

СПРАВОЧНИК ПО КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ



Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана

К 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана

СПРАВОЧНИК ПО КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Под редакцией Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой

Москва
Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана
2005

ББК 34.43
УДК 669
С74

Федеральная целевая программа «Культура России»
(подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания России»)

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.В. Крымов; д-р техн. наук А.Г. Братухин;
канд. техн. наук В.А. Поклад

Авторы: Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов, Г.Г. Мухин, В.Н. Зикеев, О.М. Ховова, А.Г. Рахштадт, В.Н. Глушенко, Е.В. Рябченко, Э.Ч. Гини, И.С. Гершман, Н.А. Буше, А.П. Семенов, Н.В. Васильев, Ж.П. Пастухова, Г.Б. Строганов, В.И. Силаева, И.Н. Фридляндер, А.А. Зябрев, А.Б. Арзамасов, Ю.А. Пучков, Е.А. Ульяновин, Т.А. Панайоти, В.И. Третьяков, В.И. Солонин, В.И. Макарова, В.Н. Симонов, В.Б. Арзамасов, Ю.А. Быков, Л.М. Соколенко, И.В. Кириллов, Г.И. Эскин, Е.И. Панов, В.Ф. Моисеев, В.И. Кучерявый

С 74 **Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.– 640 с.: ил.**

ISBN 5-7038-2651-9

Приведены сведения о составах, 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.

ББК 34.43
УДК 669

© Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др., 2005
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005

ISBN 5-7038-2651-9

ПРЕДИСЛОВИЕ

В справочнике представлены главным образом конструкционные материалы, предназначенные для изготовления деталей машин и приборов, инженерных сооружений и изделий, которые в основном несут механические нагрузки, а в некоторых случаях находятся под воздействием окружающей среды и температуры.

Выбор материалов для деталей машин и приборов определяется эксплуатационными, технологическими и экономическими требованиями. Эксплуатационные требования к свойствам материалов часто играют определяющую роль, хотя технологические и экономические требования тоже важны, особенно в условиях массового производства.

Отличительная особенность предлагаемого справочника – классификация материалов по основным эксплуатационным характеристикам с учетом назначения. Принятая классификация поможет конструкторам и технологам лучше ориентироваться в выборе материалов для деталей машин и приборов. Такая же классификация принята в учебнике «Материаловедение», изданном в издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана и пользующемся большим спросом у читателей. Поэтому данный справочник является хорошим дополнением к учебнику. Он поможет студентам в решении материаловедческих задач при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также будет способствовать более глубокому усвоению курса «Материаловедение».

В написании справочника принимали участие преподаватели высшей школы, научные сотрудники промышленных и исследовательских организаций, крупные специалисты в области материаловедения.

Авторы благодарны всем, кто способствовал выходу в свет данного издания, – ФГУП ММПП «Салют», кафедре «Металловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана и Издательству МГТУ им. Н.Э. Баумана.

1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Конструкционные стали в общем объеме производства предприятий черной металлургии занимают более 90 %.

В зависимости от области применения конструкционные стали подразделяют на две основные группы: для строительных металлоконструкций и для деталей машин. Одновременно конструкционные стали подразделяют по уровню легированности на углеродистые, низколегированные и легированные.

1.1. Углеродистые стали

1.1.1. Углеродистые стали обыкновенного качества

Производят стали в виде горячекатаного проката: листового (ГОСТ 14637–89), а также сортового и фасонного (ГОСТ 535–88), применяемого в основном для изготовления строительных конструкций и ответственных деталей машин.

Согласно ГОСТ 380–94, выпускают стали следующих марок: Ст0, Ст1 (кп, пс, сп), Ст2 (кп, пс, сп), Ст3 (кп, пс, сп), Ст4 (кп, пс, сп), Ст5 (пс, сп), Ст5Гпс, Ст6 (пс, сп). По степени раскисления стали подразделяют на кипящие (кп), полуспокойные (пс) и спокойные (сп). Химический состав сталей приведен в табл. 1.1, а их механические свойства – в табл. 1.2.

Таблица 1.1. Химический состав углеродистых сталей обыкновенного качества (ГОСТ 380–94), % (мас.)

Марка стали	С	Mn	Si в стали			S	P
			кп	пс	сп		
Ст0	≤ 0,23	–	–	–	–	0,06	0,07
Ст1	0,06–0,12	0,25–0,5	0,05	0,05–0,17	0,12–0,30	0,05	0,04
Ст2	0,09–0,15	0,25–0,5	0,05	0,05–0,17	0,12–0,30	0,05	0,04
Ст3	0,14–0,22	0,3–0,65	0,07	0,05–0,17	0,12–0,30	0,05	0,04
Ст4	0,18–0,27	0,4–0,7	0,07	0,05–0,17	0,12–0,30	0,05	0,04
Ст5	0,28–0,37	0,5–0,8	–	0,05–0,17	0,15–0,35	0,05	0,04
Ст6	0,38–0,49	0,5–0,8	–	0,05–0,17	0,15–0,35	0,05	0,04
Ст3Г	0,14–0,22	0,8–1,1	–	0,05–0,17	–	0,05	0,04
Ст5Г	0,28–0,37	0,8–1,1	–	0,05–0,17	–	0,05	0,04

Примечания: 1. В сталях Ст1 – Ст6 допускается не более 0,3 % Cr; 0,3 % Ni; 0,3 % Cu; 0,08 % As; 0,01 % N. 2. В сталях, выплаваемых из керченских руд, допускается до 0,15 % As и 0,05 % P. 3. В сталях, выплаваемых в электропечах, допускается не более 0,012 % N.

**Таблица 1.2. Механические свойства листового проката
из углеродистых сталей обыкновенного качества**

Марка стали	σ_s , МПа	σ_s , МПа, при a , мм		δ_s , %, при a , мм		Изгиб на 180° при a , мм	
		≤ 20	от 20 до 100	≤ 20	> 20	≤ 20	> 20
		не менее					
Ст0	≥ 300	–	–	23	20	$d=2a$	$d=3a$
Ст1кп	300–390	–	–	35	32	$d=0$	$d=a$
Ст1пс, Ст1сп	310–410	–	–	34	31	$d=0$	$d=a$
Ст2кп	320–410	215	195	33	30	$d=0$	$d=a$
Ст2пс, Ст2сп	330–430	225	205	32	29	$d=0$	$d=a$
Ст3кп	360–460	235	215	27	24	$d=0,5a$	$d=1,5a$
Ст3пс, Ст3сп	370–480	245	225	26	23	$d=0,5a$	$d=1,5a$
Ст3Гпс	370–490	245	205	26	23	$d=0,5a$	$d=1,5a$
Ст3Гсп	390–570	245	205	26	23	–	$d=2a$
Ст4кп	400–510	255	235	25	22	$d=2a$	$d=3a$
Ст4пс, Ст4сп	410–530	265	245	24	21	$d=2a$	$d=3a$
Ст5пс, Ст5сп	490–630	285	265	20	17	$d=3a$	$d=4a$
Ст5Гпс	450–590	285	265	20	17	$d=3a$	$d=4a$
Ст6пс, Ст6сп	≥ 590	315	295	15	12	–	–

Примечание. Здесь a – толщина листа; d – диаметр оправки.

Прокат из Ст3пс и Ст3сп имеет гарантируемую ударную вязкость при температурах испытания до -20°C (табл. 1.3). Хладостойкость горячекатаных сталей Ст3сп и Ст3кп, определенная по температуре порога хладноломкости t_{50} (температуре перехода из вязкого состояния в хрупкое, при котором в изломе доли вязкой и хрупкой составляющих равны между собой), составляет -10°C и $+50^\circ\text{C}$ соответственно. После нормализации этих сталей t_{50} снижается до -30°C и $+10^\circ\text{C}$ соответственно [6].

**Таблица 1.3. Ударная вязкость проката из углеродистых сталей
обыкновенного качества**

Марка стали	Вид проката	Толщина проката, мм	Расположение образца относительно оси прокатки	Тип образца по ГОСТ 9454 – 78	KCU, МДж/м ² , не менее, при t, °C	
					+20	-20
Ст3пс Ст3сп	Листовой	5–9	Поперек	3	0,78/0,39	0,39
		10–25		1	0,69/0,29	0,29
		26–40		1	0,49/–	–
	Сортовой и фасонный	5–9	Вдоль	3	0,108/0,49	0,49
		10–25		1	0,98/0,29	0,29
		26–40		1	0,88/–	–
Ст3Гпс	Листовой	5–9	Поперек	3	0,78/0,39	0,39
		10–30		1	0,69/0,29	0,29
		31–40		1	49/–	–
	Сортовой и фасонный	5–9	Вдоль	3	0,108/0,49	0,49
		10–30		1	0,98/0,29	0,29
		31–40		1	0,88/–	–
Ст4пс Ст4сп	Листовой	5–9	Поперек	3	0,78/–	–
		10–25		1	0,59/–	–
		26–40		1	0,39/–	–
	Сортовой и фасонный	5–9	Вдоль	3	0,98/–	–
		10–25		1	0,88/–	–
		26–40		1	0,69/–	–

Примечание. В числителе – ударная вязкость в горячекатаном состоянии, в знаменателе – после механического старения.

1.1.2. Углеродистые качественные стали

Из углеродистых качественных сталей производят сортовой и калиброванный со специальной отделкой поверхности прокат в основном для изготовления деталей машин. Прокат изготавливают из сталей следующих марок: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 (55 пп) и 60; диаметром или толщиной до 250 мм.

Химический состав качественных сталей (табл. 1.4) по сравнению со сталями обыкновенного качества отличается меньшим содержанием вредных примесей серы и фосфора, а также примесей хрома, никеля, меди.

Механические свойства проката в нормализованном состоянии приведены в табл. 1.5; после закалки и отпуска – в табл. 1.6.

Таблица 1.4. Химический состав углеродистых качественных сталей (ГОСТ 1050–88), % (мас.)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr, не более
08	0,05–0,12	0,17–0,37	0,35–0,65	0,10
10	0,07–0,14	0,17–0,37	0,35–0,65	0,15
15	0,12–0,19	0,17–0,37	0,35–0,65	0,25
20	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	0,25
25	0,22–0,30	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
30	0,27–0,35	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
35	0,32–0,40	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
40	0,37–0,45	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
45	0,42–0,50	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
50	0,47–0,55	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
55	0,52–0,60	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
58 (55 пп)	0,55–0,63	0,10–0,30	≤ 0,20	0,15
60	0,57–0,65	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25

Примечание. Стали также содержат, %: 0,040 S; < 0,035 P; ≤ 0,30 Ni и ≤ 0,30 Cu.

Таблица 1.5. Механические свойства листового и сортового проката из углеродистых качественных сталей в нормализованном состоянии, не менее

Марка стали	Температура нормализации, °C (τ=30 мин)	σ _T	σ _B	δ ₅	ψ
		МПа		%	
08	920	196	320	33	60
10	900	205	330	31	55
15	900	225	370	27	55
20	890	245	410	25	55
25	880	275	450	23	50
30	880	295	490	21	50
35	870	315	530	20	45
40	860	335	570	19	45
45	850	355	600	16	40
50	850	375	630	14	40
55	850	380	650	13	35
58 (55 пп)	850	315	600	12	28
60	840	400	680	12	35

Нормы относятся к прокату диаметром (толщиной) до ≤ 80 мм; для проката диаметром (толщиной) > 80 мм допускается снижение δ₅ на 2 % и ψ на 5 %.

Таблица 1.6. Механические свойства сортового проката из углеродистых качественных сталей в закаленном и отпущенном состоянии, не менее

Марка стали	Температура, °С		$\sigma_{\text{в}}$, МПа, при d , мм		$\sigma_{\text{т}}$, МПа, при d , мм		δ_5 , %, при d , мм		KCU , МДж/м ²
	закалки*	отпуска	до 16	св. 16 до 40	до 16	св. 16 до 40	до 16	св. 16 до 40	
25	870	600	550	500	375	315	19	21	0,44
30	860	600	600	550	400	355	18	20	0,38
35	850	600	630	600	430	380	17	19	0,31
40	840	600	650	630	460	400	16	18	0,25
45	840	600	700	650	490	430	14	16	0,19
50	830	600	750	700	520	460	13	15	—
55	820	600	800	750	550	490	12	14	—
60	820	600	850	800	580	520	11	13	—

* Охлаждение в воде.

1.2. Низколегированные и легированные стали

1.2.1. Низколегированные строительные стали

Строительные стали (ГОСТ 19281–89) производят в виде толстолистового, широкополосного универсального, фасонного и сортового проката, а также гнутых профилей повышенной прочности ($\sigma_{\text{т}} = 265 \dots 440$ МПа, классы прочности 265, 295, 315, 325, 345, 355, 375, 390, 440). Прокат применяют в основном для изготовления сварных конструкций, поэтому в зависимости от требуемого уровня свойств его поставляют в горячекатаном состоянии, после нормализации, термического улучшения или контролируемой прокатки.

Для обеспечения свариваемости этих сталей регламентируют их углеродный эквивалент, определяемый по формуле

$$C_3 \leq C + \frac{Mn}{6} + \frac{V + Nb + Ti + Mo}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}.$$

Значение C_3 возрастает с повышением класса прочности стали от 0,38 до 0,44 %.

С целью повышения хладостойкости стали подвергают термической обработке или контролируемой прокатке, а для обеспечения стойкости против атмосферной коррозии дополнительно легируют 0,15–0,30 % Cu.

Химический состав наиболее типичных низколегированных сталей приведен в табл. 1.7. Суммарное содержание легирующих элементов в них не превышает ~ 2,5 % (мас.). Механические свойства этих сталей даны в табл. 1.8.

Таблица 1.7. Химический состав низколегированных свариваемых строительных сталей (ГОСТ 19281–89), % (мас.)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	Другие элементы
09Г2	≤ 0,12	0,17–0,37	1,4–1,8	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	–	–
09Г2Д	≤ 0,12	0,17–0,37	1,4–1,8	≤ 0,30	≤ 0,30	0,15–0,30	–	–
09Г2С	≤ 0,12	0,5–0,8	1,3–1,7	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	–	–
17Г1С	0,15–0,20	0,4–0,6	1,15–1,60	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	–	–
15ГФ	0,12–0,18	0,17–0,37	0,9–1,2	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	0,05–0,12	–
10Г2Б	≤ 0,12	0,17–0,37	1,2–1,6	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	–	0,02–0,05 Nb
15Г2СФ	0,12–0,18	0,4–0,7	1,3–1,7	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	0,05–0,10	–
14Г2АФ	0,12–0,18	0,3–0,6	1,2–1,6	≤ 0,40	≤ 0,30	≤ 0,30	0,07	0,015–0,025 N
14ХГС	0,11–0,16	0,4–0,7	0,9–1,3	0,5–0,8	≤ 0,30	≤ 0,30	–	–
10ХСНД	≤ 0,12	0,8–1,1	0,5–0,8	0,6–0,9	0,5–0,8	0,4–0,6	–	–
10ХНДП	≤ 0,12	0,17–0,37	0,3–0,6	0,5–0,8	0,3–0,6	0,3–0,5	–	0,07–0,12 P; 0,08–0,15 Al

Примечания: 1. Все стали, кроме 14Г2АФ, содержат ≤ 0,008 % N. 2. Содержание фосфора, серы и мышьяка в сталях не должно превышать 0,035; 0,040 и 0,08 % (мас.) соответственно. 3. Стали раскисляют алюминием до его содержания 0,01–0,05, % (мас.).

Таблица 1.8. Механические свойства проката из низколегированных строительных сталей, не менее

Марка стали	Класс прочности	Толщина проката, мм	σ_T	σ_B	$\delta_5, \%$	$KCU, \text{МДж/м}^2$, при $t, ^\circ\text{C}$	
			МПа			–40	–70
09Г2С; 16ГС	265	20–160	265	430	21	0,29	0,24
09Г2С; 10Г2С1	295	20–100	295	430	21	0,29	0,24
17Г1С; 10Г2С1	315	10–60	315	450	21	0,29	0,24
15ГФ; 15ХСНД; 10ХНДП	345	10–32	345	490	21	0,29	0,29
14Г2АФ; 15ГФ; 10Г2Б	375	10–50	375	510	20	0,39	0,29
15Г2СФ; 10ХСНД*	390	≤ 32	390	510	19	0,39	0,29
16Г2АФ	440	≤ 32	440	590	19	0,39	0,29

Примечание. Ударная вязкость при 20 °С для всех сталей после прокатки $KCU = 0,59 \text{ МДж/м}^2$, а после механического старения при той же температуре $KCU = 0,29 \text{ МДж/м}^2$.

* Толщина проката до 40 мм.

Контролируемой прокатке* в основном подвергают низколегированные стали, микролегированные ниобием [14]. При этом регламентируют температуру конца прокатки ($t_{к.п} = 760 \dots 820 \text{ }^\circ\text{C}$), степень деформации в последних проходах (не менее 20 %), скорость охлаждения от $t_{к.п}$ до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\sim 10 \text{ }^\circ\text{C/c}$). В табл. 1.9 приведен химический состав сталей, подвергаемых контролируемой прокатке, а в табл. 1.10 их механические свойства и хладостойкость. Основное применение этих сталей – хладостойкие нефтегазопроводные сварные трубы большого диаметра.

Таблица 1.9. Химический состав низколегированных строительных сталей, подвергаемых контролируемой прокатке, % (мас.)

Марка стали	C	Mn	Si	S*	P*	Nb	V	Ti
09Г2ФБ	$\leq 0,13$	$\leq 1,7$	$\leq 0,35$	0,007	0,020	$\leq 0,05$	$\leq 0,09$	0,010–0,035
13Г1СБ-У	0,12–0,15	1,30–1,60	0,4–0,6	0,007	0,025	$\geq 0,045$	–	0,015–0,035
10Г2ФБЮ	0,09–0,12	1,55–1,75	0,15–0,50	0,006	0,020	0,02–0,05	0,08–0,12	0,010–0,035
08Г2ФБТ	$\leq 0,10$	$\leq 2,00$	$\leq 0,50$	0,005	0,020	$\leq 0,06$	$\leq 0,08$	$\leq 0,05$

* Не более.

Таблица 1.10. Механические свойства низколегированных строительных сталей после контролируемой прокатки листов толщиной 9–28 мм

Марка стали	σ_s	σ_T	δ_s , %, не менее	KCU при $-60 \text{ }^\circ\text{C}$	KCV при $-20 \text{ }^\circ\text{C}$
	МПа			МДж/м ² , не менее	
09Г2ФБ	550–670	450–570	22	0,59	0,88
13Г1СБ-У	570–690	490–610	22	0,59	0,69*
10Г2ФБЮ	590–690	480–580	22	0,69	0,49
08Г2ФБТ	640–740	510–610	20	0,59	0,88

* При $-5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сероводородостойкие низколегированные стали применяют для изготовления оборудования (транспортные трубы, аппараты) нефтегазовых месторождений, содержащих в продукте сероводород, углекислый газ, которые вызывают коррозионное растрескивание металла. Химический состав низколегированных сероводородостойких сталей приведен в табл. 1.11, а механические и коррозионные свойства – в табл. 1.12. Для обеспечения требуемой коррозионной стойкости стали микролегированы ниобием и ванадием, модифицированы кальцием для глобуляризации сульфидных включений при повышенной чистоте по содержанию серы, равной 0,005–0,010 % (мас.) [13].

* Контролируемая прокатка – это высокотемпературная обработка низколегированной стали, технология которой основана на определенном сочетании основных параметров горячей деформации: температуры нагрева и конца прокатки, суммарной степени, кратности деформации и ее величины при различных температурах, скорости охлаждения между проходами и т. д.

Таблица 1.11. Химический состав сероводородостойких низколегированных сталей, % (мас.)

Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	V	Nb	Al	N
20Юч	0,16–0,24	0,15–0,30	0,35–0,65	≤ 0,004	≤ 0,020	≤ 0,05	≤ 0,10	–	–	0,01–0,06	≤ 0,008
12ГФ	0,09–0,14	0,17–0,37	0,8–1,1	≤ 0,005	≤ 0,015	≤ 0,05	≤ 0,10	0,06–0,12	–	0,01–0,06	≤ 0,008
16ГФБ	0,13–0,18	0,17–0,37	0,9–1,3	≤ 0,005	≤ 0,015	≤ 0,05	≤ 0,10	0,04–0,10	0,03–0,06	0,01–0,06	≤ 0,008
14ГБ-Ш*	0,07–0,15	0,2–0,4	0,8–1,0	≤ 0,005	≤ 0,020	–	–	–	0,02–0,05	0,02–0,05	–
09ХТ2НАБ	0,09–0,14	0,3–0,5	1,3–1,7	≤ 0,010	≤ 0,020	0,8–1,2	0,30–0,65	–	0,03–0,08	0,01–0,06	0,010–0,025

Примечание. Все стали в жидком состоянии обрабатывают кальцийсодержащим модификатором.

