов, изготавливается как электронного, так и

дырочного типа электрической проводимости. В качестве легирующих примесей используются сера, цинк, окись хрома. Для легирования высокоомного фосфида галлия марки ФГВ-1 используются железо, ванадий и марганец. Легирование фосфида галлия марок ФГВ-2 и ФГВ-3 осуществляется хромом. Слитки монокристаллического фосфида галлия выпускаются с номинальными значениями диаметра 35, 40, 45, 50 мм и длиной не менее 30 мм. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111] или [100]. Некоторые электрофизические свойства монокристаллических слитков фосфида галлия приведены в табл. 85.

Антимонид галлия, предназначенный для производства полупроводниковых приборов и других целей (ТУ 48-4-464—85, ОКП 17 7591), выпускается в виде нелегированных и легированных теллуром или кремнием монокристаллических слитков, выращенных по методу Чохральского. Длина и диаметр слитков не менее 20 мм. Плотность

дислокаций в слитках не превышает $1 \cdot 10^8 m^{-2}$. Нелегированный и легированный кремнием антимонид галлия имеет дырочный тип электрической проводимости, а легированный теллуром — электронный. Основные свойства антимонида галлия приведены в табл. 86.

Арсенид индия для производства полупроводниковых приборов и оптических целей (ТУ 48-4-420—80) выпускается в виде поликристаллических слитков, выращенных по методу Бриджмена (марка ИМЭП-0) и по методу Чохральского (марка ИМЭП-1), и в виде монокристаллических слитков, нелегированных и легированных теллуром, оловом, цинком и марганцем, выращенных по методу Чохральского.

Концентрация ОНЗ при $-196^\circ C$ в образцах поликристаллического арсенида индия не превышает $5 \cdot 10^{22} m^{-3}$; концентрация ОНЗ для различных марок монокристаллического арсенида индия приведена в табл. 87. Марки монокристаллических слитков делятся

85. Электрофизические свойства слитков фосфида галлия [33]

| Марка | Концентрация ОНЗ, m^{-3} | Подвижность ОНЗ, $m^2/(B \cdot c)$ при $27^\circ C$, | | $R_p, Om \cdot m$ | Плотность дислокаций, m^{-2} , не более |
|---------|-------------------------------------|---|----------|-------------------|---|
| | | не менее | не более | | |
| ФГЭ-1 | $1 \cdot 10^{23} - 8 \cdot 10^{24}$ | 0,015 | 0,065 | — | — |
| ФГЭС-1А | $1 \cdot 10^{23} - 4 \cdot 10^{23}$ | 0,012 | 0,050 | — | $5 \cdot 10^8$ |
| ФГЭС-1Б | $1 \cdot 10^{23} - 4 \cdot 10^{23}$ | 0,012 | 0,040 | — | $4 \cdot 10^8$ |
| ФГЭС-2 | $3 \cdot 10^{23} - 7 \cdot 10^{23}$ | 0,010 | 0,035 | — | $2 \cdot 10^8$ |
| ФГДЦ-1 | $1 \cdot 10^{23} - 4 \cdot 10^{23}$ | 0,004 | — | — | $2 \cdot 10^8$ |
| ФГДЦ-2 | $4 \cdot 10^{23} - 9 \cdot 10^{23}$ | — | — | — | $2 \cdot 10^8$ |
| ФГВ-1 | — | — | — | $1 - 10^6$ | $5 \cdot 10^8$ |
| ФГВ-2 | — | — | — | $10^4 - 10^6$ | $2 \cdot 10^8$ |
| ФГВ-3 | — | — | — | Не менее 10^6 | $2 \cdot 10^8$ |

86. Электрофизические свойства слитков антимонида галлия (ТУ 48-4-464—85)

| Марка | Концентрация ОНЗ при $-196^\circ C$, m^{-3} | Подвижность ОНЗ, $m^2/(B \cdot c)$, не менее | Ориентация оси слитка |
|-------|--|---|-----------------------|
| ГСД | Не более $3 \cdot 10^{22}$ | 0,200 | [211], [111] |
| ГСДК | Не менее $1 \cdot 10^{24}$ | 0,015 | [111] |
| ГСЭТ | $3 \cdot 10^{23} - 1,5 \cdot 10^{24}$ | 0,300 | [211] |

87. Концентрации основных носителей заряда в монокристаллических слитках арсенида индия при -196°C (ТУ 48-4-420—80)

| Марка | Концентрация ОНЗ, м^{-3} | Марка | Концентрация ОНЗ, м^{-3} |
|--------|--|--------|--|
| ИМЭ | Не более $3 \cdot 10^{22}$ | ИМЭТ-2 | Св. $9 \cdot 10^{23}$ до $2 \cdot 10^{24}$ |
| ИМЭО-1 | $5 \cdot 10^{22}$ — $9 \cdot 10^{23}$ | ИМЭТ-3 | » $1 \cdot 10^{24}$ » $5 \cdot 10^{24}$ |
| ИМЭО-2 | Св. $9 \cdot 10^{23}$ до $2 \cdot 10^{24}$ | ИМДЦ-1 | $1 \cdot 10^{22}$ — $5 \cdot 10^{22}$ |
| ИМЭО-3 | » $1 \cdot 10^{24}$ » $5 \cdot 10^{24}$ | ИМДЦ-2 | Св. $5 \cdot 10^{22}$ до $1 \cdot 10^{24}$ |
| ИМЭО-4 | Св. $5 \cdot 10^{24}$ | ИМДЦ-3 | » $1 \cdot 10^{23}$ » $1 \cdot 10^{24}$ |
| ИМЭО-5 | $7 \cdot 10^{23}$ — $2 \cdot 10^{24}$ | ИМДЦ-4 | » $1 \cdot 10^{24}$ » $8 \cdot 10^{23}$ |
| ИМЭТ-1 | $5 \cdot 10^{22}$ — $9 \cdot 10^{23}$ | ИМДМ | $(1-7) \cdot 10^{22}$ |

88. Коэффициент оптического пропускания (T) арсенида индия марки ИМЭП-1 для толщины образца ($3 \pm 0,1$) мм (ТУ 48-4-420—80)

| $T = \Phi_{\text{пр}}/\Phi_{\text{пад}}$ | Длина волны, мкм | $T = \Phi_{\text{пр}}/\Phi_{\text{пад}}$ | Длина волны, мкм |
|--|------------------|--|------------------|
| 0 | 3,4 | 0,42 | 4,7 |
| 0,4 | 4,3 | 0,40 | Св. 5,3 |

89. Электрофизические свойства монокристаллов фосфида индия

| Марка | Концентрация ОНЗ, м^{-3} | Подвижность ОНЗ, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ | Плотность дислокаций, м^{-2} |
|--------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| ФИЭ-1 | $\leq 5 \cdot 10^{22}$ | 0,30 | $5 \cdot 10^8$ |
| ФИЭТ-2 | $5 \cdot 10^{22}$ — $5 \cdot 10^{23}$ | 0,25 | |
| ФИЭТ-3 | $5 \cdot 10^{23}$ — $5 \cdot 10^{24}$ | 0,10 | |
| ФИДЦ-1 | $5 \cdot 10^{23}$ — $1 \cdot 10^{24}$ | — | $1 \cdot 10^9$ |
| ФИДЦ-2 | $1 \cdot 10^{24}$ — $8 \cdot 10^{24}$ | — | |

на четыре группы по плотности дислокаций: а — не более $5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-2}$; б — $7 \cdot 10^7 \text{ м}^{-2}$; в — $1 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$; г — плотность дислокаций не лимитирована. Диаметр слитков может изменяться от 25 до 80 мм. Чем больше допустимая плотность дислокаций, тем большего диаметра могут быть получены слитки. Ориентация продольной оси монокристаллических слитков арсенида индия [111]; отклонение плоскости торцового

среза от плоскости ориентации не должно превышать 3° .

Для арсенида индия марки ИМЭП-1 коэффициент пропускания, равный отношению прошедшего светового потока $\Phi_{\text{пр}}$ к падающему $\Phi_{\text{пад}}$, должен быть не меньше величин, приведенных в табл. 88.

Монокристаллический фосфид индия, предназначенный для производства полупроводниковых приборов, изготов-

90. Электрофизические свойства антимоида индия (ТУ 48-4-292—85)

| Марка | Концентрация ОНЗ, м^{-3} | $(\rho_1 - \rho_2)$, Ом·м | Подвижность ОНЗ, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, не менее | Плотность дислокаций, м^{-2} , не более |
|--------|---|----------------------------|--|--|
| ИСД-1 | $1 \cdot 10^{18}$ — $5 \cdot 10^{19}$ | 0,5—5,0 | 0,3 | $5 \cdot 10^6$ |
| ИСД-2 | $3 \cdot 10^{18}$ — $3 \cdot 10^{19}$ | 0,5—3,0 | 0,4 | $5 \cdot 10^6$ |
| ИСД-3 | $5 \cdot 10^{18}$ — $3 \cdot 10^{19}$ | 0,5—2,5 | 0,5 | $1 \cdot 10^7$ |
| ИСД-3у | $5 \cdot 10^{18}$ — $1,5 \cdot 10^{19}$ | 0,65—2,0 | 0,5 | $1 \cdot 10^7$ |
| ИСД-4 | $3 \cdot 10^{19}$ — $1 \cdot 10^{21}$ | Менее 0,50 | — | $1 \cdot 10^7$ |
| ИСД-5 | $1 \cdot 10^{21}$ — $1 \cdot 10^{24}$ | Менее 0,50 | — | $1 \cdot 10^7$ |
| ИСЭ-0 | $6 \cdot 10^{21}$ — $2 \cdot 10^{20}$ | — | 70 | $5 \cdot 10^6$ |
| ИСЭ-1 | $8 \cdot 10^{19}$ — $2 \cdot 10^{20}$ | — | 50 | $5 \cdot 10^6$ |
| ИСЭ-2 | $2 \cdot 10^{20}$ — $3 \cdot 10^{21}$ | — | 20 | $5 \cdot 10^6$ |
| ИСЭ-2у | $6 \cdot 10^{20}$ — $3 \cdot 10^{21}$ | — | 20 | $5 \cdot 10^6$ |
| ИСЭ-3 | $1 \cdot 10^{19}$ — $1,4 \cdot 10^{24}$ | Не менее 0,50 | 2 | $1 \cdot 10^7$ |
| ИСЭ-4 | $1 \cdot 10^{18}$ — $6 \cdot 10^{19}$ | 0,001—0,1 | 10 | $5 \cdot 10^6$ |
| ИСЭ-5 | $6 \cdot 10^{19}$ — $2 \cdot 10^{20}$ | — | 10 | $5 \cdot 10^6$ |
| ИСЭП-1 | $(1,5-5,0) \cdot 10^{24}$ | — | — | — |
| ИСЭП-2 | $(4,0-8,0) \cdot 10^{24}$ | — | — | — |
| ИСЭВ-1 | $2 \cdot 10^{20}$ | — | 60 | $2 \cdot 10^6$ |
| ИСЭВ-2 | $2 \cdot 10^{20}$ | — | 30 | $2 \cdot 10^6$ |

Обозначение. $(\rho_1 - \rho_2)$ — интервал значений удельного электрического сопротивления.

ляют электронного (ФИЭ) и дырочного (ФИФ) типа электрической проводимости. В качестве легирующих элементов используют теллур или цинк. Основные электрофизические свойства различных марок фосфида индия приведены в табл. 89.

Антимоид индия (ТУ 48-4-292—85) поликристаллический и монокристаллический, предназначенный для производства фотосопротивлений и других полупроводниковых приборов, получают по методу Чохральского с ориентацией продольной оси слитка [211]. Отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° .

Основные электрофизические свойства антимоида индия различных марок приведены в табл. 90. Слитки марок ИСЭ-0, ИСЭ-1, ИСЭ-5 и ИСЭВ-1 изготавливаются легированными. Образцы с электронным типом электрической проводимости легируются теллуром, а с дырочным — германием. По согласованию с потребителем возможно легирование цинком, марганцем, кадмием. Время жизни неравновесных

носителей заряда контролируется для марок ИСЭВ-1 и ИСЭВ-2 и составляет не менее 0,5 и 1 мкс соответственно.

8. АМОРФНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ

Аморфные металлические сплавы или металлические стекла (МС) являются новым перспективным материалом. По химическому составу они состоят из металлов и элементов аморфизаторов, в качестве которых используют бор, углерод, кремний, азот и другие в количестве до 30%. Аморфное состояние сплава характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении атомов упаковки. Такое состояние материала достигается сверхбыстрым его охлаждением из газообразного, жидкого или ионизированного состояния. Существуют различные методы получения аморфных сплавов.

1. Высокоскоростное ионно-плазменное и термическое распыление материала с последующей конденсацией паров

на охлаждаемую жидким азотом подложку. Получают слои толщиной до 5 мм.

2. Химическое и электролизное осаждение ионов металлов на подложку.

3. Плавление тонких поверхностных слоев деталей лазерным лучом, а также лазерная обработка смеси порошков с последующим быстрым отводом теплоты от расплава.

4. Закалка из жидкого состояния. Это основной метод получения МС. Закалка осуществляется различными способами. Для производства лент струя жидкого металла направляется на вращающийся охлаждаемый барабан. Изготавливают фольгу в виде ленты шириной 1—200 мм и толщиной 20—60 мкм. Аморфную тонкую проволоку получают извлечением жидкого металла из ванны быстро вращающимся диском, погруженным вертикально торцом в расплав. Этот же способ применяют и для производства аморфных металлических порошков. Гранулометрический состав порошков и их конфигурация задаются профилем рабочей кромки диска. Известен способ аморфизации охлаждением струи расплава в газобразной или жидкой среде. Для изготовления тонких аморфных нитей в стеклянной изоляции металл помещают в стеклянную трубку, расплавляют с помощью токов высокой частоты, вытягивают и быстро охлаждают. Нити имеют диаметр от 5 мкм до нескольких десятков микрометров.

Возможность получения сплавов МС определяется химическим составом и скоростью охлаждения жидкого расплава. Сплавы должны иметь низкую температуру плавления и высокую температуру аморфизации. Скорость охлаждения расплава составляет 10^3 — 10^{10} °C/с.

Аморфное состояние сплава является метастабильным. Поэтому МС подвергают отжигу, в процессе которого происходит релаксация к более стабильному состоянию стеклофазы. Однако при температурах отжига, превышающих (0,4—0,65) $T_{пл}$, материал кристаллизуется.

Аморфные конструкционные сплавы. МС обладают ценным комплексом механических свойств. Прежде всего их особенностью является сочетание высо-

кой твердости и прочности. Твердость HV может достигать значений более 1000, а прочность — 4000 МПа и выше. Например, сплав $Fe_{46}Cr_{16}Mo_{20}C_{18}$ имеет твердость HV 1150 при прочности 4000 МПа; сплав $Co_{34}Cr_{28}Mo_{20}C_{18}$ — соответственно 1400 и 4100 МПа.

МС характеризуется высокой упругой деформацией — около 2 % и низким значением пластичности $\delta = 0,03 \pm 0,3$ %. Однако сплавы нельзя отнести к категории хрупких материалов, так как их можно штамповать, резать и прокатывать. Сплавы хорошо поддаются холодной прокатке с обжатием 30—50 % и волочению с обжатием до 90 %.

Механические свойства некоторых аморфных сплавов приведены в табл. 91.

Наряду с высокими механическими свойствами МС обладают хорошей коррозионной стойкостью. Возможность использования МС ограничивается относительно низкой температурой ($T_{крист}$) их перехода при нагреве в кристаллическое состояние, наличием отпускной хрупкости, возникающей при кратковременном нагреве до температур существенно ниже $T_{крист}$, а также тем, что сортамент выпускаемых материалов ограничен. Изготавливаются только тонкие ленты, фольга и нити. Получать массивные заготовки и изделия можно методами порошковой металлургии. Однако обычная технология — спекание порошковых заготовок — неприемлема из-за низкой термической стабильности аморфных материалов. В экспериментальном порядке образцы из аморфных порошков изготавливают взрывным прессованием.

Срок службы аморфного сплава зависит от температуры эксплуатации. Термическая стойкость аморфных сплавов невысока. Однако имеются материалы с $T_{крист}$ более 725°C. К ним, в частности, относится сплав $Ti_{40} \times Ni_{40}Si_{20}$ с высокими механическими свойствами: HV 1070, $\sigma_B = 3450$ МПа и удельной прочностью $\sigma_B/(\rho g) = 58$ км (ρ — плотность; g — ускорение свободного падения).

Высокопрочные нити из МС могут использоваться в композиционных материалах, а ленты — в виде намотки

91. Механические свойства аморфных металлических сплавов [10]

| Сплав | HV | σ_B | σ_T | E , ГПа | E/σ_B | δ , % |
|-------------------------------|------|------------|------------|-----------|--------------|--------------|
| | | МПа | | | | |
| $Fe_{80}B_{20}$ | 1100 | 3130 | — | 169 | 54 | — |
| $Fe_{78}Mo_2B_{20}$ | 1015 | 2600 | — | 144 | 55 | — |
| $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ | 640 | 1710 | — | 144 | 84 | — |
| $Fe_{80}P_{13}C_7$ | 760 | 3040 | 2300 | 121 | 40 | 0,03 |
| $Fe_{78}Si_{10}B_{12}$ | 890 | 3300 | 2180 | 85 | 26 | 0,3 |
| $Ni_{75}Si_5B_{17}$ | 860 | 2650 | 2160 | 103 | 39 | 0,14 |
| $Ni_{49}Fe_{29}P_{14}B_6Al_2$ | — | 1960 | — | 103 | 53 | 0,02 |
| $Pd_{80}Si_{20}$ | 325 | 1330 | 850 | 67 | 50 | 0,11 |
| $Cu_{60}Zr_{40}$ | 540 | 1960 | 1350 | 76 | 38 | 0,2 |
| $Ti_{50}Be_{40}Zr_{10}$ | 730 | 1860 | — | 106 | 57 | — |
| $Pd_{77,5}Cu_6Si_{16,5}$ | 129 | 1810 | 1000 | 82 | 45 | 0,3 |
| $La_{80}Al_{20}^{*1}$ | — | 430 | — | 24 | 56 | 0,1—0,2 |
| $Co_{75}Si_{15}B_{10}$ | 910 | 2940 | — | 104 | 36 | — |

*1 При -269 °C.

для упрочнения сосудов высокого давления.

МС — перспективный материал для изготовления упругих элементов. В этой связи заслуживает внимания сплав $Ti_{40}Be_{40}Zr_{10}$, имеющий высокие релаксационную стойкость и запас упругой энергии. По эффективной силе ($F_3 = \sigma_{уп}^2/E^2$, где $\sigma_{уп}$ — предел упругости; E — модуль упругости) пружины из этого сплава на порядок превосходят пружины из обычных поликристаллических металлов.

Отсутствие границ зерен, высокая твердость, износостойкость, коррозионная стойкость аморфных сплавов позволяют получать из них высококачественный тонколезвийный инструмент, например бритвенные лезвия.

Аморфизация поверхностных слоев изделий лазерной обработкой с целью повышения их твердости может составить конкуренцию традиционным методам поверхностного упрочнения. Данным методом, в частности, на порядок (HV 1050) повышена поверхностная твердость монокристаллического сплава $Ni_{99}Nb_{10}$ и достигнута твердость HV 1200 на поверхности изделий из

чугуна состава: 3,20 % C; 2,60 % Si; 0,64 % Mn, 0,06 % P.

Магнитомягкие и магнитотвердые аморфные сплавы. Аморфные магнитомягкие сплавы применяют в изделиях электронной техники. По химическому составу сплавы подразделяют на три системы: на основе железа, железа и никеля, железа и кобальта. Разработано большое количество составов МС. Однако опытными и опытно-промышленными партиями выпускают сплавы ограниченной номенклатуры.

МС на основе железа отличает высокая индукция насыщения (1,5—1,8 Тл), и в этом отношении они уступают только электротехническим сталям и железокобальтовым сплавам. По сравнению с электротехническими сталями МС имеют в несколько раз более низкие потери. Перспективно использовать МС в силовых трансформаторах. Однако для этого требуется изменить технологию изготовления трансформаторов (намотку ленты на катушки трансформаторов, отжиг в магнитном поле и в инертной среде, особые условия герметизации и пропитки сердечников).

92. Свойства МС на основе железа [24, 35]

| Сплав | V_s^* , Тл | H_c^{*1} , А/м | θ_c^{*1} , °С | B_r/H_c^{*1} | B_r/B_s | $\rho_l \cdot 10^6$, Ом·м |
|--|--------------|------------------|----------------------|---------------------|-----------|----------------------------|
| Fe ₈₀ B ₂₀ (Metglas 2605) | 1,60 | 2,4 | 374 | 32·10 ⁴ | 0,77 | 1,45 |
| Fe ₈₆ B ₂ C ₇ | 1,80 | 12,0 | — | — | — | — |
| Fe ₇₈ Si ₁₀ B ₁₂ * ² (Amomet) | 1,55 | 4,8 | 447 | 21·10 ⁴ | 0,9 | 1,55 |
| Fe ₈₂ Si ₈ B ₁₀ (Amomet) | 1,60 | 2,4 | — | — | 0,75 | — |
| Fe ₈₁ B ₁₃ Si ₄ C ₂ (Amomet) | 1,60 | 0,6 | 400 | 180·10 ⁴ | 0,90 | 1,25 |
| Fe ₈₁ B ₁₃ Si _{13,5} C _{1,5} (Metglas 26055С) | 1,60 | 4,8 | 370 | 18·10 ⁴ | 0,70 | 1,25 |
| 9ЖКСР—А | 1,60 | 4,7 | 370 | — | 0,70 | 1,25 |

*¹ Данные получены при термической обработке в магнитном поле.

*² Сплав получен закалкой в валках, остальные — закалкой на диске.

Магнитные свойства некоторых МС группы железа приведены в табл. 92. Железониكلевые МС (табл. 93) имеют высокую магнитную проницаемость; по индукции насыщения сравнимы с металлическими магнитными сплавами и ферритами, обладают малой коэрцитивной силой и высокой прямоуголь-

93. Свойства поли- и монокристаллических железоникелевых и железокобальтовых металлических стекол (МС) [24, 35]

| Сплав | V_s^* , Тл | H_c^* , А/м | θ_c , °С | μ_n | $\rho_l \cdot 10^6$, Ом·м |
|--|--------------|---------------|-----------------|---------------------|----------------------------|
| Железониكلевые МС | | | | | |
| Fe ₃₀ Ni ₄₀ P ₁₄ B ₆ (Metglas 2826) | 0,79 | 1,6 | 264 | 5·10 ³ | 1,80 |
| Fe ₄₀ Ni ₃₈ Mo ₄ B ₁₉ (Metglas 2826 MB) | 0,88 | 0,56 | 230 | 7·10 ⁴ | 1,50 |
| Fe ₃₂ Ni ₁₈ Si ₁₈ B ₁₄ (Amomet) | 1,30 | 0,48 | 310 | 2·10 ⁴ | 1,30 |
| H25-A | 1,30 | 0,015 | 435 | — | 1,20 |
| 10НСР | 1,35 | 0,15 | 430 | 4700 | 1,30 |
| Железокобальтовые МС | | | | | |
| Fe _{4,5} Co _{7,5} Si ₁₀ B ₁₅ (Amomet) | 0,85 | 1,6 | 420 | 1·10 ⁴ | 1,5 |
| Fe ₅ Co ₆ Cr ₉ Si ₅ B ₁₅ (Amomet) | 0,63 | 0,08 | 210 | 2·10 ⁵ | 1,6 |
| Fe _{4,5} Co _{6,8} Ni _{1,5} Nb _{2,2} Si ₁₀ B ₁₅ | 0,71 | 0,40 | 420 | 2·10 ⁴ | — |
| 45ННР-А | 0,78 | 1,6 | 250 | 3,1·10 ⁵ | — |
| K83-A | 0,7 | 0,08 | 350 | 2·10 ⁴ | 1,2 |
| K25-A | 1,4 | 0,04 | 535 | — | 1,2 |
| 24КСР | 1,5 | 0,1 | 550 | — | 1,2 |
| 71КНСР | 0,5 | 0,008 | — | 2·10 ⁴ | — |
| Некоторые традиционные материалы | | | | | |
| 4-79Мо (Пермаллой) | 0,77 | 0,80 | 460 | 3·10 ⁴ | 0,4 |
| Хардпери * ¹ | 0,50 | 0,40 | 300 | 8·10 ⁴ | 1,00 |
| Сендаст * ¹ | 1,00 | 4,0 | 500 | 3·10 ⁴ | 0,80 |
| Монокристалл Мп—Zn феррита | 0,40 | 1,6 | 180 | 2·10 ⁴ | 3·10 ⁶ |

*¹ Полнокристаллические магнитные материалы.

94. Свойства резистивных материалов [10]

| Сплав | $TK_{\rho-C^{-1}}$, °С ⁻¹ | $\rho_l \cdot 10^6$, Ом·м |
|--|---------------------------------------|----------------------------|
| Аморфные сплавы | | |
| Ni ₆₈ Si ₁₅ B ₁₇ | 0 | 1,52 |
| Ni ₆₈ Si ₁₀ B ₂₂ | 3,9 | 1,42 |
| Ni ₆₇ Si ₄ B ₂₉ | 4,2 | 1,39 |
| Ni ₆₇ Si ₇ B ₂₆ | -2,6 | 1,55 |
| Ni ₆₈ Si ₁₂ B ₂₀ | -2,3 | 1,54 |
| Cu ₇₇ Ag ₈ P ₁₅ | -123 | 1,36 |
| Cu ₇₉ Ag ₆ P ₁₅ | -93 | 1,37 |
| Cu ₅₀ Ag ₆ P ₁₄ | -90 | 1,37 |
| Традиционные кристаллические сплавы | | |
| Cu ₅₅ Ni ₄₅ | ±20 | 0,49 |
| Ni ₈₀ Cr ₂₀ | 70 | 1,08 |
| Ni ₆₄ Cr ₁₁ Fe ₂₅ | 180 | 1,10 |

ностью петли гистерезиса. МС используют для изготовления трансформаторов и электромагнитных устройств, работающих на повышенных частотах, что позволяет уменьшить габариты изделий и удельные потери. Отечественные марки сплавов Н25-А и 10НСР.

Высокопроницаемые железокобальтовые МС (табл. 93) могут заменить в радиоэлектронной аппаратуре пермаллой с высокой индукцией; превосходят последние по некоторым свойствам и по технологичности. Отечественные марки МС: К83-А, К25-А, 24КСР, 71КНСР, 45ННР-А и др.

Методом катодного распыления получены аморфные пленки из магнитотвердого сплава SmCo₅ с магнитной энергией 120 кТл·А/м, которые могут найти применение для изготовления малогабаритных постоянных магнитов различного назначения.

Инварные аморфные сплавы. Некоторые МС на основе железа (93ЖХР-А, 96ЖР-А) в определенных температурных интервалах имеют низкий коэффициент линейного расширения $[\alpha < 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}]$. При комнатной температуре их свойства близки к свойствам поликристаллического сплава 36Н. Они сохраняют низкое значение α вплоть до температуры 250—300 °С, в то время как сплав 36Н — до 100 °С.

Резистивные аморфные сплавы имеют высокое электрическое сопротивление. Из них изготавливают микропровод в изоляции из стекла. Свойства некоторых резистивных материалов приведены в табл. 94.

МС (системы Ni—Si—В) выгодно отличаются по свойствам от кристаллических сплавов. Они имеют на порядок ниже термический коэффициент электросопротивления и в 1,5 раза больше удельное электрическое сопротивление. Сплавы парамагнитны, коррозионно-стойки, обладают линейной температурной зависимостью ЭДС и относительно высокой температурой кристаллизации. Их можно использовать не только для изготовления прецизионных резисторов, но и для тензодатчиков при измерении деформаций и микросмещений и т. д.

9. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Диэлектрик — материал, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле (ГОСТ 19880—74). Диэлектрический материал предназначен для использования его диэлектрических свойств (ГОСТ 21515—76). Важным свойством диэлектриков является их высокое удельное электрическое сопротивление (10^7 — 10^{18} Ом·м).

Явление поляризации диэлектрика заключается в возникновении электрического момента тела под влиянием внешних воздействий (чаще всего внешнего электрического поля). Количество электрической поляризации вещества характеризуется поляризованностью \vec{p} (Кл/м²) — векторной величиной, равной пределу отношения электрического момента некоторого объема вещества \vec{p}_i к этому объему v_i при стремлении последнего к нулю:

$$\vec{p} = \lim_{v_i \rightarrow 0} \frac{\vec{p}_i}{v_i}.$$

Механизм поляризации диэлектриков зависит от строения диэлектрика. Диэлектрики бывают *поляричными* и *неполяричными*. Поляричный диэлектрик содержит электрические диполи — молеку-

лы, обладающие дипольным моментом и способные к переориентации во внешнем электрическом поле. В отсутствие поля полярные молекулы находятся в хаотическом тепловом движении и ориентированы беспорядочно. При наложении электрического поля дипольные моменты молекул ориентируются преимущественно по полю и диэлектрик становится поляризованным.

Для неполярных диэлектриков характерна электронная поляризация, которая обусловлена упругим смещением и деформацией электронных оболочек относительно ядер в диэлектрике. Электронная поляризация наблюдается у всех диэлектриков и сопровождается другими типами поляризации.

Ионная поляризация — электрическая поляризация, обусловленная упругим смещением разноименно заряженных ионов относительно их положения равновесия в диэлектрике. Этот тип поляризации имеет место у диэлектриков ионного строения.

Диэлектрические свойства материалов характеризуются абсолютной ϵ_a и относительной ϵ_r диэлектрической проницаемостью и абсолютной χ_a и относительной χ_r диэлектрической восприимчивостью.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость (ГОСТ 19880—74) — величина, характеризующая диэлектрические свойства диэлектрика, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля электрического смещения (\vec{D}) к модулю напряженности электрического поля (\vec{E}), и тензорная для анизотропного вещества. Относительная диэлектрическая проницаемость — отношение абсолютной диэлектрической проницаемости ϵ_a к электрической постоянной ϵ_0 :

$$\vec{D} = \epsilon_a \vec{E}; \quad \epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r.$$

Электрическая постоянная в системе СИ определяется как величина, обратная произведению магнитной постоянной μ_0 на квадрат скорости света в вакууме:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м,}$$

а магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Абсолютная диэлектрическая восприимчивость — величина, характеризующая свойство диэлектрика поляризоваться в электрическом поле, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля поляризованности к модулю напряженности электрического поля, и тензорная для анизотропного вещества. Относительная диэлектрическая восприимчивость — отношение абсолютной диэлектрической восприимчивости к электрической постоянной:

$$\vec{P} = \chi_a \vec{E}; \quad \chi_a = \epsilon_0 \chi_r.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость связана с относительной диэлектрической восприимчивостью соотношением

$$\epsilon_r = \chi_r + 1,$$

а электрическое смещение

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость вещества зависит от внешних факторов, таких, как частота приложенного электрического поля, температура, давление. Диэлектрическая проницаемость электронных и ионных диэлектриков обычно не зависит или слабо зависит от частоты приложенного поля. Это связано с тем, что характерные времена поляризации составляют 10^{-13} — 10^{-15} с и при частотах, применяемых в современной электротехнике, за время полупериода успевает установиться равновесие. У полярных диэлектриков, время ориентации молекул которых в электрическом поле больше на несколько порядков, чем время поляризации у неполярных диэлектриков, диэлектрическая проницаемость сначала не изменяется с увеличением частоты, а затем уменьшается. Диэлектрическая проницаемость электронных диэлектриков слабо уменьшается с повышением температуры, а ионных диэлектриков сложным образом зависит от температуры, наиболее часто слабо возрастающая с увеличением температуры. У полярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость проходит обычно через максимум: диэлектрическая проницаемость сначала увеличивается вследствие уменьшения вязкости ди-

электрика, а затем падает в результате дезориентирующего действия температуры на электрические диполи.

Низкая электрическая проводимость диэлектриков объясняется низкой концентрацией носителей тока и их малой подвижностью. Носителями тока в диэлектриках являются электроны, ионы и молекулы (коллоидные частицы); различают соответственно электронную, ионную и молекулярную электрическую проводимость. Диэлектрики имеют более широкую запрещенную зону энергий, чем полупроводники, и соответственно более низкую электрическую проводимость. Ионная электрическая проводимость сопровождается явлением электролиза. Молекулярная электрическая проводимость наблюдается в коллоидных системах и объясняется наличием электрических зарядов на поверхности частиц дисперсной фазы (молекул). Электрическая проводимость диэлектриков приводит к токам утечки, играющим отрицательную роль при использовании диэлектриков в качестве изолирующих материалов. Ток утечки обусловлен приложением изменяющегося во времени электрического напряжения. С течением времени ток спадает, приближаясь к сквозному току диэлектрика — постоянной составляющей тока утечки.

Электрическая проводимость диэлектриков зависит от внешних факторов, таких, как температура, давление, влажность, а также от наличия примесей в диэлектриках и приложенного напряжения. Электрическая проводимость диэлектриков обычно растет с повышением температуры, может повышаться с увеличением приложенного напряжения и повышением влажности. Для гигроскопичных волокнистых материалов электрическая проводимость может уменьшаться с повышением температуры в результате уменьшения влажности материала и начинает расти только после удаления значительной доли влаги.

При воздействии электрического поля на диэлектрик происходит поглощение электрической мощности в диэлектрике, которая рассеивается, превращаясь в тепло — так называемые диэлектрические потери. Диэлектрические потери зависят от свойств диэлек-

трика, величины и частоты приложенного напряжения. Диэлектрические потери на электрическую проводимость составляют часть диэлектрических потерь, обусловленную сквозным током диэлектрика. Величиной, характеризующей потерю в диэлектрике, является угол диэлектрических потерь — угол между векторами плотности переменного тока проводимости и тока смещения диэлектрика на комплексной плоскости. Чем больше этот угол, тем больше диэлектрические потери. Тангенс этого угла равен отношению активного и реактивного токов или отношению мощности потерь к реактивной мощности.

При использовании диэлектриков в качестве диэлектрических материалов по отношению к внешним воздействиям учитываются такие характеристики, как нагревостойкость, стойкость к термодарам, холодостойкость, дугостойкость, химостойкость, радиационная стойкость, коррозийная стойкость, трещиностойкость, влагостойкость, водостойкость, водопоглощение, тропикостойкость, плеснеустойкость, влагопоглощение и старение диэлектрика.

Наибольшая по количеству и стоимости часть выпускаемой промышленностью диэлектрических материалов предназначена для использования в качестве *электроизоляционных материалов*. Согласно ГОСТ 21515—76 электроизоляционные материалы делятся на следующие виды.

Электроизоляционный слоистый пластик — электроизоляционный материал, состоящий из слоев волокнистого наполнителя, связанных термореактивным связующим. Выпускается листовая электроизоляционный слоистый пластик в виде листов и фасонный электроизоляционный слоистый пластик в виде различных форм поперечного сечения — стержней, трубок, цилиндров. В зависимости от вида волокнистого наполнителя различают гетинакс, текстолит, асбестотекстолит, асбогетинакс, стеклотекстолит.

Электроизоляционный фольгированный материал — листовый или рулонный электроизоляционный материал, облицованный с одной или двух сторон металлической фольгой.

Слюдосодержащий электроизоляционный материал — листовый или рулонный электроизоляционный материал, состоящий из пластин щипаной слюды или слоев слюдяной бумаги, склеенных связующим веществом.

Слюдовая электроизоляционная бумага — электроизоляционный материал, состоящий из мелких частичек слюды. В зависимости от способа изготовления различают слюдинитовую и слюдопластовую бумаги.

Миканит — слюдосодержащий электроизоляционный материал на основе пластин щипаной слюды.

Слюдинит — слюдосодержащий электроизоляционный материал на основе слюдинитовой бумаги.

Слюдопласт — слюдосодержащий электроизоляционный материал на основе слюдопластовой бумаги.

По назначению различают коллекторный, прокладочный, формовочный, гибкий и ленточный миканит, слюдинит и слюдопласт.

Пленкосодержащий электроизоляционный материал — листовый или рулонный материал, состоящий из полимерной пленки, склеенной с различными электроизоляционными бумагами, тканями, картонами и другими гибкими материалами.

Гибкая электроизоляционная трубка — цилиндрический полый гибкий материал. По способу изготовления и назначению различают лакированные, эластомерные, пластиковые и термусаживаемые гибкие электроизоляционные трубки.

Электроизоляционный лак — раствор пленкообразующих в органических растворителях, образующий после удаления растворителя и высыхания однородную пленку, обладающую электроизоляционными свойствами. По механизму пленкообразования различают термопластичные и термореактивные лаки, по режиму сушки — лаки естественной и горячей сушки, по назначению — пропиточные, клеящие и покрывные лаки.

Электроизоляционный компаунд — порошкообразный, высоковязкий или жидкий состав без растворителя, применяемый для напыления, заливки или пропитки электроизоляционных материалов, деталей и узлов электрообору-

дования. По составам различают компаунды термопластичные и термореактивные, по режиму отверждения — компаунды естественного и горячего отверждения.

Электроизоляционная лакоткань — рулонный материал, состоящий из ткани, пропитанной электроизолирующим лаком. По виду применяемой ткани различают лакоткани хлопчатобумажные, шелковые, стеклоткани и резиностеклоткани.

Электроизоляционный препрег — гибкий материал, состоящий из волокнистой основы и частично отвержденного термореактивного связующего. Различают препреги обмоточные и формовочные.

Электроизоляционный пресс-материал — материал в виде порошка, гранул или рыхлых пучков, состоящих из волокнистого наполнителя и частично отвержденного термореактивного связующего.

Большую группу диэлектриков, используемых в качестве изоляционных материалов, составляют *жидкие диэлектрики*.

Значительное развитие получило использование *электрических кристаллов*. Такие кристаллы излучают и принимают звук и ультразвук, стабилизируют по частоте излучение радиостанций, разграничивают частотные диапазоны в высокочастотной телефонии, служат активными элементами в измерительных приборах, управляют лазерным пучком и т. д. Среди электрических кристаллов центральное место принадлежит сегнетоэлектрикам и пьезоэлектрикам.

Сегнетоэлектрик обладает спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено внешним воздействием. Сегнетоэлектрики бывают ионные и дипольные.

Сегнетоэластик — диэлектрик, в котором самопроизвольно возникает деформация, знак которой может быть изменен внешними воздействиями.

Антисегнетоэлектрик при определенной температуре самопроизвольно переходит в такое состояние е упорядоченным распределением диполей, что спонтанная поляризованность остается равной нулю.

Сегнетомагнетик обладает сочетанием упорядоченных электрической и магнитной дипольных структур.

Пьезоэлектрик поляризуется под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) или деформируется под воздействием электрического поля (обратный пьезоэффект).

Пирозлектрик — диэлектрик, на поверхности которого возникают электрические заряды при изменении его температуры.

Электрет — диэлектрик, длительно создающий в окружающем пространстве электростатическое поле вследствие предварительной поляризации или электризации диэлектрика. Электреты в целом можно разделить на две группы: электреты, заряды которых обусловлены в основном остаточной поляризацией, и электреты, заряды которых обусловлены инжектированными зарядами (моноэлектреты). К первым относятся термоэлектреты, хемотретреты, криоэлектреты, фотоэлектреты и механоэлектреты; ко вторым — электроэлектреты, радиоэлектреты, трибоэлектреты.

Важнейшей характеристикой электретов, определяемой экспериментально, является эффективная плотность поверхностных зарядов, которая для практически применяемых электретов составляет $(10^{-3}—10^{-6})$ Кл/м². Другим параметром, характеризующим свойства электретов, является время релаксации зарядов (время уменьшения зарядов в e раз). Стабильные электреты, пригодные для практического применения, имеют время релаксации зарядов 3—10 лет и более.

Электреты нашли применение в качестве мембран в конденсаторных (электретных) микрофонах, в электростатических фильтрах, в ткани Петринова, предназначенной для защиты от производственной и радиоактивной пыли, в отклоняющих системах электронной фокусировки и т. д.

Жидкие кристаллы, относящиеся к полярным диэлектрикам, используют для индикаторов часов и калькуляторов.

10. ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для создания лазера нужен материал с определенными свойствами,

в котором в процессе накачки может быть создана активная среда. Такой материал называется *лазерным веществом* (ГОСТ 15093—75).

Наиболее важными процессами, необходимыми для функционирования лазера, являются люминесценция и вынужденное излучение. *Люминесценция* — неравновесное излучение тел, избыточное по отношению к тепловому излучению, причем испускание фотонов происходит самопроизвольно. То же явление, при котором основную роль играет вынужденное излучение, возникающее в среде с инверсной заселенностью, приводит к лазерному эффекту.

В люминесценции участвуют не все частицы, входящие в состав лазерного вещества. Если в люминесценции участвуют частицы, не входящие в основной состав лазерного вещества, то их совокупность называют активатором, а остальное — матрицей. Для того чтобы имела место люминесценция, активные частицы должны быть возбуждены. *Лазерный эффект* может возникнуть в том случае, если в энергетическом спектре частицы ниже уровня или полосы возбуждения находится уровень, безызлучательные переходы с которого маловероятны, т. е. квантовый выход люминесценции близок к единице. На этом люминесцирующем уровне, называемом верхним лазерным уровнем, создается инверсная заселенность. Желательно, чтобы нижний лазерный уровень, на который попадает частица в результате вынужденного излучения, имел низкую заселенность, т. е. чтобы он не был основным и опустошался как можно быстрее с помощью безызлучательных переходов.

Лазерный эффект получен в трех средах: твердых телах, жидкостях и газах, включая чистые газы и пары металлов. Соответственно различают твердотельные, жидкостные и газовые лазеры. Отдельную группу составляют полупроводниковые лазеры.

Наибольшее практическое использование получили *твердотельные лазеры* — лазеры на кристаллах и стеклах. Широкое использование твердотельных лазеров объясняется тем, что они обладают наиболее благоприятной

95. Основные свойства диэлектрических лазерных кристаллов [12]

| Свойства | YAlO ₃ | Y ₂ Al ₅ O ₁₂ | Al ₂ O ₃ |
|---|--|---|---|
| Пространственная группа | $D_{2h}^{16} - Pbnm$ | $O_h^0 - Ia\bar{3}d$ | $D_{3d}^6 - R\bar{3}c$ |
| Параметры элементарной ячейки, без активатора, нм | $a_0 = 0,5176;$ $b_0 = 0,6307;$ $c_0 = 0,7355$ | 1,2008 | $a_0 = 0,47628;$ $b_0 = 1,30032$ |
| Относительная молекулярная масса $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ : | 163,88 | 593,59 | 101,59 |
| без активатора | 5,35 | 4,55 | 3,98 |
| с ионами Nd ³⁺ | — | 4,55 | — |
| с ионами Cr ³⁺ | — | — | 3,92 |
| Твердость по Моосу | 8,5 | 8,5 | 9 |
| Твердость по Кнупу, ГПа | 9,57 по оси <i>a</i> ; 11,66 по осн <i>b</i> ; 16,37 по осн <i>c</i> | 13,0—13,5 | 21,0—24,0 |
| Скорость звука $\times 10^3$, м/с | — | 8,5630 по [001]; 5,0293 по [001]; 8,6016 по [110] | 10,92 по [1120]; 5,79 по [1120]; 6,69 по [1120] |
| Упругие постоянные, ГПа | 220 | $C_{11} = 333;$ $C_{12} = 111;$ $C_{44} = 115$ | $C_{11} = 496,8;$ $C_{33} = 498,1;$ $C_{44} = 147,4;$ $C_{12} = 163,6;$ $C_{13} = 110,9;$ $C_{14} = -23,5$ |
| σ_B , МПа | — | 171—205 | — |
| Температура, °C: | — | — | — |
| плавления | 1850±30 | 1930±20 | ~2040 |
| кипения | — | — | ~3500 |
| характеристическая | — | 427—477 | 662—677 |
| Теплопроводность, Вт/(м·°C): | — | — | — |
| без активатора | 11 | 13 | 23 ⊥ осн <i>c</i> |
| с ионами Nd ³⁺ | — | 11—14 | 25 осн <i>c</i> |
| Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C) | 420 | 580—630 | 760 |
| Коэффициент термического расширения $\times 10^{-6}$, 1/°C: | — | — | — |
| без активатора | 9,5 по оси <i>a</i> ; 4,3 по оси <i>a</i> ; 10,8 по осн <i>c</i> | 8,2 по [100] 7,7 по [110] 7,8 по [111] | 6,66 осн <i>c</i> 5,0 ⊥ осн <i>c</i> |
| с ионами Nd ³⁺ | 3,37±0,05 по осн <i>a</i> | 6,96±0,06 | — |
| Коэффициент диффузии, см ² /с: | — | — | — |
| без активатора | 0,049 | 0,046 | 0,084 |
| с ионами Nd ³⁺ | — | 0,050 | — |
| Область оптической прозрачности, мкм | 0,22—6,5 | 0,24—6,0 | 0,14—6,5 |

Продолжение табл. 95

| Свойства | YAlO ₃ | Y ₂ Al ₅ O ₁₂ | Al ₂ O ₃ |
|--|--|--|---|
| Показатели преломления: без активатора | $n_\alpha = 1,929;$ $n_\beta = 1,943;$ $n_\gamma = 1,952$ | 1,81523 (1,06 мкм) | $n_o = 1,763;$ $n_e = 1,755$ (0,694 мкм) |
| с ионами Nd ³⁺ | $n_\alpha = 1,930;$ $n_\beta = 1,946;$ $n_\gamma = 1,954$ (0,589 мкм) | 1,81633 (1,06 мкм) | — |
| Диэлектрические постоянные | — | $\epsilon = 11,7;$ $\epsilon_\infty = 3,5$ | $\epsilon = 10,55$ осн <i>c</i> ; $\epsilon = 8,61$ ⊥ осн <i>c</i> ; $\epsilon_\infty = 3,1$ |

совокупностью важнейших параметров — возможностью получения высоких энергетических параметров генерации, способностью работать в разнообразных режимах и надежностью. Из большого числа диэлектрических кристаллов, на которых получен лазерный эффект, практическое применение в коммерческих лазерах нашли только те из них, которые наиболее полно удовлетворяют всем современным требованиям квантовой электроники. К таким кристаллам относятся иттрий-алюминиевый гранат, активированный неодимом Y₃Al₅O₁₂-Nd³⁺ алюминат иттрия, активированный неодимом YAlO₃-Nd³⁺, а также рубин Al₂O₃-Cr³⁺. В этих кристаллах удачно сочетаются удовлетворительные спектрально-генерационные свойства с такими необходимыми свойствами, как механическая прочность, твердость, значительная теплопроводность и прозрачность в широком спектральном диапазоне. Основные характеристики этих кристаллов приведены в табл. 95. Перспективным материалом для использования в твердотельных лазерах являются кристаллы гадолиний-скандий-галлиевого граната с хромом и неодимом GSGG-Cr-Nd. На этих кристаллах был создан ряд лазеров, обладающих рекордными параметрами. Стеклообразные лазерные материалы принадлежат к классам неорганических оксидных и фторидных стекол. Стекло, как материал для лазеров,

имеет ряд преимуществ по сравнению с диэлектрическими кристаллами. Стекла можно получать в большем объеме при сравнительно низкой стоимости и изготавливать изделия практически любой формы и размеров. Имеется возможность изменять в значительных пределах физико-химические и спектрально-люминесцентные характеристики стекла с целью их оптимизации. К недостаткам относятся низкая теплопроводность, худшие механические свойства — меньшие твердость, модуль упругости, прочность. У стекол существенно меньше сечение индуцированного излучения. Этот фактор оказывается полезным при работе активных элементов в режиме усиления и модулированной добротности, особенно в мощных системах, так как он позволяет получить большую энергию излучения с одного элемента.

В качестве лазерных стекол используют силикатные, фосфатные, фторбериллатные, боратные, фторфосфатные, германатные и тому подобные стекла, активированные редкими землями и неодимом. Освоены (ОСТ 3-30-77) силикатные (ГЛС-1—ГЛС-14) и фосфатные (ГЛС-21—ГЛС-24) стекла, активированные неодимом. К обозначению марки стекла, сваренного в платиновом тигле, добавляется буква П (ГЛС-П).

Преимуществом фосфатных стекол по сравнению с силикатными являются больший коэффициент усиления, более

высокое сечение индустриального излучения, лучшие термооптические свойства; это позволяет использовать фосфатные стекла в мощных системах для усиления сверхкоротких импульсов. Недостатки фосфатных стекол — повышенная стоимость, меньшая механическая и химическая стойкость. Заготовки оптического стекла марок ГЛС изготавливают в форме стержней прямоугольного или круглого сечения и в форме прямоугольных пластин. Заготовки в форме стержней имеют диаметр или наибольшую сторону сечения не более 65 мм и отношение наибольшей стороны сечения к длине не более 1 : 20. Отношение сторон заготовок прямоугольного сечения равно 1 : 3. Максимальный размер заготовок 750 мм. Максимальная масса заготовок стекла марки ГЛС-10 — 1 кг, ГЛС-9 — 3 кг, ГЛС-7 и ГЛС-8 — 5 кг; для всех остальных марок — 10 кг. Оптическое стекло марки ГЛС нормируют по коэффициенту поглощения K_{586} нм, длительности затухания люминесценции τ , показателю преломления n_e или n_D , двойному лучепреломлению, бесцветности, пузырчатости, включениям. По пузырчатости стекло типа ГЛС разделяют на категории, установленные ГОСТ 3514—76. По показателю неактивного поглощения установлено три категории K_{1060} нм: первая — не более 0,0010; вторая — не более 0,0020; третья — не более 0,0025. По химической стойкости к влажной атмосфере силикатные стекла относятся к группе В, а фосфатные — к группе Д (ГОСТ 13917—82). Некоторые оптические свойства стекол приведены в табл. 96, а физико-химические свойства — в табл. 97.

Основные характеристики твердотельных лазеров регламентированы ГОСТ 19319—82.

К полупроводниковым относятся лазеры, в которых используются оптические переходы с участием свободных носителей тока в кристаллах. По способу накачки полупроводниковые лазеры делятся на инжекционные, с оптической накачкой, с накачкой пучком быстрых электронов и с накачкой пробоем в электрическом поле.

Классификация и условные обозна-

чения материалов, используемых в полупроводниковых лазерах, определены ГОСТ 11.397.831—83. Наиболее широко в полупроводниковых лазерах используется арсенид галлия, а наибольшая доля серийного выпуска приходится на инжекционные лазеры на основе лазерных гетероструктур GaAlAs/GaAs и InGaAsP/InP.

Основные характеристики полупроводниковых лазеров определены ГОСТ 17490—77.

Для широкого практического применения лазеров и лазерных систем требуемыми характеристиками и перестраиваемой частотой излучения большое значение имеют материалы, позволяющие управлять лазерным излучением.

В качестве материалов для призм в дальнем ультрафиолетовом диапазоне используются фтористый барий BaF₂, флюорит CaF₂, фтористый литий LiF и др.; в ближней ультрафиолетовой области чаще всего используется кристаллический кварц; в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах — различные флинты, рутил TiO₂, титанат стронция SrTiO₃; в области свыше 2—3 мкм — диэлектрические и полупроводниковые кристаллы, такие, как LiF, CaF₂, BaF₂, Ge, Si.

Для управления лазерным излучением широко применяются кристаллы, обладающие электрооптическим эффектом, т. е. изменением поляризационных констант и соответственно показателей преломления под воздействием электрического поля, и оптическими нелинейными свойствами. Это кристаллы, кристаллическая решетка которых не имеет центра симметрии. Наибольшее распространение для управления лазерным излучением получили такие материалы (ГОСТ 11.397.831—83), как кристаллы дигидрофосфата калия KН₂Р₀₄ (KDP) и его аналоги: дигидрофосфат аммония NH₄H₂Р₀₄ (ADP), дидейтерофосфат калия K₂Р₀₄ (DADP), дигидрофосфат рубидия RbH₂Р₀₄ (RDP) и ряд других кристаллов.

Кристаллы дигидрофосфата калия выращивают в виде блоков. Изделия из кристаллов KDP в виде прямоугольных призм, каждый из размеров которых может изменяться от 1 до

96. Оптические свойства неодимовых стекол (ОСТ 3-30—77)

| Марка | Коэффициент поглощения K_{586} нм, мм ⁻¹ | Длительность затухания люминесценции, мкс | | Квантовый выход люминесценции η при длительности затухания τ , мкс | | Показатель преломления | |
|--------|---|---|-------------|--|--------|--------------------------------|---------------------------------------|
| | | Номинальная | Минимальная | η | τ | n_D ($\lambda = 589$ нм) | n_λ ($\lambda = 1060$ нм) |
| | | | | | | | |
| ГЛС-1 | 0,190±0,015 | 450 | 390 | 0,78 | 480 | 1,534 | 1,521 |
| ГЛС-2 | 0,185±0,015 | 610 | 480 | 0,70 | 525 | 1,528 | 1,518 |
| ГЛС-3 | 0,470±0,050 | 470 | 330 | 0,49 | 360 | 1,528 | 1,518 |
| ГЛС-5 | 0,100±0,015 | 800 | 700 | — | — | 1,545 | 1,533 |
| ГЛС-6 | 0,175±0,015 | 790 | 610 | 0,75 | 650 | 1,550 | 1,537 |
| ГЛС-7 | 0,280±0,050 | 570 | 490 | 0,61 | 510 | 1,554 | 1,542 |
| ГЛС-8 | 0,450±0,050 | 420 | 320 | 0,37 | 320 | 1,560 | 1,547 |
| ГЛС-9 | 0,400±0,050 | — | — | 0,58 | 430 | 1,527 | 1,516 |
| ГЛС-10 | 0,210±0,015 | 510 | 500 | 0,62 | 510 | 1,546 | 1,535 |
| ГЛС-14 | 0,410±0,050 | 510 | 380 | 0,55 | 380 | 1,536 | 1,524 |
| ГЛС-21 | 0,185±0,015 | 320 | 280 | 0,73 | 280 | 1,593 | 1,582 |
| ГЛС-22 | 0,260±0,015 | 320 | 280 | 0,74 | 300 | 1,593 | 1,582 |
| ГЛС-23 | 0,460±0,050 | 260 | 220 | 0,60 | 240 | 1,593 | 1,582 |
| ГЛС-24 | 0,770±0,050 | 220 | 150 | 0,44 | 190 | 1,592 | 1,582 |

97. Физико-химические свойства неодимовых стекол (ОСТ 3-30—77)

| Марка | Число ионов Nd ³⁺ ·10 ²⁰ , м ⁻³ | Содержание Nd ₂ O ₃ , мас. доля % | ρ 10 ⁻³ , кг/м ³ , при 20 °С | E, ГПа | Коэффициент Пуассона | HV, ГПа | Относительная твердость при шлифовании | | α , 10 ⁻⁷ , °С ⁻¹ , при температуре 20—180 °С | c , Дж/(кг·°С), при 50 °С | λ , Вт/(м·°С), при 50 °С |
|--------|--|---|---|--------|----------------------|---------|--|-----|--|-----------------------------|----------------------------------|
| | | | | | | | ГЛС-1 | К8 | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| ГЛС-1 | 1,90 | 2,0 | 2,66 | 73,7 | 0,229 | 5,20 | 1,0 | 1,0 | 94 | — | — |
| ГЛС-2 | 1,90 | 2,0 | 2,70 | 67,8 | 0,233 | — | 0,7 | 0,8 | 119 | 690 | 0,97 |
| ГЛС-3 | 4,60 | 5,5 | 2,70 | 67,3 | 0,239 | — | — | — | 121 | — | — |
| ГЛС-5 | 0,97 | — | 2,72 | 57,8 | 0,270 | — | 0,7 | 0,8 | 113 | — | — |
| ГЛС-6 | 1,96 | 2,0 | 2,74 | 56,8 | 0,260 | 4,20 | 0,6 | 0,7 | 114 | 670 | 0,49 |
| ГЛС-7 | 3,05 | 3,0 | 2,81 | 61,8 | 0,260 | 4,20 | 0,6 | 0,7 | 113 | 670 | 0,36 |
| ГЛС-8 | 5,16 | 5,0 | 2,86 | 62,0 | 0,260 | 4,60 | 0,6 | 0,7 | 108 | — | — |
| ГЛС-9 | — | 4,7 | 2,66 | 69,3 | 0,220 | 5,50 | 0,8 | 0,9 | 112 | 690 | 0,70 |
| ГЛС-10 | 2,34 | — | 2,88 | 62,7 | 0,270 | — | — | — | 126 | 490 | 0,60 |
| ГЛС-14 | 4,56 | — | 2,71 | 71,0 | 0,230 | — | 0,8 | 0,9 | 108 | — | — |
| ГЛС-21 | 1,40 | 1,11 | 3,52 | 55,7 | 0,280 | 3,20 | 0,2 | 0,2 | 106 | 575 | 0,43 |
| ГЛС-22 | 2,00 | 1,63 | 3,52 | 55,7 | 0,280 | 3,60 | 0,2 | 0,2 | 106 | 575 | 0,43 |
| ГЛС-23 | 3,60 | 2,90 | 3,52 | 55,7 | 0,280 | — | 0,2 | 0,2 | 106 | 575 | 0,43 |
| ГЛС-24 | 5,70 | 4,60 | 3,52 | 55,7 | 0,280 | — | 0,2 | 0,2 | 106 | 575 | 0,43 |

150 мм, применяются для изготовления электрооптических затворов и устройств сканирования луча на поперечном и продольном электрооптическом эффекте.

Список литературы

1. Аморфные магнитомягкие сплавы для устройств РЭА/Р. Д. Нуралиева, Д. Г. Вербицкий, С. П. Поляков и др. М.: Труды ЦНИИ «Электроника», 1984. Вып. 12. С. 1063—1070.
2. Анисеев Ю. Г., Жаботинский М. Е., Кравченко В. Б. Лазеры на неорганических жидкостях. М.: Наука, 1986. 248 с.
3. Анохов С. П., Марусий Т. Я., Соскин М. С. Перестраиваемые лазеры/Под ред. М. С. Соскина. М.: Радио и связь, 1982. 360 с.
4. Басов Н. Г., Елисеев П. Г., Попов Ю. М. Полупроводниковые лазеры. УФН, 1986. 148. Вып. 1. С. 35—53.
5. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1985. 304 с.
6. Головашкин А. И. Сверхпроводники с необычными свойствами и возможности повышения критической температуры. УФН, 1986. Вып. 2. С. 363—380.
7. Головин С. А., Пушкар А. А., Левин Д. М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Металлургия, 1987. 192 с.
8. Елисеев П. Г. Введение в физику инжекционных лазеров. М.: Наука, 1983. 294 с.
9. Зверев Г. М., Голяев Ю. Д., Шалаев Е. А., Шоки А. А. Лазеры на алюминиевом гранате с неодимом. М.: Радио и связь, 1985. 144 с.
10. Золотухин И. В. Физические свойства аморфных металлических материалов. М.: Металлургия, 1986. 175 с.
11. Калинин Н. Н., Скибинский Г. Л., Новиков П. П. Электролазерные материалы. М.: Высшая школа, 1981. 293 с.
12. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975. 256 с.
13. Каталог активных лазерных сред на основе растворов органических красителей и родственных соединений/Под ред. В. И. Степанова. Минск: Институт физики АН БССР, 1977. 239 с.
14. Кузьмиков Ю. С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука, 1982. 400 с.
15. Лазерные фосфатные стекла/Н. Е. Алексеев, В. П. Гапонцев, М. Е. Жаботинский и др. М.: Наука, 1980. 352 с.
16. Луцейкин Г. А. Полимерные электреты. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1984. 184 с.
17. Материалы для электротермических установок: Справочное пособие/Н. В. Большакова, К. С. Борисанова, В. И. Бурцев и др.; Под ред. М. В. Гутмана. М.: Энергоатомиздат, 1987. 296 с.
18. Михайлова М. М., Филиппов В. В., Мусликов В. П. Магнитомягкие ферриты для радиоэлектронной аппаратуры: Справочник/Под ред. А. Е. Оборонко. М.: Радио и связь, 1983. 200 с.
19. Многожильные сверхпроводящие материалы для технического использования/А. Д. Никулин, В. П. Потанин, Н. А. Чернопленков и др. Сверхпроводимость. Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости. Т. IV. Сверхпроводящие материалы. М.: Атомиздат, 1977. С. 5—14.
20. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур/Ю. А. Концевой, Ю. М. Литвинов, Э. А. Фаттахов и др. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
21. Полупроводниковая электроника: Справочник/П. И. Баранский, В. П. Ключков, И. В. Потыкевич и др. Киев: Наукова думка, 1975. 704 с.
22. Порошковая металлургия: Справочник/И. М. Федорченко, И. Н. Фрайцевич, И. Д. Радомысльский и др./Под ред. И. М. Федорченко. Киев: Наукова думка, 1985. 624 с.
23. Преображенский А. А., Бишард Е. Г. Магнитные материалы и элементы. М.: Высшая школа, 1986. 352 с.

24. Прецизионные сплавы: Справочник/Под ред. Б. В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983. 439 с.
25. Прохоров А. М. Новое поколение твердотельных лазеров. УФН, 1986. 148. Вып. 1. С. 7—33.
26. Сверхпроводящие материалы/Е. М. Савицкий, Ю. В. Ефимов, Н. Д. Козлова и др. М.: Металлургия, 1976. 296 с.
27. Сверхпроводящие соединения переходных металлов/Е. М. Савицкий, Ю. В. Ефимов, Н. Д. Козлова и др. М.: Наука, 1976. 216 с.
28. Сверхпроводящие соединения со структурой β -вольфрама: Сборник статей. М.: Мир, 1977. 435 с.
29. Спеченные материалы для электротехники и электроники: Справочное издание/Г. Г. Гнесин, В. А. Дубок, Г. Н. Братерская и др. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
30. Сплавы для нагревателей/Л. Л. Жуков, И. М. Племянникова, М. Н. Миронова и др. М.: Металлургия, 1985. 144 с.
31. Сплавы для термпар: Справочное издание/И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. М.: Металлургия, 1983. 360 с.
32. Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1, 504 с.
33. Справочник по электротехническим материалам/Под ред. Ю. В. Коричко, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Т. 3. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. 728 с.
34. Структура сверхпроводящих соединений. М.: Металлургия, 1983. 104 с.
35. Судзуки К., Фузимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы/Под ред. Ц. Масумото//Пер. с япон. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
36. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1982. 320 с.
37. Физика сегнетоэлектрических явлений/Г. А. Смоленский, В. А. Боров, В. А. Исупов и др. Л.: Наука, 1985. 396 с.
38. Физико-химические основы получения сверхпроводящих материалов/Под ред. Е. М. Савицкого. М.: Металлургия, 1981. 480 с.
39. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ: Справочник. М.: Наука, 1978. 340 с.
40. Электротехнические материалы: Справочник/В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 504 с.
41. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости/И. А. Глебов, Ч. Лаверник, В. Н. Шахтари. Л.: Наука, 1980. 256 с.

1. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Для обработки резанием используются различные виды материалов: углеродистые, легированные и быстрорежущие стали, твердые сплавы на основе карбидов вольфрама и титана, сверхтвердые материалы (минералокерамика, алмазы, различные модификации кубического нитрида бора). Наибольший объем снимаемой стружки приходится на инструмент из твердых сплавов и быстрорежущих сталей.

Углеродистые инструментальные стали. Химический состав углеродистых инструментальных сталей по ГОСТ 1435—74.

Углеродистые стали применяют для изготовления режущих инструментов, работающих в условиях, не вызывающих нагрева рабочей кромки свыше 150—200 °С. Они используются также для штамповых и измерительных инструментов.

Основные достоинства углеродистых сталей — получение высокой твердости в поверхностном слое при сохранении вязкой сердцевины. Это в ряде случаев обеспечивает минимальную поводку инструмента и повышение его механических свойств; низкую твердость в отожженном состоянии НВ 1800—2000 МПа, позволяющую использовать высокопроизводительные методы изготовления инструмента (накатку, насечку); закалку с низких температур (770—820 °С); получение после закалки малых количеств остаточного аустенита, что обеспечивает им повышенное сопротивление пластической деформации; сохранение чистой поверхности при закалке вследствие охлаждения в воде, что упрощает очистку инструментов; низкую стоимость.

Вместе с тем недостатки углеродистых сталей существенно ограничи-

вают область их применения: вследствие низкой теплостойкости — способности сохранять твердость лишь при нагреве до температур, не превышающих 170—200 °С. Меньшая прочность по сравнению с быстрорежущими сталями связана с получением более крупного зерна (8—9 балл) при оптимальных температурах закалки. Склонность к росту зерна при незначительных перегревах при закалке приводит к понижению механических свойств. Ограниченная технологическая закаливаемость требует применения высоких скоростей охлаждения в перлитном интервале, что приводит к неоднородной твердости, особенно у инструментов небольшой толщины, а также к большой поводке и термическим трещинам. Стали нельзя применять для относительно крупных инструментов (диаметром или толщиной больше 30 мм), если они предназначены для работы при повышенных давлениях. Стали склонны к отпуску поверхностных слоев при нагреве во время шлифования и заточки.

Углеродистые стали используют для инструментов, не подвергаемых в процессе работы нагреву до температур свыше 150—200 °С и не требующих в процессе изготовления значительного шлифования (напильники, метчики, развертки, ножовки, топоры, колуны, стамески, слесарно-монтажные и хирургические инструменты, а также для некоторых штамповых и измерительных инструментов).

Высокая твердость углеродистых сталей (HRC 62—63) достигается уже при 0,6 % С в инструменте диаметром (толщиной) 1—5 мм.

В инструменте большей толщины такую твердость на поверхности можно получить лишь при 0,8—0,9 % С. С увеличением содержания углерода более 0,9—1,0 % твердость повышается до HRC 65.

1. Критические точки и режимы отжига углеродистых инструментальных сталей [5, 9, 10]

| Сталь | A_{c1} | A_{c2} (A_{cm}) | A_{r3} (A_{rm}) | A_{r1} | M_n | M_k | Температура отжига *1 |
|-----------|----------|--------------------------|--------------------------|----------|-------|-------|-----------------------|
| | °С | | | | | | |
| У7, У7А | 723 | 765 | — | 700 | 280 | — | 730—750 |
| У8, У8А | 720 | 740 | — | 700 | 245 | — | 730—750 |
| У9, У9А | 740 | 760 | — | 700 | 190 | — | 740—750 |
| У10, У10А | 730 | 800 | — | 700 | 210 | — | 740—750 |
| У11, У11А | 730 | 810 | — | 700 | 200 | — | 750—780 |
| У12, У12А | 730 | 820 | — | 700 | 200 | —20 | 750—780 |
| У13, У13А | 730 | 830 | — | 700 | 190 | — | 750—780 |

*1 После выдержки при 730—780 °С охлаждение со скоростью 50°/ч до 620—660 °С, далее на воздухе.

Оптимальное содержание углерода определяется особенностями работы инструмента, его формой и технологией изготовления. Если инструмент подвергается в основном ударным нагрузкам (деревообрабатывающий инструмент, зубила, некоторые штампы), целесообразно применять доэвтектоидные стали с 0,6—0,7 % С с трооститной структурой. Для остального режущего инструмента более целесообразна мартенситная структура с избыточными карбидами, образующаяся в эвтектоидных сталях, содержащих 0,9—1,3 % С. Эти стали имеют высокую твердость и износостойкость и удовлетворительные механические свойства. Сталь эвтектоидного состава (0,8 % С) более склонна к росту зерна (перегреву), обладает меньшей стабильностью свойств и в связи с этим находит ограниченное применение.

Предварительная термическая обработка углеродистых инструментальных сталей. Неполный отжиг (нагрев 690—710 °С) с непрерывным охлаждением и сфероидизацию рекомендуется проводить в шахтных или камерных печах (стали У7, У7А, У8, У8А). Продолжительность выдержки после прогрева всей садки до температуры отжига 3—4 ч.

Изотермический отжиг целесообразен для печей непрерывного действия (конвейерных, толкательных). Продолжительность выдержки после прогрева всей садки до температуры от-

жига 1—2 ч. Изотермическая выдержка при охлаждении 1—2 ч. Отжиг с полной перекристаллизацией (стали У7, У7А, У8, У8А) проводят при необходимости одновременного измельчения структуры. Сфероидизацию (маятниковый отжиг) применяют для получения структуры зернистого перлита.

Высокий отпуск (650—700 °С) следует использовать для снятия наклепа после холодной пластической деформации (так называемый рекристаллизационный отжиг), а также для снятия внутренних напряжений от обработки резанием, предшествующей закалке, перед повторной закалкой изделий, имеющих пониженную твердость после термообработки. Продолжительность выдержки при высоком отпуске 2—3 ч после прогрева всей садки.

Нормализацию применяют для измельчения зерна перегретой стали и для получения небольших параметров шероховатости поверхности при обработке резанием в тех случаях, когда сталь в отожженном состоянии имеет твердость меньше НВ 1830 МПа. Продолжительность выдержки при нагреве в печах 20—30 мин после прогрева всей садки; при нагреве в соляных ваннах — равняется расчетной выдержке для нагрева под закалку. Режимы отжига, механические и физические свойства углеродистых инструментальных сталей приведены в табл. 1—4.

2. Режимы отжига углеродистых сталей на зернистый перлит [9, 10]

| Сталь | Температура, °С | |
|-----------|-----------------|--|
| | нагрева | изотермической выдержки при охлаждении |
| У7, У7А | 730—750 | 600—650 |
| У8, У8А | 730—750 | 600—650 |
| У9, У9А | 740—750 | 600—650 |
| У10, У10А | 740—750 | 600—650 |
| У11, У11А | 750—780 | 620—660 |
| У12, У12А | 750—780 | 620—660 |
| У13, У13А | 750—780 | 620—660 |

3. Механические свойства углеродистых инструментальных сталей после предварительной обработки (отжига) [5, 9, 10]

| Сталь | НВ, МПа, не более | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | Феррит | Карбиды *1 |
|-----------|-------------------|------------|----------------|----------|--------|---------|------------|
| | | МПа | | % | | % | |
| У7, У7А | 1870 | 630 | 390 | 21 | 38 | 88—90 | 10—12 |
| У8, У8А | 1870 | 600 | — | — | — | 87—89 | 11—13 |
| У9, У9А | 1920 | 600 | — | — | — | — | — |
| У10, У10А | 1970 | 600 | — | 23 | 60 | 84—86 | 14—16 |
| У11, У11А | 1970 | — | — | — | — | 83—84 | 16—17 |
| У12, У12А | 2070 | 600—700 | 350—450 | 28 | 45—55 | 83—83,5 | 16,5—17 |
| У13, У13А | 2170 | — | — | — | — | 80—81,5 | 18,5—20 |

*1 Карбидная фаза представляет собой цементит Fe₃C.

4. Физические свойства углеродистых инструментальных сталей после отжига [5, 9]

| Сталь | $H_c \cdot 10^{-2}$, А/м | $\mu_{max} \cdot 10^{-6}$, Гн/м | $4\pi J_s$, Тл | $\rho_r \cdot 10^{-8}$, Ом·м | ρ_r , г/м ³ |
|-----------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| У7, У7А | 3—10 | 94 | 2 | 0,13 | 7,83 |
| У8, У8А | 4—10 | 91 | 2 | 0,14 | 7,83 |
| У9, У9А | — | — | — | — | — |
| У10, У10А | 5—13 | 88 | 1,95 | — | 7,81 |
| У11, У11А | — | — | 1,8 | — | 7,81 |
| У12, У12А | 6—8 | 85 | 1,9 | — | 7,81 |
| У13, У13А | — | — | — | — | 7,80 |

Нагрев под вакуумом углеродистых инструментальных сталей осуществляется как в воздушных печах, так и в соляных ваннах. Для соляных ванн выдержка 20—25 с, для воздушных печей 60—80 с на 1 мм толщины. Условия охлаждения при закалке определяются сечением инструмента. Поскольку быстрое охлаждение в воде или водном растворе солей и щелочей нежелательно, инструмент небольшого сечения охлаждают в масле или расплавленных солях при 160—200 °С. Для уменьшения возможности образования трещин и деформаций при закалке в ряде случаев целесообразно проводить охлаждение сначала

5. Механические свойства и прокаливаемость углеродистых инструментальных сталей после закалки (охлаждение в воде) и отпуска [5, 9, 10]

| Сталь | Температура, °С | | Содержание Fe ₃ C, % | HRC | σ_B , МПа | Прокаливаемость (критический диаметр d, мм) |
|-----------|-----------------|--------------------|---------------------------------|----------------|------------------|---|
| | закалки | отпуска | | | | |
| У7, У7А | 800—820 | 150—160 200—220 | 0 | 61—63 57—59 | 2000 | 15—20 |
| У8, У8А | 780—800 | 150—160 200—220 | — | 63—65 57—59 | 1950 | 15—20 |
| У9, У9А | 760—780 | 150—160 200—220 | — | 62—63 58—59 | — | 15—20 |
| У10, У10А | 760—780 | 150—160 200—250 | 2—4 | 62—63 58—59 | 2400 | 15—20 |
| У11, У11А | 760—780 | 150—160 200—250 | 4—6 | 62—63 58—59 | 2900 | 15—20 |
| У12, У12А | 760—780 | 150—160 200—250 | 5—7 | 62—63 58—59 | 3500 | 10—20 |
| У13, У13А | 760—780 | 150—160 200—250 | 6,5—8 | 62—63 58—59 | 2150 | 10—20 |

в воде с последующим переносом в масло.

Отпуск для сохранения высокой твердости и получения оптимальной прочности и вязкости рекомендуется проводить при 150—160 °С для инструмента толщиной более 5 мм и при 170—180 °С для инструмента меньшего сечения. Такой отпуск сохраняет твердость выше HRC 62 без разложения остаточного аустенита. Для деревообрабатывающего инструмента рекомендуется более высокий отпуск: 275—290 °С для HRC 55—58 (стамески) и 400—450 °С для HRC 44—48 (пилы).

Отпуск проводят в воздушных печах или в жидкостных ваннах продолжительностью 1 ч с последующим охлаждением на воздухе. Для предотвращения трещинообразования отпуск должен быть осуществлен непосредственно после закалки. После шлифования и заточки для снятия напряжений полезен отпуск при 140—160 °С продолжительностью 30—45 мин.

Механические свойства и прокаливаемость углеродистых инструментальных сталей после закалки и отпуска приведены в табл. 5.

Сортмент углеродистых инструментальных сталей по ГОСТ 1133—71 (кованая круглая и квадратная); ГОСТ 2879—88 (горячекатаная шестигранная); ГОСТ 4405—74 и ГОСТ 103—76 (полосы кованые и горячекатаные); ГОСТ 7417—75, ГОСТ 8559—75 и ГОСТ 8560—78 (калиброванная), ГОСТ 14955—77 (со специальной отделкой).

Назначение углеродистых инструментальных сталей приведено в табл. 6.

Легированные стали для режущего и измерительного инструмента. По характеру легирования, свойствам и областям применения стали можно разделить на две группы: 1) небольшой прокаливаемости (7ХФ, 8ХФ, 9ХФ, 11ХФ, 13Х, ХВ4, ХВ5); 2) повышенной прокаливаемости (9Х, Х, 9ХС, ХГС, 12Х1, 9ХВГ, ХВГ, ХВСГ).

6. Назначение углеродистых инструментальных сталей [5, 9, 10]

| Сталь | Назначение |
|-----------|--|
| У7, У7А | Инструменты для обработки дерева — топоры, колуны, стамески, долота; пневматические инструменты небольших размеров — зубила, обжимки, бойки. Слесарно-монтажные инструменты — кусачки, плоскогубцы, острогубцы, молотки, кувалды, отвертки, бородки и др. |
| У8, У8А | Инструменты для обработки дерева — фрезы, зенковки, цековки, топоры, стамески, долота, продольные и дисковые пилы. Накатные ролики. Плиты и стержни для форм литья под давлением оловянно-свинцовых сплавов. Обжимки, кернеры, бородки, отвертки, плоскогубцы, острогубцы, боковые кусачки |
| У9, У9А | Инструменты для обработки дерева, слесарно-монтажные инструменты, калибры простой формы и пониженных классов точности |
| У10, У10А | Столярные пилы ручные и машинные, ручные ножовки, спиральные сверла; слесарные шаберы, напильники, накатные ролики; штампы для холодной штамповки деталей небольших размеров и простой формы; калибры простой формы и пониженных классов точности |
| У11, У11А | То же, а также ручные метчики, холодновысодочные пуансоны и штампы мелких размеров, калибры простой формы и пониженных классов точности |
| У12, У12А | То же, а также небольшие пресс-формы для пластмасс |
| У13, У13А | Инструменты повышенной износостойкости, работающие при умеренных и значительных давлениях без разогрева режущей кромки (напильники, бритвенные ножи, лезвия, острые хирургические инструменты, шаберы, гравировальные инструменты) |

Химический состав легированных инструментальных сталей приведен в ГОСТ 5950—73.

Стали, входящие в первую группу, по устойчивости переохлажденного аустенита незначительно превосходят углеродистые стали У7—У13, но благодаря легированию хромом (0,2—0,7%), ванадием (0,15—0,3%) и вольфрамом (до 4%) имеют повышенные устойчи-

вость против перегрева, износостойкость и теплостойкость.