* Сталь также содержит 0,010–0,035 Ti.

Таблица 1.12. Механические свойства, хладостойкость и стойкость к сероводородному растрескиванию низколегированных сталей для нефтегазопроводных труб и аппаратов

Марка стали	Металлопродукция	σ_b	σ_T	$\delta_5, \%$	КСУ, МДж/м ² , при -40°С	$t_{90}, ^\circ\text{C}$	Стойкость в H ₂ S, ч, при $\sigma=0,8 \sigma_T$
20Юч	Трубы бесшовные диаметром 42–426 мм; листы толщиной 22–100 мм	≥ 420	≥ 240	23	49	-40	720
12ГФ	Трубы бесшовные диаметром 57–426 мм	415–570	≥ 290	24	49	-40	720
16ГФБ	То же	530–700	≥ 415	22	49	-40	720
14ГБ-Ш	Листы толщиной 14–26 мм для электро- сварных труб диаметром 530–1020 мм	440–540	310–410	23	78	–	720
09ХТ2НАБ	Листы толщиной 65–100 мм для аппаратов	≥ 490	≥ 314	22	49	-10	500

Примечание. Стойкость против сероводородного растрескивания определяется испытанием цилиндрических образцов диаметром 6 мм при постоянной нагрузке в специальной среде по методике МСКР-01–85 [7].

1.2.2. Легированные машиностроительные стали

Легированные машиностроительные стали (ГОСТ 4543–71) производят в основном в виде горячекатаного и кованого сортового проката диаметром или толщиной до 250 мм для изготовления деталей машин, бесшовных труб нефтяного сортамента и др. В зависимости от вида термической или химико-термической обработки стали подразделяют на термоулучшаемые (закалка и высокий отпуск) и цементуемые (закалка и низкий отпуск), а в зависимости от содержания легирующих элементов – на хромистые, марганцовистые, хромоникелевые и т. д.

Для достижения эксплуатационной надежности деталей машин машиностроительные стали после закалки должны обеспечивать требуемую глубину прокаливаемости* на структуру мартенсита или мартенсита и не более 50 % нижнего бейнита, а после отпуска – дисперсную сорбитную структуру с достаточно высоким сопротивлением хрупкому разрушению (порог хладноломкости t_{50} не выше -60°C).

Цементуемые стали наряду с требуемым уровнем прокаливаемости, механических свойств и сопротивления хрупкому разрушению должны обеспечивать повышенную износостойкость и усталостную прочность благодаря созданию (после цементации, закалки и низкого отпуска) поверхностного слоя с высокой твердостью ($\geq 60 \text{ HRC}_3$).

В зависимости от содержания в машиностроительных сталях вредных примесей серы и фосфора, а также примесей цветных металлов (меди, никеля и др.) различают качественные ($S \leq 0,035$; $P \leq 0,035$ %), высококачественные ($S \leq 0,025$; $P \leq 0,025$ %), особо высококачественные ($S \leq 0,015$, $P \leq 0,025$ %). В табл. 1.13 приведены типичные марки этих сталей и их химический состав, а в табл. 1.14 – их механические свойства после термической обработки.

Дополнительные справочные данные по механическим свойствам, прокаливаемости и хладостойкости машиностроительных сталей приведены в [8].

Таблица 1.13. Химический состав легированных машиностроительных сталей (ГОСТ 4543–71), % (мас.)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Другие элементы
	<i>Хромистые стали</i>				
20X	0,17–0,23	0,17–0,37	0,50–0,80	0,70–1,00	–
40X	0,36–0,44	0,17–0,37	0,50–0,80	0,80–1,10	–
	<i>Марганцовистые стали</i>				
20Г	0,17–0,24	0,17–0,37	0,7–1,0	–	–
40Г	0,35–0,45	0,17–0,37	0,7–1,0	–	–
40Г2	0,36–0,44	0,17–0,37	1,40–1,80	–	–

* Прокаливаемость стали определяется методом торцевой закалки цилиндрических образцов по ГОСТ 5657–69 с построением кривых и полос прокаливаемости в координатах твердость HRC_3 – расстояние от охлаждаемого торца образца. Полосы прокаливаемости для ряда марок сталей и диаметры прутков, имеющих после объемной закалки в воде или в масле такую же твердость, как и торцевой образец на соответствующем расстоянии от охлаждаемого торца, приведены в приложении № 1 ГОСТ 4543–71.

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Другие элементы
<i>Хромомарганцевые стали</i>					
18ХГТ	0,17–0,23	0,17–0,37	0,80–1,10	1,00–1,30	0,03–0,09 Ti
20ХГР	0,18–0,24	0,17–0,37	0,70–1,00	0,75–1,05	≥ 0,001 В
30ХГТ	0,24–0,32	0,17–0,37	0,80–1,10	1,00–1,30	0,03–0,09 Ti
25ХГМ	0,23–0,29	0,17–0,37	0,90–1,20	0,90–1,20	0,20–0,30 Мо
<i>Хромокремнистые стали</i>					
38ХС	0,34–0,42	1,00–1,40	0,30–0,60	1,30–1,60	–
<i>Хромомolibденовые и хромомolibденованадиевые стали</i>					
20ХМ	0,15–0,25	0,17–0,37	0,40–0,70	0,80–1,10	0,15–0,25 Мо
30ХМА	0,26–0,33	0,17–0,37	0,40–0,70	0,80–1,10	0,15–0,25 Мо
40ХМФА	0,37–0,44	0,17–0,37	0,40–0,70	0,80–1,10	0,20–0,30 Мо, 0,10–0,18 V
<i>Никельмolibденовые стали</i>					
20Н2М	0,17–0,25	0,17–0,37	0,40–0,70	–	1,50–1,90 Ni, 0,20–0,30 Мо
<i>Хромоникелевые стали</i>					
20ХН	0,17–0,23	0,17–0,37	0,40–0,70	0,45–0,75	1,00–1,40 Ni
40ХН	0,36–0,44	0,17–0,37	0,50–0,80	0,45–0,75	1,00–1,40 Ni
20ХНР	0,16–0,23	0,17–0,37	0,60–0,90	0,70–1,10	0,80–1,10 Ni
20ХН3А	0,17–0,24	0,17–0,37	0,30–0,60	0,60–0,90	2,75–3,15 Ni
30ХН3А	0,27–0,33	0,17–0,37	0,30–0,60	0,60–0,90	2,75–3,15 Ni
<i>Хромокремнемарганцевые стали</i>					
30ХГСА	0,28–0,34	0,90–1,20	0,80–1,10	0,80–1,10	–
30ХГСН2А	0,27–0,34	0,90–1,20	1,00–1,30	0,90–1,20	1,40–1,80 Ni
<i>Хромомарганцевоникелевые стали</i>					
15ХГН2ТА	0,13–0,18	0,17–0,37	0,70–1,00	0,70–1,00	1,40–1,80 Ni
20ХГНР	0,16–0,23	0,17–0,37	0,70–1,00	0,70–1,00	0,80–1,10 Ni, ≥ 0,001 В
<i>Хромоникельмolibденовые стали</i>					
14Х2Н3МА	0,12–0,17	0,17–0,37	0,30–0,60	1,50–1,75	2,75–3,15 Ni, 0,20–0,30 Мо
40ХН2МА	0,37–0,44	0,17–0,37	0,50–0,80	0,60–0,90	1,25–1,65 Ni, 0,15–0,25 Мо
18Х2Н4МА	0,14–0,20	0,17–0,37	0,25–0,55	1,35–1,65	4,00–4,40 Ni, 0,30–0,40 Мо
<i>Хромоалюминиевые стали</i>					
38Х2Ю	0,35–0,43	0,20–0,40	0,20–0,50	1,50–1,80	0,50–0,80 Al
38Х2МЮА	0,35–0,42	0,20–0,45	0,30–0,60	1,35–1,65	0,15–0,25 Мо, 0,70–1,10 Al

Примечание. Буква «А» в конце марки стали означает, что сталь высококачественная.

Таблица 1.14. Режимы термообработки и механические свойства (не менее) легированных машиностроительных сталей

Марка стали	Температура, °С		σ_T	σ_B	δ_5	ψ	KCU, МДж/м ²	d°, мм	
	закалки	отпуска							МПа
20Х	880 (вода, масло)+ 770... 820 (вода, масло)		180	635	780	11	40	0,59	15
40Х	860 (масло)		500	785	980	10	45	0,59	25
18ХГТ	880... 950 (воздух)+ 870 (масло)		200	880	980	9	50	0,78	15
25ХГМ	860 (масло)		200	1080	1180	10	45	0,78	25
38ХС	900 (масло)		630	735	930	12	50	0,69	15
30ХМА	880 (масло)		540	735	930	12	50	0,88	15
20ХН	860 (вода, масло)+ 760... 810 (вода, масло)		180	590	780	14	50	0,78	15
20ХН3А	820 (масло)		500	735	930	12	55	0,108	15
30ХГСА	880 (масло)		540	830	1080	10	45	0,49	25
40ХН2МА	850 (масло)		620	930	1080	12	50	0,78	25
18Х2Н4МА	950 (воздух)+ 860 (воздух)		200	830	1130	12	50	0,98	15
	950 (масло)+ 860 (масло)		550	780	1030	12	50	0,118	15
38Х2МЮА	940 (вода, масло)		640	830	980	14	50	0,88	30

* Диаметр образца.

1.2.3. Высокопрочные мартенситно-старяющие 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-старяющих сталей, которая не достигается при использовании сталей других классов [17].

Мартенситно-старяющие 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-старяющих 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. 1.1), 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. 1.2 и 1.3). Положительное влияние кобальта в мартенситно-старееющих сталях обусловлено также формированием в мартенситной матричной фазе при старении упорядоченных областей, являющихся дополнительным фактором упрочнения. Хром способствует повышению коррозионной стойкости этих сталей и одновременно вызывает дополнительное упрочнение при старении (рис. 1.4).

Подробно основные системы легирования мартенситно-старееющих сталей, особенности их фазового состава и структурного состояния, а также представления о природе высокой прочности сталей этого класса рассмотрены в монографиях [3, 18]. Эти стали

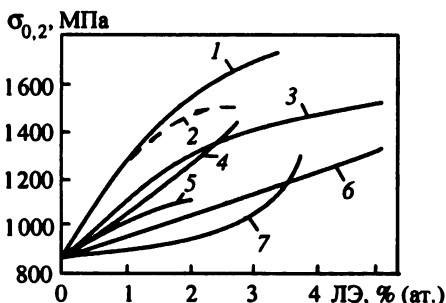


Рис. 1.1. Влияние концентрации легирующих элементов (ЛЭ) на упрочнение железоникелевого мартенсита (18 % Ni) при старении [17]:

1 – Ti; 2 – Be; 3 – Al; 4 – Mn; 5 – Nb; 6 – Si; 7 – Mo

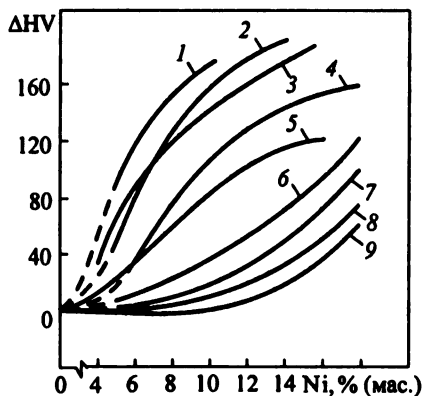


Рис. 1.2. Влияние содержания никеля на повышение твердости при старении мартенсита сталей на основе Fe с различным дополнительным легированием [17]:

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

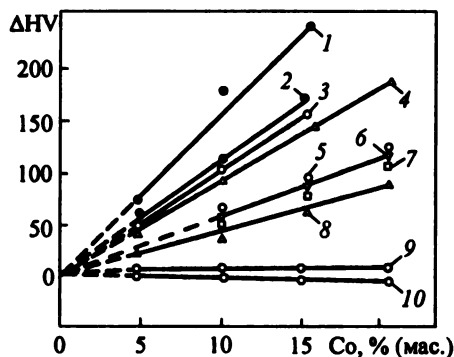


Рис. 1.3. Влияние содержания кобальта на повышение твердости при старении железоникелевого мартенсита (14–18 % Ni), содержащего различные элементы замещения [15]:

1 – H18F7; 2 – H18B10; 3 – H16M5; 4 – H16C3; 5 – H14E4; 6 – H18Ta6; 7 – H16Г5; 8 – H16; 9 – H16Т; 10 – H16Ю

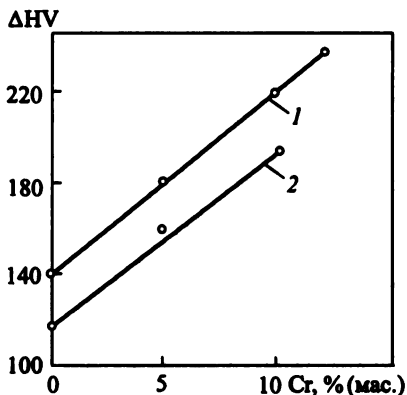


Рис. 1.4. Влияние содержания хрома на повышение твердости при старении сталей [17]:

1 - 11 % Ni + 1,1 % Ti; 2 - 11 % Ni + 1,1 % Al

размеров при термической обработке этих сталей минимальны, поэтому практически исключены поводка и коробление изделий самой сложной формы. Стали этого класса, как правило, не содержат углерода, поэтому нет опасности их обезуглероживания при термической обработке в обычной среде. Указанные преимущества мартенситно-старяющихся сталей позволяют подвергать термической обработке готовые детали и изделия.

В закаленном состоянии стали характеризуются высокой пластичностью и вязкостью, малым коэффициентом деформационного упрочнения; поэтому при изготовлении проволоки, ленты, труб и других полуфабрикатов эти стали можно деформировать с высокими степенями обжатия (до 80 %), не прибегая к промежуточным разупрочняющим обработкам. Стали хорошо свариваются, а также штампуются в горячем и холодном состоянии; обработка резанием закаленных сталей не вызывает трудностей.

Закаленные мартенситно-старяющиеся стали имеют структуру мартенсита замещения. Легирующие элементы, вызывающие старение, незначительно влияют на свойства несостаренного мартенсита, поэтому прочность, пластичность и ударная вязкость закаленных сталей разных составов весьма близки и находятся, как правило, в следующих пределах [17]: $\sigma_b = 900 \dots 1200$ МПа; $\sigma_{0,2} = 800 \dots 1100$ МПа; $\delta = 15 \dots 20$ %; $\psi = 50 \dots 80$ %; $KCU = 1,5 \dots 3$ МДж/м².

Старение мартенситно-старяющихся 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. 1.5); при этом в зависимости от состава сталей временное сопротивление может повышаться на 300–1800 МПа [17]. При более высокой температуре старения развиваются

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

Мартенситно-старяющиеся стали характеризуются высокой технологичностью [8, 17]. Их упрочняющая термическая обработка, заключающаяся в закалке и старении, сравнительно проста. Стали имеют глубокую прокаливаемость, закаляются на мартенсит практически при любой скорости охлаждения. Изменения

процессы, ведущие к разупрочнению: коагуляция частиц упрочняющих фаз и образование устойчивого аустенита вследствие обратного $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения.

Учитывая диапазон упрочнения, реализуемого в мартенситно-старееющих сталях ($\sigma_{\text{в}} = 1500 \dots 3500$ 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-старееющих 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-старееющие стали общего назначения. Составы и свойства. Наиболее распространенные составы этих сталей и их свойства приведены в табл. 1.15 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) [17].

Наибольшее распространение в технике получила сталь Н18К9М5Т (ЭП-637). Согласно ТУ 14-1-1531–75, она 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 механические свойства: $\sigma_{\text{в}} = 1000 \dots 1100$ МПа, $\sigma_{0,2} = 900 \dots 1000$ МПа, $\delta \geq 15$ %, а после закалки и старения при 480–500 °С, 3 ч – $\sigma_{\text{в}} = 1900 \dots 2100$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1800 \dots 2000$ МПа, $\delta = 8 \dots 10$ %, $\psi = 45 \dots 55$ %, $KCU = 0,5 \dots 0,7$ МДж/м².

В связи с широким и разнообразным промышленным применением было детально изучено влияние режимов термической обработки на комплекс основных свойств стали Н18К9М5Т. Перегрев при горячей пластической деформации или термической обработке повышает ее чувствительность к трещине (табл. 1.16). 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.

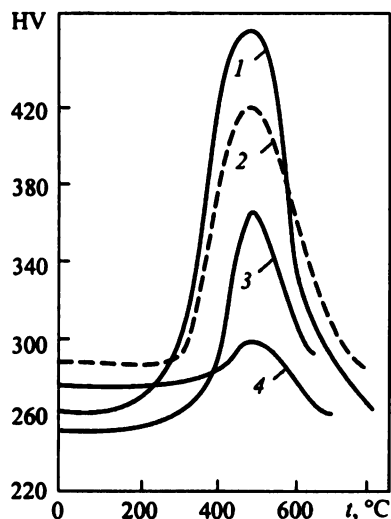


Рис. 1.5. Влияние легирующих элементов на упрочнение железоникелевого мартенсита при старении [17]: 1 – 17,5 % Ni + 1,2 % Ti; 2 – 17,5 % Ni + 1,1 % Al; 3 – 18 % Ni + 1,5 % Nb; 4 – 16,5 % Ni + 2,1 % Mo

Таблица 1.15. Содержание основных легирующих элементов и механические свойства (средние) мартенситно-стареющих сталей общего назначения после старения при 480–520 °С [10]

Тип стали	Средняя концентрация легирующих элементов, % (мас.)	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
		МПа		%		
<i>$\sigma_s = 1500 \dots 2000$ МПа</i>						
H18K3M4T	18 Ni; 3,2 Co; 4,2 Mo; 0,26 Ti	1550	1500	9	49	0,46
H18K7M5T	18 Ni; 7 Co; 5,5 Mo; 0,5 Ti	1800	1700	8	50	0,5
H18K8M3T	18 Ni; 8 Co; 3 Mo; 0,2 Ti	1450	1400	15	65	0,8
H18K8M5T	18 Ni; 8 Co; 5 Mo; 0,5 Ti	1850	1800	12	60	0,5
H18K9M5T	18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,5 Ti	1900	1830	8	50	0,6
H18K9M5T	18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,8 Ti	2100	1900	8	50	0,5
H18K9M5T	18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 1,2 Ti	2180	1960	8	45	0,6
H15K9M5TЮ	15 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,7 Ti; 0,9 Al	1960	–	6	23	–
H16K4M5T2Ю	16 Ni; 4,5 Co; 4,5 Mo; 2 Ti; 0,3 Al	2050	1980	7,5	40	0,2
H12K8M3Г2	12 Ni; 8 Co; 3 Mo; 2 Mn	1500	1480	9,6	57	0,6
H12K8M4Г2	12 Ni; 8 Co; 4 Mo; 2,3 Mn	1700	1680	7	50	0,4
H18Ф6M3	18 Ni; 6 V; 3 Mo	1650	1600	10	60	0,7
H18Ф6M6	18 Ni; 6 V; 6 Mo	1940	1880	10	53	0,45
<i>$\sigma_s = 2000 \dots 2500$ МПа</i>						
H16K11M3T2	16 Ni; 11 Co; 3 Mo; 1,6 Ti	2136	2070	11	64	–
H16K11M3T2	16 Ni; 11 Co; 3 Mo; 1,9 Ti	2250	2220	12	60	–
H17K11M4T2Ю	17 Ni; 11 Co; 4,5 Mo; 1,8 Ti; 1 Al	2570	2550	8	46	0,25
H18K12M3T2	18 Ni; 12 Co; 3 Mo; 1,4 Ti	2400	2350	9	50	0,2
H17K12M5T	17 Ni; 12 Co; 5 Mo; 1 Ti	2050	2000	8	45	0,3
H18K12M4T2	18 Ni; 12 Co; 4 Mo; 2 Ti	2450	2350	7	35	–
H18K14M5T	18 Ni; 14 Co; 5 Mo; 1,5 Ti	2400	–	9	35	–
H18K4M7TC	18 Ni; 4,5 Co; 7,7 Mo; 0,6 Ti; 0,7 Si	2180	2060	7	34	0,35
H17K10M2B10T	17 Ni; 10 Co; 1,5 Mo; 10 W; 0,7 Ti	2350	2300	8,5	48	0,3
<i>$\sigma_s \geq 2500$ МПа</i>						
H12K12M10TЮ	12 Ni; 12 Co; 10 Mo; 0,8 Ti; 1 Al	3000	2950	2	4	–
H12K15M10	12 Ni; 15 Co; 10 Mo	2500	2400	6	30	0,2
H13K15M10	13 Ni; 15 Co; 10 Mo	2600	2500	6	30	0,2
H13K16M10	13 Ni; 16 Co; 11 Mo	2800	2740	8	42	–
H12K16M12	12 Ni; 16 Co; 12 Mo	2800	2740	5	40	0,2
H8K18M14	8 Ni; 18 Co; 14 Mo	3500	3400	1	3	–
H12K12M7B7	12 Ni; 12 Co; 7,8 Mo; 6,7 W	2600	–	6	30	0,25
H16K15B9M2	16 Ni; 15 Co; 9 W; 2 Mo	2600	2400	6	30	0,2

Примечание. Освоенные промышленностью стали поставляют по техническим условиям.

Таблица 1.16. Чувствительность образцов стали 00Н18К9М5Т к поверхностной усталостной трещине [26]

Заготовка для изготовления образца	Термическая обработка	Номер зерна	σ_s , МПа	
			гладких образцов	образцов с трещиной
Горячекатаный лист (толщиной 2,5 мм)	Закалка 820 °С, 1 ч + старение 450 °С, 3 ч	8	1940	1940
Перегретый (1100 °С, 2 ч) пруток диаметром 130 мм	То же	1–3	1860–1950	1500–1720
	Трехкратная закалка 920 °С, 1 ч + 820 °С, 1 ч + 450 °С, 3 ч	5–6	1930	1900–1990

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 разнотерностью, но главным образом с образованием зернограницных 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 пограничных выделений) и последующую трехкратную закалку при 900–1000 °С (для измельчения зерна) (табл. 1.17).

Таблица 1.17. Влияние режима термической обработки крупных поковок из стали Н18К9М5Т на ее свойства [25]

Термическая обработка	Направление волокна	σ_s	$\sigma_{0,2}$	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	0,07–0,2
Закалка 1200 °С, 2 ч, вода + трехкратная закалка 970 °С, 1 ч, вода + старение 520 °С, 3 ч	Продольное	1950–2100	1850–2050	6–10	40–58	–
	Поперечное	1950–2100	1850–2050	5–8	25–50	0,2–0,25

Применительно к стали Н18К9М5Т были опробованы различные комбинированные способы термической обработки, в том числе и термоциклирование, 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 ударно-циклическому нагружению при незначительном снижении прочности стали (табл. 1.18).

Таблица 1.18. Механические свойства (средние значения) стали H18K9M5T при различных способах получения остаточного аустенита [17]

Вариант	Термическая обработка	Количество аустенита, % (об.)	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU_2 МДж/м ²	$K_{Ic}^{1/2}$ МПа ^{1/2}	Число циклов до разрушения при σ_{max} , МПа		
									МПа	%	
Обычная термическая обработка	Закалка 820 °C + старение 490 °C, 3 ч	0	2100	2050	8	57	0,4	97	48 000	20 000	4600
Термоциклирование	Двухкратная закалка 820 °C, 5 мин + старение 490 °C, 3 ч	18	1950	1930	10,8	63	0,9	143	60 000	23 000	4400
Старение в двухфазной области	Закалка 820 °C + старение 550 °C, 3 ч	28	1800	1750	8,7	60	0,4	115	33 000	13 000	3740
	Закалка 820 °C + старение 600 °C, 30 мин	19	1790	1730	10,7	58	0,6	128	38 000	13 600	3700
	Закалка 820 °C + старение 650 °C, 5 мин	18	1810	1750	10	63	0,7	137	43 000	17 600	4100
Тепловая стабилизация	Нагрев до 820 °C + изотермическая выдержка 110 °C, 5 мин + старение 490 °C, 3 ч	30	1860	1800	10	60	0,6	113	50 000	12 000	250

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 разрушения при ударном изгибе образцов с трещиной изменяются при возрастании упрочнения практически независимо от режима старения.

Проведена оценка работоспособности стали в различных условиях эксплуатации. Параметры, характеризующие конструктивную прочность стали Н18К9М5Т, свидетельствуют о высоком сопротивлении развитию трещины. После полного цикла упрочняющей обработки отношение временного сопротивления образцов с надрезом к временному сопротивлению гладких образцов $\sigma_{\text{н}}^{\text{в}}/\sigma_{\text{г}}^{\text{в}} = 1,4 \dots 1,6$, т. е. существенно больше 1; ударная вязкость образцов с заранее нанесенной трещиной также весьма высока (0,15–0,25 МДж/м²). Вязкость разрушения K_{1c} , хотя и снижается по мере роста предела текучести (табл. 1.19), однако во всех случаях превышает уровень, достигаемый в углеродсодержащих легированных сталях эквивалентной прочности.

Меньшая чувствительность стали Н18К9М5Т к надрезу проявляется и в условиях усталостного нагружения. По сопротивлению усталости сталь соответствует углеродсодержащим конструкционным сталям равной прочности (рис. 1.6), а при ударно-усталостном нагружении ее стойкость в 2–4 раза выше [17].

Как и многим другим мартенситно-старееющим сталям, стали Н18К9М5Т свойственно высокое сопротивление развитию малой пластической деформации. Для достижения максимального предела упругости ($\sigma_{0,002} = 1275 \dots 1370$ МПа) рекомендуют старение при 450 °С, 4 ч [20]. Ступенчатое старение по режиму 480 °С, 30 мин + 425 °С, 8 ч еще больше повышает предел упругости ($\sigma_{0,002}$ до 1575 МПа).

Таблица 1.19. Вязкость разрушения стали Н18К9М5Т с различным содержанием титана [17]

Ti, % (мас.)	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}
0,2	1400	115–180
0,4	1700	103–170
0,8	1950	93–155

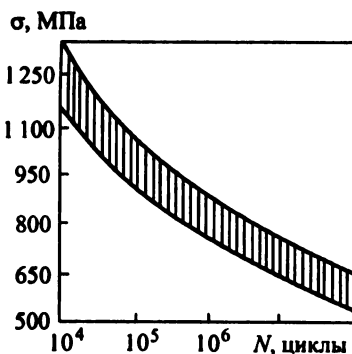


Рис. 1.6. Кривая усталости образцов из стали Н18К9М5Т [17]

При определенных режимах термической обработки благодаря стабилизации некоторого количества аустенита наряду с высокими упругими характеристиками сталь Н18К9М5Т обладает также и элинварными свойствами, т. е. малым изменением модуля упругости в климатическом интервале температур (табл. 1.20).

Оптимальное сочетание элинварных и механических свойств получено на стали Н21К9М5Т с повышенным содержанием никеля (после закалки от 850–900 °С и старения при 575 °С, 3 ч ТКЧ составил $-30 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, а $\sigma_{0,005} = 1100 \dots 1150 \text{ МПа}$).

Таблица 1.20. Физико-механические свойства стали Н18К9М5Т после старения при разных температурах [9]

Температура старения, °С	$\alpha_E \cdot 10^{6^*}$	$\alpha_f \cdot 10^{6^{**}}$	Количество аустенита, % (об.)	$\sigma_{0,005}$	$\sigma_{0,2}$	σ_s	δ	ψ
	°С ⁻¹			МПа			%	
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	—	—	—	—	—

* Температурный коэффициент модуля упругости. ** Температурный коэффициент частоты.

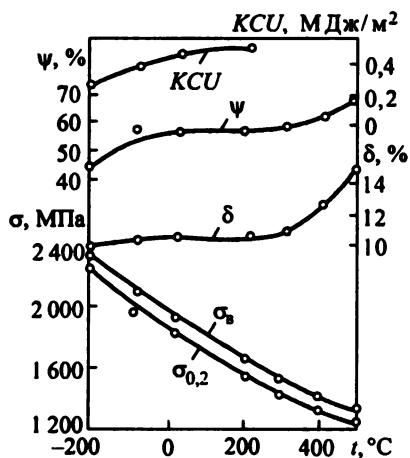


Рис. 1.7. Зависимость механических свойств стали Н18К9М5Т от температуры испытаний [17]

Сталь Н18К9М5Т сохраняет свою работоспособность в широком интервале температур: от криогенных до + 400 °С (рис. 1.7). С понижением температуры испытания до -196 °С временное сопротивление возрастает от 2000 до 2400 МПа при незначительном уменьшении пластичности и вязкости ($KCU = 0,3 \dots 0,4 \text{ МДж/м}^2$, $\delta = 7 \dots 9 \%$, $\psi = 40 \dots 45 \%$) [17]. При нагреве с ростом температуры пропорционально уменьшаются прочностные характеристики, снижается предел упругости $\sigma_{0,002}$ от 1450 МПа при 20 °С до 1210, 930 и 755 МПа соответственно при 200, 300, 400 °С [20]. Тем не менее и при 300 °С сталь отличают достаточно высокие свойства и хорошее сопротивление ползучести.

Ниже приведены некоторые физико-механические свойства стали H18K9M5T [17]:

Удельное электрическое сопротивление ρ , мкОм·м:	
после закалки 820 °С, 1 ч	0,60–0,51
после старения при 480 °С, 3 ч	0,38–0,39
Козрцитивная сила, А/м:	
после закалки 820 °С, 1 ч	1750–1910
после старения при 480 °С, 3 ч	2150
Модуль упругости E	
при 20 °С, ГПа	190
Модуль сдвига G , ГПа	
	70–72
Козэффициент Пуассона μ	
	0,3
Плотность γ , т/м ³	
	8
Козэффициент линейного расширения	
$\alpha_{20-480} \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	11,2
Изменение длины $\Delta l/l$ после старения	
при 480–500 °С, %	–0,08
Теплопроводность $\lambda_{100-400} \text{ } ^\circ\text{C}$, Вт/(м·°С)	
	25,5
Удельная теплоемкость $c_{100-400} \text{ } ^\circ\text{C}$, кДж/(кг·°С)	
	0,480

Особо важное значение имеет малое изменение размеров деталей при полном цикле упрочняющей термической обработки (рис. 1.8).

Коррозионно-стойкие мартенситно-стареющие стали. Составы и свойства. Вследствие высокого содержания никеля мартенситно-стареющие стали общего назначения по коррозионной стойкости (без нагрузки) превосходят высокопрочные конструкционные низколегированные стали, а по сопротивлению коррозии под напряжением уступают им [3]. Коррозионная стойкость сталей этого класса повышается при введении уже 5 % Сг; однако достаточную их работоспособность как в атмосферных условиях, так и в некоторых агрессивных средах обеспечивает введение не менее 10–12 % Сг.

Легирование хромом вносит существенные изменения в фазовый состав сталей, способствует сохранению в них значительного количества остаточного аустенита, в связи с чем коррозионно-стойкие мартенситно-стареющие стали фактически принадлежат к переходному (мартенситно-аустенитному) классу и в цикле их упрочняющей обработки рекомендовано перед старением проводить обработку холодом или холодную пластическую деформацию. Для сталей, содержащих хром, характерным является рост козэффициента деформационного упрочнения, что позволяет

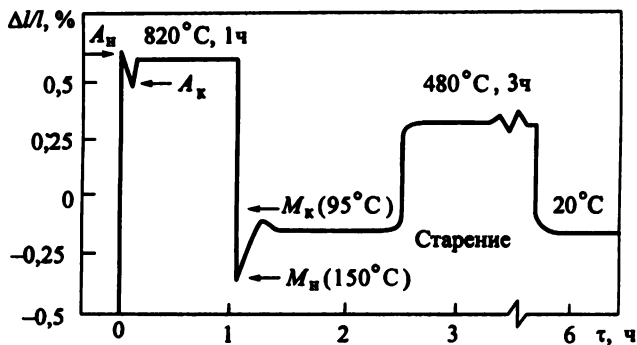


Рис. 1.8. Относительное изменение длины образцов при отдельных операциях упрочняющей термической обработки стали Н18К9М5Т [17]

использовать для них холодную пластическую деформацию перед старением как эффективный дополнительный фактор упрочнения [17]. Введение кобальта существенно (до 550 °С) повышает теплостойкость сталей этого класса.

Наиболее распространенные составы коррозионно-стойких мартенситно-стареющих сталей и их свойства после полного цикла упрочняющей обработки приведены в табл. 1.21. Отдельно здесь выделены стали, предназначенные для эксплуатации при повышенных температурах.

Стали, нашедшие широкое промышленное применение, условно можно разбить на две группы: низкоуглеродистые слабостареющие (типа 08Х15Н5Д2Т) и безуглеродистые интенсивно стареющие (типа 03Х12Н10Д2ТБ и 03Х11Н10М2Т).

Сталь 08Х15Н5Д2Т (ВНС-2) [3] в закаленном состоянии кроме мартенсита содержит около 10 % остаточного аустенита. Температура закалки составляет 950–1000 °С. Охлаждение при закалке должно быть ускоренным во избежание образования сетки зерно-границных 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 ($\sigma_B = 1150 \dots 1220$ МПа) при очень высоком сопротивлении удару ($KCU = 1,5 \dots 2$ МДж/м²). Старение при 450 °С способствует достижению более высокого упрочнения ($\sigma_B = 1350 \dots 1450$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1150 \dots 1250$ МПа). Временное сопротивление стали можно повысить до 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 08Х15Н5Д2Т перспективным материалом для многих отраслей современной техники.

Таблица 1.21. Содержание основных легирующих элементов и механические свойства (средние) коррозионно-стойких мартенситно-старяющихся сталей [10]

Тип стали	Средняя концентрация легирующих элементов, % (мас.)	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
		МПа		%		
<i>Стали для нормальных температур</i>						
X5H12M3T	5 Cr; 12 Ni; 3 Mo; 0,4 Ti	1550	1450	15	61	0,6
X11H10M2T	11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 0,6 Ti	1500	1400	8	50	0,5
X11H10M2T	11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 0,9 Ti	1550	1480	12	58	0,5
X11H10M2T	11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 1,2 Ti	1750	1700	12	50	0,37
X12H8Л	12 Cr; 8 Ni; 0,9 Ве	1860	1720	16	6	–
X12H9Д2ТБ	12 Cr; 9 Ni; 2 Cu; 1 Ti; 0,4 Nb	1800	1700	10	–	–
X12H9МД2Т	12,5 Cr; 8,5 Ni; 2,2 Cu; 0,7 Mo; 0,8 Ti	1550	1500	10	50	0,5
X12H10Д2Т	12 Cr; 9 Ni; 2 Cu; 1,2 Ti	1720	1650	10	45	–
X14H5МГ2ТЮ	15 Cr; 5,5 Ni; 2 Mn; 1 Mo; 0,3 Ti; 0,3 Al	1350	1280	16	50	0,45
X14H5Д2МБ	14,5 Cr; 5 Ni; 2,2 Cu; 1,5 Mo; 0,25 Nb	1500	1270	15	63	0,9
X15H5Д2Т	14,5 Cr; 5 Ni; 2 Cu; 0,2 Ti	1450	1350	11	50	0,8
<i>Теплостойкие стали</i>						
X5H12K3M7T	5 Cr; 12 Ni; 3 Co; 7 Mo; 1,1 Ti	2000	1900	8	45	0,45
X9H6K14M4Д	9 Cr; 6 Ni; 14 Co; 4 Mo; 2 Cu	1700	1600	–	–	0,4
X11H4K7T3M5T	11 Cr; 4 Ni; 7 Co; 3 Mn; 5 Mo; 0,3 Ti	1700	1450	15	50	0,2
X12H8K5M2T	12,5 Cr; 8 Ni; 5,2 Co; 2 Mo; 0,9 Ti	1800	1700	9	40	–
X12H7K7M4	12 Cr; 7 Ni; 7 Co; 4 Mo	1600	1500	16	46	0,5
X12H5K14M5T	12 Cr; 5 Ni; 14 Co; 5 Mo; 0,3 Ti	1700	1650	–	–	0,4
X12H2K16M4	12 Cr; 2 Ni; 16 Co; 4 Mo	1600	1550	12	55	–
X13K13M5	13 Cr; 13 Co; 5,5 Mo	1590	1340	15	50	–
X13K16M5	13 Cr; 16,4 Co; 5 Mo	1700	1550	14	48	–
X14H6K9M5	14 Cr; 5,5 Ni; 9 Co; 5 Mo	1550	1350	15	55	0,4
X14H4K14M3T	14,5 Cr; 4 Ni; 14,6 Co; 2,9 Mo; 0,2 Ti	1650	1500	20	62	0,78

Примечание. Освоенные промышленностью стали поставляют по техническим условиям.

Сталь 03X12H10Д2ТБ [3, 20] подвергают закалке с температур 870–1150 °С (в зависимости от содержания титана соответственно 0,4–1,2 %) в сочетании с обработкой холодом при –70 °С, 2 ч. Преимущество безуглеродистых сталей по сравнению с низкоуглеродистыми – меньшая чувствительность к охрупчиванию при невысоких скоростях охлаждения. Старение стали 03X12H10Д2ТБ при оптимальном режиме 450 °С, 6 ч обеспечивает следующие свойства: $\sigma_b = 1800$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1700$ МПа, $\sigma_{0,002} = 1260$ МПа, $\delta = 10$ %, 460 HV. Проведение ступенчатого старения 450 °С + 400 °С позволяет повысить предел упругости $\sigma_{0,002}$ до 1300 МПа и особенно релаксационную стойкость стали. Также весьма эффективным является применение перед старением холодной пластической деформации (при $\varepsilon = 80$ % $\sigma_b = 2500$ МПа).

Особенностью стали является высокий предел упругости $\sigma_{0,002}$ при нагреве, равный 1100, 930 и 830 МПа при 200, 300 и 400 °С соответственно. Упругие элементы из этой стали могут длительно работать при 300–350 °С, кратковременно – при 400 °С.

Сталь 03X12H10Д2ТБ 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 были отмечены изменения предела упругости, упругого последействия, 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 03X11H10M2T применяют для изготовления элементов обшивки, нагруженных внутренним давлением емкостей, пружин. Температуры ее эксплуатации – от криогенных до 500 °С; рекомендуемый режим термической обработки – закалка 900 °С, воздух + старение при 500–525 °С, 2 ч. Некоторые физические и механические свойства этой стали приведены в табл. 1.22–1.24*.

Таблица 1.22. Физические свойства стали 03X11H10M2T

Параметр	Температура, °С					
	20	100	200	300	400	500
$\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	10,4	11,1	11,7	12,2	12,8	–
$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$	17,7	18,0	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

Примечание. Приведенные значения α определены в интервале температур 20–100, 100–200, 200–300, 300–400 и 400–500 °С соответственно.

Таблица 1.23. Показатели прочности и пластичности листов толщиной 2–3 мм из стали 03X11H10M2T

Обработка	$t_{\text{нп}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	E	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta_{5,65\sqrt{F}}, \%$
		МПа			
Закалка 860 °С + старение 500 °С, 2 ч	20	196 000	1 500	1 430	8
	300	165 000	1 400	1 320	5
	400	156 000	1 350	1 280	6
	500	145 000	1 100	980	10
Закалка 860 °С, воздух	20	–	1 000	900	15
Нагартовка (50 %-ное обжатие)	–	–	1 250	1 180	7
Нагартовка (50 %-ное обжатие)+ старение 500 °С, 2 ч	–	–	1 800	1 650	–

* Данные С.И. Кишкиной.