Так же как и углеродистые стали У7—У13, они после термической обработки содержат мало остаточного аустенита, что обеспечивает им высокий предел текучести. Большинство из этих сталей с успехом используют при изготовлении инструментов, подвергаемых поверхностной (местной) за-

калке. Некоторые из сталей небольшой прокаливаемости имеют специализированное применение: сталь 13Х предназначена главным образом для бритвенных ножей, лезвий, хирургического и гравировального инструмента; сталь ХВ4 рекомендуется для резов и фрез, используемых для обработки резанием с небольшими скоростями материалов высокой твердости; сталь В2Ф используется для изготовления ленточных пил и ножовочных полотен для резки конструкционных сталей средней твердости.

Стали второй группы имеют более высокое содержание хрома (0,8—1,7%), наряду с которым в ряде марок присутствуют марганец, кремний, вольфрам.

Комплексное легирование даже относительно небольшими количествами элементов существенно повышает прокаливаемость, способствует увеличению дисперсности и однородности распределения карбидов (за исключением сталей типа ХВГ), уменьшает чувствительность к перегреву, способствует сохранению более мелкого зерна при закалке. Стали повышенной прокаливаемости применяют для изготовления инструментов больших сечений, охлаждаемых при закалке в масле или горячих средах. Указанные особенности сталей второй группы (9ХС, ХГС, ХВГ, ХВСГ) позволяют использовать их для изготовления режущего (метчики, плашки, развертки, фрезы, протяжки), а также штампового инструмента более ответственного назначения, чем из углеродистых и низкопрокаливающихся сталей. Отличительной особенностью марганецсодержащих сталей (ХВГ, ХВСГ, 9ХВГ) является их малая деформируемость при термической обработке, обусловленная повышенным содержанием остаточного аустенита. Это позволяет рекомендовать их для изготовления тех инструментов, к которым предъявляются жесткие требования относительно стабильности размеров при термической обработке. Недостатком указанных сталей является повышенная склонность к образованию карбидной сетки по границам зерен в результате выделения карбидов в процессе замедленного охлаждения после

горячей пластической деформации или высокотемпературного нагрева. Стали ХВГ и ХВ4 характеризуются также неблагоприятным распределением карбидов в деформированном металле сечением более 30—40 мм. Карбидная неоднородность наблюдается также и в стали Х, которая обладает, кроме того, повышенной чувствительностью к перегреву и существенным колебанием прокаливаемости в различных плавках. К особенностям термической обработки низколегированных инструментальных сталей следует отнести необходимость использования резких охлаждающих сред (водные растворы солей и щелочей) для сталей небольшой прокаливаемости, закаливаемых на максимальную твердость (7ХФ, 8ХФ, 9ХФ, 11ХФ, 13Х).

Стали повышенной прокаливаемости (9ХС, ХВГ, 9ХВГ, ХВСГ) для уменьшения термических напряжений и коробления у инструментов сложной формы целесообразно подвергать неполной изотермической (выдержка при 180—250 °С длительностью 30—60 мин) или ступенчатой (охлаждение в горячих средах с температурой 150—220 °С с последующим переносом на воздух) закалке.

Продолжительность выдержки при аустенизации низколегированных сталей выбирают из расчета 50—70 с/мм при нагреве в воздушной печи и 35—40 с/мм при нагреве в соляной ванне.

Продолжительность отпуска обычно составляет 1—2 ч плюс 1—1,5 мин на 1 мм толщины крупногабаритного инструмента.

Сортамент поставляемых легированных инструментальных сталей: кованая круглая и квадратная (ГОСТ 1133—71), калиброванная (ГОСТ 7417—75, ГОСТ 8559—75 и ГОСТ 8560—78); прокат горячекатаный круглый (ГОСТ 2590—88), горячекатаный квадратный; полосы горячекатаные и кованные (ГОСТ 4405—74).

Допускаемая глубина обезуглероженого слоя регламентирована ГОСТ 5950—73.

Критические точки, режимы ковки и отжига, режимы окончательной термической обработки и назначение легированных инструментальных сталей приведены в табл. 7—10.

7. Критические точки (температура, °С) легированных инструментальных сталей [9, 10, 12]

| Сталь | A_{c1} | A_{cm} | A_{r1} | A_{r2} | M_n | M_k |
|---|----------|----------|----------|----------|-------|-------|
| Стали небольшой прокаливаемости | | | | | | |
| 7ХФ *1 | 770 | 780 | 740 | 710 | — | — |
| 8ХФ *1 | 740 | 750 | — | 700 | 215 | — |
| 9ХФ | 700 | — | — | — | 215 | — |
| 11ХФ | — | — | — | — | 195 | — |
| 13Х | 760 | 780 | 740 | 710 | — | — |
| В2Ф | 750 | 800 | 690 | 650 | — | — |
| Стали повышенной прокаливаемости | | | | | | |
| 9Х | 730 | 860 | — | 700 | 270 | — |
| Х | 745 | 900 | — | 700 | 240 | — |
| 9ХС | 770 | 870 | — | 730 | 160 | -30 |
| 12Х1 | 750 | 890 | — | — | 245 | -40 |
| 9ХВГ | 750 | 900 | — | — | 205 | — |
| ХВГ | 750 | 940 | — | 710 | 210 | -50 |
| ХВСГ | 770 | 785 | 730 | 720 | 200 | 20 |
| Х6ВФ | 8·5 | 845 | 775 | 625 | 150 | -100 |

*1 Для сталей 7ХФ и 8ХФ A_{c2} и A_{r2} .

8. Режимыковки и отжига легированных инструментальных сталей [9, 10, 12]

| Сталь | Интервал ковочных температур, °С | Режим отжига | НВ после отжига, МПа, не более |
|-------|----------------------------------|--|--------------------------------|
| 7ХФ | 1160—850 | Нагрев на 780—800 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 640—680 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2290 |
| 8ХФ | 1150—850 | Такой же, как для стали 7ХФ | 2550 |
| 9ХФ | 1180—800 | Нагрев на 760—790 °С, далее как для стали 7ХФ | 2550 |
| 11ХФ | 1100—800 | Нагрев на 750—790 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 670—700 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2290 |

Продолжение табл. 8

| Сталь | Интервал ковочных температур, °С | Режим отжига | НВ после отжига, МПа, не более |
|-------|----------------------------------|--|--------------------------------|
| 13Х | 1100—800 | Такой же, как для стали 11ХФ | 2410 |
| ХВ4 | 1125—850 | Нагрев на 800—820 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2850 |
| В2Ф | 1200—900 | Нагрев на 780—800 °С, охлаждение со скоростью 50 °С до 710—730 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2850 |
| 9Х1 | 1150—850 | Нагрев на 800—820 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 670—680 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2290 |
| Х | 1150—850 | Нагрев на 780—800 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 670—720 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2290 |
| 9ХС | 1140—800 | Нагрев на 790—810 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 670—720 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2410 |
| 12Х1 | 1120—850 | Такой же, как и для стали Х | 2410 |
| 9ХВГ | 1120—850 | Такой же, как и для стали Х | 2410 |
| ХВГ | 1150—850 | Такой же, как и для стали Х | 2550 |
| ХВСГ | 1140—850 | Такой же, как для стали 9ХС | 2410 |
| Х6ВФ | 1100—850 | Нагрев на 830—850 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 700—720 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С | 2410 |

9. Режимы окончательной термической обработки легированных инструментальных сталей [5, 9, 10]

| Сталь | Закалка | | | Отпуск | | |
|-------|-----------------|--------------------|----------------------|----------------|-------------------------------|----------------------|
| | Температура, °C | | Охлаждающая среда | HRC | Температура отпуска, °C | HRC |
| | подогрева | аустенизации | | | | |
| 7ХФ | 600—650 | 820—840 800—820 | Масло Вода | 62—64 | 200—220 | 58—60 |
| 8ХФ | 600—650 | 810—820 830—860 | Вода | 58—59 63—65 | 200—220 | 57—58 60—62 |
| 9ХФ | 600—650 | 850—880 820—840 | Масло Вода | 61—64 61—64 | 200—250 | 58—60 58—58 |
| 11ХФ | 600—650 | 810—830 840—860 | Вода Масло | 62—65 62—64 | 150—170 | 62—65 |
| 13Х | 600—650 | 780—820 810—830 | Вода Масло | 63—65 62—64 | 150—170 | 62—65 |
| ХВ4 | 600—650 | 830—850 820—840 | Масло Вода | 63—65 65—67 | 140—170 | 62—67 |
| В2Ф | 600—650 | 780—840 | Масло Вода | 66—67 66—67 | 100—180 | 62—65 |
| 9Х1 | 600—650 | 820—850 | Масло | 61—63 | 160—180 | 59—61 |
| Х | 650 | 840—860 | Масло | 62—63 | 130—150 170—210 | 62—65 58—60 |
| 9ХС | 650—700 | 840—860 | Масло | 62—63 | 180—250 | 58—62 |
| 12Х1 | 650—700 | 850—870 | Масло | 63—65 | 120—130 | 62—65 |
| 9ХВГ | 650 | 820—840 | Масло | 64—66 | 160—180 170—230 230—275 | 64 60—62 56—60 |
| ХВГ | 650—700 | 830—850 | Масло | 62—63 | 150—200 200—300 | 62—63 58—62 |
| ХВСГ | 650—700 | 840—860 | Масло | 62—63 | 140—160 | 60—62 |
| Х6ВФ | 650—700 | 980—1000 | То же, горячие среды | 63—65 | 150—170 280—300 | 62—63 56—58 |

10. Назначение легированных инструментальных сталей [1, 5, 10]

| Сталь | Назначение |
|-------|--|
| 7ХФ | Деревообрабатывающий инструмент (топоры, долота, зубила), круглые и ленточные пилы со сплюснутыми и разведенными зубьями, инструмент для чеканки |
| 8ХФ | Ножи для холодной резки металла, обрезающие матрицы и пуансоны, кернеры, штемпели |
| 9ХФ | Рамные, ленточные, круглые, строгальные пилы, ножи, обрезающие матрицы и пуансоны для холодной обрезки заусенцев, кернеры, штемпели |
| 11ХФ | Метчики и другие режущие инструменты диаметром до 30 мм, закаливаемые в горячих средах, хирургические инструменты, штампы для холодной штамповки, пуансоны, калибры |
| 13Х | Вместо стали У13, У13А для мелких инструментов диаметром 1—15 мм, чтобы иметь возможность проводить закалку в масле; для инструментов диаметром до 30—35 мм (при закалке в воду) получают более глубокий закаленный слой, чем у стали У13, У13А; назначение то же, что и у стали У13, У13А (см. табл. 6) |
| ХВ4 | Инструменты для чистового резания твердых материалов (отбеленный чугун, валки с закаленной поверхностью) с небольшой скоростью, граверный инструмент, прошивные пуансоны |
| В2Ф | Ленточные пилы по металлу, ножовочные полотна |
| 9Х1 | Деревообрабатывающий инструмент, валки холодной прокатки, клейма, пробойники, холодновысадочные матрицы и пуансоны |
| Х | Токарные, строгальные и долбежные резцы, работающие при небольших скоростях резания; зубила, гладкие цилиндрические калибры и калиберные кольца |
| 9ХС | Сверла, развертки, метчики, плашки, гребенки, фрезы; машинные штемпели; клейма; деревообрабатывающий инструмент |
| 12Х1 | Измерительные инструменты (плнтки, калибры, шаблоны) |
| 9ХВГ | Резьбовые калибры сложной формы, штампы для холодного деформирования сложной формы, которые при закалке не должны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению |

Продолжение табл. 10

| Сталь | Назначение |
|-------|---|
| ХВГ | Режущие и измерительные инструменты, в том числе крупных сечений, для которых повышенное коробление при закалке недопустимо (протяжки, длинные метчики и развертки, плашки, резьбовые калибры; деревообрабатывающий инструмент; ножи для бумажной промышленности; холодновысадочные матрицы и пуансоны) |
| ХВСТ | Инструмент для ручной работы (плашки, сверла, развертки, гребенки, штемпели, клейма); холодновысадочные матрицы и пуансоны; деревообрабатывающий инструмент; ножи для бумажной промышленности |
| Х9ВФ | Дереворежущий фрезерный инструмент, ручные ножовочные полотна, резбонакатный инструмент, матрицы и пуансоны холодного деформирования |

Быстрорежущие стали — наиболее характерные для режущих инструментов. Они сочетают высокую теплостойкость (600—650 °С в зависимости от состава и обработки) с высокими твердостью (до HRC 68—70), износостойкостью при повышенных температурах и повышенным сопротивлением пластической деформации. Быстрорежущие стали позволяют повысить скорость резания в 2—4 раза по сравнению со скоростями, применяемыми при обработке инструментами из углеродистых и легированных инструментальных сталей.

Быстрорежущие стали широко применяют для режущих инструментов, работающих в условиях значительного нагружения и нагрева рабочих кромок. Инструмент из быстрорежущих сталей обладает достаточно высокой стабильностью свойств, что особенно важно в условиях гибкого автоматизированного производства.

Работоспособность инструментов простой формы с массивной режущей кромкой при непрерывном точении лимитируется вторичной твердостью, теплостойкостью и износостойкостью. Для инструментов сложной формы, тонколезвийных, а также для инструментов, используемых при прерыви-

стом точении, большее значение приобретают прочность и вязкость быстрорежущей стали. Повышение того или иного свойства, достигаемое в результате изменения химического состава стали, а также режимов закалки и отпуска, часто сопровождается снижением других показателей. Например, при повышении вторичной твердости и теплостойкости наблюдается, как правило, снижение прочности и вязкости стали.

Высокие режущие свойства быстрорежущих сталей обеспечиваются легированием сильными карбидообразующими элементами (вольфрамом, молибденом, ванадием), элементами, повышающими температуру ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения (кобальтом, алюминием), и применением специальной термической обработки, заключающейся в закалке с высоких температур (1200—1300 °С) и отпуске, вызывающем дисперсионное твердение.

Для быстрорежущих сталей основным является карбид M_6C .

Для получения высоких теплостойкости и твердости достаточно большая доля распадающегося карбида должна быть переведена при закалке в твердый раствор (аустенит, мартенсит), что

насыщает его углеродом, вольфрамом, молибденом, ванадием, хромом.

Последующий отпуск при температурах 550—560 °С повышает твердость до максимальных значений вследствие выделения дисперсных карбидов и распада остаточного аустенита.

В зависимости от химического состава, а следовательно, и уровня основных свойств быстрорежущие стали подразделяют на стали нормальной и повышенной теплостойкости (производительности). Если содержание ванадия не превышает 2%, их относят к быстрорежущим сталям нормальной теплостойкости (производительности). Это стали P18, P9, P6M5.

Быстрорежущие стали с более высоким содержанием ванадия, а также дополнительно легированные кобальтом относят к сталям повышенной теплостойкости (P12Ф3, P6M5Ф3, P18K5Ф2, P9K5, P6M5K5, P9M4K8 и др.).

По сравнению со сталями нормальной производительности высокованадиевые стали повышенной производительности обладают в основном повышенной износостойкостью из-за наличия высокотвердого карбида типа MC, а кобальтсодержащие стали — более высокими вторичной твердостью, теплостойкостью и теплопроводностью.

К группе быстрорежущих сталей повышенной производительности следует отнести и быстрорежущие дисперсионно-твердеющие сплавы с интерметаллидным упрочнением. Их высокая теплостойкость и режущие свойства обеспечиваются высокими температурами $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения и упрочнением вследствие выделения при отпуске интерметаллидов, имеющих более высокую устойчивость к коагуляции при нагреве, чем карбиды [7]. Наибольшее распространение получил сплав В11М7К23 (ЭП831).

Основные свойства быстрорежущих сталей в состоянии поставки приведены в табл. 11. Режимы окончательной термической обработки и свойства быстрорежущих сталей нормальной и повышенной производительности приведены в табл. 12.

Интенсивно развивается группа низколегированных быстрорежущих сталей с суммарным содержанием вольф-

рама и молибдена, не превышающим 5—6%.

Инструменты из быстрорежущих сталей этой группы предназначены в основном для обработки неупрочненных сталей и чугунов, а также цветных металлов и сплавов. Стойкость инструментов из этих сталей при обработке вышеуказанных групп материалов близка к стойкости инструментов из стали P6M5.

Химический состав некоторых низколегированных быстрорежущих сталей приведен в табл. 13. Наиболее высокими свойствами в этой группе сталей обладают стали P2M5 и 11M5Ф. Они существенно превосходят стали 11P3AM3Ф2 и 9X4M3Ф2АГСТ как по основным свойствам (табл. 14), так и по шлифуемости (табл. 15).

Особенно перспективно использование низколегированной безвольфрамовой стали 11M5Ф. Сталь 11M5ФЮС с 1% Al имеет более высокую теплостойкость и режущие свойства, чем быстрорежущая сталь P6M5.

Карбидная неоднородность. Быстрорежущие стали относятся к ледебуритному классу. Избыточные карбиды быстрорежущих сталей входят в состав эвтектики, образующейся по границам зерен аустенита или δ -феррита.

Литая сталь из-за присутствия эвтектики имеет высокую хрупкость и низкую прочность. Существенное улучшение структуры и прочностных свойств достигается после горячей пластической деформации с обжатием выше 90%.

Однако практически при всех используемых условиях деформации абсолютно равномерного распределения карбидов не наблюдается. Карбидная неоднородность способствует созданию значительной анизотропии свойств в заготовках больших размеров.

Карбидная неоднородность выражена сильнее в сталях с повышенным содержанием вольфрама, ванадия и кобальта. В сталях с молибденом размер карбидных частиц и их скоплений меньше, что оказывает положительное влияние на свойства последних.

Форму, расположение и распределение эвтектических карбидов характеризуют баллом карбидной неоднородности. Для вольфрамовых и

11. Основные свойства быстрорежущих сталей в состоянии поставки [5, 9, 10]

| Сталь | ρ , т/м ³ | Температура, °C | | | | НВ, МПа, не более | Мас. доля карбид- ной фа- зы, % |
|-----------|------------------------------|-----------------|-----------------|----------|---------|-------------------------|---|
| | | Ac ₁ | Ar ₁ | ковки | отжига | | |
| P18 | 8,7 | 820 | 760 | 1200—900 | 840—860 | 2550 | 28 |
| P9 | 8,3 | 820 | 740 | 1180—850 | 840—860 | 2550 | 17 |
| P6M5 | 8,1 | 815 | 730 | 1160—850 | 840—860 | 2550 | 22 |
| 11P3AM3Ф2 | 7,9 | — | — | 1140—850 | 830—850 | 2550 | — |
| P6M5Ф3 | 8,1 | 815 | — | 1180—850 | 840—860 | 2690 | — |
| P12Ф3 | 8,5 | 825 | — | 1160—850 | 860—880 | 2690 | 25 |
| P18K5Ф2 | 8,2 | 830 | 750 | 1200—900 | 840—860 | 2850 | 25 |
| P9K5 | 8,3 | 815 | 725 | 1150—900 | 840—860 | 2690 | 17 |
| P6M5K5 | 8,2 | 840 | 765 | 1160—850 | 840—860 | 2690 | 23 |
| P9M4K8 | 8,3 | 800 | 750 | 1140—850 | 840—860 | 2850 | — |
| P2AM9K5 | — | — | — | 1150—900 | 850—860 | 2690 | — |
| P18Ф2K8M | 8,7 | 830 | 750 | 1160—950 | 840—860 | 2930 | — |
| P12Ф4K5 | 8,3 | 820 | 745 | 1160—850 | 850—870 | 2850 | — |
| P12M3Ф2K8 | 8,4 | 820 | 750 | 1160—900 | 840—860 | 690 | — |
| P8M3K6C | 8,2 | 820 | 750 | 1160—900 | 860—880 | 2850 | — |
| B11M7K23 | 8,6 | 915 | — | 1200—950 | 860—880 | 3500 | — |

Примечание. Послековки охлаждение в колодцах при 750—800 °C. После выдержки при 840—880 °C охлаждение со скоростью 30—40 °C/ч до 720—740 °C, выдержка не менее 4 ч, охлаждение со скоростью 50 °C/ч до 600 °C, далее на воздухе.

12. Режимы окончательной термической обработки и свойства быстрорежущих сталей нормальной и повышенной теплоустойчивости (производительности) [5, 9, 10]

| Сталь | Температура, °C | | HRC | σ_{H} , МПа | Теплоустой- чивость, (HRC 58), °C |
|-------------------|-----------------|---------|-------|--------------------|---|
| | закалки | отпуска | | | |
| P18 | 1270—1290 | 560—570 | 63—64 | 2600—3000 | 620 |
| P9 | 1220—1240 | 550—570 | 62—64 | 2800—3200 | 620 |
| P6M5 | 1200—1230 | 540—560 | 63—65 | 3200—3600 | 620 |
| P6M5Ф3 | 1200—1230 | 540—560 | 64—66 | 2700—3100 | 625 |
| P12Ф3 | 1230—1260 | 550—570 | 64—66 | 2400—2600 | 630 |
| P18K5Ф2 | 1270—1290 | 560—580 | 65—67 | 1800—2200 | 640 |
| P9K5 | 1220—1240 | 560—580 | 64—66 | 2300—2700 | 630 |
| P6M5K5 | 1210—1240 | 540—560 | 64—66 | 2600—3000 | 630 |
| P9M4K8 | 1210—1240 | 550—570 | 65—68 | 2200—2600 | 630 |
| P2AM9K5 | 1190—1210 | 540—550 | 64—66 | 2600—3000 | 630 |
| P18Ф2K8M (ЭП379) | 1250—1270 | 560—580 | 66—68 | 1600—1800 | 640 |
| P12Ф4K5 (ЭП600) | 1230—1260 | 560—580 | 66—67 | 1800—2200 | 640 |
| P12M3Ф2K8 (ЭП657) | 1220—1250 | 550—580 | 66—68 | 1800—2200 | 635 |
| P8M3K6C (ЭП722) | 1190—1220 | 540—560 | 66—69 | 1600—1900 | 635 |
| B11M7K23 (ЭП831) | 1250—1270 | 570—590 | 66—68 | 2200—2400 | 700 |

Стали P18Ф2K8M, P12Ф4K5, P12M3Ф2K8, P8M3K6C, B11M7K23 поставляются по техническим условиям.

13. Химический состав некоторых низколегированных быстрорежущих сталей

| Сталь | Мас. Доля элементов, % | | | | | | | | | |
|------------------------------|------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|--|--|
| | C | Mn | Si | Cr | W | V | Mo | Ni | | |
| 11P3AM3Ф2 (ГОСТ 19265—73) | 1,02—1,12 | До 0,5 | До 0,5 | 3,8—4,3 | 2,5—3,3 | 2,2—2,6 | 2,5—3,0 | 0,05—0,1 | | |
| P2M5 (ЭП894) | 0,95—1,05 | » 0,5 | » 0,5 | 3,8—4,3 | 1,7—2,3 | 0,9—1,3 | 4,8—5,3 | 0,05—0,08 | | |
| 9X4M3Ф2АГСТ (ЭК42) | 0,87—0,97 | 0,55—0,75 | 0,5—0,7 | 4,0—4,5 | До 0,6 | 1,6—2,1 | 2,7—3,2 | 0,04—0,1 | | |
| 11M5Ф (ЭП980) | 1,02—1,1 | До 0,4 | До 0,5 | 3,8—4,2 | » 0,6 | 1,3—1,6 | 5,2—5,8 | — | | |

Примечание. Сталь 11P3AM3Ф2 дополнительно содержит 0,05—0,2 % Nb. Сталь P2M5 дополнительно содержит 0,05—0,15 % Zr. Сталь 9X4M3Ф2АГСТ дополнительно содержит 0,15—0,25 % Ti, до 0,003 % В, до 0,08 % P3M, до 0,08 % Са. Сталь 11M5Ф дополнительно содержит 0,15 % Се (по расчету).

14. Режимы окончательной термической обработки и свойства низколегированных быстрорежущих сталей [5, 10, 11]

| Сталь | Температура, °C | | Твердость HRC | Теплоустой- чивость, (HRC 58) | σ_{H} , МПа |
|--------------------|-----------------|--|------------------|-------------------------------------|--------------------|
| | закалки | отпуска | | | |
| 11P3AM3Ф2 | 1180—1210 | 540—560 (2, 3 раза по 1 ч) | 63—64 | 620 | 3400—3600 |
| P2M5 (ЭП894) | 1140—1160 | 530—550 | 64—65 | 620 | 3400—3600 |
| 9X4M3Ф2АГСТ (ЭК42) | 1200—1210 | (2, 3 раза по 1 ч) 550—560 | 61—63 | 610 | 2600—3000 |
| 11M5Ф (ЭП980) | 1140—1180 | (2, 3 раза по 1 ч) 560—570 (3 раза по 1 ч) | 64—66 | 620 | 3400—3600 |

15. Относительная шлифуемость быстрорежущих сталей [19, 21]

| Шлифуемость | Коэффициент относительной шлифуемости $K_{ш}^{*1}$ | Сталь | |
|-------------|--|--|---|
| | | по ГОСТ 19265—73 | по техническим условиям |
| Повышенная | 0,9—1 | P18 | P2M5 (ЭП894), B11M7K23 (ЭП831), B14M7K28 (ЭП723), 3B20K18Ф (ЭП634) |
| Нормальная | 0,7—0,9 | P6M5, P6M5K5, P12 | 11M5Ф (ЭП980), P6M5-МП* ² P6M5Ф3K8-МП* ² P6M5K5-МП* ² |
| Средняя | 0,55—0,7 | P9M4K8 | P9M3K6C (ЭП722) |
| Пониженная | 0,35—0,55 | P6M5Ф3, P9, P9K5, P12Ф3, P18Ф2K5 | P6M5Ф6-МП* ² P9M3K6C (ЭП722) P12M3Ф2K8 (ЭП657) |
| Низкая | До 0,35 | 11P3AM3Ф2 | 9X4M3Ф3AГСТ (ЭК41) 9X4M3Ф2AГСТ (ЭК42) P12Ф4K5 (ЭП600) P12M2Ф3K10 (ЭП682) |

*¹ Коэффициент относительной шлифуемости равен отношению удельной производительности шлифования исследуемой стали к удельной производительности шлифования стали P18.

*² Стали, полученные методом порошковой металлургии.

вольфрамомолибденовых быстрорежущих сталей существуют две восьмибалльные шкалы (соответственно шкалы 1 и 2, ГОСТ 19265—73), определяющие карбидную неоднородность.

Карбидная неоднородность существенно влияет на прочностные свойства деформированной стали после закалки и отпуска. По мере увеличения карбидной неоднородности прочностные свойства ухудшаются (табл. 16), что приводит к снижению стойкости инструмента в результате выкрашивания режущей кромки или его поломки.

Существуют три основных пути уменьшения карбидной неоднородности:

1) увеличение скорости кристаллизации расплавленной стали; этот путь самый перспективный, поскольку позволяет существенно уменьшить тол-

щину эвтектической сетки (например, при электрошлаковом переплаве) или вообще устранить ее образование, как у сталей, полученных прессованием порошков (гранул) из распыленного жидкого металла;

2) повышение степени деформации и изменение характера деформирования (например, при прессовании литой стали);

3) применение высокотемпературного гомогенизирующего отжига; при этой обработке у быстрорежущих сталей почти полностью устраняется эвтектическая сетка, но увеличиваются размеры избыточных карбидов.

В зависимости от состава и способа производства размеры наиболее крупных (избыточных карбидов) быстрорежущих сталей различаются значи-

ные карбиды менее эффективно задерживают рост зерна, слабее связаны с матрицей и быстрее выкрашиваются из рабочей кромки инструмента при его эксплуатации. При увеличении размеров карбидов с 8—10 до 15—20 мкм наблюдается снижение стойкости инструмента до 2 раз в тех случаях, когда радиус закругления режущей кромки соизмерим с размерами крупных карбидов и когда инструмент работает с малыми толщинами среза.

Наиболее эффективный путь уменьшения размеров карбидов — изготовление сталей посредством прессования порошков, полученных распылением расплавленного металла. В этом случае размеры карбидов не превышают

1—3 мкм. Быстрорежущие стали, полученные этим способом, обладают повышенными механическими свойствами, стойкостью и шлифуемостью.

Быстрорежущие стали, полученные способом порошковой металлургии, наиболее целесообразно использовать для инструментов, работающих в условиях гибких автоматизированных производств, поскольку этот инструмент обладает более высокой стабильностью свойств.

Нагрев под закалку быстрорежущих сталей проводится при температурах и выдержках, обеспечивающих растворение специальных карбидов и легирование аустенита, для получения оптимальной теплостойкости при усло-

16. Связь между распределением карбидов и прочностью быстрорежущей стали P18 [5]

| Балл карбидной неоднородности | Характеристика распределения карбидов по шкале | Диаметр прутка, мм | $\sigma_{н}^{*1}$, МПа, в направлении | |
|-------------------------------|--|--------------------|--|------------|
| | | | продольном | поперечном |
| 1 | Тонкая полосчатая структура | 10—15 | 3300—3400 | — |
| 2 | Полосчатость с большим числом полос | 15—25 | 3000—3200 | — |
| 3А | Полосчатость, более сильно выраженная | 25—40 | 2800—3000 | — |
| 3Б | Остатки разорванной карбидной сетки | 25—40 | 2400—2700 | — |
| 4А | Полосчатость резко выраженная | 40—60 | 2400—2700 | — |
| 4Б | Сетка слабо выраженная, разорванная | 40—60 | 2400—2700 | — |
| 5А | Грубая полосчатость | 60—75 | 2300—2500 | 1800—2000 |
| 5Б | Сетка явно выраженная, разорванная | 60—75 | 2300—2500 | 1800—2500 |
| 6А | Полосчатость грубая, резко выраженная и скопления карбидов | 70—90 | 1800—1900 | 1500—1600 |
| 6Б | Сетка явно выраженная, разорванная, крупные скопления карбидов | 70—90 | 1800—1900 | 1500—1600 |
| 7 | Сетка, разорванная в отдельных участках, скопления карбидов | 80—100 | 1600—1700 | — |
| 8 | Сетка малодеформированная, разорванная и скопления карбидов | 90—110 | 1200—1400 | — |

*¹ Закалка на зерно балла 10 и отпуск при 560 °С, 3 часа.

17. Балл зерна для различных быстрорежущих сталей [5]

| Балл зерна | Стали |
|------------|--|
| 9 | Низколегированные, молибденовые и вольфрам-молибденовые нормальной производительности, из которых изготовляют крупный инструмент относительно простой формы |
| 10 | Быстрорежущие нормальной производительности, низколегированные быстрорежущие, а также быстрорежущие повышенной производительности, из которых изготовляют инструмент относительно простой формы |
| 11 | Быстрорежущие повышенной производительности (кобальтовые, ванадиевые), а также быстрорежущие обычной производительности (если они применяются для мелкого инструмента сложной формы), порошковые быстрорежущие |

нии, что размер зерна не превышает 10-го балла, при котором достигаются оптимальные механические свойства.

Рекомендуемый балл зерна для различных марок быстрорежущих сталей приведен в табл. 17.

При закалке тонколегированных инструментов небольших размеров (менее 3—5 мм) температура закалки снижается на 10—20 °С (балл зерна 11—12), при закалке крупногабаритного инструмента (сверла диаметром более 20 мм, резцы) можно повысить температуру закалки на 10 °С (балл зерна 9—10).

Для предупреждения образования трещин и повышенных термических напряжений нагрев под закалку ведут с одним или двумя подогревами. Первый подогрев при 400—500 °С, второй при 800—850 °С. Выдержку при окончательном нагреве выбирают из расчета 10—15 с на 1 мм диаметра (толщины) для инструмента диаметром 5—30 мм.

Для инструментов меньшего диаметра время выдержки увеличивают (общее время выдержки не менее 30 с).

Время выдержки при подогреве обычно берут удвоенным по сравнению с выдержкой при окончательном нагреве.

Подогрев и окончательный нагрев под закалку быстрорежущих сталей, как правило, проводят в электрических соляных ваннах. Среда нагрева: при подогреве — смесь 78 % BaCl_2 и 22 % NaCl ($T_{\text{пл}} = 640$ °С), при окончательном нагреве — в расплаве BaCl_2 ($T_{\text{пл}} = 962$ °С). Для предохранения от окисления (обезуглероживания инструмента) ванну раскисляют фтористым магнием.

Эти рекомендации особенно существенны для быстрорежущих сталей с молибденом и кобальтом, которые обладают повышенной склонностью к обезуглероживанию.

Переохлажденный аустенит быстрорежущих сталей устойчив, вследствие чего они могут охлаждаться в любой среде — воздухе, масле, горячих средах при 500—560 °С.

Вместе с тем при замедленном охлаждении в интервале температур 1000—500 °С возможно выделение карбидов по границам зерен, вследствие чего инструмент, охлажденный таким образом, будет иметь пониженную вязкость и теплостойкость. Вследствие этого охлаждение инструментов крупных размеров на воздухе нежелательно.

Отпуск быстрорежущих сталей выполняется при температурах 550—570 °С, 2—3 раза по 1 ч.

Двухкратный отпуск можно применять для сталей с небольшой устойчивостью остаточного аустенита. Быстрорежущие стали с большой устойчивостью остаточного аустенита требуют трех- и даже четырехкратного отпуска.

При отпуске происходит выделение упрочняющих карбидов и распад остаточного аустенита. В результате быстрорежущая сталь получает высокую твердость, прочность и теплостойкость.

Свойства быстрорежущих сталей после закалки и отпуска приведены в табл. 12 и 14.

Шлифуемость является важным технологическим свойством, которое определяет качество готового инструмента. Стоимость шлифования достигает 50—60 % общей стоимости изготовления инструмента. Чем хуже шлифуемость стали, тем более трудоемким является процесс изготовления из нее инструмента. По этой причине многие быстрорежущие стали находят ограниченное применение.

Используют два метода определения шлифуемости стали. Механический метод заключается в определении отношения объема металла, снятого в единицу времени, к объему одновременно изношенного абразива.

Структурный метод характеризует шлифуемость по количеству остаточного аустенита в шлифованном слое. Чем хуже шлифуемость, тем выше температура его разогрева, тем больше в слое аустенита.

Неправильно выполненное шлифование, при котором в шлифованном слое из-за высоких температур образовалось большое количество аустенита, приводит к значительному снижению стойкости инструмента.

Шлифуемость сталей определяется главным образом количеством карбидов ванадия VC в структуре стали. Наиболее низкую шлифуемость имеют быстрорежущие стали с повышенным содержанием ванадия. Шлифуемость быстрорежущих сталей можно существенно повысить, если их получать методами порошковой металлургии.

Способы улучшения поверхностного слоя. Качество инструмента в значительной мере определяется свойствами поверхностного слоя. В процессе тер-

мической обработки или в результате шлифования при несоблюдении технологических режимов свойства поверхностного слоя могут существенно снижаться (в частности, вследствие обезуглероживания или чрезмерного нагрева при шлифовании).

Наиболее эффективно свойства поверхностного слоя могут быть повышены в результате химико-термической обработки, поскольку возрастают твердость, теплостойкость, стойкость против коррозии, в ряде случаев уменьшается коэффициент трения.

Химико-термическая обработка целесообразна для инструментов, сохраняющих улучшенный слой после переточки полностью (резьбовые и червячные фрезы, долбяки, протяжки, фасонные резцы, метчики и др.) или частично (сверла, зенкеры).

Выбор способа химико-термической обработки обусловлен не только требованиями, предъявляемыми к поверхности слою, но и температурой, при которой выполняется эта обработка, и теплостойкостью стали. Наиболее универсальными и эффективными методами упрочнения поверхностного слоя инструментов из быстрорежущих сталей является жидкое цианирование, карбонитрация, ионное азотирование и вакуумно-плазменное нанесение износостойких покрытий. Основные способы химико-термической обработки, применяемые в качестве заключительной операции для повышения стойкости инструментов из быстрорежущих сталей, приведены в табл. 18.

В том случае, если инструмент после шлифования не подвергается химико-термической обработке, его целесообразно дополнительно отпускать. Отпуск снимает напряжения, способствует превращению аустенита, образовавшегося в поверхностном слое при шлифовании, и поэтому повышает стойкость инструмента. Температура отпуска 350—400 °С, выдержка 30—60 мин.

Примерное назначение быстрорежущих сталей приведено в табл. 19.