Таблица 1.24. Влияние отрицательных температур на механические свойства стали 03X11H10M2T

Термическая обработка	$t_{исп}, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	KCU, МДж/м ²
		МПа			
Закалка 860 °С, воздух	20	1000	900	15	2,2
	-70	1150	1050	13	2,0
	-196	1450	1300	13	1,0
То же + старение 500 °С, 2 ч	20	1550	1470	10	0,7
	-70	1700	1600	7	0,5

Определенные преимущества имеет аустенитизация стали 03X11H10M2T при пониженной температуре (800–850 °С), 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 °С 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-стареющих сталей. Практика широкого промышленного применения этих сталей показала, что наряду с преимуществами по реализуемым механическим и физико-химическим свойствам, по критериям технологичности в отдельных сталях наблюдается ряд явлений, таких как тепловое охрупчивание, задержанное разрушение, ликвационная неоднородность, трудности исправления перегретой структуры, которые затрудняют и ограничивают их использование. Поэтому при разработке новых эффективных способов улучшения свойств мартенситно-стареющих сталей главное внимание следует уделять изысканию возможностей устранения или предотвращения перечисленных явлений. Работы ведут 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-стареющих сталей [5, 15, 23, 24], однако особое внимание уделяется получению точного химического состава сталей по углероду и легирующим элементам, способам выплавки с целью достижения максимальной однородности слитков и минимального содержания неметаллических включений [5]. Увеличение на 1 % содержания молибдена и кобальта в стали типа H18K9M5T повышает уровень прочности на 140 и 60 МПа соответственно. Аналогичный эффект (увеличение на 60–70 МПа) наблюдается при повышении концентрации титана и алюминия всего на 0,1 % [5]. На пластичность и вязкость влияют даже незначительные колебания содержания примесных атомов (табл. 1.25), поэтому для выплавки мартенситно-стареющих сталей рекомендуется применять вакуумно-дуговой переплав и использовать шихту повышенной чистоты [5].

Таблица 1.25. Механические свойства стали типа Н18К9М5Т, выплавленной из шихты обычной (плавка 1) и повышенной (плавка 2) чистоты, после закалки и старения [5]

Номер плавки	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	K^* , Дж, при t , °С	
	МПа		%		-70	+40
Плавка 1 (0,009 % S, 0,003 % P)	1596	1533	11	46,9	20,7	27,6
Плавка 2 (0,0015 % S, 0,001 % P)	1600	1526	14	68,4	62,4	128,5

* Работа разрушения при ударном изгибе.

В зарубежной периодике имеются данные о применении методов порошковой металлургии для изготовления изделий из мартенситно-стареющих 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 [5]. В лучшем случае их пластичность составляла 90 % пластичности литого кованого материала.

Второе направление, связанное с оптимизацией условий термической и термомеханической обработки, 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, использованию различных вариантов пластической деформации в общем цикле обработки.

Комбинированная закалка. Эффективным средством воздействия на структурное состояние и свойства мартенситно-стареющих сталей является применение различных комбинированных вариантов закалки. Многократная закалка обеспечивает измельчение зерна и исправляет структуру перегретой стали [26]. В сочетании с предварительной высокотемпературной закалкой такая обработка рекомендована для предотвращения теплового охрупчивания сталей при их замедленном охлаждении (для крупных поковок и полуфабрикатов крупного сечения) [25]. В коррозионно-стойких мартенситно-стареющих сталях для измельчения зерна и рафинирования структуры чаще применяют сочетание двух последовательных закалок при различных температурах. Двойная закалка (750 °С, 4 ч + 850 °С, 2 ч) обеспечивает измельчение зерна в сталях типа 03Х11Н10М2Т от 0 до 8.

Важным результатом применения термоциклической обработки и других видов комбинированной закалки является сохранение в закаленных сталях некоторого количества остаточного аустенита [17], благодаря чему удается повысить пластичность и вязкость сталей, особенно при криогенных температурах [27], увеличить сопротивление ударно-циклическому нагружению [17].

Термомеханическая обработка. Практически всегда в процессе изготовления либо самих изделий, либо полуфабрикатов мартенситно-стареющие стали подвергают 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, 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 временного сопротивления образцов с поверхностной трещиной усталости σ_n^{TP} , увеличивает напряжение $\sigma_{кр}$, при котором еще не происходит коррозионное растрескивание в 3 %-ном растворе NaCl (табл. 1.26) [20]. 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 [3, 20].

Таблица 1.26. Влияние холодной пластической деформации на свойства стали H18K9MST [20]

Термическая обработка	σ_n	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	$KCU, 2$ МДж/м ²	σ_n^{TP} , МПа, при $l_{TP}, \text{мм}$		$K_{Ic}, 1/2$ МПа·м	$\sigma_{кр}$, МПа
	МПа				2,5	6		
Закалка 820 °С, + + старение 480 °С	1900	1800	5	0,62	1950	1740	132	600
Закалка 820 °С + + деформация 40 % + + старение 480 °С	2100	1970	6	0,56	2120	1720	128	800

Для коррозионно-стойких мартенситно-старееющих сталей характерен более высокий коэффициент деформационного упрочнения [12], 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 фаз, имеющих близкий интервал температур образования, целесообразнее использовать ступенчатое старение по схеме В + Н, при котором последовательно выполняют сначала высокотемпературное, а затем при более низкой температуре низкотемпературное старение. В результате увеличения объемной доли выделяющейся фазы, более высокой дисперсности части частиц уровень упрочнения сталей может быть повышен при общем сокращении длительности старения. Для гетерофазных коррозионно-стойких мартенситно-старееющих сталей рекомендуется ступенчатое старение по схеме Н + В, когда вначале выполняют низкотемпературное, а затем высокотемпературное старение. На первом этапе старения (480 °С) формируются обогащенные хромом области α -фазы, на втором (500–550 °С) происходит выделение R-фазы [28]. В результате такой обработки достигается более высокий комплекс свойств, в том числе и более высокая теплостойкость.

Применительно к мартенситно-стареющим сталям опробованы различные варианты динамического старения. В частности, достаривание под напряжением $\sigma = 0,7\sigma_{0,2}$ при $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ после основного старения при $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к релаксации микронапряжений и тем самым устраняет опасность задержанного разрушения, проявляющегося в снижении пластичности сталей при малых скоростях нагружения [17]. Важным следствием динамического достаривания является значительное (в 1,5–2 раза) увеличение предела упругости $\sigma_{0,002}$ стали 04X14K13N4M3TB и ее релаксационной стойкости при практически неизменных значениях временного сопротивления и относительного удлинения [16]. Эффективность динамического достаривания существенно возрастает в том случае, если сталь перед основным старением подвергается НТМО [16]. Динамическое достаривание можно реализовать различными способами [16], например путем заневольивания винтовых пружин, и использовать для улучшения эксплуатационных характеристик различных упругих элементов.

Для отдельных видов изделий разработаны специальные варианты старения. Применяющаяся при изготовлении волокнистых композиционных материалов армирующую проволоку, которая подвергается холодной пластической деформации с предельными обжатиями (96–99 %), нагревают при высокотемпературном старении $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1–1,5 с. Скоростное старение позволяет реализовать очень высокое временное сопротивление (4200 МПа при диаметре проволоки 40 мкм) и избежать охрупчивания ($\delta = 4\%$), которое имеет место при обычном старении такой проволоки. Совмещение старения мартенситно-стареющих сталей с процессом азотирования наряду с объемным упрочнением обеспечивает формирование износостойкого поверхностного слоя [17].

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

Машиностроение [3, 5, 17]. Как конструкционный материал, отличающийся высокой удельной прочностью и сопротивлением хрупкому разрушению, мартенситно-стареющие стали используют для изготовления конструктивных элементов космической и ракетной техники, в криогенном машиностроении, 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 в силовых установках, сосудов высокого давления, рабочих колес и валов насосов. Высокая износостойкость в сочетании с размерной стабильностью сталей этого класса определяют их применяемость для деталей высокоточных металлорежущих станков. Более высокая (чем у перлитных сталей) радиационная стойкость позволяет использовать безкобальтовые стали в реакторостроении, а также для узлов урановых центрифуг.

Приборостроение [9, 16, 20]. 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-стареющих сталей как пружинного

материала. При формировании двухфазной ($\alpha+\gamma$)-структуры эти стали могут обладать эливарными свойствами в интервале климатических температур, что существенно расширяет диапазон использования упругих элементов из этих сталей.

Изготовление инструментов [3, 17]. 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 медицинского микроинструмента. Благодаря теплостойкости стали нашли применение при изготовлении пресс-форм для обработки резины, пластмасс, для высокоточного латунного и алюминиевого литья под давлением. Стали можно применять для изготовления штампов горячего и холодного деформирования, лезвий и ножей.

1.3. Стали с высокой технологичностью

1.3.1. Стали с улучшенной обрабатываемостью резанием

Химический состав и условия поставки проката из автоматных сталей. Необходимость разработки и выпуска сталей с повышенной обрабатываемостью резанием вызвана тем, что этот вид механической обработки является основным при изготовлении большинства деталей в машиностроении. Решающее значение это имеет для массового производства, где широко используется обработка на автоматических линиях и станках-автоматах.

Для обеспечения высокой эффективности механической обработки резанием потребовалось создание целого класса сталей, которые позволяли бы вести обработку деталей с максимальной скоростью резания, соответствующей определенной степени износа или заданной стойкости инструмента. Кроме того, важными показателями также являются чистота обрабатываемой поверхности, форма стружки и легкость ее отвода.

Стали этого класса получили название «автоматные» и, согласно ГОСТ 1414–75, обозначаются буквой «А» в начале маркировки.

Высокая обрабатываемость резанием автоматных сталей достигается благодаря повышенному содержанию в них серы, фосфора и (или) дополнительному введению свинца, селена, теллура, кальция. Наличие свинца в марке стали обозначает буква «С», селена – «Е», кальция – «Ц».

Благодаря такому металлургическому приему в структуре стали образуются неметаллические включения, которые создают как бы внутреннюю смазку, снижающую трение в зоне резания между инструментом и стружкой, а также облегчающую ее измельчение.

В зависимости от химического состава автоматные стали подразделяются на пять групп (табл. 1.27).

Таблица 1.27. Группы автоматных сталей (ГОСТ 1414–75)

Группа сталей	Марки
Углеродистые сернистые	A11, A12, A20, A30, A35
Сернистомарганцовистая	A40Г
Углеродистая свинецсодержащая	AC40
Сернистомарганцовистые свинецсодержащие	AC14, AC35Г2, AC45Г2
Легированные свинецсодержащие	AC40X, AC12XH, AC14XHГ, AC19XHГ, AC20XHГМ, AC30XH, AC38XHГМ, AC40XHГМ

Таблица 1.28. Химический состав автоматных сталей (ГОСТ 1414-75), % (мас.)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Pb	Cu
A11	0,07-0,15	≤0,10	0,80-1,20	≤0,25	≤0,25	-	0,15-0,25	0,06-0,12	-	≤0,25
A12	0,08-0,16	0,15-0,35	0,70-1,10	≤0,25	≤0,25	-	0,08-0,2	0,08-0,15	-	≤0,25
A20	0,17-0,25	0,15-0,35	0,70-1,00	≤0,25	≤0,25	-	0,08-0,15	≤0,06	-	≤0,25
A30	0,26-0,35	0,15-0,35	0,70-1,00	≤0,25	≤0,25	-	0,08-0,15	≤0,06	-	≤0,25
A35	0,32-0,40	0,15-0,35	0,70-1,00	≤0,25	≤0,25	-	0,08-0,15	≤0,06	-	≤0,25
A40Г	0,37-0,45	0,15-0,35	1,20-1,55	≤0,25	≤0,25	-	0,18-0,30	≤0,05	-	≤0,25
AC40	0,37-0,45	0,17-0,37	0,50-0,80	≤0,25	≤0,25	-	≤0,04	≤0,040	0,15-0,30	≤0,25
AC14	0,10-0,17	≤0,12	1,00-1,30	≤0,25	≤0,25	-	0,15-0,30	≤0,10	0,15-0,30	≤0,25
AC35Г2	0,32-0,39	0,17-0,37	1,35-1,65	≤0,25	≤0,25	-	0,08-0,13	≤0,04	0,15-0,30	≤0,25
AC45Г2	0,40-0,48	≤0,15	1,35-1,65	≤0,25	≤0,25	-	0,24-0,35	≤0,04	0,15-0,35	≤0,25
AC40X	0,36-0,44	0,17-0,37	0,60-0,90	0,80-1,10	≤0,30	-	≤0,035	≤0,035	0,15-0,30	≤0,30
AC12XH	0,09-0,15	0,17-0,37	0,30-0,60	0,40-0,70	0,50-0,80	-	≤0,035	≤0,035	0,15-0,30	≤0,25
AC14XHГ	0,13-0,18	0,17-0,37	0,70-1,00	0,80-1,10	0,80-1,10	≤0,10	≤0,035	≤0,035	0,15-0,30	≤0,25
AC19XHГ	0,16-0,21	0,17-0,37	0,70-1,10	0,80-1,10	0,80-1,10	≤0,10	≤0,035	≤0,035	0,15-0,30	≤0,25
AC20XHГМ	0,18-0,23	0,17-0,37	0,70-1,10	0,40-0,70	0,40-0,70	0,15-0,25	≤0,035	≤0,035	0,15-0,30	≤0,25
AC30XM	0,27-0,33	0,17-0,37	0,40-0,70	0,80-1,10	≤0,30	0,15-0,25	≤0,035	≤0,035	0,15-0,30	≤0,25
AC38XГМ	0,34-0,40	0,17-0,37	0,60-0,90	0,80-1,10	≤0,30	0,15-0,25	≤0,030	≤0,035	0,15-0,30	≤0,25
AC40XГМ	0,37-0,43	0,17-0,37	0,50-0,80	0,60-0,90	0,70-1,10	0,15-0,25	≤0,030	≤0,035	0,15-0,30	≤0,25

Примечания: 1. Для легированных свинецсодержащих сталей суммарная массовая доля серы и фосфора не должна превышать 0,06 %.
 2. По соглашению с потребителями допускается замена свинца селеном для углеродистой свинецсодержащей стали. При этом количество селена должно быть в 2,5 раза меньше, чем свинца. 3. Прокат из стали марки А12 не допускается к применению во вновь создаваемой и модернизируемой технике.

Наряду с приведенными в табл. 1.27 марками металлургические заводы по отдельным техническим условиям выпускают кальцийсодержащие (0,002–0,008 % Са) стали марок АЦ20, АЦ30, АЦ40Х, АЦ30ХН и другие с добавлением свинца и теллура. Из этих сталей изготавливают термически упрочняемые детали, обрабатываемые твердосплавным инструментом при повышенных скоростях резания. По техническим условиям выпускаются также селенсодержащие автоматные стали марок А35Е, А45Е и А40ХЕ. В структуре этих сталей образуются селениды и сульфоселениды, которые обволакивают твердые оксидные включения и тем самым устраняют их истирающее действие. Применение селенсодержащих сталей в 2 раза снижает расход инструмента и в 1,3 раза повышает производительность механической обработки резанием.

Химический состав указанных выше групп автоматных сталей приведен в табл. 1.28. Критические точки некоторых марок автоматных сталей даны в табл. 1.29.

Таблица 1.29. Температуры критических точек автоматных сталей, °С [11]

Марка стали	A_{c1}	A_{c3}	A_{r3}	A_{r1}
A12	735	866	840	685
A20	735	866	840	685
A30	735	845	820	680
A40Г	730	830	–	–

Некоторые физические свойства определены для наиболее широко исследованной стали марки А12. Например, установлено, что температурный коэффициент линейного расширения α стали А12 увеличивается с ростом температуры от $\alpha_{20-100} = 11,9 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ до $\alpha_{20-600} = 14,2 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Удельная теплоемкость c также возрастает с повышением температуры от $c_{20-100} = 465 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ до $c_{20-500} = 636 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$. Теплопроводность λ стали А12 с ростом температуры от 100 до 500 °С снижается от 77,5 до 41 Вт/(м·°С). Модуль нормальной упругости этой стали составляет $E=202 \text{ ГПа}$.

По видам обработки поставляемый металлургическими заводами прокат из автоматных сталей подразделяют на горячекатаный, калиброванный, круглый со специальной отделкой поверхности, круглый с обточенной поверхностью.

Горячекатаный и круглый с обточенной поверхностью прокат изготавливают как с применением термической обработки (отжига, высокого отпуска, нормализации, нормализации с высоким отпуском), так и без нее. Калиброванный прокат поставляют в нагартованном, нагартованно-отпущенном и термически обработанном состоянии (отожженный, нормализованный, нормализованный с высоким отпуском, улучшенный), а прокат со специальной отделкой поверхности – в нагартованном (нагартованно-отпущенном) или отожженном состоянии. В улучшенном состоянии выпускают только прокат из сталей марок АС35Г2, АС30ХМ, АС40ХГНМ размером не более 35 мм. Прокат из стали марок А11, АС14, А12, А20, АС12ХН производят без термической обработки.

Свойства и области применения автоматных сталей. Механические свойства и твердость горячекатаного и калиброванного проката из автоматных углеродистых сернистых, сернистомарганцовистой и сернистомарганцовистой свинецсодержащих сталей без термической обработки представлены в табл. 1.30. В табл. 1.31 указаны свойства калиброванного проката из сернистомарганцовистой и некоторых свинецсодержащих автоматных сталей после различных видов термической обработки.

Таблица 1.30. Механические свойства и твердость проката из автоматных сталей без термической обработки (ГОСТ 1414–75)

Марка стали	Состояние	σ_T	σ_B	δ	ψ	НВ, не более
		МПа		%		
		не менее				
A11	Горячекатаное	–	410	22	34	160
A12		–	410	22	34	160
A20		–	450	20	30	168
A30		–	510	15	25	185
A35		–	510	15	23	201
A11	Калиброванное и нагартованное	390	490	10	–	207
A12		–	510	7	–	217
A20		–	530	7	–	217
A30		–	540	6	–	223
A35		–	570	6	–	229
A40Г	Горячекатаное	–	590	14	20	207
AC14	То же	–	410	20	30	170
	Калиброванное и нагартованное	390	490	10	–	207

Таблица 1.31. Механические свойства и твердость проката из калиброванных термически обработанных автоматных сталей (ГОСТ 1414–75)

Марка стали	Размер, мм	Состояние	σ_T	σ_B	δ	ψ	НВ, не более
			МПа		%		
			не менее				
A40Г	Все размеры	После высокого отпуска или отжига	–	590	17	–	229
AC35Г2	≤ 35	Улучшенное	590	740	14	–	277
AC45Г2	Все размеры	Нормализованное или нормализованное с отпуском, нагартованное с отпуском	440	640	6	–	255
AC30ХМ	≤ 35	Улучшенное	630	780	12	–	285
AC40ХГНМ	≤ 35	Улучшенное или нормализованное	–	–	–	–	262–300

Механические свойства углеродистой и легированных свинецсодержащих сталей, определяемые на термически обработанных образцах или образцах, изготовленных из термически обработанных заготовок, соответствует показателям, указанным в табл. 1.32. Твердость горячекатаных и калиброванных свинецсодержащих сталей должна соответствовать значениям, указанным в табл. 1.33.

Таблица 1.32. Механические свойства образцов или заготовок из автоматных сталей в термически обработанном состоянии (ГОСТ 1414–75)

Марка стали	Термическая обработка				σ_r	σ_b	δ	ψ	КСУ, ² МДж/м
	Закалка		Отпуск		МПа		%		
	$t, ^\circ\text{C}$	Среда	$t, ^\circ\text{C}$	Среда	не менее				
АС40	Нормализация				335	570	19	–	–
АС40Х	845–875	Масло	450–550	Вода	784	980	10	45	0,59
АС12ХН	900–920	То же	150–180	Воздух	440	640	10	–	0,88
	900–920	Вода	150–180	»	590	780	8	–	0,68
АС14ХГН	860–880	Масло или вода	150–180	»	835	1080	8	–	0,78
АС19ХГН	865–885	То же	150–180	»	930	1180	7	–	0,68
АС20ХГНМ	850–870	»	150–180	»	930	1180	7	–	0,59
АС30ХМ	860–880	Масло	510–560	»	735	880	12	–	0,98
АС38ХГМ	860–880	То же	580–620	»	785	930	11	–	0,78
АС40ХГНМ	830–850	»	580–620	»	835	980	12	–	0,88

Таблица 1.33. Твердость НВ углеродистой и легированных свинецсодержащих автоматных сталей (ГОСТ 1414–75), не более

Марка стали	Сталь горячекатаная, термообработанная ¹	Сталь калиброванная	
		нагартованная	отожженная или после высокого отпуска
АС40 ²	187	241	197
АС35Г2	217	269	229
АС45Г2	229	269	241
АС40Х	217	269	235
АС12ХН	–	229	–
АС14ХГН	187	269	201
АС19ХГН	201	269	223
АС20ХГНМ	201	269	223
АС30ХМ	223	269	241
АС38ХГМ	241	269	255
АС40ХГНМ	241	269	255

¹ В качестве термообработки допускается использовать отжиг, высокий отпуск, нормализацию и нормализацию с высоким отпуском. ² Горячекатаная сталь АС40 без термической обработки имеет твердость не более 217 НВ.

Об эффективности специального введения в состав сталей указанных выше элементов (серы, свинца, кальция, селена или теллура) для повышения обрабатываемости резанием можно судить по коэффициенту обрабатываемости k , приведенному в табл. 1.34. Этот коэффициент учитывает влияние легирующих добавок по сравнению с обрабатываемостью сталей аналогичного химического состава, но без добавок.

Таблица 1.34. Коэффициент обрабатываемости автоматных сталей [21]

Группа сталей	Легирующие элементы, % (мас.)	Значение k при обработке инструментом	
		быстрорежущим	твердосплавным
Углеродистые сернистые	0,15–0,30 S	1,4	1,3
	0,08–0,15 S	1,25	1,2
	< 0,08 S	1,15	1,1
Углеродистые свинецсодержащие	0,15–0,3 Pb; < 0,04 S	1,4	1,4
Сернистомарганцовистые свинецсодержащие	0,15–0,30 Pb; 0,15–0,30 S	1,8	1,7
	0,15–0,30 Pb; 0,08–0,15 S	1,5	1,4
Кальцийсодержащие	0,002–0,008 Ca; < 0,04 S	1,0	1,2
	0,002–0,008 Ca; 0,04–0,07 S	1,2	1,4
Селенсодержащие	0,05–0,2 Se; 0,04–0,1 Te	1,2	1,2

Другие технологические свойства некоторых наиболее применяемых марок автоматных сталей представлены в табл. 1.35.

Таблица 1.35. Технологические свойства автоматных сталей [11]

Марка стали	Склонность к отпускной хрупкости	Температура ковки, °C	
		начала	конца
A12	Не склонна	1 200	850
A20	То же	1 180	850
A30	»	1 200	850
A40Г	Склонна	1 100	800

Примечание. Все стали чувствительны к образованию флокенов при прокатке и вследствие низкой свариваемости не применяются для сварных конструкций.

Автоматные стали нашли широкое применение в массовом производстве при обработке резанием на автоматических линиях и станках-автоматах во многих машиностроительных отраслях. Это автомобильная и авиационная промышленность, тракторостроение, станкостроение и приборостроение, пищевая и текстильная промышленность, производство бурового инструмента и др. (табл. 1.36).

Таблица 1.36. Примеры деталей, изготавливаемых из автоматных сталей [11]

Марка стали	Детали
A12	Оси, валики, втулки, зубчатые колеса, шестерни, пальцы, винты, болты, ниппели, гайки, сухари и другие малонагруженные мелкие детали сложной формы, к которым предъявляются повышенные требования по качеству поверхности и точности размеров
A20	Мелкие детали машин и приборов, малонагруженные детали сложной конфигурации, к которым предъявляют требования высокой точности размеров и качества поверхности; после цементации и нитроцементации малонагруженные детали, к которым предъявляют повышенные требования по износостойкости и качеству поверхности
A30, A35, A40Г	Детали сложной формы, работающие при повышенных напряжениях (оси, валики, втулки, кольца, шестерни, пальцы, болты, гайки, ходовые винты), к которым предъявляют повышенные требования к качеству поверхности

1.3.2. Стали с высокой технологической пластичностью

Стали для листовой холодной штамповки. Технические требования и условия на листовую сталь для холодной штамповки приведены в ГОСТ 9045–93, ГОСТ 4041–71, ГОСТ 503–81, ГОСТ 16523–97, ГОСТ 11268–76, 11269–76, ТУ-14-1-3464–83, ТУ-14-1-3764–84.

Состав и структура. Стали для холодной штамповки в первую очередь должны обладать высоким запасом технологической пластичности – хорошо подвергаться различным видам холодной пластической деформации, в том числе глубокой вытяжке. Они также должны иметь хорошее качество поверхности (без полос скольжения), если изготавливают наружные детали, на которые наносят отделочные покрытия.

Способность к вытяжке в наибольшей степени зависит от содержания углерода, а также от химического состава, структуры и механических свойств стали. С уменьшением концентрации углерода облегчается технологический процесс вытяжки. Для глубокой вытяжки содержание углерода не должно превышать 0,1 % (мас.). Операции гибки и небольшой вытяжки возможны даже при 0,2–0,3 % С, а изгиб большого радиуса – при 0,35–0,45 % С.

По способности к вытяжке прокат толщиной до 2 мм подразделяют на 4 категории (ГОСТ 9045–93): весьма особо сложной (ВОСВ, ВОСВ-Т), особо сложной (ОСВ), сложной (СВ) и весьма глубокой (ВГ) вытяжки.

Углерод может находиться в стали в виде структурно-свободного цементита, выделяющегося из феррита при температуре ниже A_1 . От размера зерна структурно-свободного цементита и феррита зависит способность стали к вытяжке (табл. 1.37).

Таблица 1.37. Способность стали к вытяжке в зависимости от размера зерна феррита и цементита

Способность к вытяжке	Номер зерна	
	феррита	структурно-свободного цементита
ВОСВ, ВОСВ-Т	6, 7	2
ОСВ, СВ	6, 7, 8, 9	2
ВГ	–	3

Примечание. В прокате со способностью к вытяжке ВОСВ и ВОСВ-Т допускается наличие зерен феррита с номером 8 и 9.

В сталях с повышенным содержанием углерода предпочтительно иметь перлит зернистого типа, для чего их подвергают отжигу. Допускается лишь небольшое количество включений пластинчатого перлита.

Контролируемыми параметрами механических свойств сталей являются относительное удлинение δ и отношение σ_T/σ_B . Чем меньше указанное отношение, тем выше способность низкоуглеродистых сталей к вытяжке. Стали также испытывают на вытяжку сферической лунки по ГОСТ 10510–80. Кроме того, необходим контроль сталей на склонность к деформационному старению. Следствием деформационного старения является образование на поверхности изделия после вытяжки полос скольжения – своеобразных складок, исключающих качественную отделку поверхности. Это, например, относится к широко применяемой кипящей стали 08кп. Причиной старения является выделение из твердого раствора феррита атомов азота и углерода, которые группируются с образованием частиц нитридов и карбидов. Участки с этими частицами оказываются более

твердыми по сравнению с другими участками структуры, они меньше деформируются, что и приводит к появлению своеобразных складок на поверхности листа.

Контролируют склонность стали к деформационному старению по виду кривой растяжения, которая должна быть плавной и не иметь площадки или зуба текучести.

К числу нестареющих сталей относят, например, кипящую сталь 08Фкп, микролегированную ванадием (0,02–0,04 %), спокойную сталь 08Ю и 10ЮА с присадкой алюминия (0,02–0,5 %) и спокойную 08ГСЮФ с присадками алюминия и ванадия. При этом для стали 08Ю возможны все четыре категории вытяжки.

В качестве штампуемых используют также двухфазные стали, обладающие повышенной прочностью благодаря ферритно-мартенситной структуре. Эти стали подвергают закалке из межкритического интервала температур $A_1 - A_3$ после горячей прокатки. Они достаточно легко штампуются. Штамповкой достигается $\sigma_T = 450 \dots 600$ МПа.

Низкоуглеродистые качественные стали для тонколистового проката. Общая характеристика и требования, предъявляемые к этим сталям, изложены в ГОСТ 9045–93. Прокат изготавливают из низкоуглеродистых качественных сталей марок 08Ю, 08пс, 08кп, составы которых приведены в табл. 1.38. Сталь 08Ю способна к вытяжкам ВОСВ, ВОСВ-Т, ОСВ и СВ, стали 08пс и 08кп – к вытяжке ВГ. Допускается изготовление проката из стали 08Ю со способностью к вытяжке ВГ. Сортамент проката должен соответствовать ГОСТ 19904–90. Тонколистовой холоднокатаный прокат выпускают в виде листов и в рулонах толщиной до 3,9 мм. Механические свойства проката из низкоуглеродистых качественных сталей должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 1.39.

Таблица 1.38. Химический состав низкоуглеродистых качественных сталей, % (мас.), не более

Марка стали	C	Mn	S	P	Si
08Ю*	0,07	0,35	0,025	0,020	0,03
08пс	0,09	0,45	0,030	0,025	0,04
08кп	0,10	0,40	0,030	0,025	0,03

* Сталь также содержит 0,02–0,07 Al кислоторастворимого.

Таблица 1.39. Механические свойства проката из низкоуглеродистых качественных сталей с различной способностью к вытяжке

Способность к вытяжке	σ_T , МПа, не более	σ_B , МПа	δ , %, не менее, при толщине проката, мм				HRT15*	HRT30*	HRB
			< 0,7	от 0,7 до 1,5	св. 1,5 до 2,0	св. 2,0 до 3,9			
							св. 0,5 до 0,8	св. 0,8 до 1,7	св. 1,7 до 2,0
ВОСВ	185	250–350	38	40	42	–	76	51	46
ВОСВ-Т	175	250–320	40	42	44	–	75	45	43
ОСВ	195	250–350	34	36	40	42	76	51	46
СВ	205	250–380	32	34	38	40	78	53	48
ВГ	–	250–390	26	28	29	30	–	–	–

* Твердость, измеряемая на Супер-Роквелле шариковым индентером при пониженных нагрузках (15 и 30 Н).

По качеству отделки поверхности прокат подразделяют на группы: I – особо высокой отделки, II – высокой отделки и III – повышенной отделки.

К числу дополнительных испытаний проката из низкоуглеродистых качественных сталей на способность к вытяжке относят испытания на вытяжку сферической лунки (табл. 1.40).

Таблица 1.40. Глубина сферической лунки для различных категорий проката, мм

Толщина проката	ВОСВ, ВОСВ-Т	ОСВ	СВ	ВГ
0,4	9,3	9,0	8,8	8,6
0,5	9,7	9,4	9,2	9,0
0,6	10,0	9,8	9,6	9,4
0,7	10,4	10,2	10,0	9,7
0,8	10,7	10,6	10,4	10,0
0,9	11,0	10,9	10,6	10,3
1,0	11,2	11,1	10,8	10,5
1,1	11,4	11,3	11,0	10,8
1,2	11,6	11,5	11,2	11,0
1,3	11,8	11,7	11,4	11,2
1,4	11,9	11,8	11,5	11,3
1,5	12,0	11,9	11,6	11,5
1,6	12,1	12,0	11,7	11,6
1,7	12,2	12,1	11,9	11,8
1,8	12,3	12,2	12,0	11,9
1,9	12,4	12,3	12,1	12,0
2,0	12,5	12,4	12,2	12,1

Примечание. Для проката промежуточных толщин глубину сферической лунки берут по ближайшей меньшей толщине, приведенной в таблице.

Стали конструкционные качественные для листового проката. Характеристики и требования, предъявляемые к этим сталям, изложены в ГОСТ 4041–71. Листовой прокат из качественных углеродистых сталей выпускают толщиной от 4 до 14 мм. Сортамент проката должен соответствовать ГОСТ 19903–74. В зависимости от нормируемых показателей и толщины листа прокат поставляют по четырем категориям (табл. 1.41).

По качеству отделки поверхности листового проката делят на группы: III – повышенной отделки и IV – обычной отделки. По точности проката листы могут иметь высокую точность (AA), повышенную точность (A) и нормальную точность (B).

Химический состав конструкционных качественных сталей определяется как маркой стали, так и категорией поставки (табл. 1.42). Механические свойства этих сталей приведены в табл. 1.43.

Таблица 1.41. Марки стали, толщина листового проката и нормируемые характеристики для различных категорий поставки

Категория	Толщина листа, мм	Марка стали	Химический состав	Механические свойства					Размер зерна	Структурно-свободный цементит	Полосчатость	Обезуглерожженный слой для стали марок 35, 40									
				σ_s	σ_T	δ	HRB (НВ)	Изгиб в холодном состоянии на 180°													
1	От 4 до 14	08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, 25пс, 25, 30, 35, 40	+	σ_s	+	σ_T	-	δ	+	HRB (НВ)	-	Изгиб в холодном состоянии на 180°	-	Размер зерна	-	Структурно-свободный цементит	-	Полосчатость	-	Обезуглерожженный слой для стали марок 35, 40	+
				+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Св. 4 » 14	08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, 25пс, 25, 30, 35, 40, 08ЮА, 10ЮА, 15ЮА, 20ЮА	+	σ_s	+	σ_T	-	δ	+	HRB (НВ)	+	Изгиб в холодном состоянии на 180°	+	Размер зерна	+	Структурно-свободный цементит	-	Полосчатость	+	Обезуглерожженный слой для стали марок 35, 40	+
				+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	» 4 » 8	08кп, 08пс	+	σ_s	+	σ_T	+	δ	+	HRB (НВ)	+	Изгиб в холодном состоянии на 180°	+	Размер зерна	+	Структурно-свободный цементит	+	Полосчатость	+	Обезуглерожженный слой для стали марок 35, 40	-
				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	» 4 » 8	08Ю	+	σ_s	+	σ_T	+	δ	+	HRB (НВ)	+	Изгиб в холодном состоянии на 180°	+	Размер зерна	+	Структурно-свободный цементит	-	Полосчатость	+	Обезуглерожженный слой для стали марок 35, 40	-
				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. Знак «+» означает, что характеристика нормируется, знак «-» — что не нормируется, знак «+» — что нормируется по требованию потребителя.

Таблица 1.42. Химический состав конструкционных качественных сталей, %(мас.)

Марка стали	Категория поставки	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al
08пс	3	0,09	0,25–0,45	0,04	0,030	0,025	0,10	0,15	0,20	–
08кп	3	0,10	0,25–0,45	0,03	0,030	0,025	0,10	0,15	0,20	–
25пс	2	0,22–0,27	0,25–0,50	0,03	0,040	0,040	0,25	0,25	0,30	–
08Ю	4	0,10	0,25–0,45	0,03	0,030	0,025	0,10	0,15	0,20	0,02–0,08
08ЮА	2	0,10	0,20–0,40	0,03	0,025	0,020	0,10	0,15	0,20	0,02–0,08
10ЮА	2	0,07–0,14	0,20–0,40	0,07	0,025	0,020	0,10	0,15	0,20	0,02–0,08
15ЮА	2	0,12–0,18	0,25–0,45	0,07	0,025	0,020	0,10	0,15	0,20	0,02–0,08
20ЮА	2	0,16–0,22	0,25–0,45	0,07	0,025	0,020	0,10	0,15	0,20	0,02–0,08

Таблица 1.43. Механические свойства конструкционных качественных сталей для различных категорий поставки

Марка стали	Категория	σ_s , МПа	δ_5	δ_{10}	HRB	HB
			%, не менее		не более	
08кп	1–2	270–370	34	30	55	100
08пс, 08	1–2	270–410	32	28	61	109
10кп	1–2	270–410	32	28	64	114
10пс, 10	1–2	290–420	32	27	66	117
15кп, 15пс, 15	1–2	320–440	30	26	68	121
20кп, 20пс, 20	1–2	340–490	28	24	71	127
25пс	1–2	370–540	27	23	76	138
25	1–2	390–540	26	23	76	138
30	1–2	430–590	24	21	80	149
35	1–2	480–640	22	18	84	163
40	1–2	510–660	21	17	85	167
08кп, 08пс	3	$\leq 360 (235)^*$	36	32	54	98
08Ю	4	$\leq 360 (265)^*$	36	32	67	118
08ЮА	2	270–360	36	32	65	116
10ЮА	2	270–410	32	28	66	117
15ЮА	2	320–440	30	26	68	121
20ЮА	2	340–490	28	24	71	127

Примечания: 1. Для листов в нормализованном состоянии допускается повышение σ_s на 50 МПа при условии соблюдения норм по относительному удлинению и изгибу. 2. Для листов из стали 08кп 3-й категории σ_s гарантируется в течение семи суток со дня испытания.

* σ_s , МПа, не более.

Листы 2-й и 3-й категорий поставки в зависимости от марки стали должны выдерживать испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° при диаметре оправки, указанном ниже:

08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15пс	$d = 0^{*1}$
15, 20кп, 20пс, 20, 25пс, 25	$d = a^{*2}$
30, 35	$d = 2a$

*¹ До соприкосновения сторон. *² Толщина листа.

В месте изгиба не должно быть надрывов, трещин и расслоений.

Стали углеродистые качественные и обыкновенного качества для тонколистового проката. Характеристики и требования, предъявляемые к этим сталям, изложены в ГОСТ 16523–97. Горячекатаный и холоднокатаный тонколистовой прокат из сталей углеродистой качественной и обыкновенного качества общего назначения изготавливают шириной 500 мм и более, толщиной до 3,9 мм включительно. Прокат подразделяют по нормируемым показателям на 6 категорий (табл. 1.44). По качеству отделки поверхности его делят на группы: холоднокатаный особо высокой, высокой и повышенной отделки – соответственно I, II и III (IIIа, IIIб); горячекатаный повышенной и обычной отделки – соответственно III и IV.

Таблица 1.44. Нормируемые показатели и группы прочности для различных категорий проката

Категория	Вид проката	Группа прочности				Нормируемые показатели
		K260В, K270В, K310В, K330В, K350В	K390В	K490В, OK400В	OK300В OK360В OK370В	
1	Горячекатаный Холоднокатаный	– –	– –	– –	+ +	Пластичность при изгибе на 180°
2	»	+	–	–	–	Глубина сферической лунки
3	»	+	–	–	–	Пластичность при изгибе и глубина сферической лунки
4	Горячекатаный Холоднокатаный	+ +	+ +	+ +	+ +	Механические свойства
5	Горячекатаный Холоднокатаный	+ +	+ +	– +	+ +	Механические свойства, пластичность при изгибе
6	»	+	–	–	–	Механические свойства, глубина сферической лунки, пластичность при изгибе

По способности к вытяжке холоднокатаный прокат толщиной до 2 мм групп прочности K260В, K270В, K310В, K330В, K350В подразделяют на две категории: глубокой (Г) и нормальной (Н) вытяжки.

Сортамент горячекатаного проката из этих сталей должен соответствовать требованиям ГОСТ 19903–74, холоднокатаного – ГОСТ 19904–90.

Механические свойства проката и диаметр оправки при испытании на изгиб на 180° в холодном состоянии приведены в табл. 1.45.

Таблица 1.45. Механические свойства тонколистового проката из углеродистых качественной и обыкновенного качества сталей

Марка стали	Группа прочности	σ_s , МПа	δ_4 , %, не менее, для проката толщиной, мм		Изгиб на 180° при толщине проката, мм	
			≤ 2	> 2	≤ 2	> 2
08кп	K260В	260–380	25/26	28/29	$d = 0$ (без прокладки)	$d = a$
08пс, 08, 10кп, 10пс, 10	K270В	270–410	24/25	26/28		
Ст1, Ст2 (всех степеней раскисления)	OK300В	300–480	21/24	23/26		
15кп, 15пс	K310В	310–440	23/24	25/27		
15, 20кп	K330В	330–460	23/24	24/25		
20пс, 20	K350В	350–500	22/23	23/24		
Ст3 (всех степеней раскисления)	OK360В	360–530	20/22	22/24	$d = a$	$d = 2a$
Ст3пс, Ст3сп	OK370В	370–530	20/22	22/24		
25, 30	K390В	390–590	19/20	20/21		
Ст4 (всех степеней раскисления), Ст5пс, Ст5сп	OK400В	400–680	17/19	19/21	–	–
35, 40, 45, 50	K490В	490–720	12/13	13/14		

Примечания: 1. В группу прочности входят три цифры, соответствующие нижнему пределу временного сопротивления. Прокат из сталей обыкновенного качества обозначают буквами «ОК», из качественной стали – «К». 2. В числителе приведены значения δ_4 для горячекатаного проката, в знаменателе – для холоднокатаного.

Глубина сферической лунки при испытании на выдавливание должна соответствовать требованиям, приведенным в табл. 1.46.

Нормы глубины сферической лунки при изготовлении проката группы прочности K270В из стали марок 10пс и 10 должны соответствовать нормам глубины для проката групп прочности K310В – K350В.

Составы углеродистых качественных сталей приведены в ГОСТ 1050–88, а сталей обыкновенного качества – в ГОСТ 380–88.

Свариваемость проката групп прочности OK330В, OK360В категорий 4 и 5 обеспечивается технологией изготовления и химическим составом стали.