Твердые сплавы. Спеченные твердые сплавы представляют собой гетерогенные материалы, состоящие из зерен высокопрочных тугоплавких со-

18. Способы химико-термической обработки быстрорежущих сталей

| Способ химико-термической обработки | Условия обработки | Свойства слоя или назначение обработки |
|--|--|--|
| Газовое азотирование | При 520—580 °С и степени диссоциации аммиака 25—30 % (при 520—540 °С) и 35—40 % (при 560—570 °С) с выдержкой 0,5—2 ч | Твердость HV 11—12 ГПа, толщина 0,02—0,03 мм |
| Ионное азотирование | При 350—400 °С в специальных установках в полностью диссоциированном аммиаке или смеси азота с водородом | Твердость HV 11—12,5 ГПа |
| Вакуумно-плазменное нанесение износостойких покрытий | После ионной очистки на поверхность инструмента методом ионной бомбардировки наносят слой нитридов титана или других металлов | Для повышения износостойкости рабочей поверхности инструмента вследствие высокой твердости этих соединений (HV 25—45 ГПа, толщина слоя 5—20 мкм) |
| Карбонитрация | В расплаве смесей: 70 % KCNO + 30 % K ₂ CO ₃ или 55 % CO (NH ₂) ₂ (мочевина) и 45 % K ₂ CO ₃ или Na ₂ CO ₃ при 560—580 °С 5—30 мин. Поверхность насыщается углеродом и азотом | Твердость слоя HV 10—11 ГПа, толщина 0,01—0,02 мм |
| Низкотемпературное цианирование | В расплаве солей NaCN (KCN) при 560—580 °С в течение 5—30 мин. Поверхность насыщается углеродом и азотом. Соли ядовиты | Твердость HV 10—11 ГПа, толщина 0,01—0,02 мм |
| Сульфацианирование | В ваннах для жидкого цианирования с добавлением 2 % K ₂ S или 25 % Na ₂ SO ₄ и 5 % Na ₂ S ₂ O ₃ . Поверхность насыщается углеродом, азотом и серой | Твердость HV 10—11 ГПа. Слой имеет пониженный коэффициент трения |
| Оксидирование | Жидкое оксидирование выполняют в ванне, содержащей 30 % KNO ₂ и 70 % NaNO ₃ при 480—510 °С в течение 20—30 мин. При обработке перегретым паром процесс ведут при 550—570 °С в течение 30—60 мин | Для улучшения товарного вида и повышения стойкости инструмента после шлифования, а также после азотирования или цианирования |

19. Примерное назначение быстрорежущих сталей [1, 5, 10]

| Сталь | Прочность, износостойкость, особенности стали | Примерное назначение |
|--------|---|---|
| P18 | Удовлетворительные прочность и шлифуемость, широкий интервал закалочных температур | Для всех видов инструментов, особенно подвергаемых значительному шлифованию, при обработке конструкционных материалов с прочностью до 1000 МПа |
| P9 | Повышенная износостойкость, более узкий интервал оптимальных закалочных температур, повышенная пластичность при горячей пластической деформации. Шлифуемость пониженная | Для изготовления инструментов простой формы, не требующих большого объема шлифования, применяемых для обработки конструкционных материалов |
| P6M5 | Повышенная прочность, более узкий интервал (чем у стали P18) закалочных температур, повышенная склонность к обезуглероживанию. Шлифуемость удовлетворительная | Для всех видов инструментов при обработке конструкционных материалов с прочностью до 1000 МПа |
| P12Ф3 | Повышенная износостойкость, теплостойкость, удовлетворительная прочность. Шлифуемость пониженная | Для чистовых инструментов (резцов, зенкеров, разверток, сверл, протяжек и др.) при обработке на средних режимах резания вязких аустенитных сталей, а также материалов, обладающих повышенными режущими свойствами |
| P6M5Ф3 | Повышенная износостойкость, удовлетворительная прочность. Шлифуемость пониженная | Для чистовых и получистовых инструментов (фасонных резцов, разверток, протяжек, фрез и др.), предназначенных для работы на средних скоростях резания, преимущественно обрабатывающих углеродистые и легированные инструментальные стали |

Продолжение табл. 19

| Сталь | Прочность, износостойкость, особенности стали | Примерное назначение |
|---|---|---|
| Р9К5, Р6М5К5, Р18К5Ф2 | Повышенная вторичная твердость, теплостойкость, удовлетворительная прочность и вязкость. Шлифуемость пониженная | Для изготовления черновых и получистовых инструментов (фрез, долбяков, метчиков, сверл и т. п.), предназначенных для обработки углеродистых и легированных конструкционных сталей на повышенных режимах резания, а также некоторых труднообрабатываемых материалов. Инструменты из сталей Р6М5К5 и Р18К5Ф2 имеют более высокую стойкость, чем из стали Р9К5 |
| Р9М4К8, Р8М3К6С (ЭП722), Р12М3Ф2К8 (ЭП657), Р12Ф4К5 (ЭП600), Р18Ф2К8М (ЭП379) | Повышенная вторичная твердость, теплостойкость. Пониженная прочность (особенно у стали Р18Ф2К8М) и шлифуемость (особенно у стали Р12Ф4К5) | Все виды инструментов для обработки высокопрочных коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов (в условиях повышенного нагрева режущей кромки), конструкционных материалов повышенной твердости |
| 11Р3АМ3Ф2, Р2М5 (ЭП894), 9Х4М3Ф2АГСТ (ЭК42), 11М5Ф (ЭП980) | Повышенная прочность, удовлетворительная шлифуемость (стали Р2М5, 11М5Ф). Пониженная шлифуемость (стали 11Р3АМ3Ф2, 9Х4М3Ф2АГСТ) | Все виды инструментов для обработки неупрочненных сталей и чугунов, а также цветных металлов и сплавов |
| В11М7К23 (ЭП831) | Повышенная твердость, теплостойкость. Удовлетворительная прочность, шлифуемость | Все виды инструментов для обработки титановых сплавов, некоторых высокопрочных коррозионно-стойких сталей и сплавов |

20. Период стойкости инструментов (в мин) при точении стали 50 в зависимости от скорости резания и марки режущего сплава (глубина резания 1 мм, подача на оборот 0,08 мм) [13]

| Скорость резания, м/мин | Сплав | | | | |
|-------------------------|-------|-----|-------|-------|------|
| | ВК8 | ВК9 | ВК10М | Т5К10 | Р18 |
| 30 | 200 | 85 | 90 | 40 | 110 |
| 50 | 240 | 110 | 100 | — | 53 |
| 70 | 80 | 61 | 200 | 20 | 17 |
| 100 | 100 | 76 | 74 | 17,4 | 15,9 |
| 120 | 40 | 11 | 37 | 22 | 6,5 |
| 150 | 8 | 4,5 | 7,5 | 7,5 | 0,5 |

единений (карбидов, реже, нитридов или боридов переходных металлов), цементованных пластичным металлом — связкой. В качестве тугоплавкой фазы твердых сплавов наиболее широко используются карбиды вольфрама, титана, тантала, хрома или их смеси, а в качестве связки кобальт, никель, реже железо и их сплавы.

Достижение высоких физико-механических и эксплуатационных свойств твердых сплавов возможно лишь при использовании методов порошковой металлургии. При этом из дисперсных смесей порошков тугоплавкой фазы и связки прессованием и последующим спеканием прессовок при температурах, существенно более низких, чем температура плавления тугоплавкой фазы, получают изделия необходимой формы и размеров. При спекании связующая фаза плавится, растворяя некоторую долю тугоплавкой фазы либо изменяя состав поверхностных слоев зерен последней. Твердые сплавы имеют высокую твердость в зависимости от состава (HRA 80—92) и теплостойкость (до 900—1000°C), что обеспечивает им существенно более высокие режущие свойства по сравнению с быстрорежущими сталями (табл. 20).

В соответствии с ГОСТ 3882—74 металлокерамические твердые сплавы делятся на три группы: вольфрамовые, титановольфрамовые и титанотанталовольфрамовые.

Химический состав и свойства твердых сплавов по ГОСТ 3882—74 приведены в табл. 21.

Безвольфрамовые твердые сплавы на основе карбида и карбонитрида титана по прочностным свойствам, износостойкости и режущим свойствам при чистовом и получистовом точении находятся на уровне вольфрамосодержащих твердых сплавов. Физико-механические свойства безвольфрамовых твердых сплавов, освоенных промышленностью, приведены в табл. 22.

Нанесение износостойких покрытий
Повышение режущих свойств неплетачиваемых пластин из твердых сплавов, прикрепляемых к державке реза механическим способом, достигается путем нанесения на них износостойких покрытий из карбида, нитрида, карбонитрида титана либо других высокотвердых соединений. Освоен промышленный выпуск неплетачиваемых пластин различных форм и размеров с покрытиями.

Существуют три основных метода нанесения покрытий: термодиффузионный (ДТ), газофазовый (ГТ) и вакуумно-плазменный (КИБ).

Условия получения некоторых покрытий из газовой фазы (метод ГТ) приведены в табл. 23.

Толщина износостойкого покрытия составляет 5—10 мкм. Стойкость инструмента из твердого сплава с покрытием повышается в 2—4 раза.

Классификация спеченных твердых сплавов по областям применения. Область применения различных марок твердых сплавов для режущих инструментов (ГОСТ 3882—74) приведена в табл. 24.

21. Состав и свойства твердых сплавов для режущих инструментов [3, 17]

| Группа | Марка | Мас. доля компонентов, % | | | | Физико-механические свойства | | | | | |
|---------------------------|--------------------|--------------------------|-----|------|-----|----------------------------------|------|--|-----------------------|--------|-----|
| | | WC | TiC | TaC | Co | $\sigma_{0,2}$, МПа не менее | HRA | $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | λ , Вт/(м·°C) | E, ГПа | |
| | | | | | | | | | | | |
| Вольфрамовая | ВК3 | 97 | — | — | 3 | 1200 | 89,5 | 15—15,3 | 50,2 | 643 | |
| | ВК3-М | 97 | — | — | 3 | 1200 | 91,0 | 15—15,3 | — | 647 | |
| | ВК4 | 96 | — | — | 4 | 1550 | 89,5 | 14,9—15,2 | 50,2 | 638 | |
| | ВК4-В | 96 | — | — | 4 | 1500 | 88,0 | 14,9—15,2 | — | 638 | |
| | ВК6 | 94 | — | — | 6 | 1550 | 88,5 | 14,6—15,0 | 62,8 | 628 | |
| | ВК6-М | 94 | — | — | 6 | 1450 | 90,0 | 14,8—15,1 | 67,0 | 633 | |
| | ВК6-ОМ | 92 | — | 2 | 6 | 1300 | 90,5 | 14,7—15,0 | — | — | |
| | ВК8 | 92 | — | — | 8 | 1700 | 87,5 | 14,4—14,8 | 50,2 | 598 | |
| | ВК10 | 90 | — | — | 10 | 1800 | 87,0 | 14,2—14,6 | 67,0 | 574 | |
| | ВК10-М | 90 | — | — | 10 | 1650 | 88,0 | 14,3—14,6 | — | — | |
| | ВК10-ОМ | 90 | — | — | 10 | 1500 | 88,5 | 14,3—14,6 | — | — | |
| | ВК15 | 85 | — | — | 15 | 1900 | 86,0 | 13,9—14,1 | 67,0 | 559 | |
| | Титановольфрамовая | T30K4 | 66 | 30 | — | 4 | 1000 | 92,0 | 9,5—9,8 | 12,6 | 422 |
| | | T15K6 | 79 | 15 | — | 6 | 1200 | 90,0 | 11,1—11,6 | 12,6 | 520 |
| T14K8 | | 78 | 14 | — | 8 | 1300 | 89,5 | 11,2—11,6 | 16,7 | 520 | |
| T5K10 | | 85 | 6 | — | 9 | 1450 | 88,5 | 12,4—13,1 | 20,9 | 549 | |
| T5K12 | | 83 | 5 | — | 12 | 1700 | 87,0 | 13,1—13,5 | 20,9 | 549 | |
| Титанотанталовольфрамовая | ТТ17К12 | 81 | 4 | 3 | 12 | 1700 | 87,0 | 13,0—13,3 | — | — | |
| | ТТ8К6 | 84 | 8 | 2 | 6 | 1350 | 90,5 | 12,8—13,3 | — | — | |
| | ТТ10К8-Б | 82 | 3 | 7 | 8 | 1650 | 89,0 | 13,5—13,8 | — | — | |
| | ТТ20К9 | 67 | 9,4 | 14,1 | 9,5 | 1500 | 91,0 | 12,0—12,5 | — | — | |

22. Физико-механические свойства карбидтитановых твердых сплавов (ТУ 48-19-223—76), выпускаемых промышленностью [17]

| Сплав | Мас. доля, % | | | ρ , т/м ³ | $\sigma_{0,2}$, МПа | HRA |
|-------|--------------|----|----|---------------------------|----------------------|------|
| | TiC | Ni | Mo | | | |
| ТН-20 | 79 | 15 | 6 | 5,4—5,8 | 1000 | 89,5 |
| ТН-30 | 69 | 23 | 29 | 5,6—6,0 | 1100 | 88,5 |
| ТН-50 | 61 | 29 | 10 | 5,7—6,2 | 1150 | 87,0 |

Для характеристики областей применения различных марок твердых сплавов принята также международная классификация, в соответствии с которой все сплавы делятся на груп-

пы в зависимости от обрабатываемого материала. Внутри группы сплавы подразделяются по конкретным условиям применения (табл. 25). Сплавы для обработки резанием материалов,

23. Условия получения покрытий из газовой фазы на инструменте из твердых сплавов [17]

| Материал покрытия | Рабочий газ | Химическая реакция | Температура, °C |
|-------------------|--|--|-----------------------|
| TiC TiN | CH ₄ , TiCl ₄ TiCl ₄ , H ₂ , N ₂ | TiCl ₄ + CH ₄ → TiC + 4HCl 2TiCl ₄ + N ₂ + 2H ₂ → → 2TiN + 8HCl | 980—1050 1100—1250 |
| Ti (C, N) | TiCl ₄ , CH ₄ , N ₂ | 2TiCl ₄ + 2CH ₄ + N ₂ → → 2Ti (C, N) + 8HCl | 1000—1300 |
| TiB ₂ | TiCl ₄ , BCl ₃ , H ₂ | TiCl ₄ + 2BCl ₃ + 5H ₂ → → TiB ₂ + 10HCl | 1000—1300 |

24. Область применения твердых сплавов для обработки материалов резанием [17]

| Сплав | Применение |
|--------|---|
| ВК3 | Чистовое точение с малым сечением среза, окончательное нарезание резьбы, развертывание отверстий и другие аналогичные виды обработки серого чугуна, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов (резины, фибры, пластмассы, стекла, стеклопластиков и т. д.). Резка листового стекла |
| ВК3-М | Чистовая обработка (точение, растачивание, нарезание резьбы, развертывание) твердых, легированных и отбеленных чугунов, цементованных и закаленных сталей, а также неметаллических материалов |
| ВК4 | Черновое точение при неравномерном сечении среза, черновое и чистовое фрезерование, рассверливание и растачивание нормальных и глубоких отверстий, черновое зенкерование при обработке чугуна, цветных металлов и сплавов, титана и его сплавов |
| ВК6-ОМ | Чистовая и получистовая обработка твердых, легированных и отбеленных чугунов, закаленных сталей и некоторых марок коррозионно-стойких высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, особенно сплавов на основе титана, вольфрама и молибдена (точение, растачивание, развертывание, нарезание резьбы, шабрение) |

Продолжение табл. 24

| Сплав | Применение |
|---------|--|
| ВК6-М | Получистовая обработка жаропрочных сталей и сплавов, коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, специальных твердых чугунов, закаленного чугуна, твердой бронзы, сплавов легких металлов, неметаллических материалов, пластмасс, бумаги, стекла. Обработка закаленных сталей, а также незакаленных углеродистых и легированных сталей при тонких сечениях среза на весьма малых скоростях резания |
| ТТ8К6 | Чистовое и получистовое точение, растачивание, фрезерование и сверление серого и ковкого чугуна, а также отбеленного чугуна. Непрерывное точение с небольшими сечениями среза стальных отливок, высокопрочных, коррозионно-стойких сталей, в том числе закаленных. Обработка сплавов цветных металлов и некоторых марок титановых сплавов при резании с малыми и средними сечениями среза |
| ВК6 | Черновое и получерновое точение, предварительное нарезание резьбы токарными резцами, получистовое фрезерование сплошных поверхностей, рассверливание и растачивание отверстий, зенкерование серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов |
| ВК8 | Черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, строгание, черновое фрезерование, сверление, черновое рассверливание, черновое зенкерование серого чугуна, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов. Обработка коррозионно-стойких, высокопрочных и жаропрочных труднообрабатываемых сталей и сплавов, в том числе сплавов титана |
| ВК10-ОМ | Черновая и получерновая обработка твердых, легированных и отбеленных чугунов, некоторых марок коррозионно-стойких, высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, особенно сплавов на основе титана, вольфрама и молибдена. Изготавливают некоторые виды монолитного инструмента |
| ВК10-М | Сверление, зенкерование, развертывание, фрезерование и зубофрезерование стали, чугуна, некоторых труднообрабатываемых и неметаллических материалов цельнотвердосплавным, мелко-размерным инструментом |
| ВК15 | Режущие инструменты для обработки дерева |
| Т30К4 | Чистовое точение с малым сечением среза (типа алмазной обработки); нарезание резьбы и развертывание отверстий в деталях из незакаленных и закаленных углеродистых сталей |

Продолжение табл. 24

| Сплав | Применение |
|----------|---|
| Т15К6 | Получерновое точение при непрерывном резании, чистовое точение при прерывистом резании, нарезание резьбы токарными резцами и вращающимися головками, получистовое и чистовое фрезерование сплошных поверхностей, рассверливание и растачивание предварительно обработанных отверстий, чистовое зенкерование, развертывание и другие аналогичные виды обработки углеродистых и легированных сталей |
| Т14К8 | Черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, получистовое и чистовое точение при прерывистом резании; черновое фрезерование сплошных поверхностей; рассверливание отверстий в литых и кованых деталях, черновое зенкерование и другие подобные виды обработки углеродистых и легированных сталей |
| Т5К10 | Черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, фасонное точение, отрезка токарными резцами; чистовое строгание; черновое фрезерование прерывистых поверхностей и другие виды обработки углеродистых и легированных сталей, преимущественно в виде поковок, штамповок и отливок по корке и окалине |
| Т5К12 | Тяжелое черновое точение стальных поковок, штамповок и отливок по корке с раковинами при наличии песка, шлака и различных неметаллических включений, при неравномерном сечении среза и наличии ударов. Все виды строгания углеродистых и легированных сталей. Сверление отверстий в стали |
| ТТ17К12 | Тяжелое черновое точение стальных поковок, штамповок и отливок по корке с раковинами при наличии песка, шлака и различных неметаллических включений при равномерном сечении среза и наличии ударов. Все виды строгания углеродистых и легированных сталей. Тяжелое черновое фрезерование углеродистых и легированных сталей |
| ТТ10К8-Б | Черновая и получистовая обработка некоторых труднообрабатываемых материалов, коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, низкомагнитных сталей и жаропрочных сталей и сплавов, в том числе титановых |
| ТТ20К9 | Фрезерование стали, фрезерование глубоких пазов и других видов обработки, предъявляющих повышенные требования к сопротивлению сплава тепловым и механическим циклическим нагрузкам |

25. Соответствие марок твердых сплавов международной классификации [17]

| Основные группы резания | | Группы применения | | | Соответствующая марка по ГОСТ 3882—74 |
|-------------------------|-----------------|-------------------|---|--|---------------------------------------|
| Обозначение | Цвет маркировки | Обозначение | Обрабатываемый материал и тип снимаемой стружки | Вид обработки и условия применения | |
| Р | Синий | P01 | Сталь, стальные отливки, дающие сливную стружку | Чистовое точение, растачивание, развертывание. Высокая точность обработки и высокое качество поверхности изделия. Отсутствие вибрации во время работы | T30K4 |
| | | P10 | Сталь, стальные отливки, дающие сливную стружку | Точение, точение по копиру, нарезание резьбы, фрезерование, рассверливание, растачивание | T15K6 |
| | | P20 | Сталь, стальные отливки, ковкий чугун и цветные металлы, дающие сливную стружку | Точение, точение по копиру, фрезерование, чистовое строгание | T14K8 |
| | | P25 | Нелегированная, низко- и среднелегированная стали | Фрезерование, в том числе фрезерование глубоких пазов, другие виды обработки, при которых предъявляются повышенные требования к сопротивлению сплава тепловым и механическим нагрузкам | TT20K9 |
| | | P30 | Сталь, стальные отливки, ковкий чугун, дающие сливную стружку | Черновое точение, фрезерование, строгание. Для работ в неблагоприятных условиях *1 | T5K10 |
| М | Желтый | P40 | Сталь, стальные отливки с включениями песка и раковинами, дающие сливную стружку и стружку надлома | Черновое точение, строгание. Для работ в особо неблагоприятных условиях *1 | T5K12, TT7K12 |
| | | P50 | Сталь, стальные отливки со средней или низкой прочностью, с включениями песка и раковинами, дающие сливную стружку и стружку надлома | Точение, строгание, долбление при высоких требованиях к прочности твердого сплава в связи с неблагоприятными условиями резания *1. Для инструмента сложной формы | TT7K12 |
| | | M10 | Сталь, стальные отливки, высоколегированные стали, в том числе аустенитные, жаропрочные труднообрабатываемые стали и сплавы, серый, ковкий и легированный чугуны, дающие как сливную, так и стружку надлома | Точение и фрезерование | BK6-OM, BK6-M, TT8K6 |
| | | M20 | Стальные отливки, аустенитные стали, марганцовистая сталь, жаропрочные труднообрабатываемые стали и сплавы, серый и ковкий чугуны, дающие как сливную, так и стружку надлома | Точение и фрезерование | TT10K8-B |

| Основные группы резания | | Группы применения | | | Соответствующая марка по ГОСТ 3882-74 |
|-------------------------|-----------------|-------------------|--|--|---------------------------------------|
| Обозначение | Цвет маркировки | Обозначение | Обрабатываемый материал и тип снимаемой стружки | Вид обработки и условия применения | |
| М | Желтый | М30 | Стальные отливки, аустенитные стали, жаропрочные труднообрабатываемые стали и сплавы, серый и ковкий чугуны, дающие как сливную, так и стружку надлома | Точение, фрезерование, строгание. Условия резания неблагоприятные *1 | ВК10-ОМ, ВК10-М, ВК8 |
| | | М40 | Низкоуглеродистая сталь с низкой прочностью, сталь высокой обрабатываемости резанием и другие металлы и сплавы, дающие как сливную, так и стружку надлома | Точение, фасонное точение, отрезка преимущественно на автоматах | ТТ7К12, ВК10-ОМ |
| К | Красный | К01 | Серый чугун, преимущественно высокой твердости, алюминиевые сплавы с большим содержанием кремния, закаленная сталь, пластмассы, керамика, стекло, дающие стружку надлома | Чистовое точение, растачивание, фрезерование, шабрение | ВК3, ВК3-М |

| | | | |
|-----|---|--|---------------|
| К05 | Легированные и отбеленные чугуны, закаленные стали, коррозионно-стойкие высокопрочные и жаропрочные стали и сплавы, дающие стружку надлома | Чистовое и получистовое точение, растачивание, развертывание, нарезание резьбы | ВК6-М, ВК6-ОМ |
| К10 | Серый и ковкий чугуны преимущественно повышенной твердости, закаленная сталь, алюминиевые и медные сплавы, пластмассы, стекло, керамика, дающие стружку надлома | Точение, растачивание, фрезерование, сверление, шабрение | ТТ8К6 |
| К20 | Серый чугун, цветные металлы, прессованная древесина, пластмассы, дающие стружку надлома | Точение, фрезерование, строгание, сверление, растачивание | ВК6, ВК4 |
| К30 | Серый чугун низкой твердости и прочности, сталь низкой прочности, древесина, цветные металлы, пластмасса, плотная древесина, дающая стружку надлома | Точение, фрезерование, строгание, сверление. Работа в неблагоприятных условиях *1. Допустимы большие передние углы заточки инструмента | ВК8, ВК4 |
| К40 | Цветные металлы, древесина, пластмассы, дающие стружку надлома | Точение, фрезерование, строгание. Допустимы большие передние углы заточки инструмента | ВК8, ВК15 |

*1 Неблагоприятными условиями следует считать работу с переменной глубиной резания, с прерывистой подачей, с ударами, вибрациями, с наличием литейной корки и абразивных включений в обрабатываемом материале.

26. Физические и механические свойства алмаза и кубического нитрида бора (эльбора) [17]

| Вещество | ρ , т/м ³ | λ , Вт/(м·°С) | HV, ГПа | Относительная режущая способность |
|------------------------|---------------------------|-----------------------|---------|-----------------------------------|
| Алмаз | 3,51 | 137,9—146,3 | 100—120 | 1 |
| Кубический нитрид бора | 3,48 | 41,86 | 80—100 | 0,58—0,64 |

дающих сливную стружку (сталь, ковкий чугун), обозначаются буквой Р; для материалов, дающих дробленую стружку (серый чугун, цветные металлы и их сплавы, неметаллические материалы), — буквой К и так называемые универсальные сплавы, т. е. пригодные для обработки как сталей, так и чугунов, — буквой М.

Подгруппы сплавов внутри каждой из групп для конкретных условий резания обозначают двузначной цифрой, прибавляемой к соответствующей букве, например Р01, Р10, Р20. Возрастающие цифр указывает на повышение прочностных свойств сплавов и снижение их твердости, износостойкости при одновременном снижении скорости резания.

Сменные многогранные твердосплавные пластины для режущего инструмента поставляются по

| | |
|----------------|----------------|
| ГОСТ 19042—80, | ГОСТ 19043—80, |
| ГОСТ 19046—80, | ГОСТ 19047—80, |
| ГОСТ 19048—80, | ГОСТ 19049—80, |
| ГОСТ 19052—80, | ГОСТ 19053—80, |
| ГОСТ 19056—80, | ГОСТ 19057—80, |
| ГОСТ 19059—80, | ГОСТ 19061—80, |
| ГОСТ 19065—80, | ГОСТ 19067—80, |
| ГОСТ 19069—80, | ГОСТ 19070—80, |
| ГОСТ 19085—80, | ГОСТ 19086—80, |
| ГОСТ 24247—80, | ГОСТ 24248—80, |
| ГОСТ 24249—80, | ГОСТ 24250—80, |
| ГОСТ 24254—80, | ГОСТ 24255—80, |
| ГОСТ 24257—80. | |

Сверхтвердые материалы. К сверхтвердым относят материалы, твердость и износостойкость которых превышает твердость и износостойкость твердых сплавов на основе карбидов вольфрама и титана с кобальтовой связкой и карбидотитановых сплавов на никель-молибденовой связке.

В промышленности применяют инструменты из таких сверхтвердых веществ, как алмаз, нитрид бора, оксид алюминия и нитрид кремния, в монокристалльной форме или в виде порошков и спеченных порошков в качестве лезвийного инструмента, шлифовальных кругов, паст и др.

К основным группам относятся инструменты на основе алмаза, нитрида бора, минералокерамики.

По твердости сверхтвердые материалы подразделяют на пять подклассов: природные алмазы (HV 98,1 ГПа); синтетические алмазы (HV 88,29—98,1 ГПа); кубический нитрид бора (HV 68,67—78,48 ГПа); вюрцитный нитрид бора (HV 49,05—78,48 ГПа); композиционные материалы (HV до 49,05 ГПа).

Физические и механические свойства алмаза и кубического нитрида бора приведены в табл. 26.

Алмазы имеют теплопроводность, в несколько раз превышающую теплопроводность других инструментальных материалов. Этим объясняется более эффективный отвод теплоты из зоны резания, что существенно улучшает режущие свойства алмазных инструментов.

Кубический нитрид бора (эльбор) обладает твердостью, близкой к твердости алмаза, более теплоустойчив, чем алмаз, и более химически инертен, хотя и менее теплопроводен.

Алмаз начинает графитизироваться уже при 800—900°С; кубический нитрид бора переходит в графитоподобную модификацию при температурах 1200—1400°С и только при 1600—1800°С скорость перехода резко возрастает. Его теплопроводность примерно в 3 раза ниже теплопроводности

27. Степень химического взаимодействия сверхтвердых материалов с некоторыми обрабатываемыми материалами [17]

| Материал | Степень химического взаимодействия | | |
|----------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| | Стали | Титан и его сплавы | Чугуны |
| Алмаз | Высокая » Не взаимодействует | Низкая Средняя Высокая | Низкая » Не взаимодействует |
| Карбид кремния | | | |
| Электрокорунд | | | |
| Оксид циркония | То же Низкая | Низкая » | То же » |
| Эльбор | | | |

алмаза, но все же значительно выше теплопроводности других сверхтвердых материалов.

Степень химического взаимодействия некоторых сверхтвердых материалов приведена в табл. 27.

Алмазные резцы из природных монокристаллов, а также из синтетических алмазов типа баллас (АСБ) и карбонадо (АСПК) могут эффективно применяться при обтачивании и растачивании изделий из цветных металлов и их сплавов, а также из неметаллических материалов и пластмасс. Для обработки сталей их применять не рекомендуется из-за сильного химического взаимодействия.

Основным преимуществом алмазowego лезвийного инструмента, кроме высокой твердости и износостойкости, является его высокая теплопроводность (см. табл. 26). Несколько уступая по комплексу свойств природным алмазам, балласы и карбонадо значительных размеров позволяют осуществить не только сверхточное точение, но также получистовую и даже черновую обработку с глубиной резания до 2—2,5 мм. Структура балласов и карбонадо препятствует доводке режущей кромки инструмента до параметра шероховатости, который достигнут природным алмазом.

Для резцов используют кристаллы природных алмазов массой 0,2—0,75 кар. Размеры балласов и карбонадо могут быть существенно большими. Такие кристаллы допускают 6—10 переточек. Монокристаллы алмазы, как и поликристаллы типа бал-

ласов и карбонадо, хрупки и могут быть использованы лишь при непрерывном точении.

Резцы для алмазного точения бывают двух видов: с напаянными алмазами и механически закрепленными. Для резцов применяют технические кристаллы шестой и третьей групп по техническим условиям 4086—52 Министерства финансов СССР и Министерства цветной металлургии СССР.

Рекомендуемые обрабатываемые материалы и режимы резания при алмазном точении приведены в табл. 28.

Режущие пластины для резцов и торцовых фрез изготавливаются из сферической (кубической) и вюрцитной модификации нитрида бора.

Высокая эффективность применения инструмента, оснащенного режущими пластинами из этих модификаций нитрида бора, обусловлена высокой твердостью (HV 40—75 ГПа), т. е. в 2—4 раза больше, чем у твердых сплавов; высокой теплоустойчивостью (1100—1300°С); теплопроводностью на уровне теплопроводности твердых сплавов, не снижающейся при повышении температуры; химической инертностью к большинству сплавов железа с углеродом; способностью режущей кромки к самозатачиванию; достаточной ударной вязкостью, обеспечивающей применение при торцовом фрезеровании.

Обработка этими материалами характеризуется исключительно высокими скоростями резания и малыми толщинами срезаемых стружек, малыми силами резания, высокой точностью обработки, высоким качеством

28. Рекомендуемые обрабатываемые материалы и режимы резания при алмазном точении [17]

| Обрабатываемый материал | Режимы резания | | |
|--------------------------------------|----------------|---------------------|------------|
| | v, м/мин | S ₀ , мм | t, мм |
| Алюминий | 400—500 | 0,01—0,05 | 0,01—0,15 |
| Сплавы алюминия | 600 | 0,01—0,05 | 0,05—0,10 |
| Латунь | 400—500 | 0,02—0,07 | 0,03—0,06 |
| Баббиты | 400—500 | 0,02—0,05 | 0,05—0,15 |
| Бронза: | | | |
| оловянистая | 300—400 | 0,03—0,05 | 0,05—0,25 |
| свинцовистая | 800 | 0,02—0,04 | 0,025—0,05 |
| Медь | 350—500 | 0,01—0,04 | 0,01—0,03 |
| Титан | 100—300 | 0,02—0,05 | 0,03—0,05 |
| Пластмасса | 500—700 | 0,03—0,06 | 0,05—0,03 |
| Специальные пластмассы (типа К211-3) | 100—150 | 0,02—0,03 | 0,05—0,15 |

вом тонкого поверхностного слоя детали.

Эльборовые поликристаллические спекн (эльбор-Р, композиты 01, 05) особенно эффективно использовать при изготовлении резцов, предназначенных для обработки стальных и чугунных изделий. При обработке закаленных сталей высокой твердости по износостойкости режущий инструмент из эльбора-Р во много раз превосходит твердосплавный и минералокерамический инструменты и обеспечивает возможность замены шлифования точением или фрезерованием.

Рекомендуемые обрабатываемые материалы и режимы резания при точении и фрезеровании инструментами из эльбора приведены в табл. 29 и 30.

На основе смесей кубического и вюрцитного нитрида бора в ИКФ АН СССР разработаны сверхтвердые материалы типа ПТНБ для лезвийного инструмента. Они могут применяться как для гладкого, так и прерывистого точения. Рекомендуемые обрабатываемые материалы и эксплуатационные характеристики ПТНБ приведены в табл. 31.

Высокими режущими свойствами обладает сверхтвердый гексанит-Р (композиты 10, 10Д), изготовленный из вюрцитной модификации нитрида бора

по технологии, разработанной в ИПМ АН УССР. Его фазовый состав представлен вюрцитной модификацией нитрида бора, являющейся высокодисперсной связующей основой, содержащейся в гексаните-Р в количестве, превышающем 50 %, и сфалеритной модификацией — продуктом частичного фазового перехода вюрцитной формы.

На режимах прерывистого точения гексанит-Р превосходит по износостойкости все модификации ПТНБ, однако в условиях непрерывного точения, при обработке особо твердых закаленных сталей, несколько уступает по износостойкости эльбору-Р.

При обработке сталей с твердостью ниже HRC 60 его износостойкость существенно выше.

Гексанитовые резцы рекомендуются использовать при обработке твердых сплавов, наплавов из сормита, закаленных сталей, чугунов, сплавов цветных металлов и пластмасс.

Режущий инструмент из сверхтвердых материалов на основе нитрида бора выпускается в виде пластин круглой, треугольной, квадратной и ромбической формы по ТУ 2-035-808—81.

Применение инструментов с режущими сменными пластинами из керамики, обладающей высокими тепло-

29. Рекомендуемые режимы резания инструментом из эльбора при точении и растачивании [14, 17]

| Обрабатываемый материал | Характер процесса резания | Композит | Режимы резания | | | |
|--|--|--------------------|----------------|---------------------|-----------|----------|
| | | | v, м/мин | S ₀ , мм | t, мм | |
| Конструкционные и легированные, инструментальные и подшипниковые стали, закаленные до твердости HRC 40—58 Быстрорежущие, инструментальные, цементуемые стали, закаленные до твердости HRC 58—70 Серые и высокопрочные чугуны, HB 150—300 | Без удара С ударом | 05; 01 | 50—180 | 0,03—0,20 | 0,05—3,0 | |
| | | 10; 10Д | 40—120 | 0,03—0,10 | 0,05—1,0 | |
| | Без удара С ударом | 01 | 50—120 | 0,03—0,1 | 0,05—0,8 | |
| | | 10; 10Д | 40—100 | 0,03—0,07 | 0,05—0,4 | |
| | Без удара С ударом | 05; 01 | 400—1000 | 0,03—0,5 | 0,05—3,0 | |
| | | 10; 10Д; 05; 01 | 300—800 | 0,03—0,2 | 0,05—2,0 | |
| | Отбеленные, закаленные чугуны, HB 400—600 | Без удара С ударом | 05; 01 | 50—200 | 0,03—0,5 | 0,05—2,0 |
| | | 10; 10Д | 40—90 | 0,03—0,10 | 0,05—1,0 | |
| | Твердые сплавы с содержанием кобальта не менее 15 %, HRA 80—86 Износостойкие покрытия на основе никеля (плазменное нанесение), HRC 45—57 | Без удара | 10; 10; 10Д | 5—20 | 0,03—0,1 | 0,05—1,0 |
| | | По корке | 01; 10; 10Д | 40—100 | 0,03—0,15 | 0,1—0,5 |

Примечание. Композит 01, 05 — эльбор-Р на основе кубического нитрида бора; композит 10 — гексанит-Р; композит 10Д — двухслойные пластины с рабочим слоем из гексанита-Р.

30. Рекомендуемые режимы резания инструментами из эльбора при торцовом фрезеровании [14, 17]

| Обрабатываемый материал | Композит | Режимы торцового фрезерования | | |
|---|-------------|-------------------------------|---------------------|----------|
| | | v, м/мин | S ₂ , мм | t, мм |
| Конструкционные и легированные нетермообработанные стали, HRC 30 (в состоянии поставки) | 10; 01; 10Д | 400—900 | 0,01—0,1 | 0,05—1,5 |

Продолжение табл. 30

| Обрабатываемый материал | Композит | Режимы торцового фрезерования | | |
|--|-----------------|-------------------------------|---------------------|----------|
| | | v, м/мин | S _z , мм | t, мм |
| Конструкционные, легированные, инструментальные закаленные стали, HRC 35—55 Закаленные, цементованные стали, HRC 55—70 Быстрорежущие стали, HRC 60—70 Серые и высокопрочные чугуны, HB 150—300 (в том числе по литейной корке) Отбеленные, закаленные чугуны, HB 400—600 | 10; 01; 10Д | 200—600 | 0,01—0,1 | 0,05—1,2 |
| | 10; 01; 10Д | 80—300 | 0,01—0,05 | 0,05—0,8 |
| | 01 | 20—40 | 0,01—0,05 | 0,05—0,6 |
| | 05; 10; 10Д; 01 | 800—3000 | 0,01—0,1 | 0,05—6,0 |
| | 10; 01; 10Д; 05 | 200—800 | 0,01—0,1 | 0,05—4,0 |

Примечание. Композит 01, 05 — эльбор-Р на основе кубического нитрида бора; композит 10 — гексанит-Р, композит 10Д — двухслойные пластины с рабочим слоем из гексанита-Р.

31. Эксплуатационные характеристики ПТНБ [17]

| Исходный материал для синтеза | Марка | Область применения | Примечание |
|--|---------|--|---|
| Смесь КНБ и ВНБ | P20/25Д | Обработка закаленных сталей, чугунов и сплавов цветных металлов | Непригоден для прерывистого точения |
| Смесь КНБ и ВНБ | 11-5МК | Обработка закаленных сталей, чугунов, стеклопластиков, керметов, никеля и сплавов цветных металлов | Может использоваться как при гладком, так и при прерывистом точении |
| Смесь активированных КНБ и ВНБ с примесями | 11-3МКТ | То же | При прерывистом точении стойкость в 1,3—1,4 раза выше, чем у марки 11-5МК |

32. Физико-механические свойства керамики [14]

| Марка | Группа | ρ, т/м ³ | Твердость | σ _н , МПа |
|----------|-------------------|---------------------|-----------|----------------------|
| ЦМ-332 | Оксидная | 3,85 | HRA 90 | 300—400 |
| ВШ-7 | » | — | — | 500—600 |
| ВЗ | Оксидно-карбидная | 4,5—4,6 | HRA 92—94 | 450—750 |
| ВОК-60 | То же | 4,2—4,3 | HRA 92—94 | 600—750 |
| ВОК-63 | » | — | HRA 92—93 | 650—750 |
| Силнит-Р | Оксидно-нитридная | — | HV 32 ГПа | 500—700 |

Примечание. Оксид — Al₂O₃; карбид — WC, Mo₂C или TiC; нитрид — нитрид кремния.

стойкостью (1200—1400 °С), твердостью (до HV 30 ГПа), износостойкостью, химической устойчивостью, обеспечивает обработку деталей из стали и чугуна со скоростями резания в 1,5—8 раз более высокими, чем при использовании инструментов, оснащенных пластинами из твердых сплавов.

Реализация высоких скоростей резания при внедрении инструментов из керамики позволяет уменьшить машинное время обработки деталей, сэкономить дефицитные вольфрамсодержащие твердые сплавы, повысить качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Интенсивное развитие производства и применение керамики в нашей стране и за рубежом привело к созданию керамических материалов нескольких групп.

1. Оксидная керамика состоит из оксида алюминия (99 %) с незначительными добавками оксида магния или других элементов. К ней относятся марки: ВО-13 (ТУ 48-19-4204—79), ЦМ-332 (белая) и ВШ-75 (ТУ 2-036-788—82).

2. Оксидно-карбидная (черная, смешанная) керамика состоит из оксида алюминия (до 60—80 %), карбидов и оксидов тугоплавких металлов. К ней относятся марки ВОК-60 и В-3 по ГОСТ 25003—81.

3. Оксинитридная керамика состоит из нитридов кремния и тугоплавких материалов с включением оксида алюминия и некоторых других компонентов. К этой группе

относятся марки: кортинит ОНТ-20 (ТУ 2-036-087—82) и силнит-Р (ТУ 06-339—78).

Физико-механические свойства керамики приведены в табл. 32.

Рекомендуемые марки керамики и режимы резания при обработке чугуна и стали приведены в табл. 33.

2. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

По условиям работы стали можно разделить на четыре группы: 1) высокой и повышенной износостойкости; 2) высокого сопротивления смятию и высокой теплостойкости; 3) высокопрочные с высокой и повышенной ударной вязкостью; 4) для ударных инструментов.

Химический состав штамповых сталей для холодного деформирования приведен в табл. 34, значения критических точек — в табл. 35, а режимыковки и отжига — в табл. 36.

Достижение экономической целесообразной стойкости инструмента возможно только при четкой специализации штамповых сталей в зависимости от типов технологических процессов и свойств штампуемых материалов.

Для оценки условий работы инструмента при выполнении различных операций холодной штамповки и соответственно правильного выбора сталей для его изготовления необходимо знать основные причины выхода инструмента из строя (табл. 37).

33. Рекомендуемые марки керамики и режимы резания при обработке чугуна и стали

| Обрабатываемый материал | Твердость | Режимы резания | | | Рекомендуемая марка керамики | |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------|------------|--------------------------|------------------------------|-------------------|
| | | v , м/мин | S_0 , мм | f , мм | | |
| Чугун: | серый | HB 163—241 | 300—800 *1 | 0,1—0,2 | 0,3—1,0 | ВО-13 |
| | | | 200—500 | 0,2—0,5 | 1,4—4,0 | ВШ-75 (ВОК-60) *2 |
| | ковкий | HB 160—270 | 200—400 | 0,12—0,25 | 0,3—0,8 | ВОК-60 |
| 150—250 | | | 0,2—0,4 | 1,0—2,0 | Кортинит (В-3) | |
| отбеленный | HB 400—650 | 40—150 15—40 | 0,8—0,15 | 0,3—0,8 | ВОК-60 Кортинит (ВОК-63) | |
| Сталь: | конструкционная неупрочненная | HB 229 | 300—700 | 0,15—0,2 | 0,3—0,8 | ВО-13 |
| | | | 150—300 | 0,2—0,5 | 1,0—3,0 | ВШ-75 (ВОК-60) |
| | улучшенная цементуемая | HB 229—380 | 300—600 | 0,1—0,2 | 0,3—0,8 | ВШ-75 |
| | | | 200—350 | 0,15—0,3 | 1,0—2,0 | Кортинит (ВОК-60) |
| | вакаленная | HRC 36—48 | 100—300 | 0,1—0,15 | 0,1—0,3 | ВОК-60 |
| 70—180 | | | 0,1—0,12 | 0,2—0,8 | Кортинит (В-3) | |
| HRC 48—57 | | 60—150 | 0,05—0,15 | 0,1—0,3 | ВОК-60 Кортинит (В-3) | |
| HRC 57—64 | 50—120 | 0,04—0,12 | 0,1—0,8 | ВОК-60 Кортинит (В-3) | | |

*1 В числителе дроби приведены режимы чистой обработки, в знаменателе — получистовой.
*2 Марка керамики, которую можно применять альтернативно.

Указанные условия эксплуатации резцов рассчитаны на среднюю стойкость 15 мин.

34. Химический состав штамповых сталей для холодного деформирования (по ГОСТ 5950—73)

| Сталь | Мас. доля элементов, % | | | | | | |
|---|------------------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | C | Si | Mn | Cr | W | Mo | V |
| Стали высокой и повышенной износостойкости | | | | | | | |
| X6Ф4М (ЭП770) | 1,70—1,85 | 0,15—0,40 | 0,15—0,40 | 5,70—6,50 | — | 0,50—0,80 | 3,50—4,00 |
| X12ВМФ | 2,00—2,20 | 0,10—0,40 | 0,15—0,45 | 11,00—12,50 | 0,50—0,80 | 0,60—0,90 | 0,15—0,30 |
| X12 | 2,00—2,20 | 0,10—0,35 | 0,15—0,45 | 11,50—13,00 | — | — | — |
| X12Ф1 | 1,25—1,45 | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 11,00—12,50 | — | — | 0,70—0,90 |
| X12МФ | 1,45—1,65 | 0,10—0,40 | 0,15—0,40 | 11,0—12,50 | — | 0,40—0,60 | 0,15—0,30 |
| X6ВФ | 1,05—1,15 | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 5,50—6,50 | 1,10—1,50 | — | 0,50—0,80 |
| Стали высокого сопротивления смятию и высокой теплостойкости | | | | | | | |
| 8Х4В2МФС2 (ЭП761) | 0,80—0,90 | 1,70—2,00 | 0,20—0,50 | 4,55—5,10 | 1,80—2,30 | 0,80—1,10 | 1,10—1,40 |
| 11Х4В2МФ3С2 (ДИ-37) | 1,05—1,15 | 1,40—1,80 | 0,20—0,50 | 3,50—4,20 | 2,00—2,70 | 0,30—0,50 | 2,30—2,80 |
| Высокопрочные стали с повышенной ударной вязкостью | | | | | | | |
| 6Х4М2ФС (ДИ-55) | 0,57—0,65 | 0,70—1,00 | 0,15—0,40 | 3,8—4,40 | — | 2,00—2,40 | 0,40—0,60 |
| 6Х6В3МФС (55Х6В3СМФ, ЭП569) | 0,50—0,60 | 0,60—0,90 | 0,15—0,40 | 5,50—6,50 | 2,50—3,20 | 0,60—0,90 | 0,50—0,80 |
| 7ХГ2ВМФ | 0,68—0,76 | 0,20—0,40 | 1,80—2,30 | 1,50—1,80 | 0,55—0,90 | 0,50—0,80 | 0,10—0,25 |
| Стали для ударных инструментов | | | | | | | |
| 4ХС | 0,35—0,45 | 1,20—1,60 | 0,15—0,40 | 1,30—1,60 | — | — | — |
| 6ХС | 0,60—0,70 | 0,60—1,00 | 0,15—0,40 | 1,00—1,30 | — | — | — |
| 4ХВ2С | 0,35—0,45 | 0,60—0,90 | 0,15—0,40 | 1,00—1,30 | 2,00—2,50 | — | — |
| 5ХВ2СФ | 0,45—0,55 | 0,80—1,10 | 0,15—0,45 | 0,90—1,20 | 1,80—2,30 | — | 0,15—0,30 |
| 6ХВ2С | 0,55—0,65 | 0,50—0,80 | 0,15—0,40 | 1,00—1,30 | 2,20—2,70 | — | — |
| 6ХВГ | 0,55—0,70 | 0,15—0,35 | 0,90—1,20 | 0,50—0,80 | 0,50—0,80 | — | — |
| 6Х3МФС (ЭП788) | 0,55—0,62 | 0,35—0,65 | 0,20—0,60 | 2,60—3,30 | — | 0,20—0,50 | 0,30—0,60 |

Примечания: 1. Сталь X6Ф4М (ЭП770) производят по ТУ 14-1-1227—75.

2. Содержание серы и фосфора не превышает 0,030 % (0,020 %) каждого элемента, а в стали после электрошлакового переплава содержание серы не более 0,015 %.

35. Критические точки (в °С) штамповых сталей для холодного деформирования [10]

| Сталь | A_c | A_{c1} | A_{r1} | A_{r2} | M_H | M_K |
|-----------|---------|------------|----------|----------|---------|-------|
| X6Ф4М | 820 | 860 | 800 | 750 | 260 | 20 |
| X12ВМФ | 815 | — | — | — | 225 | — |
| X12 | 810 | — | — | 755 | 180 | — |
| X12Ф1 | 810 | — | — | 760 | 225 | 0 |
| X12МФ | 830 | — | — | 750 | 230 | 0 |
| X6ВФ | 815 | 845 | 775 | 625 | 150 | -100 |
| 8Х4В2МФС2 | 840 | 880 | 820 | 785 | 150 | — |
| 6Х6В3МФС | 875 | 905 | 790 | 755 | 250 | — |
| 7ХГ2ВМФ | 765 | 825 | 430 | 310 | 160 | — |
| 4ХС | 770 | 860 *1 | — | — | 290 | — |
| 6ХС | 770 | 830 *1 | — | — | 250 | — |
| 4ХВ2С | 780 | 840 *1 | — | — | 315 | — |
| 5ХВ2ФС | 775 | 860 *1 | — | — | 295 | — |
| 6ХВ2С | 775 | 810 *1 | — | — | 280 | — |
| 6Х3МФС | 760—790 | 950—975 *1 | — | — | 210—220 | — |
| 6ХВГ | 780 | 795 *1 | — | 675 | 280 | — |

*1 Указаны температуры A_{c3} .

36. Режимыковки и отжига штамповых сталей для холодного деформирования [10]

| Сталь | Интервал кованных температур, °С | Режимы отжига | Твердость после отжига НВ, МПа, не более |
|---------------|----------------------------------|--|--|
| X6Ф4М | 1140—850, охлаждение замедленное | Нагрев на 860—880 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 700 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2410 |
| X12ВМФ X12 | 1100—850, охлаждение замедленное | Нагрев на 830—850 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 720 °С, выдержка 3—4 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2550 |

Продолжение табл. 36

| Сталь | Интервал кованных температур, °С | Режимы отжига | Твердость после отжига НВ, МПа, не более |
|--------------|---|---|--|
| X12Ф1, X12МФ | 1140—850, охлаждение замедленное | Нагрев на 850—870 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 710 °С, выдержка 3—4 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2550 |
| X6ВФ | 1100—850, охлаждение замедленное | Нагрев на 830—850 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 710 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2410 |
| 8Х4В2МФС2 | 1150—850, охлаждение замедленное | Нагрев на 880—900 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 740 °С, выдержка 3—4 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2290 |
| 11Х4В2МФС2 | 1150—880, посадка в печь при 600—650 °С, нагрев с печью до 820 °С, выдержка до полного прогрева, затем до температурковки, охлаждение замедленное | Нагрев со скоростью 100—120 °С/ч до 860—880 °С, выдержка не менее 2,5—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 740—750 °С, выдержка 3—3,5 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2550 |
| 6Х6В3МФС | 1100—850, охлаждение замедленное | Нагрев на 860—880 °С, охлаждение со скоростью 30 °С/ч до 770 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2550 |
| 7ХГ2ВМФ | 1160—800, охлаждение замедленное | Нагрев на 770—790 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе | 2550 |
| 4ХС | 1180—850, воздух | Нагрев на 820—840 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе | 2170 |

Продолжение табл. 36

| Сталь | Интервал ковочных температур, °С | Режимы отжига | Твердость после отжига НВ, МПа, не более |
|--|----------------------------------|---|--|
| 6 ХГ | 1180—850, охлаждение замедленное | Нагрев на 820—840 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе | 2290 |
| 4ХВ2С 5ХВ2ФС 6ХВ2С 6ХЗМФС 6ХВГ | 1180—850, охлаждение замедленное | Нагрев на 800—820 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе | 2290 2550 2690 2710 2170 |
| | 1160—850, охлаждение замедленное | Нагрев на 800—820 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе | 2170 |

Примечание. Для всех сталей посадка в печь при 600—650 °С.

37. Основные причины выхода из строя и средняя стойкость штамповых инструментов для основных операций холодной штамповки [16]

| Характеристика технологических операций | Основные причины выхода из строя | Средняя стойкость, тыс. шт. |
|--|--|-----------------------------|
| Объемное прессование | | |
| Калибровка и чеканка: изготовление изделий простой формы из низкоуглеродистых и низколегированных сталей; калибровка и чеканка деталей сложной формы из высокопрочных материалов | Износ рабочих частей | 100—350 |
| Высадка: изготовление деталей из цветных сплавов, низко- и среднеуглеродистых и легированных сталей (ударные условия нагружения) | Износ и смятие рабочих кромок, хрупкое разрушение | 50—100 |
| Прессование: изготовление деталей из цветных сплавов, низко-, среднеуглеродистых и низколегированных сталей при степени деформации 0,4—0,5 и давлении 1400 МПа; изготовление деталей из низкоуглеродистых и низколегированных сталей при степени деформации 0,5—0,65 и давлении 1400—1800 МПа; | Хрупкое разрушение, износ | 50—200 |
| | Хрупкое разрушение, износ рабочих частей | 30—100 |
| | Хрупкое разрушение, смятие и выкрашивание рабочих частей | 20—50 |

Продолжение табл. 37

| Характеристика технологических операций | Основные причины выхода из строя | Средняя стойкость, тыс. шт. |
|---|--|-----------------------------|
| однопереходное прессование деталей из конструкционных сталей с большими степенями деформации при давлении 1800—2200 МПа и более | Хрупкое разрушение, смятие и выкрашивание рабочих частей | 10—40 |
| Резка вырубка и пробивка отверстий в заготовках из конструкционных материалов; прецизионная вырубка изделий электротехнической промышлености | Износ, усталостное разрушение | 50—250 |
| Листовая штамповка гибка, вытяжка и формовка деталей небольших размеров и простой формы; изготовление деталей повышенной точности сравнительно небольших размеров; изготовление крупных изделий сложной формы | Выкрашивание и износ рабочих кромок, хрупкое разрушение | 10—100 |
| | Износ | 200—250 |
| | Износ рабочих частей, схватывание | 100—250 |
| | Износ и выкрашивание рабочих кромок, схватывание | 50—200 |

Примечание. Значения стойкости даны в основном до первого восстановления.

Наименьшая стойкость инструмента наблюдается при выполнении операций объемной штамповки (прессование, высадка, калибровка, чеканка) и резки (вырубка, пробивка, просечка, отрезка) вследствие возникновения больших давлений, неблагоприятного напряженного состояния и нагрева рабочих частей инструментов. Гибка, вытяжка, формовка особых трудностей не вызывают.

Давления при холодном прессовании достигают 2000—2500 МПа, а температура на поверхности инструмента 500—530 °С. При этом из-за низкой теплопроводности высоколегированных сталей в поверхностном слое толщиной около 0,3 мм наблюдается резкий перепад температур [13].

На прессах объемного прессования реализуется плавное нагружение со скоростями 0,1—0,4 м/с, а на чеканочных прессах, холодновысадочных автоматах и быстроходных пресс-автоматах ударное нагружение со скоростями 0,5—1,5 м/с.

Хрупкое разрушение может быть не только следствием ударного нагружения, воздействия опасных концентраторов напряжений, но и результатом возрастания удельных нагрузок от смятия или затупления (износа) рабочих частей. При этом интенсивное изменение геометрических размеров связано или с недостаточной теплостойкостью материала, или с абразивным воздействием материала заготовки, или с усталостным выкрашиванием.

38. Количество карбидной фазы в сталях после отпуска на твердость HRC 62—64 [4]

| Сталь | Мас. доля, % | |
|-------|--------------|------------------------|
| | углерода | карбидной фазы |
| X12 | 2,1 | 19—20 |
| X6Ф4М | 1,8 | 15—16 |
| | | (в том числе 8—9 % МС) |
| X12М | 1,5 | 16—17 |
| X12Ф1 | 1,3 | 13—14 |
| X6ВФ | 1,1 | 12 |

Кроме приемлемых износостойкости, сопротивления малым пластическим деформациям и теплостойкости, прочности и вязкости, стали должны обладать хорошими технологическими свойствами: обрабатываемостью давлением и резанием, устойчивостью против перегрева, малой деформируемостью при термической обработке, малой склонностью к обезуглероживанию, а также по возможности быть экономно легированными.

Условия работы инструмента определяют выбор режимов термической обработки сталей. Высокое качество термической обработки обеспечивается защитой поверхности от обезуглероживания; соблюдением условий и температур нагрева, а также условий охлаждения для достижения оптимального сочетания свойств при наименьшей деформации инструментов.

Лучшее качество поверхности получают при нагреве инструментов в расплавленных солях, раскисленных бурой $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (4—5 % от массы соли) или MgF_2 (2—4 %), в печах с защитной атмосферой или в упаковке из чугушной стружки. Склонность к обезуглероживанию повышают кремний, вольфрам и молибден при содержании каждого более 1 %.

Во избежание возникновения чрезмерных термических напряжений из-за низкой теплопроводности сталей перед окончательным нагревом под закалку рекомендуется одноступенчатый (при 650—700 °С) или двух-

ступенчатый (при 300—400 °С — первая ступень и при 800—850 °С — вторая ступень) нагрев.

Время выдержки при температуре аустенитизации для сталей первых трех групп устанавливают из расчета 50—70 с на 1 мм сечения при печном нагреве и 35—40 с при нагреве в ванне. Выдержка при отпуске составляет 1,5—2,5 ч (или 100—150 с на 1 мм наименьшего сечения, но не менее 1 ч); при проведении кратных отпусков и обработке на вторичную твердость выдержку ограничивают 1—1,5 ч.

При обработке инструментов из сталей четвертой группы (для ударных инструментов) время выдержки в камерных печах устанавливают 50—70 с (без учета времени прогрева) на 1 мм толщины детали, а в соляных ваннах 20—30 с. Время выдержки при отпуске определяют из расчета 2 ч плюс 1—1,5 мин на 1 мм толщины.

Инструменты холодного деформирования, работающие в условиях значительного износа, изготавливают преимущественно из сталей с 12 % Сг (X12М, X12, X12Ф1, X12МФ). Используют также стали с 6 % Сг (X6Ф4М и X6ВФ, см. табл. 34).

По относительной износостойкости стали после обработки на твердость HRC 61—62 могут быть расположены в следующий ряд (в скобках указана относительная износостойкость): X6ВФ (0,5), X12М (1,0), X6Ф4М (1,2), X12 (1,45) [4]. Эти стали относятся к мартенситному классу и ледобуритной группе. Высокая износостойкость определяется повышенным количеством карбидной фазы (табл. 38), типом и морфологией карбидов. Карбиды представлены преимущественно частицами M_7C_3 (Cr_7C_3) и небольшим количеством M_{23}C_6 (Cr_{23}C_6), МС (VC), а также M_3C при высоком содержании углерода (X12). Неблагоприятное распределение карбидной фазы, возникающее при кристаллизации слитков и сохраняющееся в горячеканом и горячекатаном состоянии, особенно в прутках диаметром более 40 мм, снижает прочность и ударную вязкость, вызывает выкрашивание рабочих кромок штампов и создает значительную анизотропию свойств. У сталей обязательно контролируют

карбидную неоднородность, чем оценивают одновременно качествоковки. Прочность ледобуритных сталей в термообработанном состоянии при изменении карбидного балла с 3 (диаметр проката 20—35 мм) на 7 (диаметр проката 80—100 мм) снижается в 1,5—2 раза.

Меньшую карбидную неоднородность имеют высокованадиевые стали (X6Ф4М), но их недостатком является пониженная шлифуемость и повышенная окисляемость при нагреве под ковку, отжиг и закалку.

Термическую обработку сталей с 6 и 12% Сг высокой износостойкости проводят преимущественно на первичную твердость и реже на вторичную.

Оптимальные температуры заковки на первичную твердость устанавливаются на основе определенного сочетания характеристик твердости (HRC 62—65), размера зерна (не крупнее 9 по ГОСТ 5639—82 при диаметре до 80 мм и 8 при диаметре 80—140 мм или 4 и 3 по шкале изломов соответственно) и количества остаточного аустенита (15—20%) (табл. 39). Максимальная твердость после заковки достигается при достаточно полном растворении карбидов (сохраняется 6—10%), но так, чтобы не происходил рост зерна и образование чрезмерного количества остаточного аустенита. У высокохромистых сталей интервал температур заковки небольшой.

39. Влияние температуры заковки на твердость, размеры зерна аустенита и количество остаточного аустенита сталей высокой износостойкости

| Сталь (рекомендуемая температура заковки) | Температура заковки, °С | HRC | Зерно | Количество остаточного аустенита, % |
|---|-------------------------|-------|-------|-------------------------------------|
| X6Ф4М (980—1010 °С) [1] | 975 | 63,5 | — | 8 |
| | 1000 | 64,5 | — | 10 |
| | 1025 | 64,5 | — | 17 |
| | 1050 | 64 | — | 21 |
| | 1100 | 62,5 | 12 | 37 |
| | 1150 | 60,5 | 11—10 | 55 |
| | 1175 | 59 | 10 | — |
| X12 (950—980 °С) [4, 15] | 880 | 57,5 | — | — |
| | 930 | 65 | 12 | — |
| | 980 | 65 | 10—10 | — |
| | 1030 | 57 | 10—11 | — |
| | 1100 | 50 | 11—9 | — |
| X12Ф1 (1030—1050 °С) [9, 16] | 900 | 53—54 | — | 3 |
| | 950 | 58—60 | 12—13 | 5 |
| | 1000 | 63 | 12 | 10 |
| | 1025 | 64—65 | 12—11 | 15—17 |
| | 1050 | 63—64 | 11—12 | 22—27 |
| | 1100 | 58—60 | 9—10 | 40—60 |
| | 1150 | 52 | 7—8 | 65—95 |

Продолжение табл. 39

| Сталь (рекомендуемая температура закалки) | Температура закалки, °C | HRC | Зерно | Количество остаточного аустенита % |
|---|-------------------------|-------|-------|------------------------------------|
| X12MФ (1000—1030 °C) [15] | 900 | 54—55 | 12—13 | 3 |
| | 950 | 60—61 | 12 | 5 |
| | 975 | 62—63 | 12—11 | 8 |
| | 1000 | 64 | 11—12 | 12 |
| | 1025 | 64,5 | 11—10 | 20 |
| | 1050 | 63 | 10 | 40 |
| | 1100 | 54 | 8—9 | 74 |
| X6BФ (980—1000 °C) [2] | 850 | 53 | Св. 9 | 3 |
| | 900 | 59 | | 5 |
| | 950 | 62,5 | | 9 |
| | 1000 | 64 | | 16 |
| | 1050 | 62 | | 29 |
| | 1100 | 54 | | 52 |

При закалке с 1010—1060 °C сталь X12Ф1 прокаливается в сечении до 150—180 мм, а сталь X12MФ — в сечении более 200 мм при охлаждении в масле и на воздухе.

Температуры отпуска при обработке на первичную твердость устанавливают по сочетанию характеристик твердости, прочности на изгиб и ударной

вязкости (табл. 40), чтобы обеспечить наилучшую износостойкость при определенном сопротивлении хрупкому разрушению и выкрашиванию. Отпуск при 300—450 °C резко снижает ударную вязкость вследствие коагуляции карбидов и распада остаточного аустенита. Пониженная ударная вязкость стали X12 по сравнению

40. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей высокой износостойкости (сечения до 40 мм) [10]

| Сталь (рекомендуемая температура закалки, твердость) | Температура отпуска, °C | HRC | $\sigma_{н}$, МПа | $a_{н}$, МДж/м ² (неандрезанный образец) |
|--|-------------------------|------|--------------------|--|
| X6Ф4М (1000 °C; HRC 62—64) | 150 | 64 | 3300 | 0,45 |
| | 200 | 62 | 3500 | 0,54 |
| | 250 | 60 | 3700 | 0,60 |
| | 300 | 58,5 | 3750 | 0,65 |
| | 350 | 58 | 3800 | 0,70 |
| | 400 | 58 | 3500 | 0,76 |
| | 450 | 57 | 3200 | 0,85 |
| | 500 | 55 | — | — |
| | 550 | — | — | — |
| | 600 | 40 | — | — |

Продолжение табл. 40

| Сталь (рекомендуемая температура закалки, твердость) | Температура отпуска, °C | HRC | $\sigma_{н}$, МПа | $a_{н}$, МДж/м ² (неандрезанный образец) |
|--|-------------------------|------|--------------------|--|
| X12BMФ (1020 °C; HRC 65) | 180 | 62 | 2150 | 0,2 |
| | 200 | 60,5 | 2330 | 0,23 |
| | 250 | 59 | 2500 | 0,30 |
| | 300 | 58 | 2650 | 0,36 |
| | 350 | 58 | 2740 | 0,40 |
| | 400 | 58 | 2840 | 0,44 |
| | 450 | 58,5 | 2750 | 0,40 |
| | 500 | 60 | 2500 | — |
| | 550 | 58 | — | — |
| | X12 (970 °C; HRC 65) | 180 | 63 | 2150 |
| 200 | | 62 | 2170 | 0,10 |
| 250 | | 60 | 2200 | 0,16 |
| 300 | | 59 | 2170 | 0,14 |
| 350 | | 58 | 2150 | 0,25 |
| 400 | | 57,5 | 2050 | 0,35 |
| 450 | | 56,5 | 1950 | 0,10 |
| 500 | | 55 | 1850 | — |
| 550 | | 46 | — | — |
| X12Ф1 (1040 °C; HRC 63) | | 150 | 63 | 2450 |
| | 200 | 61,5 | 2500 | 0,25 |
| | 250 | 60 | 2550 | 0,25 |
| | 300 | 59 | 2580 | 0,30 |
| | 350 | 58,5 | 2600 | 0,35 |
| | 400 | 58 | 2850 | 0,65 |
| | 450 | 57,5 | 3100 | 0,75 |
| | 500 | 57,5 | 3000 | 0,35 |
| | 550 | 49 | — | — |
| | X12MФ (1020 °C; HRC 64) | 150 | 63 | 2550 |
| 200 | | 62 | 2650 | 0,4 |
| 250 | | 61 | 2750 | 0,57 |
| 300 | | 59,5 | 2920 | 0,64 |
| 350 | | 59 | 3100 | 0,60 |
| 400 | | 58,5 | 3030 | 0,50 |
| 450 | | 58 | 2950 | 0,40 |
| 500 | | 59 | 2900 | 0,30 |
| 550 | | 51 | — | — |

Продолжение табл. 40

| Сталь (рекомендуемая температура закалки, твердость) | Температура отпуска, °С | HRC | σ_H , МПа | α_H , МДж/м ² (ненадрезанный образец) |
|--|-------------------------|------|------------------|---|
| Х6ВФ (1000 °С; HRC 65) | 150 | 63 | — | — |
| | 200 | 60 | 3100 | 0,85 |
| | 250 | 59 | — | 1,00 |
| | 300 | 58 | 3520 | — |
| | 350 | 58 | — | — |
| | 400 | 58 | 3400 | 0,80 |
| | 450 | 55 | — | — |
| | 500 | 54 | 3520 | 0,60 |
| | 550 | 53 | — | — |
| 600 | 52 | 3500 | 0,80 | |

с другими сталями объясняется ее большей карбидной неоднородностью.

Стали типа Х12, Х12МФ, Х12Ф1, Х12ВМФ иногда обрабатывают на вторичную твердость с целью повышения теплостойкости. Обработка (закалка от 1110—1140 °С с последующим четырех- или пятикратным отпуском) при 490—530 °С или с обработкой холодом и одно-двукратным отпуском применима только для малонагруженных штампов, поскольку закалка от столь высоких температур приводит к росту зерна на три-четыре балла, а отпуск или обработка холодом — к распаду остаточного аустенита. Небольшой эффект вторичного твердения после закалки от обычных температур наблюдается только у сталей Х12ВМФ и Х12МФ (см. табл. 40), что обеспечивает им большую теплостойкость по сравнению со сталью Х12. Обработку холодом сталей типа Х12 применяют редко. Вследствие распада остаточного аустенита она повышает твердость, но одновременно и склонность к хрупкому разрушению. Ее целесообразно использовать для получения высокой твердости в массивных штампах. Охлаждение во избежание образования трещин проводят замедленно.

Минимальную деформацию инструмента получают после следующих обработок.

1. Проведение перед окончательной термической обработкой улучшения по режиму: закалка от 880—900 °С, выдержка после нагрева 20—30 мин, масло + отпуск при 620—640 °С, 2—3 ч, воздух.
2. Закалка от температур на 20—30 °С выше, чем при обработке на первичную твердость, для повышения содержания остаточного аустенита (см. табл. 39) + отпуск при 450—480 °С с такой кратностью (1—3 раза), которая обеспечит требуемые размеры (тепловая водка) [18].
3. Двухступенчатая закалка; например, для стали Х12МФ охлаждение с температуры закалки 1050 °С проводят в печи, имеющей температуру 850 °С (межкритический интервал 810—860 °С) и выдерживают 8 мин (чтобы не допустить чрезмерного снижения твердости и вязкости из-за выделения вторичных карбидов и их коагуляции). Затем следует перенос в печь, нагретую до 400—450 °С (интервал максимальной устойчивости аустенита), выдержка 20—40 мин, охлаждение на воздухе [18].

Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки и свойства сталей высокой износостойкости приведены в табл. 41, а их применение — в табл. 42.

41. Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей высокой износостойкости [10]

| Сталь | Закалка | | | Отпуск | | | | |
|--------|------------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|----------------|------------------|---------------------------------|
| | Температура аустенизации, °С | Охлаждающая среда | HRC | Температура отпуска, °С | Время, ч | HRC | σ_H , МПа | α_H , МДж/м ² |
| Х6Ф4М | 980—1010 1140—1160 | Масло | 62—64 61—62 | 170—190 550 | 1,5 Трехкратный по 1 ч | 60—62 62—64 | 2900 3100 | 0,25—0,30 0,45—0,70 |
| | | | | | | | | |
| Х12ВМФ | 1000—1030 | Масло | 63—64 | 170—180 320—350 | 1,5 1,5 | 62—63 58—59 | 2400 2600 | 0,20—0,30 0,25—0,40 |
| | | | | | | | | |
| Х12 | 950—980 | Масло | 63—65 | 170—200 300—350 | 1,5 1,5 | 60—62 57—58 | 2150 2200 | 0,15—0,20 0,20—0,30 |
| | | | | | | | | |
| Х12Ф1 | 1030—1050 | Масло, селитра | 62—64 | 170—200 400—420 | 1,5 1,5 | 60—62 56—58 | 2500 3000 | 0,25—0,30 0,50—0,60 |
| | | | | | | | | |
| Х12МФ | 1000—1030 | Масло, селитра | 62—64 | 170—200 320—350 | 1,5 1,5 | 60—62 56—58 | 2600 3100 | 0,50—0,60 0,40—0,50 |
| | | | | | | | | |
| Х6ВФ | 980—1000 | Масло, щелочь, селитра | 63—65 | 150—170 280—300 | 1,5 1,5 | 60—62 56—58 | 3000 3500 | 0,70—0,80 0,90—1,00 |
| | | | | | | | | |

Примечания: 1. Температура нагрева инструмента перед аустенизацией 650—700 °С.
2. Ударная вязкость определена по результатам испытаний образцов без надреза.

42. Рекомендуемые области применения сталей высокой износостойкости [4, 9, 10, 16]

| Сталь | Область применения |
|-----------------|--|
| X6Ф4М | Матрицы для прессования абразивных и твердых металлических порошков, пуансоны, вырубные и отрезные штампы для трудно-деформируемых материалов, шлифуемые кубическим нитридом бора и работающие при давлении 1500—1700 МПа |
| X12, X12ВМФ | |
| X12МФ, X12Ф1 | |
| X6ВФ | |
| | Волочильные доски и волокнистые материалы для калибровки пружинного металла под накатку резьбы, гибочные и формовочные штампы сложной формы, матрицы и пуансоны вырубных и просечных штампов. Рабочая часть должна быть округлой формы, недопустима работа с ударами. Из стали X12ВМФ делают штампы более крупные и более сложной формы, чем из стали X12, которую целесообразно использовать в сечениях до 40—50 мм |
| | То же, что и для стали X12, но когда требуется большая вязкость; профилировочные рамки сложной формы; секции кузовных штампов сложных форм; сложные дыропрошивочные матрицы при формовке листового материала; матрицы и пуансоны вырубных и просечных штампов сложной конфигурации; пуансоны и матрицы холодного выдавливания, работающие при давлении до 1500—1700 МПа |
| | Матрицы и пуансоны холодного прессования, работающие при давлении до 1400—1600 МПа; резьбо- и зубонакатной инструмент |

43: Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей с высокими сопротивлением смятию и теплостойкостью

| Сталь (рекомендуемые температура закалки, твердость после закалки) | Температура отпуска, °С | HRC | $\sigma_{н}$, МПа | $a_{н}$, МДж/м ² (ненадрезанный образец) |
|--|-------------------------|-----|--------------------|--|
|--|-------------------------|-----|--------------------|--|

Однократный отпуск 1,5 ч

| | | | | |
|--------------------------------|-----|------|------|------|
| 8X4B2MΦC2 (1075 °С; HRC 64) | 170 | 62,0 | 3000 | — |
| | 200 | 60,5 | 3330 | 0,35 |
| | 250 | 58,0 | 3700 | 0,45 |
| | 300 | 57,2 | 3900 | 0,90 |
| | 350 | 57,6 | 3750 | 1,05 |
| | 400 | 58,5 | 3500 | 0,70 |
| | 450 | 59,7 | 3200 | 0,45 |
| | 480 | 61,0 | 3180 | 0,40 |

Трехкратный отпуск по 1 ч

| | | | | |
|--|-----|------|------|------|
| | 500 | 61,4 | 3200 | 0,35 |
| | 520 | 62,2 | 3250 | 0,30 |
| | 540 | 61,8 | 3500 | 0,40 |
| | 560 | 61,5 | 3800 | 0,44 |

Продолжение табл. 43

| Сталь (рекомендуемые температура закалки, твердость после закалки) | Температура отпуска, °С | HRC | $\sigma_{н}$, МПа | $a_{н}$, МДж/м ² (ненадрезанный образец) |
|--|-------------------------|-----|--------------------|--|
|--|-------------------------|-----|--------------------|--|

Однократный отпуск 1,5 ч

| | | | | |
|----------------------------------|-----|------|------|------|
| 11X4B2MΦ3C2 (1060 °С; HRC 62) | 170 | 61,0 | 3800 | 0,50 |
| | 200 | 60,0 | 4000 | 0,57 |
| | 250 | 58,0 | 4200 | 0,74 |
| | 300 | 57,5 | 4300 | 0,78 |
| | 350 | 57,0 | 4200 | 0,75 |
| | 400 | 57,5 | 4000 | 0,64 |
| | 450 | 58,5 | 3600 | 0,37 |

Трехкратный отпуск по 1 ч

| | | | | |
|--|-----|------|------|------|
| | 500 | 60,4 | 3600 | 0,30 |
| | 520 | 61,0 | 3800 | 0,30 |
| | 540 | 59,5 | 3900 | 0,30 |
| | 560 | 57,6 | 4100 | 0,30 |
| | 580 | 55,0 | — | 0,30 |

Однократный отпуск 1 ч

| | | | | |
|-------------------|-----|------|------|------|
| (1090 °С; HRC 62) | 170 | 60,2 | 3200 | 0,35 |
| | 200 | 58,8 | 3600 | 0,40 |
| | 250 | 57,7 | 3600 | 0,60 |
| | 300 | 56,7 | 3670 | 0,65 |
| | 350 | 56,4 | 3700 | 0,60 |
| | 400 | 57,0 | 3500 | 0,45 |
| | 450 | 58,5 | 3100 | 0,30 |

Трехкратный отпуск по 1 ч

| | | | | |
|--|-----|------|------|------|
| | 500 | 61,0 | 3300 | 0,22 |
| | 520 | 62,0 | 3400 | 0,24 |
| | 540 | 60,2 | 3600 | 0,26 |
| | 560 | 58,6 | 3700 | — |
| | 580 | 56,3 | — | — |

Стали с высоким сопротивлением смятию и высокой теплостойкостью (8X4B2MΦC2 и 11X4B2MΦ3C2) относятся к мартенситному классу и ледебуритной группе. Эти стали комплексно-легированные и имеют по сравнению со сталями высокой износостойкости пониженное содержание углерода и хрома (см. табл. 34). Поэтому количество карбидной фазы (и особенно крупных избыточных карбидов) в них меньше (10—18%), а степень дисперсности выше. Это обеспечивает получение высоких механических свойств и лучшей технологичности. По износостойкости сталь 8X4B2MΦC2 близка к сталям X12МФ и X12Ф1, а сталь 11X4B2MΦ3C2 превосходит их.

Термическую обработку сталей проводят обычно на вторичную твердость для получения хорошей теплостойкости (520—540 °С), об уровне которой можно судить по изменению твердости при отпуске (табл. 43). Необходимость использования высоких температур закалки связана с высокой термостойкостью карбидов M_6C и MC , растворяющихся выше 1050 °С. После закалки в структуре сохраняется 6—12% карбидов, что позволяет получить зерно аустенита 10—12%. Количество остаточного аустенита после закалки 20—30%.

При отпуске на вторичную твердость количество карбидов (очень дисперсных) увеличивается до 12—18%, а ко-

44. Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей с высокими сопротивлением смятию и теплостойкостью [10]

| Сталь | Закалка | | Отпуск | | | | | | |
|-------------|------------------------------|-------|--------------------|----------------------------------|----------------|------------------------|---|-----------------|--------------|
| | Температура аустенизации, °С | HRC | Температура, °С | Время, ч | HRC | σ_B , МПа | α_n , МДж/м ² (пеналразный образец) | $\sigma_{0,05}$ | |
| | | | | | | | | МПа | |
| 8Х4В2МФС2 | 1060—1090 | 62—64 | 530—540 | Трехкратный по 1 ч | 62—63 | 3700—3800 | 0,40—0,60 | 2700—2800 | 2200—2300 |
| 11Х4В2МФ3С2 | 1000—1030 | 60—62 | 200—220 320—350 | 2,5 2,5 | 60—62 56—58 | 3400—3700 3800—4000 | 0,50—0,60 0,68—0,80 | 2500 2400 | 2100 2000 |
| | 1050—1070 | 60—62 | 540 | Трехкратный по 1 ч | 59—61 | 3600—3800 | 0,45—0,50 | 2700 | 2150 |
| | 1080—1100 | 60—62 | 540 °С | Трехкратный по 1 ч + 500 °С, 1 ч | 61—62 | 3400—3600 | 0,30—0,40 | 2800 | 2250 |

Примечания: 1. Температура нагрева инструмента перед аустенизацией 650—700 °С.
2. Охлаждающая среда при закалке — масло.

личество остаточного аустенита уменьшается до 2—3 %, чем и объясняется сильное упрочнение при отпуске на 500—540 °С. Сталь 11Х4В2МФ3С2 можно обрабатывать и на первичную твердость.

Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки и свойства сталей с высоким сопротивлением смятию и высокой теплостойкостью приведены в табл. 44, а их применение — в табл. 45.

Высокопрочные стали с повышенной ударной вязкостью (6Х4М2ФС, 6Х6В3МФС и 7ХГ2ВМФ) относятся к мартенситному классу и эвтектоидной группе (см. табл. 34). Стали имеют небольшое количество избыточных карбидов и характеризуются их равномерным распределением, вследствие чего почти полностью отсутствует анизотропия деформации в прокате сечением до 100 мм. В сталях 6Х4М2ФС и 6Х6В3МФС основной карбид $M_{23}C_4$, а в стали 7ХГ2ВМФ избыточными являются карбиды M_3C и MC . Благодаря малой объемной доле карбидной фазы износостойкость сталей понижена. Прокалываемость сталей высокая (до 100 мм при охлаждении на воздухе и до 150—200 мм при охлаждении в масле). Вследствие сохранения повышенного количества остаточного аустенита после закалки (до 18—20 %) стали мало деформируются, но чувствительны к образованию шли-

фовочных трещин. Поэтому их целесообразно шлифовать до закалки.

Лучшее сочетание свойств стали 6Х4М2ФС и 6Х6В3МФС приобретают при обработке на вторичную твердость, а сталь 7ХГ2ВМФ на первичную (табл. 46). Поэтому стали 6Х4М2ФС и 6Х6В3МФС более теплостойкие (до 450—500 °С), износостойкие, лучше сопротивляются смятию. Низкая твердость этих сталей в отожженном состоянии (НВ 1600 МПа) позволяет изготавливать инструмент холодной пластической деформацией.

Теплостойкость стали 7ХГ2ВМФ ограничивается 250 °С. Отпуск при 300—350 °С вызывает развитие хрупкости первого рода.

Для уменьшения деформации стали 7ХГ2ВМФ и снижения параметра шероховатости поверхности при резании перед окончательной термической обработкой проводят закалку из межкритического интервала от 770—780 °С и отпуск при 525—600 °С на твердость HRC 28—30. В результате можно отказаться от шлифования. Возможно совмещение отпуска с азотированием (при 520 °С в течение 12 ч; твердость HRC 63—64).

Свойства всех сталей зависят (меньше для 6Х4М2ФС) от химического состава в пределах марочного.

Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки,

45. Рекомендуемые области применения сталей с высокими сопротивлением смятию и теплостойкостью [10]

| Сталь | Область применения |
|-------------|--|
| 8Х4В2МФС2 | Матрицы и пуансоны штампов холодного объемного деформирования, испытывающие в процессе эксплуатации давление до 2300 МПа, резбонакатные ролики Вырубные штампы, в том числе для обработки холоднокатаных электротехнических сталей с покрытиями типа «карлиг»; пуансоны и матрицы холодновысадочных автоматов; пуансоны и выталкиватели для холодного выдавливания, эксплуатируемые при давлениях до 2000 МПа в условиях повышенного износа и нагрева рабочих поверхностей до 400 °С; шлице- и резбонакатной инструмент |
| 11Х4В2МФ3С2 | |

46. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью

| Сталь (рекомендуемая температура закалки, твердость после закалки) | Температура, °С | HRC | σ_H , МПа | a_H , МДж/м ² (неадресный образец) |
|--|-----------------|-----------|------------------|---|
| Трехкратный отпуск по 1 ч | | | | |
| 6Х4М2ФС (1060 °С; HRC 62) [5] | 450 | 56,5 | 3600 | 2,1 |
| | 500 | 59 | 4000 | 1,6 |
| | 525 | 61 | 4200 | 1,2 |
| | 550 | 59,5 | 4400 | 1,5 |
| | 560 | — | 4800 | 1,9 |
| | 590 | 56,5 | 4000 | 3,0 |
| Однократный отпуск 1,5 ч | | | | |
| 6Х6В3МФС (1060 °С; HRC 62,5) [10] | 200 | 61,7 | 4000 | 1,6 (21% $A_{ост}$) |
| | 250 | 58,0 | — | — |
| | 300 | 56,5 | 3950 | 1,6 |
| | 350 | 56,0 | 3800 | — |
| | 400 | 56,5 | 3600 | 1,4 |
| | 450 | 57,5 | 3600 | — |
| | 480 | 58,5 | 3600 | 1,2 |
| | 525, 2 ч | 59,0—59,5 | 4100 | 1,5 (7% $A_{ост}$) |
| | 550, 2 ч | 59—60 | 4700 | 1,9 (3% $A_{ост}$) |
| 575, 2 ч | 57—58 | 4050 | 2,1 | |
| Трехкратный отпуск по 1 ч | | | | |
| 7ХГ2ВМФ (860 °С; HRC 62) [10] | 500 | 59,0 | 3600 | 1,25 |
| | 520 | 59,5 | 4000 | 1,30 |
| | 540 | 59,0 | 4150 | 1,35 |
| | 560 | 56,5 | 4000 | 1,30 |
| | — | — | — | — |
| 7ХГ2ВМФ (860 °С; HRC 62) [10] | 150 | 61 | 2800 | 0,6 |
| | 200 | 59 | — | — |
| | 250 | 58 | 3180 | 0,8 |
| | 300 | 57 | 3100 | 0,6 |
| | 350 | 55 | 3000 | 0,6 |
| | 400 | 53 | 3000 | 1,0 |
| | 450 | 51 | — | — |
| 480 | 50 | — | — | |

Примечания: 1. Свойства указаны для поковок диаметром 25 мм.
2. Для стали 7ХГ2ВМФ при прокате диаметром 50 мм и твердости HRC 60 $\sigma_H = 2000 \div 2500$ МПа, а при твердости HRC 57—58 $\sigma_H = 2500 \div 2600$ МПа.
3. $A_{ост}$ — аустенит остаточный.

свойства и применение высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью приведены в табл. 47 и 48.

Инструменты холодного деформирования, работающие в условиях динамического нагружения с изнашиванием или смятием, но без высоких давлений, изготавливают из сталей 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С, 5ХВ2СФ, 6ХВ2С, 6ХВГ, 6ХЗМФС (см. табл. 34).

Стали относятся к перлитному классу; при содержании 0,4—0,5 % С — к дозвлектоидной группе, а при содержании 0,6 % С — к заэвлектоидной. Основной карбидной фазой является легированный цементит. Высокая вязкость достигается при отсутствии или минимальном количестве избыточных карбидов. Допустимы избыточные карбиды МС, задерживающие рост зерна. Образование карбидов M_7C_3 и M_6C (при повышенной легированности) снижает вязкость. Карбидная ликвация наблюдается в сталях с вольфрамом при 0,6 % С в прокате сечением более 50—60 мм.

В сталях этой группы для повышения вязкости и износостойкости, а также уменьшения деформации целесообразно сохранять значительное количество остаточного аустенита (до 20—25 %). Однако уменьшение твердости инструмента, работающего со значительными ударными нагрузками, допустимо только до HRC 45—48, а работающего при меньших динамических нагрузках — до HRC 55—57. Необходимое количество аустенита высокой устойчивости (до минус 40—60 °С) при твердости HRC 48—55 получают даже в сечениях 50—60 мм при использовании изотермической закалки. Изотермическую закалку в горячих средах проводят при 250—300 °С (выше M_H). Для получения твердости HRC 55—50 достаточно выдержка 30—40 мин (табл. 49).

Твердость HRC 58—60 достигается после непрерывной или ступенчатой закалки (количество остаточного аустенита до 9—10 %). Прокаливаемость сложнoleгированных сталей при охлаждении в масле 70—80 мм, хромокремнистых 50—60 мм.

Температуру отпуска инструментов выбирают с учетом того, что нагрев

47. Режимы окончательной термической обработки и свойства высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью [10, 16]

| Сталь | Закалка | | | Отпуск | | | | |
|----------|--------------------------------|------------------------|-------|---------------------------|--------------------|----------------|------------------|---|
| | Температура аустенитизации, °С | Охлаждающая среда | HRC | Температура, °С | Время, ч | HRC | σ_H , МПа | a_H , МДж/м ² (неадресный образец) |
| 6Х4М2ФС | 1060—1075 | Масло, воздух | 60—62 | 520—540 | Трехкратный по 1 ч | 58—61 | 4000—4200 | 1,20—1,40 |
| 6Х6В3МФС | 1050—1070 | Селитра, масло, воздух | 60—62 | 550 °С, 2 ч + 490 °С, 2 ч | Трехкратный по 1 ч | 58—60 | 3700—4000 | 0,80—1,20 |
| 7ХГ2ВМФ | 850—870 | Воздух, масло | 61—62 | 150 220 | 1,5 1,5 | 59—60 57—58 | 2800 3000 | 0,60 0,80 |

Примечание. Температура нагрева инструмента перед аустенитизацией 650—700 °С.

48. Рекомендуемые области применения высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью [10, 16]

| Сталь | Область применения |
|----------------------|---|
| 6X4M2ФС, 6X6B3MФС | Высодочные пуансоны и матрицы, ножи трубоабразубочных машин и гильотинных ножниц для резки высокопрочных сталей и сплавов; чеканочные штампы по твердым металлам; резбонакатные ролики, зубонакатники, шлиценкатники, обрезные матрицы, пуансоны и другие инструменты, работающие в условиях значительных динамических нагрузок при давлении до 1500 МПа; зубила и долота для обработки твердых металлов, иглы-пуансоны для пробивки мелких отверстий в листах из прочных металлов. Заменяют быстрорежущие стали при изготовлении штампов холодного выдавливания, матриц прессования, работающих при высоких давлениях, но когда не требуется высокая износостойкость |
| 7XГ2ВМФ | Крупные и сложные инструменты для прецизионной вырубki, пробивки, вытяжки и формовки изделий из цветных сплавов и низкоуглеродистых сталей |

в интервале 270—400 °С вызывает развитие отпускной хрупкости первого рода со снижением вязкости. Для

49. Влияние выдержки при 260 °С стали 6XС и при 280 °С стали 6XB2С на твердость и вязкость [6]

| Вы- держка, мин | Сталь 6XС (закалка от 860 °С) | | Сталь 6XB2С (закалка от 960 °С) | |
|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| | HRC | KCU, МДж/м ² | HRC | KCU, МДж/м ² |
| 5 | 57 | 0,12 | — | — |
| 10 | 53 | 0,29 | — | — |
| 15 | 52 | 0,36 | 53 | 0,49 |
| 30 | 52 | 0,36 | 52 | 0,51 |
| 60 | 52 | 0,36 | 52 | 0,48 |

стали 6XС она возникает при отпуске 300—350 °С, для стали 6XB2С — при 300—400 °С, для стали 6X3ФС — при 350—400 °С. Желательно выполнять отпуск либо ниже, либо выше указанных температур.

Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки с использованием непрерывной закалки, а также влияние температуры отпуска на механические свойства сталей для ударных инструментов представлены в табл. 50 и 51.

Вольфрамкремниевые стали чувствительны к обезуглероживанию, и поэтому требуется защита при нагреве под закалку.

Механические свойства сталей для ударных инструментов в зависимости от температуры испытаний приведены в табл. 52, а рекомендуемые области применения — в табл. 53.

50. Режимы окончательной термической обработки сталей для ударных инструментов [10]

| Сталь | Закалка | | Отпуск | |
|--------|--------------------------------|-------|--------------------|----------------|
| | Температура аустенитизации, °С | HRC | Температура, °С | HRC |
| 4XС | 880—900 | ≥57 | 240—270 | 52—55 |
| 6XС | 840—860 | 55—59 | 240—270 | 52—55 |
| 4XB2С | 860—900 | ≥53 | 200—250 430—470 | 53—58 45—50 |
| 5XB2СФ | 860—900 | ≥55 | 200—250 430—470 | 53—58 45—50 |
| 6XB2С | 860—900 | ≥57 | 200—250 430—470 | 53—58 45—50 |
| 6XBГ | 850—900 | ≥57 | 200—250 450—480 | 53—56 44—47 |
| 6X3ФС | 980—1020 | 56—60 | 180—200 | 57—59 |

Примечания: 1. Температура нагрева инструмента перед аустенитизацией 650—700 °С.

2. Охлаждение с температуры аустенитизации в масле.

3. Охлаждение после отпуска на воздухе.

4. Отпуск для предотвращения образования трещин осуществляется непосредственно после закалки.

51. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей для ударных инструментов [10]

| Сталь (температура закалки, твердость) | Температура отпуска, °С | HRC | σ _{0,2} | σ _B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|--|-------------------------|-----|------------------|----------------|----|----|----------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 4XС (900 °С; HRC 53) | 200 | 53 | 1700 | 2100 | 9 | 34 | 0,43 |
| | 250 | 53 | 1700 | 2100 | 9 | 34 | 0,43 |
| | 300 | 52 | 1700 | 2030 | 7 | 36 | 0,44 |
| | 400 | 48 | 1530 | 1730 | 9 | 42 | 0,42 |
| | 500 | 40 | 1270 | 1370 | 14 | 47 | 0,43 |
| 6XС (880 °С, HRC 58) | 200 | 57 | 2100 | 2400 | 1 | — | 0,22 |
| | 250 | 56 | 2000 | 2150 | 1 | — | 0,24 |
| | 300 | 55 | 1960 | 2100 | 1 | 20 | 0,20 |
| | 350 | 53 | 1900 | 2050 | 3 | 19 | 0,22 |

Продолжение табл. 51

| Сталь (температура закалки, твердость) | Температура отпуски, °С | HRC | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|--|--------------------------|-----|----------------|------------|----------|--------|-------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 6XC (880 °С, HRC 58) | 400 | 50 | 1780 | 1960 | 4 | 25 | 0,40 |
| | 450 | 48 | 1600 | 1700 | 5 | 26 | 0,45 |
| | 500 | 42 | 1250 | 1440 | 9 | 30 | 0,54 |
| 4XB2C (880 °С; HRC 54) | 200 | 53 | 1740 | 1950 | 4 | 35 | 0,23 |
| | 250 | 52 | 1700 | 1880 | 5 | 35 | 0,22 |
| | 300 | 51 | 1650 | 1800 | 6 | 35 | 0,21 |
| | 350 | 50 | 1540 | 1720 | 7 | 36 | 0,24 |
| | 400 | 48 | 1450 | 1630 | 8 | 37 | 0,28 |
| | 450 | 45 | 1380 | 1520 | 9 | 39 | 0,32 |
| | 500 | 41 | 1270 | 1400 | 10 | 40 | 0,36 |
| 5XB2CF (880 °С; HRC 57) | 200 | 54 | 1830 | 2000 | 2 | 15 | 0,15 |
| | 250 | 53 | 1800 | 1920 | 4 | 17 | 0,16 |
| | 300 | 52 | 1770 | 1860 | 5 | 20 | 0,17 |
| | 350 | 51 | 1660 | 1800 | 6 | 22 | 0,18 |
| | 400 | 50 | 1560 | 1700 | 8 | 25 | 0,20 |
| | 450 | 46 | 1420 | 1600 | 9 | 27 | 0,22 |
| | 500 | 44 | 1330 | 1500 | 10 | 30 | 0,24 |
| 6XB2C (880 °С; HRC 61) | 200 | 58 | 1960 | 2150 | 2 | 10 | 0,10 |
| | 250 | 57 | 1910 | 2040 | 2 | 11 | 0,15 |
| | 300 | 54 | 1870 | 1950 | 4 | 12—28 | 0,20 |
| | 350 | 52 | 1770 | 1880 | 5 | 15—26 | 0,20 |
| | 400 | 50 | 1650 | 1770 | 5 | 17—26 | 0,22 |
| | 450 | 47 | 1600 | 1700 | 7 | 19—31 | 0,23 |
| | 500 | 42 | 1550 | 1640 | 9 | 20—33 | 0,25 |
| | 550 | 40 | 1440 | 1520 | 9 | 26 | 0,27 |
| 6XBГ (870 °С; HRC ≥ 57) | 200 | 55 | 1850 | 1870 | 2 | 2 | 0,25 |
| | 300 | 54 | 1740 | 2040 | 0 | 5 | 0,13 |
| | 400 | 50 | 1500 | 1750 | 6 | 25 | 0,20 |
| | 450 | 44 | 1470 | 1600 | 10 | 36 | 0,45 |
| | 500 | 37 | 1300 | 1440 | 10 | 30 | 0,30 |
| | 550 | 32 | 1180 | 1300 | 11 | 20 | 0,42 |
| | 6X3MFC (1000 °С; HRC 59) | 150 | 58 | — | — | — | — |
| 200 | | 57 | — | — | — | — | 0,30 |
| 250 | | 56 | — | — | — | — | 0,35 |
| 300 | | 55 | — | — | — | — | 0,35 |
| 350 | | 54 | — | — | — | — | 0,35 |
| 400 | | 52 | — | — | — | — | 0,32 |
| 450 | | 51 | — | — | — | — | — |
| 500 | | 50 | — | — | — | — | 0,30 |

52. Влияние температуры испытаний на механические свойства сталей для ударных инструментов [5, 10]

| Сталь | Температура испытаний, °С | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|---|---|----------------|------------|----------|--------|-------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Закалка от 880 °С, масло + отпуск 250 °С, 2 ч | | | | | | |
| 6XC | -60 | — | — | — | — | 0,21 |
| | -20 ÷ +150 | — | — | — | — | 0,25 |
| Изотермическая закалка от 880 °С при 250 °С | | | | | | |
| 6XC | -60 | — | — | — | — | 0,11 |
| | -20 | — | — | — | — | 0,12 |
| | +20 | — | — | — | — | 0,35 |
| | +60 | — | — | — | — | 0,50 |
| | +100 ÷ +200 | — | — | — | — | 0,55 |
| | Закалка от 880 °С, масло + отпуск 430 °С, 2 ч | | | | | |
| 4XB2C | 20 | 1350 | 1450 | 9 | 35 | 0,30 |
| | 200 | 1360 | 1460 | 11 | 48 | 0,45 |
| | 300 | 1370 | 1470 | 14 | 49 | 0,42 |
| | 400 | 1280 | 1400 | 15 | 60 | 0,40 |
| | 500 | 1130 | 1150 | 15 | 60 | 0,43 |
| | 550 | 800 | 960 | 17 | 66 | 0,50 |
| | 600 | 600 | 600 | 20 | 80 | 0,90 |
| | 650 | 300 | 400 | 23 | 86 | 1,15 |
| Закалка от 880 °С, масло + отпуск 450 °С, 2 ч | | | | | | |
| 5XB2CF | 20 | 1600 | 1700 | 6 | 15 | 0,28 |
| | 300 | 1480 | 1570 | 6 | 20 | 0,32 |
| | 400 | 1280 | 1360 | 10 | 45 | 0,24 |
| | 450 | 1200 | 1300 | 9 | 45 | 0,22 |
| Закалка от 880 °С, масло + отпуск 250 °С, 2 ч | | | | | | |
| 6XB2C | -60 | — | — | — | — | 0,20 |
| | -20 | — | — | — | — | 0,22 |
| | +20 | — | — | — | — | 0,24 |
| | +60 | — | — | — | — | 0,30 |
| | +100 | — | — | — | — | 0,34 |
| | +200 | — | — | — | — | 0,36 |
| Закалка от 880 °С, масло + отпуск 450 °С, 2 ч | | | | | | |
| 6XB2C | 20 | 1700 | 1820 | 7 | 16 | 0,25 |
| | 300 | 1440 | 1650 | 8 | 10 | 0,26 |
| | 400 | 1280 | 1440 | 10 | 47 | 0,23 |
| | 450 | 1100 | 1240 | 13 | 54 | 0,23 |
| Изотермическая закалка от 880 °С при 250 °С | | | | | | |
| 6XB2C | -60 | — | — | — | — | 0,35 |
| | -20 | — | — | — | — | 0,45 |
| | +20 | — | — | — | — | 0,49 |
| | +60 ÷ +150 | — | — | — | — | 0,50 |

Продолжение табл. 52

| Сталь | Температура испытаний, °С | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | КСУ, МДж/м ² |
|--|---------------------------|----------------|------------|----------|--------|-------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| Закалка от 1000 °С, масло + отпуск 150 °С, 2 ч (HRC 58) | | | | | | |
| 6ХЗМФС | -60 | — | — | — | — | 0,20 |
| | -20 ÷ +200 | — | — | — | — | 0,22 |
| Закалка от 1000 °С, масло + отпуск 250 °С, 2 ч (HRC 55,5) | | | | | | |
| | -60 | — | — | — | — | 0,30 |
| | -20 ÷ +200 | — | — | — | — | 0,32 |
| Изотермическая закалка от 1000 °С при 250 °С (HRC 52) | | | | | | |
| | -60 | — | — | — | — | 0,52 |
| | -20 | — | — | — | — | 0,55 |
| | +20 ÷ +200 | — | — | — | — | 0,58 |

53. Рекомендуемые области применения сталей для ударных инструментов [5, 10]

| Сталь | Область применения |
|--------|--|
| 4ХС | Зубила, обжимки, ножницы для горячей и холодной резки |
| 6ХС | Пневматические зубила и штампы небольших размеров, рубельные ножи |
| 4ХВ2С | Пневматический инструмент, зубила, обжимки, вырубные и обрезные штампы сложной формы, работающие с повышенными ударными нагрузками |
| 5ХВ2СФ | Ножи для холодной резки металла, резбонакатные плашки, пуансоны и обжимные матрицы, деревообрабатывающий инструмент при длительной работе |
| 6ХВГ | Пуансоны сложной формы при холодной прошивке преимущественно фигурных отверстий в листовом и полосовом материале, небольшие штампы горячей штамповки при необходимости обеспечить минимальное коробление |
| 6ХЗФС | Холодновысадочные штампы, штемпели, клейма, чеканочные штампы, пуансоны, работающие с повышенными динамическими нагрузками, слесарно-монтажный инструмент |

3. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ
ДЛЯ ГОРЯЧЕГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Основные причины потери работоспособности штампов горячего деформирования — износ, смятие и разгар. Возможны также усталостное разрушение в местах высокой концентрации напряжений (чаще прессовые штампы), термошоковое разрушение при резких теплосменах (длительный перерыв в подаче смазки, заклинивание поковки), угар поверхностного слоя в результате окисления. Случаи преждевременного выхода инструмента из строя могут быть связаны с ошибками в конструкции или изготовлении штампов, неправильной эксплуатацией (низкая твердость подкладных плит, неэффективная смазка, нарушение температурного режима), неправильной термической обработкой (недостаточная вязкость), дефектами материала (недостаточное металлургическое качество, неблагоприятная ориентировка волокна, недостаточный уков слитка), отсутствием дефектоскопического контроля.

Чтобы обеспечить необходимую стойкость инструмента, стали для горячего деформирования должны иметь: 1) теплостойкость, обеспечивающую необходимое сопротивление пластической деформации (предел текучести, твердость) для сохранения формы гравюры при рабочих температурах; 2) вязкость, особенно при работе с динамическими нагрузками; 3) износостойкость; 4) разгаростойкость, т. е. сопротивление термической и термомеханической усталости; 5) окалинностойкость, определяющую скорость окислительного износа, особенно выше 600 °С; 6) прокаливаемость для достижения равнопрочности по сечению.

Любое решение о необходимом сочетании показателей свойств материала штампа является компромиссным. Правильным будет решение, учитывающее конкретные условия работы инструмента и даже ограниченного участка гравюры, которые определяют преобладающий вид повреждения.

Наибольшая стойкость штампов достигается при таком соотношении

параметров температурно-силового воздействия и свойств материала, когда выбраковка связана преимущественно с износом и только небольшим разгарообразованием на поздней стадии эксплуатации. Износ может быть окислительным (нормальным), абразивным и с заеданием (интенсивный). При неблагоприятном соотношении названных факторов происходит интенсивное смятие, раннее разгарообразование или появление крупных термошоковых трещин. Промежуточная стойкость отмечается у штампов, состояние которых к моменту выхода из строя определяется значительным разгарообразованием и истиранием при сопутствующем смятии на отдельных участках.

Наиболее сильное изменение гравюры наблюдается на участках ее поверхности (облойный мостик, бобышка), где удельные силы деформирования максимальны. Они зависят от сопротивления деформированию штампуемого материала, формы и размеров облойной щели, теплового эффекта деформации, свойств окалины, скорости деформации.

Скорости деформирования (соответствующие им средние скорости деформации указаны в скобках) для наиболее распространенных машин следующие: для гидравлических прессов 0,01—0,1 м/с (0,3—0,5 1/с), для кривошипных прессов 0,25—0,50 м/с, для винтовых пресс-молотов 0,5—1,5 м/с, для молотов 4—9 м/с (8—12 1/с). Увеличение скорости деформации при переходе от штамповки на гидравлических прессах к кривошипным повышает сопротивление деформированию в 1,3—1,5 раза, а при переходе к молотам в 2,5—3,5 раза.

Преобладающий вид повреждения может изменяться в зависимости от отношения массы штампа к массе поковки: при малом отношении — смятие, при большом — истирание. С его увеличением уменьшается средняя температура штампа и относительная толщина поверхностных слоев гравюры, прогретых до высокой температуры. Стойкость растет пропорционально этому отношению.

Смена вида повреждения наблюдается и при изменении температурного

режима штампа. Например, при недостаточном охлаждении преобладает смятие, а при избыточном резко ускоряется разгарообразование.

Неравномерная деформация снижает стойкость инструмента. Для обеспечения максимального съема поковок, учитывая тенденцию к стабилизации размеров штампа после съема определенного числа поковок, целесообразно: 1) на некоторые размеры назначать оптимальные минусовые допуски (повышение стойкости на 30—40 %); 2) применять в процессе штамповки на прессах черновой ручей; 3) использовать вставки из более стойких сталей.

Стойкость штампов снижается при увеличении массы поковки до определенного значения. Для молотовых штампов эта зависимость сильнее, чем для прессовых, и стабилизация стойкости наступает при большей массе. Поэтому при некоторой массе поковок стойкость прессовых штампов становится выше молотовых. Это объясняется более интенсивным повышением нагрузки на инструмент при штамповке на молотах из-за увеличения массы падающих частей и соответственно скорости деформирования.

Износ верхнего и нижнего штампов даже при одинаковой конфигурации различен. Гравюра нижнего штампа имеет температуру на 50—125°C выше верхнего (разница больше при штамповке массивных поковок на прессах) вследствие более продолжительного контакта с поковкой. Чтобы уравнивать условия работы, более глубокую полость располагают в верхнем штампе.

Молотовые штампы работают в условиях динамического нагружения и малого времени контакта с поковкой. Поэтому теплостойкость материала может быть принята невысокой, а вязкость и сопротивление пластической деформации (смятию) должны быть повышенными. При массе падающих частей молота до 1 т работоспособность в основном лимитируется износом, а свыше — смятием. Заметное разгарообразование проявляется при большой массе падающих частей.

По сравнению с молотовыми прессовые штампы и штампы горизонтально-ковочных машин имеют иные причины

выхода из строя. У прессовых штампов резко возрастает роль износа, особенно в случае малых деформирующих сил. При силах более 10 МН проявляются ограничения по стойкости в связи с разгарообразованием и в меньшей мере смятием. Начиная с 15 МН и более нередким становится выход инструмента из строя в результате трещин. Стойкость инструмента горизонтально-ковочных машин при малых размерах заготовки (диаметр до 50 мм) определяется скоростью изнашивания. С увеличением размера (диаметр до 150 мм) у формовочных пуансонов резко усиливается разгарообразование, становится возможным скалывание торцовых поверхностей и смятие, у прошивных пуансонов преобладает смятие и разгар у пережимных вставок — смятие.

По условиям работы и уровню основных свойств стали можно разделить на четыре основные группы: 1) умеренной теплостойкости и повышенной вязкости; 2) повышенных теплостойкости и вязкости; 3) высокой теплостойкости; 4) нетеплостойкие повышенной вязкости.

Химический состав штамповых сталей для горячего деформирования приведен в табл. 54, значения критических точек — в табл. 55, режимыковки и отжига — в табл. 56.

Стойкость штампового инструмента зависит от правильности выбора и качества выполнения термической обработки. Оборудование и режимы термической обработки крупных штампов и сменного штампового инструмента малых и средних размеров различны.

Отжиг заготовок крупных штампов (высотой 300—400 мм) с целью устранения флокеночувствительности и измельчения зерна аустенита сталей проводят при температурах 760—790°C для штампов из сталей 5XHM, 5XHB, 5XGM; 790—820°C из стали 5XNBC; 800—820°C из сталей 4XMFС, 5X2MNF; 820—840°C из стали 3X2MNF [24]. Температуры отжига других сталей указаны в табл. 56.

Время выдержки при отжиге 1 ч плюс 1,5 мин на 1 мм толщины. Температура в печи при загрузке не выше 600°C.

54. Химический состав штамповых сталей для горячего деформирования (ГОСТ 5950—73)

| Сталь | Мас. доля элемента, % | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|---|
| | C | Si | Mn | Cr | W | Mo | V | Ni | | |
| 1. Стали умеренной теплостойкости и повышенной вязкости | | | | | | | | | | |
| 5XHM | 0,50—0,60 | 0,10—0,40 | 0,50—0,80 | 0,50—0,80 | — | 0,15—0,30 | — | — | 1,40—1,80 | — |
| 5XHB | 0,50—0,60 | 0,15—0,35 | 0,50—0,80 | 0,50—0,80 | 0,40—0,70 | — | — | — | 1,40—1,80 | — |
| 5XNBC | 0,50—0,60 | 0,60—0,90 | 0,30—0,60 | 1,30—1,60 | 0,40—0,70 | — | — | — | 0,80—1,20 | — |
| 5XGM | 0,50—0,60 | 0,25—0,60 | 1,20—1,60 | 0,60—0,90 | — | 0,15—0,30 | — | — | — | — |
| 4XMFС | 0,37—0,45 | 0,50—0,80 | 0,50—0,80 | 1,50—1,80 | — | 0,90—1,20 | 0,30—0,50 | — | — | — |
| 5X2MNF (ДИ-22) | 0,46—0,53 | 0,10—0,40 | 0,40—0,70 | 1,50—2,00 | — | 0,80—1,10 | 0,30—0,50 | — | 1,20—1,60 | — |
| 3X2MNF | 0,27—0,33 | 0,15—0,40 | 0,30—0,60 | 2,00—2,50 | — | 0,40—0,60 | 0,25—0,40 | — | 1,20—1,60 | — |
| 4XHMФС | 0,35—0,42 | 0,70—1,00 | 0,15—0,40 | 1,25—1,55 | — | 0,65—0,85 | 0,35—0,50 | — | 1,20—1,60 | — |
| 2. Стали повышенной теплостойкости и вязкости | | | | | | | | | | |
| 4X5MФС | 0,32—0,40 | 0,90—1,20 | 0,20—0,50 | 4,50—5,50 | — | 1,20—1,50 | 0,30—0,50 | — | — | — |
| 4X5MФ1С (ЭП1572) | 0,37—0,44 | 0,90—1,20 | 0,20—0,50 | 4,50—5,50 | — | 1,20—1,50 | 0,80—1,10 | — | — | — |
| 4X3BMФ (ЗИ-2) | 0,40—0,48 | 0,60—0,90 | 0,30—0,60 | 2,80—3,50 | 0,60—1,00 | 0,40—0,60 | 0,60—0,90 | — | — | — |
| 3X3MФ3 | 0,27—0,34 | 0,10—0,40 | 0,20—0,50 | 2,80—3,50 | — | 2,50—3,00 | 0,40—0,60 | — | — | — |
| 4X4BMФС (ДИ-22) | 0,37—0,44 | 0,60—1,00 | 0,20—0,50 | 3,20—4,00 | — | 1,20—1,50 | 0,60—0,90 | — | — | — |
| 4X5B2ФС (ЭИ958) | 0,35—0,45 | 0,80—1,20 | 0,15—0,40 | 4,50—5,50 | 1,60—2,20 | — | — | — | — | — |
| 3. Стали высокой теплостойкости | | | | | | | | | | |
| 5X3B3MФС (ДИ-23) | 0,45—0,52 | 0,50—0,80 | 0,20—0,50 | 2,50—3,20 | 3,00—3,60 | 0,80—1,10 | 1,50—1,80 | Nb=0,05—0,15 | — | — |
| 4X2B5MФ (ЭИ959) | 0,30—0,40 | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 2,20—3,00 | 4,50—5,50 | 0,60—0,90 | 0,60—0,90 | — | — | — |
| 2X6B8M2K8 (ЭП1745) | 0,22—0,30 | 0,30—0,60 | 0,15—0,40 | 6,50—7,00 | 7,00—8,00 | 1,80—2,30 | 0,10—0,25 | Co=7,50—8,50 | — | — |
| 4. Нетеплостойкие повышенной вязкости | | | | | | | | | | |
| 7X3 | 0,65—0,75 | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 3,20—3,80 | — | — | — | — | — | — |
| 8X3 | 0,75—0,85 | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 3,20—3,80 | — | — | — | — | — | — |

Примечание. Сталь марки 4XHMФС должна содержать (по расчету) широкония в количестве 0,03—0,09 % и бора 0,002—0,004 %.

55. Критические точки (в °С) штамповых сталей для горячего деформирования [10]

| Сталь | A_{c1} | A_{c2} (A_{cm}) | A_{r2} | A_{r1} | M_n | M_k |
|-------------|----------|--------------------------|----------|----------|-------|-------|
| 5XHM | 730 | 780 | 640 | 610 | 230 | — |
| 5XHB | 730 | 780 | — | — | 205 | — |
| 5XNBC | 760 | 800 | — | — | 250 | — |
| 5XGM | 700 | 800 | — | — | 215 | — |
| 4XMΦC | 760 | 805 | 710 | 630 | 280 | 100 |
| 5X2MНФ | 740 | 815 | 730 | 650 | 210 | 40 |
| 3X2MНФ [15] | 780 | 830 | — | — | — | — |
| 4X5MΦC | 840 | 870 | 810 | 735 | 300 | 110 |
| 4X5MΦ1C | 875 | 935 | 815 | 760 | 305 | 140 |
| 4X3BMΦ | 800 | 850 | 760 | 730 | 230 | — |
| 3X3M3Φ | 815 | 875 | 820 | 760 | 340 | 155 |
| 4X4BMΦC | 830 | 910 | 750 | 670 | 255 | 105 |
| 4X5B2ΦC | 800 | 875 | 840 | 730 | 275 | 90 |
| 5X3B3MΦC | 780 | 920 | 725 | 665 | 330 | 70 |
| 4X2B5MΦ | 820 | 940 | 840 | 690 | 205 | 100 |
| 2X6B8M2K8 | 827 | 890 | — | — | 180 | — |
| 7X3 | 760 | — | — | 730 | 400 | — |
| 8X3 | 785 | 830 | 770 | 750 | 370 | 110 |

56. Режимыковки и отжига (отпуска) штамповых сталей для горячего деформирования [10]

| Сталь | Интервал ковочных температур, °С*1 | Режимы отжига (отпуска) | Твердость после отжига НВ, МПа, не более |
|--------|------------------------------------|---|--|
| 5XHM | 1180—850 | Нагрев на 700—720 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе | 2410 |
| 5XHB | | | 2550 |
| 5XNBC | 1180—850 | Нагрев на 730—750 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе | 2550 |
| 5XGM | 1180—850 | Нагрев на 680—700 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе | 2410 |
| 5X2MНФ | 1200—850 | Нагрев на 720—740 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе | 2550 |
| 3X2MНФ | 1180—850 | Нагрев на 700—720 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе | 2550 |

Продолжение табл. 56

| Сталь | Интервал ковочных температур, °С*1 | Режимы отжига (отпуска) | Твердость после отжига НВ, МПа, не более |
|---|------------------------------------|--|--|
| 4X5MΦC; 4X5MΦ1C; 4X3BMΦ; 4X5B2ΦC | 1180—850 | Нагрев на 840—860 °С, охлаждение со скоростью 40—50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе | 2410 |
| 5X3B3MΦC | | | 2290 |
| 4X2B5MΦ | | | 2410 |
| 3X3M3Φ | 1180—850 | Нагрев на 860—880 °С, охлаждение со скоростью 40—50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе | 2410 |
| 4X4BMΦC | | | 2290 |
| 2X6B8M2K8 | 1200—900 | Нагрев на 900—920 °С, охлаждение со скоростью 40—50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе | 2500 |
| 7X3 | 1160—850 | Нагрев на 790—810 °С, охлаждение со скоростью 40—50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе | 2290 |
| 8X3 | | | 2410 |

*1 Замедленное охлаждение.

Возможный режим отжига крупной заготовки: охлаждение от температуры отжига до 250—300 °С со скоростью 50 °С/ч, выдержка 10—12 ч; нагрев до 600—650 °С со скоростью 50 °С/ч, а затем до 850—870 °С со скоростью 60—70 °С/ч, выдержка 10—15 ч; охлаждение до 250—300 °С со скоростью 40 °С/ч, выдержка 8—10 ч, охлаждение на воздухе [5].

Окончательную термическую обработку крупных штампов проводят чаще после полной механической обработки, включая изготовление гравюры (доведение гравюры осуществляют абразивным инструментом после термической обработки). Очень крупные штампы высотой более 400—450 мм сначала подвергают черновой механической обработке, затем закалывают и отпускают (на твердость HRC 34—37), а после проводят чистовую механическую обработку.

Режимы закалки крупных штампов на разных заводах неодинаковые. Температура печи при загрузке может быть 300—450 °С, а при скоростном нагреве — соответствовать температуре закалки (830—880 °С).

Скорость нагрева под закалку и длительность аустенитизации можно устанавливать по нормам, указанным в табл. 57. Выдержку в масле рассчитывают так, чтобы не допустить полного охлаждения. Чтобы избежать коробления и образования трещин, еще не остывшие штампы переносят для отпуска. Очень крупные штампы охлаждают водовоздушной смесью. Температура печи при загрузке крупных штампов для отпуска не выше 300—350 °С; продолжительность нагрева и выдержки при отпуске приведена в табл. 58. Длительность выдержки можно также устанавливать из расчета 2 ч плюс 1,5 мин на 1 мм

57. Продолжительность нагрева в пламенной печи, выдержки и охлаждения штампов при закалке [22]

| Операция | Наименьшая сторона штампа, мм | | | | | |
|--|-------------------------------|--------|--------|----------------|---------------|--------|
| | 300 | 350 | 400 | 500 | 600 | 700 |
| Выдержка после загрузки в печь | 30 мин | 30 мин | 1 ч | 1 ч | 2 ч | 2 ч |
| Нагрев до температуры закалки | 8 ч | 10 ч | 11 ч | 30 мин 13 ч | 16 ч | 19 ч |
| Выдержка при температуре закалки | 30 мин 1 ч | 2 ч | 2 ч | 30 мин 3 ч | 3 ч | 4 ч |
| Подстуживание на воздухе | 50 мин | 10 мин | 30 мин | | 40 мин | 10 мин |
| Охлаждение в масле с температурой 70—75 °С | 15 мин | 15 мин | 20 мин | 25 мин | 35 мин | 40 мин |
| | 40 мин | 50 мин | 1 ч | 1 ч 20 мин | 1 ч 40 мин | 2 ч |

Примечание. Указанные нормы нагрева и выдержки при использовании электропечи увеличивают на 30 %.

58. Продолжительность нагрева и выдержка штампов при отпуске в пламенной печи [22]

| Наименьшая сторона штампа, мм | Нагрев до температуры отпуска | Выдержка при отпуске | Наименьшая сторона штампа, мм | Нагрев до температуры отпуска | Выдержка при отпуске |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 250 | 7 ч 30 мин | 1 ч 30 мин | 500 | 15 ч | 3 ч |
| 300 | 9 ч | 1 ч 50 мин | 550 | 16 ч 30 мин | 3 ч 20 мин |
| 350 | 10 ч 30 мин | 2 ч 10 мин | 600 | 18 ч | 3 ч 40 мин |
| 400 | 12 ч | 2 ч 30 мин | 700 | 21 ч | 4 ч 10 мин |
| 450 | 13 ч 30 мин | 2 ч 40 мин | | | |

Примечание. Продолжительность нагрева и выдержку в электрической печи увеличивают на 20 %.