**Таблица 1.46. Глубина сферической лунки
в зависимости от толщины проката, мм**

Толщина	Прокат глубокой вытяжки групп прочности		Прокат нормальной вытяжки групп прочности	
	K260B, K270B	K310B, K330B, K350B	K260B, K270B	K310B, K330B, K350B
0,35	7,5	7,2	—	—
0,4	8,0	7,5	7,4	7,4
0,5	8,4	8,0	8,0	7,6
0,6	8,9	8,4	8,5	7,8
0,7	9,2	8,6	8,9	8,0
0,8	9,5	8,8	9,3	8,2
0,9	9,9	9,0	9,6	8,4
1,0	10,1	9,2	9,9	8,6
1,1	10,4	—	10,2	—
1,2	10,6	—	10,4	—
1,3	10,8	—	10,6	—
1,4	11,0	—	10,8	—
1,5	11,2	—	11,0	—
1,6	11,4	—	11,2	—
1,7	11,6	—	11,4	—
1,8	11,7	—	11,5	—
1,9	11,8	—	11,7	—
2,0	11,9	—	11,8	—

— *Стали низкоуглеродистые для производства холоднокатаной ленты.* Характеристики и требования, предъявляемые к прокату из этих сталей, изложены в ГОСТ 503–81. Лента из низкоуглеродистых сталей предназначена для гибки, штамповки деталей, для изготовления труб, порошковой проволоки, деталей подшипников и других металлических изделий. Ленту производят по состоянию материала особомягкую (ОМ), мягкую (М), полунагартованную (ПН), нагартованную (Н) и высоконагартованную (ВН). Ширина выпускаемой ленты зависит от ее толщины (табл. 1.47).

**Таблица 1.47. Ширина холоднокатаной ленты из низкоуглеродистых сталей
в зависимости от ее толщины, мм**

Толщина	Ширина	Толщина	Ширина
От 0,05 до 0,18	4–260	Св. 0,80 до 1,00	8–450
Св. 0,18 » 0,40	4–300	» 1,00 » 2,00	9–450
» 0,40 » 0,45	5–300	» 2,00 » 3,00	15–450
» 0,45 » 0,50	5–450	» 3,00 » 4,00	20–450
» 0,50 » 0,80	6–450		

В зависимости от точности изготовления ленты имеются следующие градации: по толщине – нормальной и повышенной точности (Т), а также высокой точности (В); по ширине – нормальной и повышенной точности (Ш). По виду и качеству поверхности ленты делят на четыре группы (1–4), а по виду кромок – с обрезанными и с необрезанными кромками (НО). Микроструктура ленты может быть без контроля и с контролем (К); серповидность также может быть без контроля (класс А) и с контролем (класс Б).

Механические свойства ленты зависят от состояния материала и марки стали (табл. 1.48).

Таблица 1.48. Механические свойства холоднокатаной ленты из низкоуглеродистых сталей

Марка стали	Состояние материала	σ_s , МПа	Относительное удлинение*, %, не менее, при толщине ленты, мм					
			< 0,5	от 0,5 до 0,7	св. 0,7 до 1,5	св. 1,5 до 2,0	св. 2,0 до 2,9	от 3,0 до 4,0
08кп, 08пс, 10кп	Особо мягкое	270–390	23	23	23	26	30	32
08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10	Мягкое	310–440	17	17	17	18	20	24
	Полунагартованное	370–510	7	7	7	9	10	12
	Нагартованное	440–590	–	–	–	–	4	4
	Высоконагартованное	≥ 540	–	–	–	–	–	–

* При толщине ленты от 3,0 до 4,0 мм приведено $\delta_{5,65\sqrt{F}} (l_0=5,65\sqrt{F})$, при всех остальных – $\delta_4 (l_0=4b_0)$.

По требованию потребителя особомягкая и мягкая лента толщиной от 0,20 до 2,00 мм должна выдерживать испытание на выдавливание лунки (табл. 1.49).

Таблица 1.49. Минимальная глубина выдавливаемой лунки для ленты из низкоуглеродистых сталей в зависимости от ее толщины и ширины, мм, не менее

Толщина ленты	Ширина ленты, мм			
	от 13 до 30 ($d_n=3, d_m=5$)	от 30 до 55 ($d_n=8, d_m=11$)	от 55 до 90 ($d_n=15, d_m=21$)	≥ 90 ($d_n=20, d_m=27$)
0,20	1 / 1,4	3,5 / 3,3	5,3 / 4,4	7,7 / 7,0
0,25	1 / 1,5	3,6 / 3,4	5,4 / 4,5	7,9 / 7,2
0,30	1 / 1,6	3,7 / 3,5	5,6 / 4,7	8,1 / 7,4
0,35	1 / 1,7	3,8 / 3,6	5,7 / 4,9	8,3 / 7,6
0,40	2 / 1,8	4,0 / 3,7	6,0 / 5,1	8,7 / 7,8
0,45	2 / 1,9	4,1 / 3,8	6,1 / 5,3	8,9 / 8,0
0,50	2 / 2,0	4,2 / 3,9	6,3 / 5,4	9,0 / 8,1
0,60	2 / 2,1	4,4 / 4,1	6,5 / 5,6	9,2 / 8,3
0,70	2 / 2,3	4,6 / 4,2	6,8 / 5,8	9,4 / 8,6
0,80	– / –	4,8 / 4,4	7,0 / 6,0	9,6 / 8,9
0,90	– / –	5,0 / 4,6	7,2 / 6,3	9,8 / 9,1
1,00	– / –	5,1 / 4,7	7,4 / 6,5	10,1 / 9,3
1,20	– / –	– / –	7,8 / 6,9	10,5 / 9,7
1,40	– / –	– / –	8,2 / 7,3	10,9 / 10,1
1,50	– / –	– / –	8,5 / 7,5	11,0 / 10,3
1,60	– / –	– / –	8,7 / 7,7	11,2 / 10,5
1,80	– / –	– / –	9,0 / 8,0	11,5 / 10,8
2,00	– / –	– / –	9,2 / 8,2	11,7 / 11,0

Примечания: 1. В числителе – для особомягкой ленты, а в знаменателе – для мягкой.
2. d_n – диаметр пуансона, d_m – диаметр матрицы.

Таблица 1.50. Химический состав легированных высококачественных сталей, % (мас.)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	не более	
									S	P
12X2HMΦA	0,09–0,16	0,17–0,37	0,30–0,70	1,90–2,40	0,80–1,20	0,35–0,45	–	0,18–0,28	0,025	0,025
12X2HВΦA	0,09–0,16	0,17–0,37	0,30–0,70	1,90–2,40	0,80–1,20	–	1,0–1,4	0,18–0,28	0,025	0,025
12X2HM1ΦA	0,09–0,16	0,17–0,37	0,60–0,90	1,90–2,40	1,20–1,60	0,70–1,00	–	0,18–0,28	0,025	0,025
12X2HВΦMA	0,09–0,16	0,17–0,37	0,60–0,90	1,90–2,40	1,20–1,60	0,35–0,45	1,0–1,4	0,18–0,28	0,025	0,025
19X2HMΦA	0,16–0,23	0,17–0,37	0,30–0,70	1,90–2,40	0,80–1,20	0,35–0,45	–	0,18–0,28	0,025	0,025
19X2HВΦA	0,16–0,23	0,17–0,37	0,30–0,70	1,90–2,40	0,80–1,20	–	1,0–1,4	0,18–0,28	0,025	0,025
21X2HMΦA	0,19–0,23	0,17–0,37	0,30–0,70	1,90–2,40	0,80–1,20	0,35–0,45	–	0,18–0,28	0,025	0,025
21X2HВΦA	0,19–0,23	0,17–0,37	0,30–0,70	1,90–2,40	0,80–1,20	–	1,0–1,4	0,18–0,28	0,025	0,025
23X2HMΦA	0,19–0,26	0,17–0,37	0,30–0,70	1,90–2,40	0,80–1,20	0,35–0,45	–	0,18–0,28	0,025	0,025
23X2HВΦA	0,19–0,26	0,17–0,37	0,30–0,70	1,90–2,40	0,80–1,20	–	1,0–1,4	0,18–0,28	0,025	0,025

Примечание. Химический состав сталей 25XГСА, 30XГСА, 30XГСН2A (30XГСНА) по ГОСТ 4543–71.

Таблица 1.51. Нормируемые показатели для различных категорий проката

	Категория			
	1	2	3	4
Нормируемый показатель				
Механические свойства листов в отожженном или нормализованном состоянии	+	–	+	+
Механические свойства листов, определяемые на термически обработанных образцах (закалка + отпуск)	–	+	+	+
Глубина выдавливаемой лунки (для листов толщиной до 1,0 мм)	–	–	–	–

Примечание. Знак «+» означает, что показатель нормируется, знак «–» – что не нормируется.

Стали конструкционные легированные высококачественные для тонколистового проката специального назначения. Характеристики и требования, предъявляемые к прокату из таких сталей, изложены в ГОСТ 11268–76. Горячекатаный и холоднокатаный листовой прокат из легированной высококачественной стали специального назначения изготовляют в листах толщиной до 3,9 мм и применяют в термически обработанном состоянии. Для горячекатаных листов повышенной и нормальной точности прокатки сортамент соответствует ГОСТ 19903–74, для холоднокатаных – ГОСТ 19904–90. Марки сталей и их химический состав приведены в табл. 1.50.

В зависимости от нормируемых показателей механических и технологических свойств прокат подразделяют на четыре категории (табл. 1.51).

Для оценки способности легированных высококачественных сталей к пластической деформации листовой прокат испытывают на выдавливание сферической лунки (табл. 1.52).

Таблица 1.52. Глубина выдавливаемой лунки в зависимости от толщины листа и марки стали, мм

Марка стали	Толщина листа, мм, не менее					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
12ХГСА, 12Х2НВФА, 12Х2НМФА	7,0	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
30ХГСА, 30ХГСН2А, 30ХГСНА, 12Х2НВФМА, 12Х2М1ФА, 19Х2НВФА, 19Х2НМФА, 21Х2НВФА, 21Х2НМФА, 23Х2НВФА, 23Х2НМФА	7,0	7,2	7,5	7,7	8,0	8,2

Механические свойства сталей в отожженном состоянии даны в табл. 1.53 (ГОСТ 11268–76, ГОСТ 11269–76), а в закаленном и отпущенном состоянии – в табл. 1.54 (ГОСТ 11268–76).

Таблица 1.53. Механические свойства легированных высококачественных сталей в отожженном состоянии

Марка стали	σ_s , МПа	δ_5	δ_{10}	НВ
		%, не менее		
25ХГСА	490–690	21	17	149–207
30ХГСА	490–740	20	16	156–217
30ХГСН2А (30ХГСНА)	490–830	19	15	163–229
12Х2НМФА	490–740	15	11	156–217
12Х2НВФА	490–740	15	11	156–217
12Х2НМ1ФА	490–740	15	11	156–217
12Х2НВФМА	490–740	15	11	156–217
19Х2НМФА	490–740	18	16	156–217
19Х2НВФА	490–740	18	16	156–217
21Х2НМФА	490–740	15	11	156–217
21Х2НВФА	490–740	15	11	156–217
23Х2НМФА	490–780	17	15	170–241
23Х2НВФА	490–780	17	15	170–241

Примечание. Для листов и полос, поставляемых в нормализованном состоянии, допускается увеличение σ_s на 49 МПа при соблюдении норм по относительному удлинению.

Таблица 1.54. Механические свойства легированных высококачественных сталей после закалки и отпуска

Марка стали	Закалка		Отпуск (рекомендуемый)		σ_s , МПа	δ_5 , %
	t , °С	Среда	t , °С	Среда		
25ХГСА	880	Масло	470–550	Вода или масло	1079	10
30ХГСА	880	»	480–570	Масло	1079	10
30ХГСН2А (30ХГСНА)	900	»	200–300	Воздух	–	–
12Х2НМФА	910	»	490–550	»	1030	10
12Х2НВФА	910	»	490–550	»	1030	10
12Х2НМ1ФА	910	Воздух или масло	500–550	»	981	11
12Х2НВФМА	910	»	500–550	»	981	11
19Х2НМФА	925	Масло	450–550	»	1128	9
19Х2НВФА	925	»	450–550	»	1128	9
21Х2НМФА	925	»	550–570	»	1128	9
21Х2НВФА	925	»	550–570	»	1128	9
23Х2НМФА	890	»	590–620	Воздух или масло	1128	9
23Х2НВФА	890	»	590–620	»	1128	9

Стали для объемной холодной штамповки. Эти стали должны обладать способностью к холодному выдавливанию и высадке согласно ГОСТ 10702–78. Стандарт распространяется на горячекатаный прокат круглый ($d = 5 \dots 45$ мм) и шестигранный ($a = 8 \dots 48$ мм), а также калиброванный круглый ($d = 3 \dots 42$ мм) и шестигранный ($a = 7 \dots 40$ мм); на холоднотянутый шестигранный профиль ($a = 5 \dots 30$ мм) и прокат со специальной отделкой поверхности ($a = 30 \dots 50$ мм); на слитки, заготовки и проволоку.

По состоянию материала прокат подразделяют на термически обработанный отпуском или отжигом – ТО, термически обработанный сфероидизирующим отжигом – ТС и нагартованный с помощью проведения калибровки или калибровки со специальной отделкой поверхности – Н.

Требования к сортаменту содержатся в ГОСТ 2590–88, ГОСТ 2879–88, ГОСТ 7417–75, ГОСТ 8560–78 и ГОСТ 14955–79.

Прокат изготовляют из сталей следующих марок: 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 15Х, 20Х, 30Х, 35Х, 38ХА, 40Х, 45Х, 15Г, 20Г, 40Г, 45Г, 20Г2, 35Г2, 40Г2, 38ХС, 12ХН, 40ХН, 50ХН, 15ХФ, 15ХМ, 16ХСН, 19ХГН, 30ХМА, 12ХН3А, 20ХГСА, 30ХГСА, 35ХГСА, 15ХГНМ, 38ХГНМ, 18Х2Н4МА, 25Х2Н4МА, (25Х2Н4ВА), 40ХН2МА, (40ХНМА), 30ХН2МФА.

Химический состав углеродистых сталей марок 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 должен соответствовать требованиям ГОСТ 1050–88, кроме массовой доли кремния, которая установлена $\leq 0,03\%$ для стали 10кп, $\leq 0,10\%$ для полуспокойных сталей и $\leq 0,20\%$ для сталей 25, 30, 35, 40 и 45. Массовая доля марганца в сталях 25, 30, 35, 40 и 45 должна быть не более 0,60%.

Химический состав легированных сталей марок 15Х, 20Х, 30Х, 35Х, 38ХА, 40Х, 45Х, 15Г, 20Г, 35Г2, 40Г2, 40Г, 45Г, 38ХС, 40ХН, 50ХН, 15ХФ, 15ХМ, 30ХМА, 12ХН3А, 20ХГСА, 30ХГСА, 35ХГСА, 18Х2Н4МА, 25Х2Н4МА (25Х2Н4ВА), 40ХН2МА (40ХНМА), 30ХН2МФА должен соответствовать требованиям ГОСТ 4543–71.

Химический состав сталей 20Г2, 12ХН, 16ХСН, 19ХГН, 15ХГНМ, 38ХГНМ приведен в табл. 1.55, а допускаемые отклонения по химическому составу в готовом прокате – в ГОСТ 4543–71.

Таблица 1.55. Химический состав сталей для объемной холодной штамповки, % (мас.)

Марка стали	С	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu, не более
				не более					
20Г2	0,18–0,26	0,17–0,37	1,30–1,60	0,035	0,035	≤ 0,25	≤ 0,25	–	0,20
12ХН	0,09–0,15	0,17–0,37	0,30–0,60	0,035	0,035	0,40–0,70	0,50–0,80	–	0,30
16ХСН	0,13–0,20	0,60–0,90	0,30–0,60	0,035	0,035	0,80–1,10	0,60–0,90	–	0,20
19ХГН	0,16–0,21	0,17–0,37	0,70–1,00	0,035	0,035	0,80–1,10	0,80–1,10	≤ 0,10	0,30
15ХГНМ	0,13–0,18	0,17–0,37	0,70–1,10	0,035	0,035	0,40–0,70	0,40–0,70	0,15–0,25	0,30
38ХГНМ	0,37–0,43	0,17–0,37	0,50–0,80	0,035	0,035	0,40–0,60	0,40–0,70	0,15–0,25	0,30

Стали для объемной холодной штамповки должны выдерживать испытание на осадку в соответствии с ГОСТ 10702–78. В зависимости от степени деформации при холодной осадке прокат делят на следующие группы: 50, 66, 66Т, 66И, 75 и 75И (цифры в группах обозначают степень деформации в процентах). При этом на осажённых образцах не должно быть надрывов и трещин. ГОСТ 10702–78 регламентирует способы изготовления проката, его термическую обработку и марки сталей для каждой группы.

Механические свойства сталей для объемной холодной прокатки приведены в табл. 1.56 и 1.57. Следует отметить, что изделия из сталей с твердостью менее 131 НВ и более 255 НВ трудно высаживаются.

Стали для автомобилестроения. Стали с высокой технологической пластичностью при штамповке широко используют в автомобилестроении и других машиностроительных отраслях. Производят их в виде тонкого холодно- и горячекатаного листа для холодной штамповки кузовных деталей, а также в виде сортового проката для холодной объемной штамповки крепежных изделий. Основные требования, предъявляемые к этим сталям, следующие: высокая пластичность в сочетании с повышенной прочностью, способность к дополнительному упрочнению при деформации и последующем искусственном старении.

Наиболее металлоемко производство тонколистового холоднокатаного проката для холодной штамповки. Для изготовления такого проката применяют низкоуглеродистые стали (табл. 1.58), отличающиеся системой легирования, фазовым составом, штампуемостью и механизмом упрочнения:

- углеродистые стали марок 08Ю, 08кп и др. [1,4];
- низколегированные стали марок 08ГСЮТ, 08ЮП, 05СПЮ и др. [1,4];
- двухфазные ферритно-мартенситные стали (ДФМС) марок 03ХГЮ, 06ХГСЮ и др. [1,4];
- низколегированные стали типа 20Г2ЮПБ с повышенным содержанием деформационно-нестабильного остаточного аустенита, упрочняющиеся за счет ТРИП-эффекта при штамповке [19];

особонизкоуглеродистые стали без свободных атомов внедрения марок 01ЮТ, 01ЮТБ, так называемые IF-стали (*interstitial free stells*), упрочняемые дополнительно при сушке лакокрасочного покрытия [22].

Таблица 1.56. Механические свойства калиброванного и калиброванного со специальной отделкой поверхности проката в отожженном состоянии

Марка стали	НВ, не более	σ_s , МПа		ψ , %, не менее
		после отпуска или обычного отжига	после сфероидизирующего отжига	
08кп, 08пс	131 (115)	310–410	290–390	60
08	131 (115)	310–410	290–390	55
10кп, 10пс	143 (115)	310–410	290–390	50
10	143 (115)	330–450	310–410	55
15кп, 15пс	149 (125)	360–470	320–420	55
15	149 (125)	360–470	320–420	55
20кп, 20пс	163 (132)	390–490	340–440	50
20	163 (132)	390–490	340–440	50
25	170 (156)	≤ 540	≤ 490	50
30	179 (156)	≤ 570	≤ 520	45
35	187 (163)	≤ 590	≤ 540	45
40	197 (163)	≤ 590	+	40
45	207 (170)	≤ 590	+	40
50	217 (217)	+	+	+
15Х	179 (156)	≤ 550	340–440	60
20Х	179 (163)	≤ 550	360–470	60
30Х	187 (170)	+	+	+
35Х	197 (170)	+	+	+
40Х	207 (179)	+	+	+
45Х	229 (179)	+	+	+
38ХА	207 (187)	≤ 590	≤ 560	60
15Г	163 (163)	+	+	+
20Г	187 (179)	+	+	+
20Г2	197 (187)	+	+	+
35Г2	207 (187)	+	+	+
40Г	207 (207)	+	+	+
45Г	229 (229)	+	+	+
40Г2	255 (217)	+	+	+
38ХС	255 (255)	+	+	+
12ХН	+	410–530	410–510	70
40ХН	207 (179)	+	+	+
50ХН	217 (197)	+	+	+
15ХФ	187 (163)	≤ 540	≤ 490	55
19ХГН	217 (+)	+	≤ 690	+
15ХМ	179 (179)	+	+	+
16ХСН	+	≤ 640	≤ 540	55
30ХМА	229 (217)	+	+	+
20ХГСА	207 (197)	+	+	+
30ХГСА	229 (217)	≤ 690	+	57
35ХГСА	241 (241)	+	+	+
15ХГНМ	217 (+)	+	≤ 490	60
38ХГНМ	+	+	≤ 690	60
12ХН3А	217 (217)	+	+	+
18Х2Н4МА	269 (269)	+	+	+
25Х2Н4МА (25Х2Н4ВА)	269 (255)	+	+	+
40ХН2МА (40ХНМА)	269 (269)	+	≤ 640	50
30ХН2МФА	269 (269)	+	+	+

Примечания: 1. В скобках приведена твердость горячекатаного и горячекатаного со специальной отделкой поверхности проката. 2. Знак «+» означает, что механические свойства определяют для накопления данных и результаты испытаний указывают в документе о качестве.

Таблица 1.57. Механические свойства калиброванного и калиброванного со специальной отделкой поверхности проката в нагартованном состоянии

Марка стали	НВ [*] , не более	σ_b , МПа		δ_b , %	ψ , %
		не менее			
08кп, 08пс	131	179	370	8	60
08	131	179	370	8	55
10кп, 10пс	137	179	370	8	55
10	137	187	390	8	50
15кп, 15пс	143	187	390	8	50
15	143	197	440	8	45
20кп, 20пс	156	197	490	7	45
20	156	207	490	7	40
25	170	217	540	7	40
30	179	229	560	7	40
35	187	229	590	5	40
40	217	241	+	+	+
45	229	241	+	+	+
12ХН	—	210	+	+	+
19ХГН	—	269	+	+	+
15Х, 20Х	—	207	590	5	45
30Х	—	207	+	+	+
35Х, 40Х	—	+	690	5	40
38ХА	—	207	+	+	+
15ХФ, 40ХН	—	207	+	+	+
20Г2	—	+	490–690	+	+
30ХГСА	—	+	490–740	+	+
16ХСН	—	+	440–640	+	+
30ХМА	—	+	440–640	+	+
15ХГНМ	—	+	+	+	+

Примечание. Знак «+» означает, что механические свойства определяют для накопления данных и результаты испытаний указывают в документе о качестве.

* Для горячекатаного и горячекатаного со специальной отделкой поверхности проката.

Комплекс механических свойств и характеристик штампуемости типичных холоднокатаных тонколистовых сталей приведен в табл. 1.58.

Для обеспечения штампуемости тонколистовой стали необходимо:

небольшое ($< 0,7$) отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_b$;

повышенная ($> 2,6$) пластичность, характеризуемая относительным удлинением δ_4 при деформации 4 %;

Таблица 1.58. Химический состав типичных холоднокатаных сталей повышенной штампуемости, % (мас.), не более

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Al	Ti	B	Nb	Cr
08Ю	0,07	0,20–0,35	0,01	0,025	0,020	0,02–0,07	–	–	–	0,03
08ЮП(Р)	0,05–0,09	0,20–0,35	0,05	0,025	0,06–0,09	0,03–0,07	–	0,002	–	0,02
08ГСЮТ	0,09	0,7–1,1	0,3–0,6	0,030	0,030	0,02–0,07	0,02–0,08	–	–	0,03
05СПЮ	0,07	0,35	0,7–1,0	0,025	0,060–0,085	0,02–0,05	–	–	–	0,02
03ХТЮ	0,06	1,1–1,4	0,25	0,030	0,030	0,02–0,07	–	–	–	0,3–0,6
Типа 20Г2ЮЛБ (ТРИП-сталь)	0,10–0,30	1,5–2,0	0,1–1,5	0,025	0,030	0,05–1,80	–	–	0,04	0,04
01ЮТ (IF-сталь)	0,008	0,10–0,18	0,02	0,012	0,010	0,03–0,06	0,015–0,040	–	0,015–0,040	–

Примечание. Содержит азота не более 0,007 % (мас.)

Таблица 1.59. Механические свойства и характеристики штампуемости типичных холоднокатаных тонколистовых (до 2 мм) сталей

Марка стали	$\sigma_{0,2}$	σ_s		$\sigma_{0,2}/\sigma_s$	$\delta_4, \%$	\bar{F}	n
	МПа						
08Ю	186–196	255–323		0,58–0,73	38–42	$\geq 1,75$	$\geq 0,22$
08ЮП(Р)	≥ 220	≥ 340		0,65	≥ 32	$\geq 1,5$	–
08ГСЮТ	≥ 294	≥ 392		0,68	≥ 30	1,15	0,18
05СПЮ	≥ 355	≥ 490		0,73	≥ 28	–	$\geq 0,16$
03ХТЮ	≤ 300	≤ 440		0,55–0,68	≥ 31	1,13	0,24
Типа 20Г2ЮЛБ (ТРИП-сталь)	≥ 400	≥ 590		0,68	≥ 29	–	0,18
01ЮТ (IF-сталь)	≤ 170	290–310		0,55–0,59	≥ 40	2,2	$\geq 0,20$

повышенный ($> 1,0$) показатель нормальной пластической анизотропии в плоскости листа (показатель Ленкфорда), определяемый по формуле

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4},$$

где $r = \varepsilon_b / \varepsilon_t$ – отношение относительной деформации по ширине b листа к его относительной деформации по толщине t ; 0,90 и 45 – углы между осью образца и направлением прокатки.

Нормируемой характеристикой штампуемых тонколистовых сталей является также показатель скорости деформационного упрочнения $n = \Delta \ln \sigma / \Delta \ln \varepsilon$, значение которого изменяется от 0,16 до 0,25.

Согласно ГОСТ 9045–93, тонколистовой холоднокатаный прокат толщиной до 2 мм подразделяют по способности к вытяжке на весьма особо сложной (ВОСВ), особо сложной (ОСВ), сложной (СВ) и весьма глубокой (ВГ) вытяжке.

Способность к вытяжке предопределяет производство и поставку стали с регламентированным уровнем механических свойств (табл. 1.60).

Таблица 1.60. Механические свойства тонколистового проката из низкоуглеродистой качественной стали 08Ю

Способность к вытяжке	σ_T , не более	σ_b	δ_4 , %, не менее, при толщине проката, мм			HRT15	HRT30	HRB
	МПа		$\leq 0,7$	0,7–1,5	1,5–2,0	не более, при толщине проката, мм		
						0,5–0,8	0,8–1,7	1,7–2,0
ВОСВ	185	250–350	38	40	42	76	51	46
ОСВ	195	250–350	34	36	40	76	51	46
СВ	205	250–380	32	34	38	78	53	48
ВГ	–	250–390	26	28	29	–	–	–

Низколегированные ДФМС применяют для изготовления кузовных деталей автомобиля (двери, капот, крышка картера, бампер, стойки и др.) благодаря сочетанию высокого уровня начальной прочности и пластичности, а также повышенному упрочнению в результате деформации (штамповки) и искусственного старения.

Листовые ДФМС производят в холодно- и горячекатаном состоянии с σ_s соответственно 400–1 000 и 550–800 МПа.

При регламентированном в стали количестве мартенсита (обычно не более 20–30 %), получаемого либо в процессе закалки из межкритического интервала температур A_{c1} – A_{c3} , либо при завершении прокатки в межкритическом интервале температур A_{r3} – A_{r1} и ускоренном охлаждении, ДФМС обладают наиболее благоприятным сочетанием прочности и пластичности по сравнению с углеродистыми и низколегированными сталями.

Наибольшее упрочнение ДФМС наблюдается при степенях деформации 2–5 % (табл. 1.61).

Таблица 1.61. Упрочнение при деформации ДФМС по сравнению с низкоуглеродистыми и низколегированными сталями

Марка стали	Свойства после отжига, МПа				Свойства после деформации на 5 % и старения при 200 °С, МПа	
	$\sigma_{0,2}$	σ_2	σ_5	σ_b	$\sigma_{0,2} = \sigma_5^{\text{ст}}$	σ_b
08Ю	200	240	275	330	315	350
08ГСЮ(Ф)	315	350	390	440	415	460
03ХГЮ*	260	355	435	485	515	540
06ХГСЮ*	310	435	510	595	590	680

* ДФМС.

Свариваемость ДФМС при точечной сварке кузовных деталей удовлетворительная. Это обусловлено малым содержанием в них углерода (до 0,08 %), а значит, низким значением углеродного эквивалента $C_3 < 0,40$ %. Прочность сварных соединений ДФМС выше, чем низколегированной стали (табл. 1.62).

Таблица 1.62. Прочность основного металла и сварного соединения ДФМС и низколегированной стали в различных исходных состояниях*

Марка стали	Состояние	σ_b , МПа		
		основного металла	зоны шва	сварного соединения
09Г2	Горячекатаное	520	660	520
06ХГСЮ	»	475	750	480
	Закаленное из ($\alpha + \gamma$)-области и деформированное на 5 %	600	720	610

* Аргонно-дуговая сварка листовых образцов толщиной 4 мм встык; скорость сварки 1 см/с.

Из ДФМС изготавливают стержневые крепежные изделия (болты, шпильки) повышенной прочности методом холодной объемной штамповки. Малоуглеродистые низколегированные борсодержащие стали марок 08Р, 12Г1Р, 06ХГР используют в виде горячекатаного сортового металлического проката диаметром 6–21 мм в мотках и диаметром 22–38 мм в прутках или мотках [2, 4]. Химический состав типичной стали 12Г1Р, % (мас.): 0,10–0,16 С; 0,9–1,3 Мп; 0,17–0,35 Si; 0,01–0,05 Al; $\geq 0,03$ Ti; $\geq 0,001$ В; $\leq 0,012$ N; $\leq 0,25$ Cr; $\leq 0,035$ S; $\leq 0,035$ P. В горячекатаном сортовом прокате из этой стали гарантирован следующий уровень механических свойств: $\sigma_b \geq 570$ МПа; $\delta_5 \geq 28$ %; $\psi \geq 60$ %; твердость ≤ 170 НВ.

Технологическая схема изготовления крепежных изделий из ДФМС включает в себя: 1) закалку из межкритического интервала температур $A_{c1} - A_{c3}$ с получением упрочняющей (мартенситной) фазы в количестве 15–20 %; 2) калибровку сортового проката на технологический размер; 3) холодную высадку и накатку резьбы; 4) старение (отпуск) при 200 °С для обезводораживания после гальванического покрытия. Изменение прочности крепежных изделий из стали 06ХГР в процессе технологических переделов приведено в табл. 1.63.

**Таблица 1.63. Временное сопротивление ДФМС марки 06ХГР
на стадиях изготовления крепежных изделий**

Изделие	Диаметр исходной проволоки, мм	σ_b , МПа, после			
		закалки	калибровки	высадки	старения
Болт М6	6,4	575	585 (2 %) ^{*1}	865 (27 %) ^{*2}	815
Болт М10	11	560	790 (21 %) ^{*1}	890 (13 %) ^{*2}	875

^{*1} Относительная деформация при калибровке. ^{*2} Относительная деформация при высадке (редуцировании).

Применение технологии изготовления крепежных изделий из ДФМС позволяет, во-первых, использовать более дешевый горячекатаный прокат вместо традиционно применяемого проката после сфероидизирующего отжига; во-вторых, получать высокопрочный крепеж ($\sigma_b \geq 800$ МПа) без проведения завершающего улучшения (закалки и высокого отпуска) и, в-третьих, заменить традиционно применяемые для данного назначения легированные конструкционные термоулучшаемые стали марок 38ХА, 38ХГНМ и др. на низколегированные ДФМС марок 08Р, 12Г1Р и т. д.

Список литературы

1. *Белянский А.Д., Капнин В.В.* Производство высокоштампуемых сталей для автомобилестроения на НовOLIпецком металлургическом комбинате // Сборник трудов международной конференции «Черная металлургия России и СНГ в XXI веке». М.: Металлургия, 1994. Т. 5.
2. *Бобылев М.В., Майстренко В.И., Королева Е.Н.* Перспективы производства высокопрочных стержневых крепежных деталей из сталей 08Р и 12Г1Р с ферритно-мартенситной структурой // Национальная металлургия. 2003. № 6.
3. *Бодяко М.Н., Астапчук С.А., Ярошевич Г.Б.* Мартенситно-стареющие стали. Минск: Наука и техника, 1976.
4. *Голованенко С.А., Фонштейн Н.М.* Двухфазные низколегированные стали. М.: Металлургия, 1986.
5. *Гузовская М.А., Островская Т.В.* Основные направления развития мартенситно-стареющих сталей за рубежом // Черная металлургия: Бюллетень научно-технической информации. М., 1982. Вып. 23 (931).
6. *Гуляев А.П.* Металловедение: Учебник для вузов. 6-е изд. М.: Металлургия, 1986.
7. *Дьяков В.Г., Медведева М.Л.* Методика испытания сталей на стойкость против сероводородного коррозионного растрескивания (МСКР-01-95) // Химическое и нефтяное машиностроение. 1986. № 12.
8. *Журавлев В.Н., Николаева О.И.* Машиностроительные стали: Справочник. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1992.
9. *Исследование эливарных и механических свойств мартенситно-стареющих сталей с двухфазной ($\alpha + \gamma$)-структурой / М.Д. Перкас, Е.М. Струг, В.В. Русаненко и др. // Физика металлов и металлосведение. 1987. Т. 63. Вып. 2.*

10. *Конструкционные материалы*: Справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990.
11. *Марочник сталей и сплавов* / Под ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989.
12. *Матросов Ю.И.* Комплексное микролегирование малоперлитных сталей, подвергаемых контролируемой прокатке // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1986. № 3.
13. *Машиностроение*. Энциклопедия: В 40 т. Т. II-2. Стали. Чугуны. / Под ред. О.А. Банных, Н.Н. Александрова. М.: Машиностроение. 2000.
14. *Ниобийсодержащие* низколегированные стали / Ф. Хайстеркамп, К. Хулка, Ю.И. Матросов и др. // М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1999.
15. *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.
16. *Пастухова Ж.П., Рахштадт А.Г., Каплун Ю.А.* Динамическое старение сплавов. М.: Metallurgia, 1985.
17. *Перкас М.Д.* Структура, свойства и области применения высокопрочных мартенситно-старееющих сталей. М.: Машиностроение, 1986.
18. *Перкас М.Д., Кардонский В.М.* Высокопрочные мартенситно-старееющие стали. М.: Metallurgia, 1970.
19. *Пышминцев И.Ю., Саврай Р.А.* Листовые высокопрочные низколегированные стали для автомобилестроения с повышенным содержанием деформационно-нестабильного аустенита // *Производство проката*. 2004. № 1.
20. *Рахштадт А.Г.* Пружинные стали и сплавы. М.: Metallurgia, 1982.
21. *Режимы резания*: Справочник. 4-е изд. / Под ред. А.Д. Корчемкина. М.: НИИТавтопром. 1995.
22. *Скорыходов В.Н., Чернов П.П., Ларин Ю.И.* Освоение производства новых оцинкованных особомалоуглеродистых высокопластичных сталей для автомобильной промышленности // *Сталь*. 2001. № 12.
23. *Стоналлова 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., 1985. № 189.
24. *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.
25. *Термическая* обработка крупных штамповок и прутков из стали H18K9M5T / О.К. Ревякина, Л.Н. Беляков, В.Л. Никольская и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1971. № 4.
26. *Термическая* обработка мартенситно-старееющей стали 00H18K9M5T / С.С. Рыжак, О.К. Ревякина, В.В. Сачков, Я.М. Потак // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1968.
27. *Тихонов Г.В., Шахназаров Ю.В.* Механические свойства нержавеющей мартенситно-старееющей стали 05X12K14H5M5T-ВД // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1981. № 9.
28. *Фазовый состав, структура* и свойства мартенситно-старееющей стали X14K9H6M5 / Н.Ф. Лашко, Л.В. Заславская, В.Л. Никольская, Г.Г. Соловьева // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1974. № 10.

2. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Материалы, используемые в машиностроении, должны обладать эксплуатационными показателями, обеспечивающими качественное и надежное функционирование изготавливаемых из них машин и приборов. Важным свойством таких материалов является их технологичность, позволяющая получать из них изделия разной массы, размеров и конфигурации с минимальными экономическими издержками.

В настоящей главе рассматриваются материалы с повышенными технологическими свойствами: чугуны, из которых получают фасонные детали самой сложной конфигурации, и медные сплавы, обладающие, как правило, высокой пластичностью или хорошими литейными свойствами.

2.1. Железоуглеродистые сплавы с высокими литейными свойствами

В современном машиностроении и других областях техники чугуны – представитель железоуглеродистых сплавов – является наиболее распространенным материалом. Доля чугунных отливок в общем объеме машиностроительных заготовок России по массе составляет около 40 %. Мировое производство чугунных литых заготовок в 1997 – 2000 гг. составило 74,5–77,5 % от общей массы выпускаемых отливок. В промышленно развитых странах семерки эта величина колебалась от 66,8 % (Япония) до 84,3 % (Великобритания). За последние годы произошло некоторое уменьшение доли чугунных отливок вследствие увеличения отливок из сплавов цветных металлов. Прогнозы показывают, что в обозримом будущем производство и потребление чугунных отливок также сохранится существенным, так как разнообразные типы чугуна обладают многими ценными свойствами, а отливки из них выдерживают экономическую конкуренцию [6].

2.1.1. 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: из графитизированного чугуна, характеризующегося наличием в структуре свободного графита различной формы; белого чугуна, характеризующегося отсутствием в структуре свободного графита (высокоуглеродистая фаза находится в виде цементита), и половинчатого, отбеленного чугуна. В последнем случае поверхностный слой отливки имеет структуру белого чугуна, а в центре – графитизированного серого чугуна.

Форма графита в графитизированных чугунах может быть пластинчатая либо вермикулярная – червеобразная, хлопьевидная и шаровидная. Эти формы графита определяют основные типы чугунов: серый чугун, чугун с вермикулярным графитом, ковкий чугун, высокопрочный чугун с шаровидным графитом. При этом структура металлической основы может быть от ферритной до аустенитной. Государственными стандартами регламентировано около 100 марок чугуна.

По химическому составу различают отливки из нелегированного и легированного чугуна.

По назначению чугуны могут быть подразделены на несколько укрупненных групп в зависимости от предъявляемых к отливке требований. К укрупненным группам относятся отливки:

а) машиностроительные из серого чугуна, у которого наиболее ярко представлены свойства чугуна как конструкционного материала: характерные механические свойства, хорошая обрабатываемость, улучшенные литейные свойства, облегчающие получение отливок с наиболее сложной конфигурацией, и наибольшая дешевизна. В пределах данной группы могут быть выделены отливки для станкостроения, автомобилестроения, тяжелого машиностроения, электрической промышленности, санитарно-технические отливки, трубы 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, изготавливаемые в разовых песчаных, оболочковых и металлических (кокилях) формах, по газифицируемым моделям, а также в керамических формах по выплавляемым или выжигаемым моделям. Особенность технологического процесса в последних двух вариантах заключается в отсутствии разъема 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 отливки зависит от типа производства, массы отливки, ее габаритных размеров и конструктивных особенностей. Выбранный способ характеризуется определенными показателями – точностью и шероховатостью 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). При литье в металлические формы целесообразна серия для мелких отливок – свыше 400 шт., для крупных – свыше 20 шт.

Литьем в оболочковые формы получают в основном коленчатые валы и ребристые цилиндры, станины электродвигателей, корпуса токарных патронов, нагревательные конфорки бытовых электроплит, детали различных двигателей, компрессоров, насосов, вентиляторов, текстильных машин, гидроаппаратуры, кондиционеров и т. д.

Максимальные габаритные размеры отливок 1000×1000 мм, масса отливок до 200 кг. Учитывая необходимость изготовления 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, требующие повышенной точности и малой 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.

Точности отливок, получаемых различными способами, приведены в табл. 2.1. На характеристики точности отливок влияет их сложность, а также вид модельной 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 удельным давлением используют металлическую модельную оснастку, что естественно отражается на себестоимости отливок и становится целесообразным лишь при определенной серии (обычно не меньше нескольких сот штук).

Таблица 2.1. Точность и шероховатость поверхности чугунных отливок, получаемых различными способами [3]

Способ литья	Класс точности* по ГОСТ 26645–85	Rz, мкм
В разовые песчаные формы:		
ручная формовка	9–13 / 7–12	80–160
машинная формовка встряхиванием с подпрессовкой	8–13 / 6–11	80–160
машинная формовка прессованием высоким давлением	7–12 / 5–9	40–80
В формы с газифицируемыми моделями	7т–12 / 5–10	40–160
В оболочковые формы	5–11 / 4–9	20–80
В металлические формы	5–11т / 4–9	20–80
По выплавляемым моделям	4–9 / 3–8	10–40


Примечание. Данные относятся к отливкам II и III групп сложности размером 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 габаритных размеров может быть ниже.