толщины штампа. На окончательную термическую обработку сменный инструмент поступает либо с припусками для выполнения заключительного шлифования или доводки, либо без припусков.

Чтобы избежать обезуглероживания и окисления, нагрев под закалку осуществляют в камерных печах с упаковкой его в защитный материал или (для мелкого инструмента диаметром

до 170 мм и длиной 250 мм) в соляных ваннах.

Рекомендуется [15, 23] применять следующие защитные материалы: для сталей, закаливаемых от температур ниже 900 °С — измельченный, просеянный и просушенный древесный уголь (засыпают от 1/3 до 1/2 объема ящика, свободного от деталей); отработавший (при температуре не ниже 930 °С) карбюрнзатор; смесь свежей

и пережженной чугушной стружки (без масел и цветной стружки);

для сталей, закаливаемых от температур выше 900 °С, бумага (2—3 слоя) и сухой древесный уголь; карбюрнзатор, предварительно отработавший при температуре, превышающей температуру закалки на 50 °С.

Для уменьшения коробления при нагреве (особенно в ваннах) применяют промежуточный нагрев: однократный при 650—680 °С (700—750 °С) или 840—870 °С и двукратный — в обоих температурных интервалах. При медленном нагреве под закалку (в ящиках с защитным материалом) промежуточный нагрев не обязателен.

Время выдержки в камерных печах принимают из расчета 50—70 с на 1 мм толщины или подбирают экспериментально.

Время выдержки в соляных ваннах на 1 мм толщины инструмента: 18—24 с — при нагреве в интервале 650—850 °С и при окончательном нагреве в интервале 820—950 °С; 15—20 с — при окончательном нагреве в интервале 1000—1150 °С сталей с меньшим чем 1,5 % суммарным содержанием вольфрама, молибдена и вадния; 20—30 с — с содержанием их 1,5—3,0 %; 30—50 с — с содержанием их более 3 %.

Продолжительность выдержки при отпуске устанавливается по табл. 58. Загрузку для отпуска проводят в печь с температурой не выше 300—400 °С с целью уменьшения коробления. Крепежную часть инструмента дополнительно отпускают при 600—700 °С для повышения сопротивления циклическим и ударным нагрузкам.

Стали повышенной вязкости и умеренной теплостойкости (5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНВС, 5ХГМ, 4ХМФС, 4ХМНФС, 3Х2МНФ, 5Х2МНФ) относят к доэвтектоидной или эвтектоидной группе. Применяют их в основном для молотовых штампов, а также для изготовления крупных штампов, контейнеров, багдажей и матриц.

Содержание карбидобразующих элементов в сталях минимально (до 7—9 мас. долей, %), что исключает возникновение карбидной неоднородности даже в крупных сечениях. Основная карбидная фаза — цементит. В не-

больших количествах (до 3 %) могут образовываться более термостойкие карбиды $M_{23}C_6$, M_6C , MC , вызывающие вторичное твердение. Поэтому теплостойкость сталей невысокая. Стали 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНВС, 5ХГМ сохраняют предел текучести до 1000 МПа при нагреве до 350—375 °С, а стали 4ХМФС, 4ХМНФС, 3Х2МНФ, 5Х2МНФ до 400—425 °С вследствие образования карбидов $M_{23}C_6$, M_6C , MC .

Если теплостойкость сталей после окончательной термической обработки оценивать температурой дополнительного отпуска в течение 4 ч, вызывающего разупрочнение (HRC 35), то по возрастанию теплостойкости их можно расположить в следующий ряд: 5ХНМ (590 °С), 5ХНВ (600 °С), 5ХНВС (610 °С), 4ХМФС (650 °С), 5Х2МНФ (670 °С).

Максимально допустимый размер штампа из выбранной стали определяется ее прокаливаемостью и ударной вязкостью. Стали 5ХНВ и 4ХМФС используют для штампов с наименьшей стороной до 200—300 мм; стали 5ХНВС и 5ХГМ — для средних штампов с наименьшей стороной до 300—400 мм; сталь 5ХНМ и 5Х2МНФ — для крупных штампов сечением до 500 мм со сложной гравюрой; сталь 3Х2МНФ — для наиболее крупных штампов с наименьшей стороной до 400—700 мм. Твердость стали 5ХНМ в середине блока размером 300×300×400 мм лишь на HRC 1—2 ниже, чем у поверхности. Твердость стали 4ХМФС в заготовке диаметром 250—280 мм сохраняется только до глубины 50—70 мм и в середине падает на HRC 5—6.

Оптимальные температуры закалки устанавливают на основе определенного соотношения твердости и зерна аустенита (табл. 59), размер которого существенно влияет на ударную вязкость стали в отпущенном состоянии (табл. 60).

Для молотовых штампов со стороной или диаметром не более 200—250 мм при получении после закалки структуры мартенита желательно иметь зерно аустенита не крупнее 9—10. При большем размере штампов, когда образуется смешанная бейнитно-мартенситная структура, лучший

59. Влияние температуры закалки на твердость и размер зерна сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [15]

| Сталь (рекомендуемая температура закалки) | Температура закалки, °C | HRC | Зерно |
|---|---|------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | |
| 4XMFС (910—930 °C) | 850 900 950 1000 1050 1075 | 46 48 50 51,5 52 52 | 11—12 11 10 9—8 7—8 — |
| 5X2MНФ (960—980 °C) | 950 1000 1050 1100 | 59 60 61 58 | 11 10 8 7 |
| 3X2MНФ (930 °C) | 900 950 1000 1050 | 44 50 50 49 | 10—11 9—10 8 7 |

60. Зависимость ударной вязкости стали 5X2MНФ от величины зерна аустенита после закалки, моделирующей закалку с охлаждением в масле центральных зон заготовки сечением 200×200 мм (числитель) и 500×500 мм (знаменатель), и последующего отпуска на разную твердость [16]

| Зерно аустенита | Температура испытаний, °C | KCU (в МДж/м²) после отпуска на твердость HRC | | |
|-----------------|---------------------------|---|---------------------|---------------------|
| | | 41—43 | 44—46 | 47—49 |
| 11 | 20 | $\frac{0,48}{0,40}$ | $\frac{0,44}{0,25}$ | $\frac{0,36}{—}$ |
| | 600 | $\frac{1,02}{0,86}$ | $\frac{0,94}{0,75}$ | $\frac{0,80}{—}$ |
| 10 | 20 | $\frac{0,50}{0,34}$ | $\frac{0,46}{0,26}$ | $\frac{0,34}{0,20}$ |
| | 600 | $\frac{0,93}{0,75}$ | $\frac{0,86}{0,57}$ | $\frac{0,68}{0,47}$ |

Продолжение табл. 60

| Зерно аустенита | Температура испытаний, °C | KCU (в МДж/м²) после отпуска на твердость HRC | | |
|-----------------|---------------------------|---|---------------------|---------------------|
| | | 41—43 | 44—46 | 47—49 |
| 9 | 20 | $\frac{0,46}{0,26}$ | $\frac{0,42}{0,18}$ | $\frac{0,28}{0,10}$ |
| | 600 | $\frac{0,80}{0,58}$ | $\frac{0,74}{0,38}$ | $\frac{0,54}{0,32}$ |
| 8 | 20 | $\frac{0,28}{0,19}$ | $\frac{0,20}{0,08}$ | $\frac{0,14}{0,01}$ |
| | 600 | $\frac{0,50}{0,30}$ | $\frac{0,48}{0,20}$ | $\frac{0,32}{0,17}$ |

комплекс свойств достигается при зерне аустенита не крупнее 10—11.

Отпуск определяет преобладающий вид повреждения штампа, а в конечном итоге его надежность и стойкость. Температуры отпуска назначают в зависимости от габаритов штампов и условий эксплуатации. В отечественной практике принят метод назначения твердости штампов в зависимости от массы падающих частей молота (точнее, от связанного с ним размера штампа) или номинального усилия машины. Найденные многолетней практикой оптимальные соотношения между твердостью и ударной вязкостью для молотовых штампов приведены в табл. 61. Рекомендуемые режимы закалки и отпуска сталей в зависимости от размеров штампов молотов и прессов приведены в табл. 62, а температуры отпуска хвостовиков штампов — в табл. 63. Влияние температур отпуска на свойства сталей показано в табл. 64.

Образование верхнего бейнита (вместо мартенсита) при закалке штампов со стороны более 250—300 мм снижает твердость в отпущенном состоянии на HRC 2—3 и теплостойкость на 20—30 °C. При этом вязкость и пластичность сталей 5XHM, 5XНВ, 5XНВС сохраняются, а сталей 4XMFС, 3X2MНФ, 5X2MНФ уменьшаются (бейнитная хрупкость). Поэтому во избежание хрупкого разру-

шения штампы из этих сталей необходимо нагревать до 250—300 °C или отпускать на меньшую твердость для получения необходимой вязкости ($KCU = 0,35 \div 40$ МДж/м²). Влияние температуры испытаний на свойства сталей показано в табл. 65.

Средняя стойкость штампов из сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости материала составляет 1500—8000 поковок при штамповке углеродистых и низколегированных сталей. При массе поковок около 5 кг стойкость молотовых и прессовых штампов примерно одинакова. При штамповке более крупных поковок стойкость прессового инструмента выше. Для указанных выше ограничений на размеры стойкость тяжело нагруженных штампов из стали 4XMFС в 1,5—2 раза, а из стали 5X2MНФ в 1,5—2,5 раза выше, чем из стали 5XHM, вследствие их лучшей теплостойкости.

Крупные инструменты, работающие при длительном нагреве (внутренние втулки, пресс-штемпелл, иглы) и кольца-бандажии целесообразно изготавливать из стали 3X2MНФ, обладающей высокой длительной прочностью (табл. 66) и релаксационной стойкостью (табл. 67). В контейнерах из сталей 5XHM и 5XНВ невозможно создать натяг при рабочих температурах 450—500 °C. Коэффициенты линейного расширения для сталей уме-

61. Ударная вязкость сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости при рекомендуемых значениях твердости штампов для молотов с различной массой падающих частей [24]

| Рекомендуемая твердость, HRC | KCU (в МДж/м ²) для сталей | | | |
|------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | 5ХНМ | 5ХНВ | 5ХНВС | 5ХГМ |
| 41—46 <1 | 0,40—0,55 | 0,30—0,50 | 0,22—0,35 | 0,17—0,30 |
| 37—41 1—3 | 0,60—0,80 | 0,50—0,80 | 0,35—0,60 | 0,30—0,70 |
| 34—38 3—4 | 0,80—1,10 | 0,60—1,00 | 0,50—1,10 | 0,50—1,00 |
| 32—36 4—6 | 1,05—1,30 | 0,85—1,25 | 0,86—1,35 | — |
| 30—33 >6 | 1,20—1,35 | 1,10—1,30 | 1,23—1,40 | — |

62. Рекомендуемые режимы закалки и отпуска сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости в зависимости от размеров штампа [5, 16]

| Наименьший размер штампа, мм | Температура нагрева (в °C) сталей | | | | HRC |
|------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|----------|-------|
| | 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ | 4ХМФС | 3Х2МНФ | 5Х2МНФ | |
| Для молотов | | | | | |
| <300 | 820—850 | 910—930 | 910—930 | 960—980 | 40—45 |
| | 480—520 | 560—600 | 540—560 | 600—620 | |
| >300 | 820—850 | 910—930 | 910—930 | 960—980 | 38—41 |
| | 520—560 | 600—620 | 560—580 | 620—640 | |
| Для прессов | | | | | |
| <300 | 840—870 | 920—950 | 920—950 | 970—1000 | 45—47 |
| | 420—450 | 530—550 | 530—550 | 580—600 | |
| >300 | 840—870 | 920—950 | 920—950 | 970—1000 | 42—44 |
| | 450—480 | 580—600 | 540—560 | 600—620 | |

Примечания: 1. В числителе дроби — температура нагрева для закалки, в знаменателе — для отпуска.

2. Для крупных штампов при большом количестве остаточного аустенита целесообразно проведение второго отпуска при температурах на 30—40 °C ниже и по продолжительности на 25—30 % короче первого.

3. Нагрев до температуры закалки со скоростью 35—25 °C/ч для штампов высотой 250—400 мм и 24—15 °C/ч — высотой 450—700 мм.

4. Штампы со стороны до 250—300 мм, имеющие простую форму, охлаждаются в масле; сложной формы — на воздухе; при стороне свыше 300 мм режим охлаждения выбирать по табл. 57.

63. Температуры отпуска и твердость хвостовиков штампов [16]

| Наименьший размер штампа, мм | Температуры отпуска (в °C) сталей | | | | HRC |
|------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|----------------|
| | 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ | 4ХМФС | 3Х2МНФ | 5Х2МНФ | |
| <300 | 580—610 | 630—650 | 620—640 | 640—660 | 34—37 28—33 |
| >300 | 600—630 | 650—670 | 640—660 | 660—680 | |

64. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [10]

| Сталь (температура закалки, твердость) | Температура отпуска, °C | HRC | σ _{0,2} | σ _B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|--|-------------------------|------|------------------|----------------|----|----|-------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 5ХНМ (850 °C; HRC 58) | 400 | 46 | 1400 | 1600 | 10 | 40 | 0,35 |
| | 450 | 44 | 1420 | 1530 | 9 | 37 | 0,38 |
| | 500 | 42 | 1300 | 1400 | 15 | 37 | 0,46 |
| | 550 | 38 | 1200 | 1350 | 12 | 34 | 0,60 |
| | 600 | 36 | — | 1170 | 16 | 51 | 0,68 |
| 5ХНВ (870 °C; HRC 58) | 450 | 44,5 | 1300 | 1460 | 11 | 45 | 0,40 |
| | 500 | 43 | 1180 | 1350 | 12 | 46 | 0,55 |
| | 550 | 38 | 1050 | 1280 | 14 | 52 | 0,64 |
| | 600 | 34,5 | 800 | 1060 | 16 | 60 | >1,2 |
| 5ХНВС (870 °C; HRC 58) | 450 | 48 | — | 1800 | — | 28 | 0,22 |
| | 500 | 46 | — | 1580 | — | 30 | 0,25 |
| | 550 | 42 | — | 1380 | — | 36 | 0,36 |
| | 600 | 38 | 1030 | 1300 | — | 43 | 0,62 |
| 5ХГМ (850 °C; HRC 58) | 450 | 45 | 1450 | 1600 | 7 | 23 | 0,26 |
| | 500 | 41 | 1340 | 1450 | 11 | 34 | 0,30 |
| | 550 | 38 | 1240 | 1400 | 11 | 30 | 0,37 |
| | 600 | 36,5 | 1100 | 1200 | 15 | 35 | 0,46 |
| 4ХМФС (920 °C; HRC 53—55) | 300 | 48,5 | 1600 | 2100 | 10 | 40 | 0,30 |
| | 350 | 47,5 | 1430 | 1720 | 10 | 36 | 0,30 |
| | 400 | 46,5 | 1400 | 1670 | 11 | 38 | 0,33 |
| | 450 | 46,5 | 1385 | 1650 | 12 | 40 | 0,33 |
| | 500 | 46 | 1375 | 1630 | 13 | 45 | 0,40 |
| | 550 | 44 | 1365 | 1610 | 13 | 50 | 0,50 |
| | 600 | 40 | 1200 | 1280 | 14 | 52 | 0,80 |
| | 650 | 40 | 820 | 900 | 22 | 62 | 1,6 |
| 5Х2МНФ (980 °C; HRC 58—59) | 500 | 47,5 | 1460 | 1770 | 11 | 39 | 0,36 |
| | 550 | 47,5 | 1550 | 1800 | 13 | 43 | 0,40 |
| | 600 | 47,5 | 1525 | 1720 | 12 | 44 | 0,50 |
| | 650 | 43,5 | 1330 | 1430 | 13 | 48 | 0,60 |

Продолжение табл. 64

| Сталь (температура закалки, твердость) | Температура отпуски, °С | HRC | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|--|-------------------------|-----|----------------|------------|----------|--------|-------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 3Х2МНФ (930 °С; HRC 54) | 450 | 48 | 1300 | 1600 | 7 | 12 | 0,40 |
| | 500 | 48 | 1320 | 1520 | 8 | 17 | 0,70 |
| | 550 | 46 | 1340 | 1520 | 9 | 17 | 0,80 |
| | 600 | 40 | 1150 | 1220 | 10 | 25 | 1,0 |
| | 650 | 27 | 740 | 840 | 18 | 50 | 1,7 |

Примечания: 1. Отпуск в течение 2 ч.

2. Свойства оценивают на образцах, изготовленных из заготовок сечением 15Х15 мм.

65. Влияние температуры испытаний и размера сечения на механические свойства сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [8, 10]

| Сталь | Температура испытаний, °С | HRC | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU | a_n для образцов с трещиной |
|-------|---------------------------|---------|----------------|------------|----------|--------|------|-------------------------------|
| | | | МПа | | % | | | |
| 5ХНМ | 20 | 44 | 1410 | 1520 | 9 | 41 | 0,32 | 0,12 |
| | | 33 | 800 | 1040 | 10 | 42 | 0,40 | 0,04 |
| | 300 | — | 1150 | 1290 | 14 | 60 | 0,70 | 0,30 |
| | | — | 790 | 1000 | 10 | 36 | 1,20 | 0,75 |
| | 400 | 38 | 1000 | 1250 | 14 | 48 | 0,65 | — |
| | 500 | 30 | 750 | 960 | 18 | 54 | 0,45 | — |
| 600 | — | 360 | 520 | 32 | 92 | 1,60 | 0,70 | |
| | | | 490 | 560 | 21 | 49 | 2,00 | 0,70 |
| 5ХНМ | 20 | 39 | — | 1265 | 14 | 45 | 0,55 | — |
| | 200 | — | 954 | 1250 | — | 41 | 0,52 | — |
| | 400 | 33 | 829 | 1170 | — | 35 | 0,46 | — |
| | 500 | 29 | 728 | 916 | — | 64 | 0,39 | — |
| | 550 | 14 | 463 | 640 | — | 74 | 0,33 | — |
| | 600 | 1560 HB | 257 | 363 | — | 66 | 0,79 | — |
| 5ХНВ | 20 | 38 | 1050 | 1280 | 11 | 45 | 0,40 | — |
| | 200 | 37 | 1050 | 1280 | 11 | 45 | 0,57 | — |
| | 300 | 33 | 1050 | 1280 | 13 | 44 | 0,64 | — |
| | 400 | 28 | 960 | 1200 | 18 | 56 | 0,70 | — |
| | 500 | — | 900 | 1070 | 18 | 63 | 0,56 | — |
| | 600 | — | 740 | 850 | 21 | 75 | 0,75 | — |

Продолжение табл. 65

| Сталь | Температура испытаний, °С | HRC | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU | a_n для образцов с трещиной |
|--------|---------------------------|---------|----------------|------------|----------|--------|------|-------------------------------|
| | | | МПа | | % | | | |
| 5ХНВС | 20 | 38 | 1030 | 1305 | — | — | — | — |
| | 200 | — | 1030 | 1305 | — | 36 | 0,55 | — |
| | 400 | 33 | 785 | 1220 | — | 28 | 0,55 | — |
| | 500 | 29 | 700 | 900 | — | 64 | 0,45 | — |
| | 550 | 20 | 415 | 580 | — | 71 | 0,40 | — |
| | 600 | 1560 HB | 265 | 405 | — | 40,5 | 0,50 | — |
| 5ХГМ | 20 | 44 | 1450 | 1600 | 7 | 25 | 0,37 | — |
| | 400 | 35 | 1080 | 1300 | 11 | 40 | 0,44 | — |
| | 500 | 30 | 870 | 1000 | 15 | 54 | 0,37 | — |
| | 600 | 25 | 400 | 710 | 24 | 80 | 0,42 | — |
| 5ХГМ | 20 | 40 | — | 1250 | 10 | 32 | 0,43 | — |
| | 100 | 37 | 976 | 1180 | — | 37 | 0,36 | — |
| | 300 | 35 | 996 | 1152 | — | 48 | 0,65 | — |
| | 400 | 32 | 866 | 1015 | — | 62 | 0,49 | — |
| | 500 | 31 | 690 | 784 | — | 81 | 0,32 | — |
| | 600 | 21 | 410 | 435 | — | 85 | 0,38 | — |
| 4ХМФС | 20 | 45 | 1480 | 1600 | 12 | 45 | 0,45 | — |
| | 300 | — | 1260 | 1500 | 12 | 44 | 0,45 | — |
| | 400 | — | 1200 | 1440 | 13 | 47 | 0,50 | — |
| | 500 | — | 1200 | 1300 | 13 | 55 | 0,45 | — |
| | 600 | — | 970 | 1080 | 14 | 62 | 0,54 | — |
| 4ХМФС | 20 | 43 | 1350 | 1510 | 13 | 51 | 0,55 | 0,08 |
| | | 43 | 1310 | 1480 | 7 | 20 | 0,25 | 0,02 |
| | 300 | — | 1190 | 1350 | 12 | 50 | 0,65 | 0,28 |
| | | — | 1210 | 1370 | 8 | 27 | 0,55 | 0,23 |
| | 600 | — | 790 | 890 | 19 | 73 | 0,85 | 0,23 |
| | | — | 780 | 920 | 10 | 45 | 0,60 | 0,21 |
| 5Х2МНФ | 20 | 47 | 1500 | 1750 | 10 | 40 | 0,55 | — |
| | 300 | — | 1300 | 1470 | 11 | 52 | 0,65 | — |
| | 400 | — | 1140 | 1320 | 13 | 58 | 0,65 | — |
| | 500 | — | 970 | 1160 | 15 | 64 | 0,65 | — |
| | 600 | — | 800 | 1000 | 17 | 68 | 1,00 | — |
| 5Х2МНФ | 20 | 43 | 1380 | 1480 | 12 | 43 | 0,60 | 0,16 |
| | | 42 | 1290 | 1450 | 12 | 35 | 0,40 | 0,04 |
| | 300 | — | 1110 | 1270 | 13 | 55 | 0,65 | 0,33 |
| | | — | 1140 | 1320 | 14 | 48 | 0,65 | 0,40 |
| | 600 | — | 700 | 820 | 21 | 77 | 0,65 | 0,30 |
| | | — | 710 | 880 | 17 | 68 | 0,80 | 0,30 |

Продолжение табл. 65

| Сталь | Температура испытаний, °С | HRC | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU | a_n для образцов с трещиной |
|--------|---------------------------|-----|----------------|------------|----------|--------|------|-------------------------------|
| | | | МПа | | % | | | |
| 3Х2МНФ | 20 | 42 | 1300 | 1450 | 11 | 45 | 0,55 | — |
| | | | 1320 | 1470 | 10 | 40 | 0,30 | |
| | 300 | — | 1100 | 1300 | 12 | 46 | 0,80 | |
| | | | 1120 | 1320 | 12 | 45 | 0,50 | |
| | 600 | — | 860 | 1100 | 13 | 52 | 0,55 | |
| | | | 850 | 1110 | 14 | 60 | 0,60 | |

Примечание. Значения свойств, приведенных в числителе дроби, получены при испытании образцов, моделирующих закалку заготовки сечением 15×15 мм с охлаждением в масле, а в знаменателе — то же, но для центральных вог заготовки сечением 500×500 мм.

66. Длительная прочность сталей [24]

| Сталь | Температура испытания, °С | | | |
|-------------|---------------------------|------------------------|----------------|------------------------|
| | 450 | | 500 | |
| | σ , МПа | Время до разрушения, ч | σ , МПа | Время до разрушения, ч |
| 5ХНВ | 600 | 75 | 400 | 46 |
| | 550 | 304 | 350 | 244 |
| | 500 | 2171 | 300 | 366 |
| | — | — | 250 | 377 |
| Типа 4Х3ВМФ | 1000 | 29 | 1000 | 5 |
| | 900 | 53 | 900 | 12 |
| | 800 | 100 | 850 | 19 |
| | 650 | 349 | 700 | 40 |
| 4Х5В2ФС | 1150 | 94 | 950 | 106 |
| | 950 | 435 | 900 | 130 |
| | 900 | 259 | 850 | 132 |
| | — | — | 800 | 130 |
| 4Х2В5ФМ | 1150 | 140 | 1050 | 21 |
| | 1050 | 616 | 950 | 191 |
| | 1000 | 1549 | 850 | 240 |
| | 950 | 1202 | — | — |
| Типа 3Х2МНФ | 1000 | 37 | 900 | 3 |
| | 900 | 1777 | 850 | 240 |
| | 850 | 830 | 700 | 452 |
| | — | — | 650 | 944 |

67. Релаксация напряжений в сталях (в %) при 500 °С [24]

| Сталь | σ , МПа | Время, ч | | | | | |
|-------------|----------------|----------|------|------|------|---------|------|
| | | 1 | 63 | 120 | 300 | 500 | 1000 |
| 5ХНВ | 750 | 85,5 | 92,4 | 94,0 | 94,3 | 95,3 | 96,5 |
| 5ХНМ | 600 | 56,0 | — | 83,0 | — | 89,0 | 92,5 |
| Типа 4Х3ВМФ | 750 | 12,0 | 21,4 | 27,5 | 34,6 | Поломка | |
| | 600 | 8,3 | 21,4 | 25,0 | 30,0 | 32,7 | 37,8 |
| 4Х5В2ФС | 750 | 15,7 | 23,4 | 26,6 | 30,7 | 34,4 | 38,8 |
| | 600 | 11,5 | 20,3 | 26,5 | 29,3 | 31,7 | 35,0 |
| 4Х2В5ФМ | 750 | 10,8 | 17,6 | 19,2 | 22,8 | 25,0 | 30,1 |
| | 600 | 9,1 | 15,8 | 20,0 | 23,0 | — | 52,0 |
| Типа 3Х2МНФ | 750 | 16,2 | 27,6 | 32,0 | 37,0 | 38,6 | 45,3 |
| | 600 | 16,3 | 28,0 | 31,4 | 36,7 | 39,0 | 45,0 |

68. Коэффициент линейного расширения сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [4]

| Сталь | $\alpha \cdot 10^6$ (в °С ⁻¹) в интервале температур | | | |
|---------|--|---------|---------|---------|
| | 100—250 | 250—350 | 350—600 | 600—700 |
| 5ХНМ | 12,5 | 14,1 | 14,2 | 15 |
| 5ХНВС | 12,5 | 14,1 | 14,6 | 16,5 |
| 30Х2МНФ | 12,7 | 14,2 | 15,6 | 15,8 |

ренной теплостойкости и повышенной вязкости приблизительно одинаковы (табл. 68). Рекомендуемые области применения этих сталей приведены в табл. 69.

Стали повышенной теплостойкости и вязкости (4Х5МФС, 4Х5МФ1С, 4Х5В2ФС, 4Х3ВМФ, 3Х3М3Ф, 4Х4ВМФС) относят к заэвтектоидным, так как содержание первичных карбидов в них мало. Карбидная неоднородность при диаметре до 50 мм обычно не превышает баллов 1—2. В отожженном состоянии доля карбидной фазы ($M_{23}C_6$, M_6C , VC) — 6—12%. Теплостойкость сталей повышается с увели-

чением в структуре сталей количества карбидов M_6C и VC, т. е. при повышении концентрации вольфрама, молибдена и ванадия.

После закалки на мелкое зерно (9—10) в структуре сохраняется 2—6% нерастворившихся карбидов M_6C и VC и 5—12% остаточного аустенита. Их влияние на свойства незначительно. Выделение вторичных карбидов по границам зерен и образование промежуточных структур снижает вязкость (табл. 70). Поэтому при назначении режима ступенчатой закалки, обеспечивающего минимальное коробление, охлаждение с темпе-

69. Рекомендуемые области применения сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [4, 10, 16]

| Сталь | Область применения |
|-------------------------|--|
| 5ХНМ | Молотовые штампы паровоздушных и пневматических молотов с массой падающих частей свыше 3 т для штамповки цветных сплавов, углеродистых и низколегированных конструкционных сталей; штампы для молотов меньшей мощности со сложной и глубокой гравюрой; прессовые штампы и штампы машинной скоростью штамповки при горячем деформировании легких цветных сплавов; блоки матриц для вставок горизонтально-ковочных машин |
| 5ХНВ, 5ХНВС, 5ХГМ | Молотовые штампы паровоздушных и пневматических молотов с массой падающих частей до 3 т, имеющие неглубокую гравюру, работающие при невысоких давлениях и используемые для штамповки цветных сплавов, углеродистых и низколегированных сталей |
| 4ХМФС | Молотовые штампы паровоздушных и пневматических молотов с массой падающих частей до 3 т при деформации легированных конструкционных и коррозионно-стойких сталей (вместо менее теплостойких сталей 5ХНМ, 5ХНВ); штампы кривошипных горячештамповочных прессов усилием до 40 МН, для штамповки деталей из углеродистых и низколегированных сталей; вставки и пуансоны для высадки деталей из этих материалов на горизонтально-ковочных машинах усилием до 10 МН; прессовый инструмент для обработки алюминиевых сплавов |
| 3Х2МНФ | Крупные молотовые штампы, в том числе для чистовых операций при обработке труднодеформируемых металлов; штампы-контейнеры, работающие при длительном нагружении; кольца-бандажи; крупные внутренние втулки, пресс-штемпели, иглы горизонтальных прессов усилием до 12—20 МН, работающие при длительном нагреве |
| 5Х2МНФ | Крупные штампы (со стороной квадрата или диаметром до 600 мм) для штамповки поковок из конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах с массой падающих частей свыше 3 т и кривошипных прессах усилием 40 МН и более (вместо менее теплостойких сталей 5ХНМ, 4ХМФС); инструменты (зажимные и формирующие вставки, наборные и формовочные пуансоны) для высадки конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ), ножи горячей резки; мелкие прессовые и молотовые вставки |

70. Влияние скорости охлаждения при закалке на ударную вязкость штамповых сталей [24]

| Сталь | Температура испытания, °С | KCU (в МДж/м ²) при охлаждении от температуры аустенитизации по режиму | | |
|----------|---------------------------|--|------|------|
| | | I | II | III |
| 4Х5В2ФС | 20 | 0,45 | 0,17 | 0,15 |
| | 600 | 0,60 | 0,45 | 0,35 |
| 4Х3ВМФ | 20 | 0,50 | 0,15 | 0,10 |
| | 600 | 0,60 | 0,60 | 0,50 |
| 4Х4ВМФС | 20 | 0,40 | 0,20 | 0,15 |
| | 600 | 0,55 | 0,35 | 0,30 |
| 4Х5МФС | 20 | 0,55 | 0,15 | 0,12 |
| | 600 | 0,60 | 0,45 | 0,45 |
| 3Х3М3Ф | 20 | 0,20 | 0,07 | 0,07 |
| | 600 | 0,50 | 0,45 | 0,35 |
| 4Х2В5МФ | 20 | 0,35 | 0,07 | 0,07 |
| | 600 | 0,45 | 0,25 | 0,27 |
| 5Х3В3МФС | 20 | 0,25 | 0,05 | 0,10 |
| | 600 | 0,40 | 0,20 | 0,17 |

Примечания: 1. Закалка от оптимальных температур. Отпуск сталей от 4Х5В2ФС до 3Х3М3Ф (по порядку записи) на твердость HRC 47—49, остальных — на твердость HRC 45—46.

2. Скорость охлаждения: I — образцов размерами 10×10×55 мм в масле; II — центра заготовки диаметром 200 мм в масле; III — центра заготовки диаметром 120 мм на воздухе.

ратуры аустенитизации до температур изотермической выдержки 450—500 °С в области наибольшей устойчивости аустенита проводят быстро (расплав солей). После выравнивания температуры по сечению следует опять быстрое охлаждение (в масле), чтобы избежать образования бейнита.

Стали повышенной теплостойкости и вязкости устойчивы против перегрева до 1020—1070 °С вследствие высокой термостойкости карбидов M_6C и VC , препятствующих росту зерна аустенита, и в зависимости от состава закаливаются на твердость HRC 48—59 (табл. 71). Лучшее сопротивление хрупкому разрушению и разгаростойкость получают при закалке на зерно не крупнее 9—10. Для получения

высокой теплостойкости и износостойкости целесообразна закалка от повышенных температур с получением зерна 7—8 (бандажированные штампы). Нагрев длительностью до 1 ч в интервале принятых температур закалки мало изменяет получаемые после закалки балл зерна, твердость и другие свойства. Однако более длительные выдержки снижают основные свойства. Для исправления крупнозернистой структуры зерна, твердость и другие свойства можно рекомендовать проведение перед закалкой изотермического отжига вместо режимов отжига, указанных в табл. 56.

Отпуск проводят на вторичную твердость (выделяются карбиды MC и M_2C), температуру назначают в зависимости от условий работы инстру-

71. Влияние температуры закалки на твердость и величину зерна сталей повышенной теплостойкости и вязкости [16]

| Сталь (рекомендуемая температура закалки) | Температура закалки, °С | HRC | Зерно аустенита |
|---|-------------------------|------|-----------------|
| 4X5MΦC (1010 °С) | 950 | 45 | 12 |
| | 1000 | 49 | 10 |
| | 1050 | 51 | 9—8 |
| | 1075 | 50,5 | 8—7 |
| | 1100 | 50,5 | 7 |
| | 1125 | 50,5 | 6—7 |
| | 1150 | 51 | 6—5 |
| 4X3BMΦ (1050 °С) | 950 | 49 | 11 |
| | 1000 | 52 | 11 |
| | 1050 | 53 | 10 |
| | 1075 | 54 | 9 |
| | 1100 | 54 | 8 |
| | 1125 | 55 | 8—7 |
| | 1150 | 56 | 7 |
| 4X5B2ΦC (1040 °С) | 950 | 46 | 11 |
| | 1000 | 51,5 | 11—10 |
| | 1050 | 54,5 | 10—9 |
| | 1075 | 56 | 9 |
| | 1100 | 56,5 | 8 |
| | 1125 | 57 | 8—7 |
| | 1150 | 58 | 7 |
| 3X3M3Φ (1040 °С) | 950 | 41,5 | 11 |
| | 1000 | 46 | 10—9 |
| | 1050 | 47,5 | 9 |
| | 1075 | 48 | 8—9 |
| | 1100 | 48 | 8—7 |
| | 1125 | 48 | 7 |
| | 1150 | 48,5 | 7 |
| 4X4BMΦC (1060 °С) | 950 | 54 | 12 |
| | 1000 | 55,5 | 11 |
| | 1050 | 57,5 | 10 |
| | 1075 | 58 | 10—9 |
| | 1100 | 59 | 9 |
| | 1125 | 59 | 8 |
| | 1150 | 59 | 7 |

мента. Тяжелонагруженный инструмент с наименьшей стороной 100—120 мм, предназначенный для горячей объемной штамповки, отпускают на твердость HRC 46—50; более крупные штампы — на твердость HRC 44—46; крупные и сложные азотируемые или цинкируемые пресс-формы литья под давлением цветных сплавов — на твердость HRC 40—43 и даже HRC

35—38. Для повышения вязкости проводят второй отпуск, назначая температуру на 30—40 °С ниже, а продолжительность на 25—30 % меньше первого. Температура отпуска влияет на свойства сталей (табл. 72). Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей повышенной теплостойкости и вязкости приведены в табл. 73. Если теплостойкость сталей

72. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей повышенной теплостойкости и вязкости [10]

| Сталь (температура закалки; твердость) | Температура отпуска, °С | HRC | σ _{0,2} | σ _B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|--|---------------------------|------|------------------|----------------|------|----|-------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 4X5MΦC (1000 °С; HRC 51) | 500 | 48 | 1440 | 1770 | 12 | 46 | 0,52 |
| | 550 | 46,5 | 1480 | 1750 | 10 | 50 | 0,57 |
| | 600 | 43 | 1380 | 1540 | 12 | 53 | 0,60 |
| | 625 | 35 | 1100 | 1320 | 13 | 58 | 0,68 |
| | 650 | 32 | 980 | 1120 | 15 | 60 | 0,82 |
| | 4X5MΦ1C (1020 °С; HRC 52) | 300 | 51 | 1520 | 1900 | 9 | 28 |
| 400 | | 53 | 1600 | 1910 | 8 | 25 | 0,44 |
| 500 | | 54 | 1520 | 2000 | 8 | 27 | 0,20 |
| 600 | | 48,5 | 1490 | 1650 | 10 | 45 | 0,46 |
| 4X3BMΦ (1060 °С; HRC 54) | 500 | 48 | 1500 | 1760 | 12,5 | 45 | 0,40 |
| | 550 | 47,5 | 1540 | 1740 | 11,5 | 52 | 0,48 |
| | 600 | 47 | 1520 | 1720 | 11,5 | 50 | 0,56 |
| | 625 | 44 | 1420 | 1580 | 12,5 | 49 | 0,50 |
| | 650 | 42 | 1300 | 1370 | 11,5 | 48 | 0,47 |
| | 4X5B2ΦC (1040 °С; HRC 54) | 500 | 52 | 1700 | 2040 | 7 | 10 |
| 550 | | 50 | 1720 | 1880 | 11 | 41 | 0,14 |
| 600 | | 45 | 1680 | 1720 | 12 | 46 | 0,50 |
| 625 | | 40 | 1250 | 1450 | 13,5 | 50 | 0,52 |
| 650 | | 35 | 1060 | 1300 | 15 | 53 | 0,70 |
| 3X3M3Φ (1040 °С; HRC 49) | 500 | 46 | 1350 | 1660 | 14 | 46 | 0,48 |
| | 550 | 46 | 1480 | 1700 | 12 | 52 | 0,32 |
| | 600 | 45,5 | 1540 | 1700 | 10 | 52 | 0,23 |
| | 625 | 43 | 1420 | 1600 | 12 | 50 | 0,40 |
| | 650 | 41,5 | 1300 | 1480 | 10 | 47 | 0,47 |
| | 4X4BMΦC (1060 °С; HRC 57) | 550 | 55 | 1880 | 2100 | 5 | 8 |
| 600 | | 51 | 1680 | 1920 | 7 | 27 | 0,45 |
| 620 | | 49 | 1600 | 1800 | 10 | 40 | 0,46 |
| 640 | | 45 | 1400 | 1600 | 12 | 38 | 0,42 |
| 660 | | 42,5 | 1200 | 1400 | 13 | 43 | 0,40 |

Примечания: 1. Длительность отпуска 2 ч.
2. Свойства приведены для образцов сечением 10X10 мм.

78. Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей повышенных теплостойкости и вязкости [10, 16]

| Сталь | Закалка | | Отпуск | | | | | Теплостойкость (HRC 40), °C | |
|---------|------------------------------|-------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------|
| | Температура аустенизации, °C | HRC | HRC | Температура первого отпуска, °C | Температура второго отпуска, °C | σ _{0,2} , МПа | σ _B | | KCU, МДж/м ² |
| | | | | | | | | | |
| 4X5MΦC | 1000—1020 | 50—52 | 47—49 44—46 | 530—560 580—590 | 500—520 540—550 | 1480 1400 | 1750 1540 | 0,57 0,60 | 600 |
| 4X5MΦ1C | 1020—1040 | 53—55 | 47—49 44—46 | 560—580 610—620 | 520—540 570—580 | 1490 | 1650 | 0,46 | 630 |
| 4X3BMΦ | 1040—1060 | 52—54 | 47—49 44—46 | 560—580 620—630 | 530—570 590—600 | 1520 1420 | 1720 1580 | 0,56 0,50 | 650 |
| 4X5B2ΦC | 1030—1050 | 53—56 | 47—49 44—46 | 560—580 600—620 | 530—540 570—590 | 1690 1430 | 1760 1550 | 0,30 0,50 | 630 |
| 3X3M3Φ | 1030—1050 | 47—50 | 47—48 44—46 | 580—600 610—620 | 540—560 570—580 | 1500 1420 | 1700 1600 | 0,25 0,30 | 650 |
| 4X4BMΦC | 1050—1070 | 55—60 | 47—50 44—46 | 620—630 640—650 | 560—580 600—610 | 1500 1300 | 1700 1500 | 0,44 0,40 | 660 |

Примечания: 1. Закалка в масле.

2. Продолжительность первого отпуска 2 ч, второго — на 25—30% меньше первого.

3. Свойства указаны для образцов сечением 10X10 мм.

оценивать по температуре отпуска (после окончательной термической обработки) на твердость HRC 47—49) продолжительностью 4 ч на твердость HRC 40, то они могут быть расположены в следующий ряд: 4X5MΦC — 600°C; 4X5MΦ1C и 4X5B2ΦC — 630°C; 4X3BMΦ и 3X3M3Φ — 650°C; 4X4BMΦC — 660°C.

При твердости HRC 45 ударная вязкость должна быть для большей части штампов не ниже 0,3—0,35 МДж/м² при 20°C и 0,5 МДж/м² при температуре эксплуатации. Выполнение этого требования осложняется отрицательным влиянием масштабного эффекта (усиление карбидной неоднородности). С увеличением диаметра (стороны) штампа с 20 до 100 мм вязкость снижается в сердцевине более чем на 30—35%. Для повышения сопротивления хрупкому разрушению штампы перед началом работы надо нагревать до 300—350°C. Температура испытаний влияет на свойства сталей повышенной теплостойкости и вязкости (табл. 74). Область применения сталей повышенных теплостойкости и вязкости приведена в табл. 75.

Стали высокой теплостойкости (см. табл. 54) относят к заэвтектоидной группе, причем стали 4X2B5MΦ и 5X3B3MΦC образуют подгруппу сталей с карбидным упрочнением, а стали типа 2X6B8M2K8 — с карбидоинтерметаллидным.

Стали 4X2B5MΦ и 5X3B3MΦC при охлаждении в масле прокаливаются в сечениях 100—150 мм. Уменьшение скорости охлаждения вызывает выделение вторичных карбидов по границам зерен аустенита и образование продуктов промежуточного превращения, что снижает вязкость. Сталь 2X6B8M2K8 приобретает твердость HRC 53—57 даже при охлаждении на воздухе заготовки диаметром больше 120—150 мм. Замедленное охлаждение вязкость почти не снижает.

Содержание карбидной фазы в сталях 4X2B5MΦ и 5X3B3MΦC — 10—13% (M₆C и MC), в стали 2X6B8M2K8 — 6—7% (Me₆C), но в этой стали дополнительно содержится интерметаллид (Fe, Co)_{W₆}. Карбидная неоднородность сталей 4X2B5MΦ и

5X3B3MΦC в сечениях до 100 мм, а стали 2X6B8M2K8 в прутках диаметром до 40—50 мм не превышает 2—3 баллов. При диаметре 100—120 мм балл карбидной неоднородности возрастает до 5—6. Поэтому стали 4X2B5MΦ и 5X3B3MΦC используют для изготовления инструмента с диаметром (стороной) до 100—150 мм, а сталь 2X6B8M2K8 — до 70—80 мм.

Стали высокой теплостойкости сохраняют мелкое зерно (9—10) до следующих температур аустенизации: 4X2B5MΦ — 1100°C, 5X3B3MΦC — 1150°C, 2X6B8M2K8 — 1200°C (табл. 76). При термической обработке штампов на высокую теплостойкость (небольшие динамические нагрузки) температуры закалки устанавливают на 10—20°C выше, чем при обработке на повышенную прочность и вязкость (табл. 77).

Количество остаточного аустенита в сталях 4X2B5MΦ и 5X3B3MΦC после закалки — 10—15%; сталь 2X6B8M2K8 почти не содержит аустенита.

Штампы сложной формы и относительно небольших размеров для уменьшения деформации охлаждают в горячих средах при 350—250°C (20—40 мин), а затем на воздухе.

Для уменьшения деформации штампов перед окончательной закалкой целесообразно проводить предварительную обработку: закалку из межкритической области (например, для стали 5X3B3MΦC от 810—830°C) и отпуск при 600°C.

Деформация штампов из стали 2X6B8M2K8 незначительна из-за небольшой концентрации углерода.

Отпуск выполняют на вторичную твердость и немедленно после закалки для предотвращения образования трещин. Температура отпуска влияет на свойства сталей высокой теплостойкости (табл. 78). Режимы обработки (табл. 77) назначают в зависимости от условий работы инструмента.

Наиболее приемлемое сочетание свойства при 20 и 600°C у сталей 4X2B5MΦ и 5X3B3MΦC получают после отпуска на твердость HRC 45—47 (табл. 79). Отпуск на твердость HRC 41—44 выполняют с целью повышения сопротивления хрупкому разруше-

74. Влияние температуры испытаний на механические свойства сталей повышенных теплостойкости и вязкости [10]

| Сталь (режим отпуска) | Температура испытания, °С | HRC | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|-----------------------|---------------------------|------|----------------|------------|----------|--------|-------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 4X5MΦC (560 °С, 2 ч) | 20 | 48 | 1600 | 1750 | 12 | 54 | 0,55 |
| | 300 | — | 1370 | 1580 | 12 | 47 | 0,64 |
| | 400 | 50 | 1300 | 1520 | 12 | 49 | 0,65 |
| | 500 | 45,5 | 1150 | 1400 | 10 | 52 | 0,58 |
| | 550 | 42 | 1180 | 1350 | 11 | 50 | 0,53 |
| 4X5MΦ1C (580 °С, 2 ч) | 20 | — | 1500 | 1700 | 10 | 40 | 0,40 |
| | 200 | — | 1370 | 1650 | 12 | 46 | 0,55 |
| | 300 | — | 1340 | 1520 | 12 | 45 | 0,52 |
| | 400 | — | 1340 | 1450 | 13 | 46 | 0,50 |
| | 500 | — | 1180 | 1350 | 13 | 47 | 0,43 |
| 4X3BMΦ (580 °С, 2 ч) | 20 | 47,5 | 1480 | 1750 | 12 | 52 | 0,50 |
| | 300 | — | 1360 | 1530 | 11 | 52 | 0,68 |
| | 400 | 44 | 1300 | 1450 | 12 | 54 | 0,60 |
| | 500 | 43 | 1150 | 1320 | 11 | 54 | 0,57 |
| | 550 | 38 | 1150 | 1260 | 10 | 52 | 0,62 |
| | 575 | — | 1020 | 1200 | 10,5 | 52 | 0,57 |
| 4X5B2ΦC (580 °С, 2 ч) | 20 | 50 | 1540 | 1850 | 10 | 48 | 0,48 |
| | 300 | — | 1350 | 1650 | 9 | 47 | 0,62 |
| | 400 | 50 | 1420 | 1550 | 10 | 51 | 0,64 |
| | 500 | 44 | 1220 | 1390 | 9 | 53 | 0,60 |
| | 550 | 40 | 1150 | 1310 | 8 | 52 | 0,58 |
| | 600 | — | 1100 | 1250 | 10 | 53 | 0,60 |
| 3X3M3Φ (600 °С, 2 ч) | 20 | 47,5 | 1480 | 1700 | 12 | 50 | 0,22 |
| | 300 | — | 1280 | 1470 | 10 | 48 | 0,62 |
| | 400 | 46 | 1290 | 1400 | 10 | 49 | 0,62 |
| | 500 | 42,5 | 1150 | 1300 | 10 | 51 | 0,57 |
| | 550 | 37 | 1140 | 1260 | 11 | 52 | 0,52 |
| | 600 | 33 | 1000 | 1150 | 12 | 54 | 0,52 |
| 4X4BMΦC (620 °С, 2 ч) | 20 | 50 | 1600 | 1820 | 8 | 36 | 0,45 |
| | 300 | — | 1400 | 1600 | 9 | 39 | 0,60 |
| | 400 | — | 1360 | 1500 | 10 | 46 | 0,60 |
| | 500 | 44,5 | 1200 | 1400 | 13 | 48 | 0,56 |
| | 550 | 35 | 1060 | 1260 | 14 | 55 | 0,55 |
| | 600 | 28 | 920 | 1100 | 17 | 64 | 0,65 |

Примечание. Свойства приведены для образцов сечением 10×10 мм.

75. Рекомендуемые области применения сталей повышенной теплостойкости и вязкости [10, 16]

| Сталь | Область применения |
|------------------|--|
| 4X5MΦC | Мелкие молотовые штампы, особенно чистовой штамповки с наименьшей стороной до 100—125 мм; молотовые (диаметром или толщиной до 200 мм) и прессовые вставки (предварительного и окончательного ручья, знаки, выталкиватели, внутренние втулки, пресс-штембели, иглы для прошивки труб) при горячем деформировании конструкционных сталей и цветных сплавов в условиях крупносерийного производства; формы литья под давлением алюминиевых и магниевых сплавов со стороной до 70—80 мм |
| 4X5MΦ1C, 4X5B2ΦC | Молотовые и прессовые вставки (толщиной или диаметром до 200—250 мм) с таким же назначением, как и из сталей 4X5MΦC; инструмент для высадки заготовок из легированных конструкционных и жаропрочных материалов на горизонтально-ковочных машинах; пресс-формы литья под давлением алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов |
| 4X3BMΦ | Мелкие молотовые штампы; молотовые и прессовые вставки (толщиной или диаметром до 300—400 мм); инструмент горизонтально-ковочных машин при горячем деформировании коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов, работающих в условиях повышенных давлений (800—1500 МПа) и нагреве до 650—660 °С; инструмент для высокоскоростной машинной штамповки конструкционных сталей |
| 4X4BMΦC | Инструмент высокоскоростной машинной штамповки и для высадки на горизонтально-ковочных машинах; вставки штампов для горячего деформирования легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах и кривошипных прессах, работающие в условиях повышенных давлений (800—1500 МПа) и нагрева до 650—660 °С; пресс-формы литья под давлением медных сплавов |
| 3X3M3Φ | Инструмент горячего деформирования на кривошипных прессах и горизонтально-ковочных машинах, подвергающихся в процессе работы интенсивному охлаждению (как правило, для мелкого инструмента); пресс-формы литья под давлением медных сплавов; ножи для горячей резки |

76. Влияние температуры закалки на твердость и зерно сталей высокой теплостойкости [16]

| Сталь (рекомендуемая температура закалки) | Температура закалки, °C | HRC | Зерно аустенита |
|---|-------------------------|------|-----------------|
| 4X2B5MΦ (1050—1080 °C) | 1000 | 49 | 12 |
| | 1050 | 54 | 11 |
| | 1100 | 55 | 9 |
| | 1150 | 55 | 6 |
| | 1200 | 55 | 4 |
| 5X3B3MΦC (1120—1150 °C) | 1000 | 50 | 12 |
| | 1050 | 51 | 11 |
| | 1100 | 53 | 10 |
| | 1150 | 57 | 9 |
| | 1200 | 57,5 | 7 |

Примечание. Закалка в масле.

нню. Сталь 2X6B8M2K8 уступает этим сталям по вязкости, но сильно превосходит их по теплостойкости (см. табл. 77).

77. Режимы окончательной термической обработки сталей высокой теплостойкости [16]

| Сталь | Закалка | | Отпуск | | Теплостойкость (HRC 40), °C |
|-----------|-----------------|-------|--------------------|----------------|-----------------------------|
| | Температура, °C | HRC | Температура, °C | HRC | |
| 4X2B5MΦ | 1080—1100 | 54—56 | 640—650 | 44—47 | 670 |
| | | | 650—660 | 41—44 | |
| | 1050—1080 | 52—56 | 610—630 | 45—49 | |
| | | | 630—640 | 42—45 | |
| 5X3B3MΦC | 1130—1150 | 54—58 | 650—660 | 44—47 | 685 |
| | | | 660—680 | 41—44 | |
| | 1100—1120 | 52—55 | 640—650 | 45—49 | |
| | | | 650—660 | 42—45 | |
| 2X6B8M2K8 | 1180—1200 | 52—54 | 670—690 690—710 | 48—52 44—48 | 730 |

Температуру второго отпуска для сталей 4X2B5MΦ и 5X3B3MΦC назначают на 30—40 °C ниже, а продолжительность на 25—30 % меньше первого. Для стали 2X6B8M2K8 рекомендуется предварительный отпуск при 340—360 °C длительностью 1,5—2 ч.

Штампы перед началом работы нагревают до 300—350 °C.

Область применения сталей высокой теплостойкости приведена в табл. 80.

Нетеплостойкие стали 7X3 и 8X3 повышенной вязкости (см. табл. 54) применяют для инструмента (пуансонов, матриц) горячей высадки крепежа и заготовок из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей на горизонтально-ковочных машинах, деталей штампов (матриц, пуансонов, выталкивателей) для горячего прессования и выдавливания этих материалов на кривошипных прессах при мелкосерийном производстве, гибочных, обрезных и просечных штампов.

Стали прокаливаются в сечениях до 70—80 мм. Повышенную вязкость и твердость HRC 40—45 получают благодаря проведению отпуска при 480—520 °C, что выше температур интенсивного развития хрупкости первого рода.

78. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей высокой теплостойкости [10]

| Сталь (температура закалки, твердость) | Температура отпуска, °C | HRC | σ _{0,2} | σ _B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|--|-------------------------|------|------------------|----------------|----|----|-------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 4X2B5MΦ (1080 °C, HRC 50) | 550 | 49 | 1560 | 1750 | 12 | 48 | 0,15 |
| | 600 | 50 | 1630 | 1780 | 11 | 50 | 0,12 |
| | 625 | 48 | 1650 | 1800 | 10 | 38 | 0,25 |
| | 650 | 46 | 1600 | 1700 | 12 | 43 | 0,30 |
| | 675 | 43 | 1420 | 1560 | 10 | 40 | 0,35 |
| 5X3B3MΦC (1150 °C, HRC 56) | 600 | 52,5 | 1820 | 2050 | 8 | 36 | 0,30 |
| | 630 | 51,5 | 1670 | 1930 | 9 | 35 | 0,26 |
| | 650 | 46 | 1600 | 1725 | 10 | 30 | 0,20 |
| | 670 | 45 | 1400 | 1570 | 8 | 34 | 0,25 |
| | 680 | 43 | 1320 | 1475 | 10 | 35 | 0,30 |
| 2X6B8M2K8 (1200 °C, HRC 54) | 650 | 52 | 1600 | 1900 | — | — | 0,02 |
| | 700 | 48 | 1340 | 1640 | — | — | 0,20 |
| | 730 | 40 | 1060 | 1370 | — | — | 0,80 |
| | 750 | 34 | 800 | 1180 | — | — | 1,28 |

Примечания: 1. Закалка в масле.

2. Продолжительность отпуска 2 ч.

3. Свойства оценивали на образцах, изготовленных из заготовок сечением 15×15 мм.

79. Влияние температуры испытаний на механические свойства сталей высокой теплостойкости [16]

| Сталь | Температура испытаний, °C | HRC | σ _{0,2} | σ _B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|----------|---------------------------|------|------------------|----------------|----|----|-------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 4X2B5MΦ | 20 | 46 | 1480 | 1680 | 10 | 42 | 0,30 |
| | 500 | 41 | 1120 | 1230 | 10 | 49 | 0,50 |
| | 550 | 31 | — | — | — | — | — |
| | 600 | 26 | 900 | 1000 | 10 | 48 | 0,45 |
| | 650 | — | 730 | 820 | 11 | 37 | 0,50 |
| 5X3B3MΦC | 20 | 47 | 1500 | 1680 | 8 | 38 | 0,25 |
| | 500 | 41,5 | 1120 | 1280 | 8 | 45 | 0,35 |
| | 550 | 36 | 1100 | 1240 | 7 | 45 | 0,32 |
| | 600 | 30 | 910 | 1040 | 10 | 42 | 0,40 |
| | 650 | — | 730 | 850 | 12 | 35 | 0,40 |

Продолжение табл. 79

| Сталь | Температура испытаний, °С | HRC | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|-----------|---------------------------|-----|----------------|------------|----------|--------|-------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 2Х6В8М2К8 | 20 | — | 1450 | 1750 | 2 | 6 | 0,05 |
| | 600 | — | 950 | 1200 | 7 | 24 | 0,20 |
| | 700 | — | 800 | 900 | 8 | 25 | 0,35 |

Примечания: 1. Закалка сталей 4Х2В5МФ от 1080 °С, 5Х3В3МФС от 1130 °С, 2Х6В8М2К8 от 1180 °С в масле.

2. Стали 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС отпущены на твердость HRC 46—47, сталь 2Х6В8М2К8 на HRC 48—50.

3. Свойства оценивали на образцах, изготовленных из заготовок сечением 15×15 мм.

80. Рекомендуемые области применения сталей высокой теплоустойчивости

| Сталь | Область применения |
|-----------|---|
| 4Х2В5МФ | Тяжелонагруженный прессовый инструмент (мелкие вставки знаков, матрицы и пуансоны для выдавливания и т. п.) при горячем деформировании легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов |
| 5Х3В3МФС | Тяжелонагруженный прессовый инструмент (прошивные и формирующие пуансоны, матрицы и т. п.); инструмент для вставки на горизонтально-ковочных машинах и вставки штампов напряженных конструкций для горячего объемного деформирования конструкционных сталей и жаропрочных металлов и сплавов (вместо сталей 3Х2В8Ф и 4Х2В5МФ) |
| 2Х6В8М2К8 | Иглы, пуансоны для прессования аустенитных, жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и сплавов, а также титановых сплавов при температурах до 650—675 °С, выполняемых без интенсивного охлаждения |

Предварительную термическую обработку для уменьшения деформации инструмента проводят по режиму: закалка от 790—800 °С и отпуск при 520—600 °С. В этом состоянии стали получают менее шероховатую поверхность при резании (твердость HRC 22—25).

Режимы окончательной термической обработки сталей 7Х3 и 8Х3 приведены в табл. 81, влияние температуры отпуска на свойства — в табл. 82, а влияние температуры испытаний — в табл. 83.

Шаглы КГШП и ГКМ, пресс-формы литья под давлением с целью

81. Режимы окончательной термической обработки нетеплостойких сталей повышенной вязкости [10]

| Сталь | Закалка | | Отпуск | |
|-------|-----------------|-----|-----------------|-------|
| | Температура, °С | HRC | Температура, °С | HRC |
| 7Х3 | 850—880 | ≥54 | 480—520 | 38—44 |
| 8Х3 | 850—880 | ≥55 | 480—520 | 41—46 |

Примечание. Закалка в масле.

82. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства нетеплостойких сталей повышенной вязкости [10]

| Сталь (температура закалки, твердость) | Температура отпуска, °С | HRC | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|--|-------------------------|------|----------------|------------|----------|--------|-------------------------|
| | | | МПа | | % | | |
| 7Х3 (870 °С, HRC 54) | 300 | 50 | 1670 | 1960 | 4 | 14 | 0,15 |
| | 400 | 45 | 1460 | 1720 | 5 | 24 | 0,30 |
| | 500 | 38 | 1260 | 1350 | 10 | 36 | 0,37 |
| | 550 | 35 | — | — | — | — | 0,54 |
| 8Х3 (870 °С, HRC 55) | 300 | 53,5 | 1830 | 2020 | 3 | — | 0,19 |
| | 400 | 50 | 1650 | 1950 | 6 | 10 | 0,23 |
| | 500 | 42 | 1280 | 1360 | 7 | 25 | 0,36 |
| | 550 | 36 | 1070 | 1170 | 10 | 39 | 0,48 |

Примечания: 1. Закалка в масле.

2. Продолжительность отпуска 2 ч.

3. Свойства оценивали на образцах, изготовленных из заготовок сечением 15×15 мм.

83. Влияние температуры испытаний на механические свойства нетеплостойких сталей повышенной вязкости [10]

| Сталь | Температура испытаний, °С | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | KCU, МДж/м ² |
|-------|---------------------------|----------------|------------|----------|--------|-------------------------|
| | | МПа | | % | | |
| 7Х3 | 20 | 1060 | 1150 | 11 | 37 | 0,36 |
| | 300 | 980 | 1040 | 12 | 34 | 0,72 |
| | 400 | 800 | 940 | 16 | 55 | 0,66 |
| | 500 | 560 | 700 | 18 | 68 | 0,52 |
| 8Х3 | 20 | 1260 | 1380 | 6 | 26 | 0,35 |
| | 200 | 1100 | 1280 | 6 | 26 | 0,45 |
| | 300 | 1060 | 1250 | 9 | 28 | 0,56 |
| | 400 | 950 | 1120 | 5 | 48 | 0,48 |
| | 500 | 650 | 830 | 20 | 63 | 0,45 |

Примечания: 1. Закалка от 870 °С в масле.

2. Отпуск при 500 °С в течение 2 ч.

3. Свойства оценивали на образцах, изготовленных из заготовок сечением 15×15 мм.

повышения стойкости (в 1,5—2,0 раза) целесообразно азотировать или цианировать [10]. Надежность инструмента возрастает при использовании для его изготовления сталей после электрошлакового переплава.

Список литературы

1. Артингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка. М.: Металлургия, 1982. 312 с.
2. Бадаева А. А. Свойства и термическая обработка стали Х6ВФ. М.: ВНИИ, 1960. 46 с.
3. Баженов И. Ф., Байчман С. Г., Карпачев Д. Г. Твердые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1978. 184 с.
4. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1975. 584 с.
5. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 525 с.
6. Геллер Ю. А., Артюхов В. Ф. МИТОМ, 1976. № 11. С. 17—20.
7. Геллер Ю. А., Брострем В. А. Легирование быстрорежущих сплавов с интерметаллидным упрочнением//Металловедение и термическая обработка. 1974. № 1. С. 4.
8. Горюнов И. И. Пресс-формы для литья под давлением. Л.: Машиностроение, 1973. 255 с.
9. Гуляев А. П., Малнина К. А., Саверина С. М. Инструментальные сплавы: Справочник. М.: Машиностроение, 1975. 272 с.
10. Инструментальные стали: Справочник/Л. А. Позняк, С. И. Тишаев, Ю. М. Скрынченко и др. М.: Металлургия, 1977. 168 с.
11. Кремнев Л. С. От стали P18 к безвольфрамовым низколегированным быстрорежущим сталям. МИТОМ. 1986. № 7. С. 27—43.
12. Материалы в машиностроении: Справочник. Т. 3/Под ред. Ф. Ф. Хнмушина. М.: Машиностроение, 1968. 447 с.
13. Михайленко Ф. П., Грикке А. Х., Демиденко Е. М. Автоматическая холодная штамповка мелких деталей на быстроходных прессах. М.: Машиностроение, 1965. 187 с.
14. Номенклатура режущего инструмента из минералокерамики и сверхтвердых материалов на основе нитрида бора, выпускаемого заводами Минстанкопрома. М.: НИИМАШ, 1984. 48 с.
15. Позняк Л. А. Штамповые стали для холодного деформирования. М.: Металлургия, 1966. 147 с.
16. Позняк Л. А., Скрынченко Ю. М., Тишаев С. И. Штамповые стали. М.: Металлургия, 1980. 244 с.
17. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник/Под ред. И. М. Федорченко. Киев: Наукова думка, 1985. 624 с.
18. Раузин Я. Р. Термическая обработка хромистой стали. М.: Машгиз, 1961. 384 с.
19. Сталь инструментальная быстрорежущая. Технологические свойства в состоянии поставки и в термически обработанном состоянии: Таблица стандартных справочных данных (ГСССД 41—82). М., 1983. 10 с.
20. Тугов И. Е., Савуков В. П., Панкратов М. Ф., Фимошенко Н. И.// Материалы для штампов и пресс-форм. М.: МДНТП, 1966. С. 24—44.
21. Централизованная заточка режущего инструмента на станкозаводах: Методические указания. М.: НИИМАШ, 1981. 108 с.
22. Шмыков А. А. Справочник термиста. М.: Машгиз, 1956. 331 с.
23. Штамповые стали и режимы их обработки для инструмента горячей и холодной объемной штамповки: Методические указания. Воронеж: ЭНИКМАШ, 1971. 60 с.
24. Штампы для горячего деформирования металла/Под ред. М. А. Тылкина. М.: Высшая школа, 1977. 495 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Алюминиевые деформируемые сплавы** 234, 236—253
— чугуны 82, 83
Аморфные металлческие сплавы 581—585
— инварные 585
— конструкционные 582, 583
— магнитомягкие 583—585
— магнитотвердые 583—585
— резистивные 585
Антифрикционные материалы металлические 171—180
— на основе древесины, резин и фторопластовых тканей 185—179
— на основе полимеров 180—185
Антифрикционный чугун 79, 81, 82

Б

- Безоловянные бронзы** 109—123
— литейные 114, 122, 123
— обрабатываемые давлением 109, 120, 121
Бериллий — Свойства 321, 322, 324—329
— Химический состав 322—324, 326
Быстрорежущие стали 606—616

В

- Волокнистые композиционные материалы металлические** 349—359
— Методы изготовления 349
— Сведения о процессах первичного производства 349—351
— Свойства волокон 352—359
Волокнистые композиционные материалы с неметаллической матрицей 365—376
— Свойства 365—369
— Характеристики 369—376
Высокопрочные высоколегированные (мартенситно-старяющие) стали 30—47
— Коррозионно-стойкие 39—42
— Общего назначения 33—39
— Применение 46, 47

- Пути совершенствования свойств 42—46
Высокопрочные средне-легированные стали 23—30
— Общая характеристика 23, 24
— Режимы упрочняющей термической обработки 24—28
— Рекомендации конструктору и технологу 28—30
Высокопрочные штамповые стали с повышенной ударной вязкостью — Режимы окончательной термической обработки 649
— Рекомендуемые области применения 649, 650
Высокопрочный чугун с шаровидным или вермикулярным графитом 74—77
Высокоэлектропроводные сплавы 222—233

Г

- Гибкая электроизоляционная трубка** 588

Д

- Двойные латуни, обрабатываемые давлением** 85—88
Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе алюминия 341, 343, 344
— бериллия 344, 345
— кобальта 347, 348
— магния 345
— никеля 345—347
— хрома 348
Диэлектрики — Механизм поляризации 585
— жидкие 588
— неполярные 585
— полярные 585

Ж

- Жаропрочные материалы** 423—450
— Аустенитные стали 423—433
— Медные сплавы 445—450

- Сплавы на основе алюминия—
меди—магния—железа—никель 235,
254
- Сплавы на основе вольфрама 440,
441
- Сплавы на основе молибдена 440—
443
- Сплавы на основе никеля 433—438
- Сплавы на основе ниобия 443—
445
- Сплавы на основе тугоплавких ме-
таллов 438—440
- Жаропрочные сплавы системы алюми-
ний—медь—магний—железо—никель**
235, 254
- Жаростойкие материалы** 406—423
- Медные сплавы 408
- Сплавы магния 407, 408
- Сплавы на основе железа и никеля
408, 409
- Термически обработанные полу-
фабрикаты 414—419
- Тугоплавкие металлы 408
- Хромистые стали 408
- Чугуны 419—423

К

- Ковкий чугун** 77—80
- Ковочные сплавы системы алюминий—
магний—кремний—медь** 255—257
- Композиты бериллий—титан** 322, 338
- Конструкционные высокопрочные и
жаропрочные алюминиевые сплавы** 269,
270
- герметичные алюминиевые сплавы
261, 268, 269
- коррозионно-стойкие алюми-
новые сплавы 270—272
- Коррозионно-стойкие и жаростойкие
покрытия** 474—498 — Условные обо-
значения способов получения 476,
477, 496—498

Л

- Лазерное вещество** 589
- Лазерные материалы** 589
- Лазерный эффект** 589
- Лазеры** полупроводниковые 592
- твердотельные 589
- Литейные алюминиевые сплавы** 257—
272
- латуни 102—104
- Люминесценция** 589

М

- Магниеые сплавы со специальными
физическими и химическими свойст-**

- вами 273, 289—291
- Магний** — Свойства 272, 273
- Магнитомягкие материалы** 544—564
- Зарубежные аналоги 562—564
- Магнитоэлектрические 559, 561
- Низкоуглеродистые электротех-
нические легированные стали 544—
548
- Общие требования и классифика-
ция 544
- Прецизионные сплавы 547, 549—553
- Ферритмагнитные 547, 553—560
- Магнитотвердые материалы** 536—544
- Деформируемые 537—541
- Легированные стали 537—539
- Литые 537, 539
- Общие требования и классифика-
ция 536—538
- Порошковые 541—543
- Сплав на основе благородных
редкоземельных металлов 543, 544
- Марганцевые чугуны** 82, 83
- Материалы высокой проводимости**
514—520
- Алюминий 517—520
- для электрических контактов 520
- Медь 514, 515
- Общие требования и классифика-
ция 514, 515
- Серебро 520
- Сплавы меди 516—518
- Материалы высокой твердости износо-
стойкие** 135—151
- Керамика 143, 144
- Металлоподобные соединения 139—
142
- Наплавочные материалы 146—151
- Неметаллические бескислородные
соединения 142, 143
- Сверхтвердые 137—139
- Ситаллы 144
- Твердые сплавы 144—146
- Материалы для криогенной техники**
498—510
- Алюминий и его сплавы 505, 506
- Медь и ее сплавы 506, 507
- Сталь 498—505
- Титан и его сплавы 507—510
- Материалы кавитационно-стойкие**
167—171
- с малым газовыделением в вакууме
462—474
- Материалы с особыми тепловыми свой-
ствами** 564—568
- Сплав с заданным температурным
коэффициентом модуля упругости 568
- Ферромагнитные сплавы 564—568

- Материалы триботехнического на-
значения** — Процесс изнашивания 131—
136
- устойчивые к изнашиванию в ус-
ловиях больших давлений и ударных
нагрузок 163, 164
- Медно-никелевые сплавы** 114, 124,
125, 128—130
- Металлические сплавы, устойчивые к
воздействию температуры и внешней
рабочей среды** 379—389
- Алюминий и его сплавы 385, 387
- Благородные металлы 389
- Коррозионно-стойкие сплавы 379—
384
- Медь и ее сплавы
- Титан и его сплавы 380, 385—387
- Многокомпонентные латуни, обраба-
тываемые давлением** 88—95

Н

- Немагнитные пружинные сплавы** 218—
221
- Неметаллические материалы, устойчи-
вые к воздействию температуры и
внешней рабочей среды** 389—395
- Винипласт 391
- Кислотоупорный бетон 392
- Минеральные 391
- Полистирол 389
- Поливинилхлорид 391
- Полиэтилен 389—391
- Резины 393—395
- Тефлон 391
- Углеродистые 392, 393
- Эбониты 393—395
- Низколегированные конструкционные
стали** 12, 13
- малолегированные стали 15—22
- стали с карбонитридным упрочне-
нием 13—15
- Никелевые чугуны** 83, 84

О

- Оловянные бронзы** 104—113
- литейные 105—109
- обрабатываемые давлением 105
- Отливки, изготавливаемые в песчаных
формах** — Группы сложности 51—54 —
Относительная стоимость 55, 56
- чугунные — Точность и шерохова-
тость 50, 55

П

- Пироэлектрик** 589
- Пленкосодержащий электроизоляцион-**

- ный материал** 588
- Покрытия вакуумные нонно-плазмен-
ные** 153—156
- газотермические 156—160
- жаростойкие 489—495
- коррозионно-стойкие 474—488
- получаемые методами химического
осаждения из газовой фазы 152, 153
- получаемые термовакуумным напы-
лением 153
- электроискровые 157
- Полимерные материалы** — Свойства
338—342
- Полупроводниковые материалы** 568—
581
- Простые полупроводники 569—576
- Сложные полупроводники 576—581
- Полуфабрикаты из латуни, обрабаты-
ваемых давлением** 95—101
- Пружинные сплавы** — Классификация
по назначению 205—233 — Класси-
фикация по основным способам упроч-
нения 205
- общего назначения 205—216
- с низким температурным коэффи-
циентом модуля упругости 219, 222
- специального назначения 215—233

Р

- Радиационно-стойкие материалы** 445—
462
- Алюминий, его сплавы и соедине-
ния 458
- Аустенитные коррозионно-стойкие
стали 458—461
- Аустенитные никелевые сплавы
458—461
- Бериллий и его соединения 453—457
- Графит 461, 462
- Магний, его сплавы и соединения
456, 457
- Радиационные дефекты 445, 451—
454
- Цирконий и его сплавы 457, 458
- Чистые металлы, керамики, кер-
меты 461
- Резистивные материалы** 526—536 —
Общие требования и классификация
526
- для резисторов 526, 527, 529
- для термоэлектродов термопар и
удлиняющих проводов 532—536
- для электронагревателей 527, 529—
532

С

- Сверхлегкие магниеволитиевые спла-
вы** 273, 289

Сверхпроводники 520—526
 Сверхтвердые материалы 626—631
 Серый чугун с пластинчатым графитом 71—74
 Слои поверхностные — Лазерные методы модифицирования и легирования 157, 160, 161
 — Химико-термические методы модифицирования 162, 163
 Слюдосодержащий электронизоляционный материал 588
 Сплавы магния 273—288
 — Области применения 273, 280, 282, 283
 — Режим термической обработки 273, 277, 284
 — Свойства 273—277, 281, 285, 286, 288
 — Состав 273—277
 — Характеристики свариваемости 273, 279, 287
 Сплавы повышенной пластичности и коррозионной стойкости системы алюминий—магний—кремний 254, 255
 — системы алюминий—медь—магний 235, 253, 254
 — типа алюминий—бериллий и алюминий—магний—бериллий 329—337
 Среднеуглеродистые низколегированные стали 22, 23
 Стекла неодимовые 591, 593
 Стеклообразные лазерные материалы 591

Т

Твердые сплавы 613, 617—626
 Теплостойкие материалы 395—406
 — Высоколегированные чугуны 402—405
 — Теплостойкие стали 395—404
 — Цветные сплавы 402, 405, 406
 Титан — Свойства 291—296
 Титановые сплавы — Применение 319 — Свойства 296—300
 — двухфазные ($\alpha + \beta$) — сплавы — Свойства 305—313, 315, 316
 — литейные 314, 317, 318
 — порошковые 314, 318—320
 — псевдо- β -сплавы 314
 — с α -структурой 300—305, 306, 320

У

Углеродистые стали 12 — инструментальные 596—599

Ф

Фрикционные материалы 189—200
 — асбополимерные 192—197
 — на железной основе 191
 — полученные методом порошковой металлургии 191, 192

Х

Хромистые чугуны 82, 83

Ч

Чугуны 49—69 — для отливок 49—57
 — Жаростойкость 66—69
 — Коррозионная стойкость 64—66
 — Магнитные свойства 63, 64
 — Коэффициент линейного расширения 60
 — Плотность 57—59
 — Теплофизические свойства 59, 60—63

Ш

Шлифуемость стали 613
 Штамповые нетеплостойкие стали 680, 681
 Штамповые стали высокой теплостойкости 675—680
 Штамповые стали для горячего деформирования 655—682
 — Длительная прочность 663, 668
 — Критические точки 653, 668
 — Режим ковки и отжига 656, 658, 659
 — Релаксационная стойкость 663, 669
 — Химический состав 656, 657
 Штамповые стали для ударных инструментов — Влияние температуры испытаний на механические свойства 650, 653, 654
 — Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства 650—652
 — Режимы окончательной термической обработки 650, 651
 — Рекомендуемые области применения 650, 654
 Штамповые стали для холодного деформирования 631—654
 Штамповые стали повышенной теплостойкости и вязкости — Влияние температур закалки на твердость и величину зерна 671, 672
 — Влияние температур испытаний на механические свойства 675, 676
 — Влияние температуры отпуска на механические свойства 671, 673
 — Режимы окончательной термиче-

ской обработки и свойства 672, 674
 — Рекомендуемые области применения 675, 677
 Штамповые стали умеренной теплостойкости и повышенной вязкости — Влияние закалки на твердость и размеры зерна 661, 662
 — Влияние температуры испытаний и размера сечения на механические свойства 663, 666—668
 — Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур 663, 665, 666
 — Коэффициент линейного расширения 663, 669
 — Рекомендуемые области применения 669—671
 — Рекомендуемые режимы закалки и отпуска в зависимости от размера штампа 663, 664
 — Ударная вязкость 663, 664

Штампы — Продолжительность нагрева в пламенной печи, выдержки и охлаждения при закалке 659, 660
 — Температура отпуска и твердость хвостовиков 663, 665

Э

Эвтектические композиционные материалы на основе алюминия 359—361
 — кобальта 361—364
 — никеля 361—364
 — ниобия 362—365
 — тантала 362—365
 Электрет 589
 Электрические кристаллы 588, 589
 Электроизоляционная лакокраска 588
 Электроизоляционный компаунд 588
 — лак 588
 — препрег 588
 — пресс-материал 588
 — фольгированный материал 587

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

АРЗАМАСОВ Борис Николаевич, БРОСТРЕМ Владимир Алексеевич, БУШЕ Николай Александрович и др.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Редактор *И. И. Лесниченко*
 Переплет художника *Н. А. Игнатьева*
 Художественный редактор *С. Н. Голубев*
 Технические редакторы: *Н. М. Харитонова, И. Н. Раченкова*
 Корректоры: *А. П. Сизова, Л. А. Ягупьева*

ИБ № 5444

Сдано в набор 27.10.89. Подписано в печать 30.03.90. Т-01753.
 Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2.
 Гарнитура литературная. Печать высокая.
 Усл. печ. л. 43,0. Усл. кр.-отг. 43,0. Уч.-изд. л. 53,99.
 Тираж 65 700 экз. Заказ 883. Цена 3 р.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Стромынский пер., 4

Типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени издательства «Машиностроение» при Государственном комитете СССР по печати 193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10