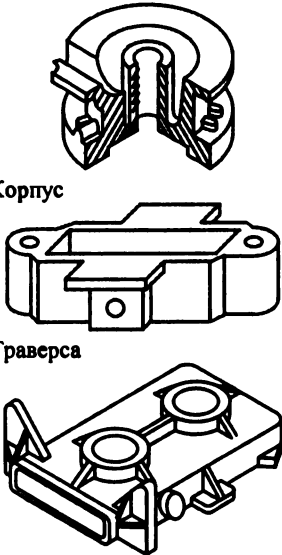
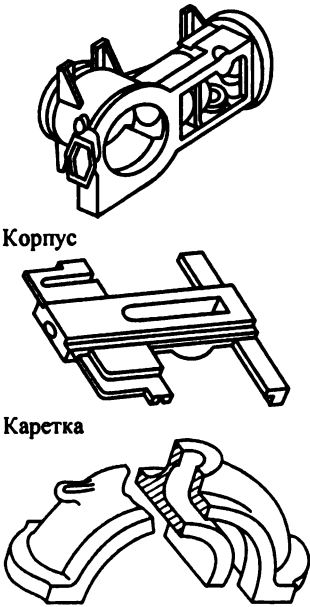
* В числителе приведена минимально допустимая точность, в знаменателе – достигаемая.

В основу классификации отливок по сложности положена классификация, установленная Прейскурантом оптовых цен № 25-01 [18]. По конструктивно-технологической сложности отливки, получаемые в песчаных формах, литьем по выплавляемым моделям, литьем под давлением, делят на 6 групп, а отливки, получаемые в оболочковых формах, в кокиль или центробежным способом, – на 5 групп.

Основными признаками при классификации являются: геометрическая форма, конфигурация наружных поверхностей; конфигурация и характер расположения внутренних полостей отливок; масса и габаритные размеры отливок; технические требования и технологические особенности изготовления. В табл. 2.2 в качестве примера даны конструктивные признаки отнесения отливок, получаемых в песчаных формах, к различным группам сложности.

Таблица 2.2. Группы сложности отливок, изготавливаемых в песчаных формах

Группа сложности	Примеры отливок	Характеристика отливок
I	 <p data-bbox="173 378 238 402">Плита</p> <p data-bbox="173 565 334 589">Крышка глухая</p> <p data-bbox="173 768 370 792">Крышка смотровая</p>	<p data-bbox="509 215 1065 492">Отливки общего назначения массой до 100 кг; с габаритными размерами < 1000 мм и толщиной стенки > 30 мм; 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 с незначительной обработкой с одной стороны (в основном сверление)</p>
II	 <p data-bbox="173 1008 267 1032">Траверса</p> <p data-bbox="173 1211 273 1235">Колосник</p> <p data-bbox="173 1438 362 1463">Ступица барабана</p>	<p data-bbox="509 842 1065 1183">Отливки общего назначения массой до 1000 кг, с габаритным размером < 1600 мм и толщиной стенки 25–30 мм; 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 точение и растачивание</p>

Группа сложности	Примеры отливок	Характеристика отливок
III	 <p>Корпус</p> <p>Траверса</p> <p>Корпус раздаточной коробки</p>	<p>Отливки ответственного назначения массой до 4000 кг, с габаритными размерами < 4000 мм и толщиной стенки 20–25 мм; открытой коробчатой, сферической, цилиндрической формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные с ребрами, бобышками, выступами и углублениями. Углубления, выступы, ребра высотой > 75 мм до 10 шт. Внутренние полости в основном с прямолинейными поверхностями со свободным выходом наружу. Применяется механическая обработка с трех-четырёх сторон, включая шлифование</p>
IV	 <p>Корпус</p> <p>Каретка</p> <p>Корпус</p>	<p>Отливки ответственного назначения массой до 8000 кг; с габаритными размерами < 3000 мм и толщиной стенки 13–19 мм; открытой и закрытой коробчатой, цилиндрической или сферической формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные. Углубления, выступы, отверстия, ребра высотой > 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 $p < 0,6$ МПа</p>



Группа сложности	Примеры отливок	Характеристика отливок
V	 <p data-bbox="172 389 332 414">Рабочее колесо</p> <p data-bbox="172 576 264 600">Станина</p> <p data-bbox="172 779 252 803">Корпус</p>	<p data-bbox="505 194 1067 609">Отливки особо ответственного назначения массой до 25 т, с габаритными размерами < 6000 мм и толщиной стенки 7–12 мм; закрытой коробчатой, цилиндрической, сферической или комбинированной формы. Углубления, выступы, ребра, отверстия высотой > 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 и полирование. Предъявляются требования по химическому составу, механическим свойствам, микроструктуре, герметичности при $p = 0,6 \dots 3$ МПа</p>
VI	 <p data-bbox="172 1006 424 1031">Аппарат выправляющий</p> <p data-bbox="172 1218 344 1242">Блок цилиндров</p> <p data-bbox="172 1421 264 1445">Станина</p>	<p data-bbox="505 828 1067 1307">Отливки особо ответственного назначения массой более 25 т, с габаритными размерами > 6000 мм и толщиной стенки менее 7 мм; закрытой, коробчатой, цилиндрической или комбинированной формы. Наружные поверхности образуются сопряжением прямолинейных и криволинейных поверхностей. Углубления, выступы, отверстия, ребра высотой > 75 мм более 15 шт. Внутренние полости особо сложной конфигурации с наличием ленточных и кольцевых каналов, расположенных в два и больше ярусов, с затрудненным выходом наружу. Применяется механическая обработка со всех сторон, включая доводку хонингованием. Предъявляются требования по химическому составу, механическим свойствам, микроструктуре, газонасыщенности, герметичности при $p > 3$ МПа</p>

Таблица 2.3. Точность чугунных отливок в зависимости от их сложности и наибольшего габаритного размера [3]

Наибольший габаритный размер, 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	5т – 7т	7т – 9т	7т – 9т
501 – 2000	2,00	2,50	3,15	7 – 9	7 – 9	9
Св. 2000	≤ 2,5	≤ 3,15	≤ 4	7 – 9	До 10	До 10

Примечание. При оценке точности в условных баллах за единицу принята достигаемая точность отливок I – II групп сложности с наибольшим габаритным размером ≤ 50 мм.

В табл. 2.3 приведены ориентировочные данные по точности чугунных отливок, изготовляемых в песчаных формах, в зависимости от сложности отливок и наибольшего габаритного размера.

Таблица 2.4. Относительная стоимость 1 т отливок сопоставимой сложности, изготовленных из различных марок чугуна в песчаную форму

Марка чугуна	Масса отливок, кг (числитель) и серия, тыс. шт. (знаменатель)					
	До 0,25 100–200	1,0–2,5 20–75	2,5–10,0 12–30	63–160 4–7,5	630–1000 1,5–3,5	2500–10000 0,18–0,35
СЧ10 – СЧ15	1,00–2,41	0,85–2,03	0,75–1,84	0,60–1,47	0,52–1,29	0,47–1,16
СЧ20, СЧ25	1,05–2,55	0,89–2,15	0,80–1,95	0,66–1,62	0,56–1,36	0,50–1,23
СЧ30, СЧ35	1,08–2,60	0,91–2,19	0,82–1,99	0,65–1,58	0,57–1,39	0,51–1,25
ВЧ35 – ВЧ45	1,23–3,02	1,03–2,53	0,95–2,30	0,74–1,81	0,68–1,59	0,59–1,44
ВЧ50, ВЧ60	1,31–3,21	1,10–2,70	1,01–2,45	0,79–1,93	0,72–1,69	0,63–1,53
ВЧ70 – ВЧ100	1,46–3,58	1,23–3,00	1,12–2,73	0,88–2,15	0,81–1,89	0,70–1,71
КЧ30-6–КЧ65-3	1,14–2,78	0,94–2,31	0,85–2,09	0,68–1,67	0,60–1,46	–
АСЧ-1 – АСЧ-4	1,10–2,65	0,93–2,23	0,82–2,02	0,66–1,62	0,58–1,42	–
АЧК-1, АЧК-2, АЧВ-1, АЧВ-2	1,06–2,55	0,90–2,15	0,79–1,95	0,63–1,55	0,56–1,36	–
ЧХ1 – ЧХ3	1,10–2,65	0,93–2,23	0,82–2,02	0,66–1,62	0,58–1,42	0,51–1,27
ЧС5, ЧС5Ш	1,13–2,72	0,96–2,29	0,84–2,07	0,67–1,66	0,60–1,45	0,53–1,31
ЧС15, ЧС17, ЧН2Х,	1,33–3,20	1,13–2,69	1,06–2,44	0,80–1,95	0,70–1,71	0,62–1,54
ЧНХМД, ЧНХМДШ,	1,51–3,63	1,28–3,06	1,13–2,77	0,90–2,22	0,80–1,95	0,71–1,75
ЧНМШ						
ЧГ6С3Ш, ЧГ8Д3	1,62–3,90	1,37–3,28	1,21–2,98	0,97–2,38	0,85–2,09	0,76–1,88
ЧХ28, ЧХ32	1,76–4,23	1,49–3,56	1,32–3,23	1,05–2,58	0,93–2,26	0,82–2,04
ЧЮ22Ш, ЧЮ30, ЧХ9Н5	2,18–5,23	1,85–4,42	1,63–4,01	1,30–3,20	1,15–2,81	1,02–2,53

Примечания: 1. В марках чугуна: Х – хром; С – кремний; Н – никель; М – молибден; Д – медь; Г – марганец; Ю – алюминий; Ш – чугун с шаровидным графитом; П – чугун с пластинчатым графитом. 2. При увеличении производства до массового по сравнению с указанным в таблице цена за 1 т отливок уменьшается на 15 %, а при уменьшении до единичного – увеличивается на 70 %.

Себестоимость отливок, кроме материала, их группы сложности и серии, определяется точностью, зависящей от применяемого способа изготовления, и в общем случае вырастает с повышением точности отливок. Однако это увеличение стоимости 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. 2.4, а от применяемого технологического процесса – в табл. 2.5 [18]. Приведенный диапазон изменения относительной стоимости охватывает отливки всех групп сложности: от I (меньшее значение) до IV (большее значение).

Таблица 2.5. Относительная стоимость 1 т отливок из ВЧ35 – ВЧ45, изготовленных по различным технологическим процессам

Способ литья	Масса, кг (числитель), и серия, тыс. шт. (знаменатель), отливок				
	0,16–0,25	1,0–1,6	6,3–10,0	63–100	630–1000
	100–200	20–85	12–30	4,0–7,5	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)*
В металлическую форму	0,85–1,49	0,7–1,3	0,59–1,16	0,49–1,0	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)**	–

Примечание. При уменьшении серии отливок до пределов, целесообразных для сопоставления всех приведенных в таблице способов, цена на отливки возрастает на 10–12 % при литье в песчаную форму, на 15 % при литье по выплавляемым моделям, на 20 % при литье в металлическую форму (кокиль) и на 25 % при литье в оболочковую форму.

* Для отливок массой более 250 кг. ** Для отливок массой более 10 кг.

За единицу в табл. 2.4 принята оптовая цена 1 т отливок массой 0,25 кг I группы сложности из чугуна марок СЧ10, СЧ15, изготовленных в песчаных формах, а в табл. 2.5. – оптовая цена 1 т тех же отливок из высокопрочного чугуна марок ВЧ35 – ВЧ45. Цена отливок, получаемых в кокиль, более низкая по сравнению с отливками, изготовленными в песчаных формах (см. табл. 2.5). Однако это зависит от серийности выпуска отливок. С уменьшением серийности цена кокильных отливок будет быстро возрастать и соотношение цен изменится в пользу отливок, изготавливаемых в песчаных формах. При единичном и мелкосерийном производстве литье в кокиль становится нецелесообразным, даже с учетом возможной выгоды, получаемой при механической обработке вследствие повышения точности отливок.

2.1.2. Физические и химические свойства чугунов

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

Плотность. Пренебрегая сравнительно малым влиянием ряда элементов в обычном чугуна вследствие их малого содержания и эффективности (Cr, Ni, Cu и др.), можно рассчитать плотность чугуна [8]:

$$\gamma = 100 : \left[\frac{100 - 15C_{cb} - C_r - 2,75 - 14,5(P - 0,1) - \Pi}{7,87 - 0,05Si - 0,065Al} + \frac{15C_{cb}}{7,67} + \frac{C_r}{2,2} + \frac{2,7S}{4} + \frac{14,5(P - 0,1)}{7,32} \right],$$

где 15 C_{cb}; 2,7 S; 14,5 (P-0,1) – количество карбидов железа, сульфидов марганца и фосфидной эвтектики соответственно; C_{cb}, S, P – массовые доли связанного углерода, серы и фосфора соответственно, %; C_r – массовая доля графита, %; Π – пористость, %. Расчеты по приведенной формуле дают хорошее совпадение с экспериментальными данными.

Наибольшей плотностью характеризуются белые чугуны, не содержащие свободных графитовых включений, и некоторые легированные чугуны – хромовые, никелевые, хромоникелевые (табл. 2.6). В серых чугунах плотность обычно тем больше, чем выше прочность чугуна.

Таблица 2.6. Плотность чугунов [10, 13]

Тип и марка чугуна	Структурные составляющие	γ, т/м ³
Белый	Перлит + карбиды	7,4–7,75
Серый с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412–85): СЧ15 – СЧ18 СЧ20 – СЧ25 СЧ30 – СЧ35	Феррит, феррит + перлит Феррит + перлит, перлит Перлит	6,8–7,0 7,1–7,2 7,3–7,4
Чугун с вермикулярным графитом ЧВГ35–ЧВГ40 (ГОСТ 28394–89)	Феррит	7,1–7,2
Чугун с шаровидным графитом (ГОСТ 7293–85): ВЧ35 – ВЧ45 ВЧ60 – ВЧ80 ВЧ100	» Перлит Бейнит	7,1–7,2 7,2–7,3 7,25–7,35
Ковкий (ГОСТ 1215–79): КЧ30-6 – КЧ37-12 КЧ45-6 – КЧ63-2	Феррит Перлит	7,2–7,4 7,3–7,5
Легированный: никелевый с 34–36 % Ni ЧН15Д7Х2(нерезист) хромистый типа ЧХ28, ЧХ32 хромово-никелевый кремнистый типа ЧС13, ЧС15, ЧС17 марганцевый с 12 % Mn алюминиевый с 5–8 % Al ЧЮ22Ш (чугаль)	Аустенит – – – Феррит – – Феррит	7,5–7,7 7,4–7,6 7,3–7,6 7,6–7,8 7,1–6,8 7,1–7,3 6,4–6,7 5,6–6,0

Примечание. При дальнейшем увеличении содержания Al до 30 % получается чугун под названием пиррофераль, плотность которого 5,3 т/м³ [8].

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, плотности которых больше, чем железа. При легировании марганцем плотность аустенита несколько понижается. Еще меньше плотность ферритных, кремнистых и алюминиевых чугунов.

Во всех случаях на плотность отливок оказывает влияние пористость (газовая, усадочная), которая составляет обычно от 0,5 до 1,2 % в зависимости от состава чугуна, характера кристаллизации и ряда 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, а в центре – на 10 % ниже, чем на периферии.

Плотность графитизированного чугуна уменьшается также с увеличением толщины стенки отливки вследствие увеличения степени графитизации и укрупнения графита [8]:

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, а следовательно, усадочная пористость. Потому отливки, полученные в металлических формах, 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. 2.7).

Таблица 2.7. Теплофизические свойства серого чугуна в зависимости от температуры [8]

$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	$c, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$
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	–

Коэффициент линейного расширения α или удельную теплоемкость c реальных неоднородных структур, в том числе чугуна, можно определить по правилу смешения:

$$x = \frac{a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n}{a_1 + a_2 + \dots + a_n},$$

где x – α или c чугуна; x_1, x_2, \dots, x_n – α или c его структурных составляющих (табл. 2.8); a_1, a_2, \dots, a_n – массовые доли этих составляющих.

Таблица 2.8. Теплофизические свойства структурных составляющих чугуна в интервале 20–100 °С (α , c) и при 100 °С (λ)

Структурная составляющая	$\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$c, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{ } ^\circ\text{C})$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C})$
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:			
параллельно базису	6,6–8,0	630–880	357
перпендикулярно базису	26	–	84

Теплопроводность λ сплавов и смесей в отличие от коэффициента α и удельной теплоемкости c нельзя определить по правилу смешения. Влияние отдельных элементов на теплопроводность расчетным путем можно установить лишь приближенно [8]. На коэффициент α и удельную теплоемкость c влияет главным образом состав чугуна, а на теплопроводность λ – степень графитации, дисперсность структуры, неметаллические включения и т. п.

Коэффициент линейного расширения α определяет не только изменения размеров в зависимости от температуры, но и напряжения, образующиеся в отливках. Его уменьшение является полезным с этих позиций и облегчает условия получения качественных отливок. Но в случае совместной работы чугунных деталей с деталями из цветных сплавов или другими материалами, имеющими больший коэффициент линейного расширения, приходится стремиться к увеличению значения α для чугуна. Теплоемкость и теплопроводность имеют большое значение для таких отливок, как отопительные трубы, конфорки, 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. 2.9 приведены теплофизические свойства различных групп чугунов.

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 , как видно в табл. 2.9, отличаются аустенитные никелевые, а также ферритные никелевые чугуны типа чугуль и пиродераль. Поэтому при достаточно высоком содержании Ni, Cu, Mn значение α резко увеличивается. Однако при содержании Ni > 20 % значение α понижается и достигает минимума при 35–37 % Ni. Форма графита существенно влияет на коэффициент линейного расширения лишь при низких температурах, у высокопрочного чугуна с шаровидным графитом коэффициент α несколько выше, чем у чугуна с пластинчатым графитом.

Удельная теплоемкость чугуна, как и железа, увеличивается с ростом температуры (см. табл. 2.7) и характеризуется скачкообразным повышением при фазовом превращении $\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$; затем удельная теплоемкость чугуна резко падает, но с дальнейшим повышением температуры вновь увеличивается [10].

Таблица 2.9. Теплофизические свойства чугунов в интервале 20–100 °С [8, 10–13]

Тип и марка чугуна	$\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$c^{*1}, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$
Белый	9–10	523–573 (628–670)	29,3–50,2
Серый с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412–85): СЧ10 – СЧ18 СЧ20 – СЧ30 СЧ35	8,0–9,0	460–470 (586–628)	60,0–57,5
	9,5–10,5	480–525 (586–628)	54,0–46,0
	11–12	502–545 (628–670)	42,0–37,6
Чугун с вермикулярным графитом (ГОСТ 28394–89): ЧВГ30 – ЧВГ35 ЧВГ40 – ЧВГ45	12–14	480–550	47,0–51,0
	12–14	480–550	37,0–41,0
Чугун с шаровидным графитом (ГОСТ 7293–85): ВЧ35 – ВЧ45 ВЧ60 – ВЧ80 ВЧ100	11,5–12,5	460–502 (586–628)	37,6–46,0
	10,0–11,0	502–523 (628–670)	33,5–41,9
	9,0–10,0	523–565 (628–670)	29,3–37,6
Ковкий (ГОСТ 1215–79): КЧ30-6 – КЧ37-12 КЧ45-6 – КЧ65-3	10,5–11,0	460–511 (586–628)	54,4–62,8
	10,3–10,8	527–544 (628–670)	50,2–54,4
Легированный (ГОСТ 7769–82): никелевый: с 35-37 % Ni ЧН20Д2Ш хромистый: ЧХ16 ЧХ22 ЧХ28 ЧХ32 кремнистый: ЧС5 ЧС15, ЧС17 алюминиевый: ЧЮ7Х2 ЧЮ22Ш ЧЮ30	1,5–2,5	–	–
	17–19	(460–502)	30–42
	–	–	32,6 ^{*2}
	–	–	25,5 ^{*2}
	9–10	–	17,4 ^{*2}
	9–10	–	19,8 ^{*2}
	14–17 ^{*3}	(473)	21,0 ^{*4}
	4,7 ^{*2}	(579)	11,7–12,8
	10,2–10,7	–	33,1–33,9
	17,5 ^{*2}	–	15,1–28,0 ^{*4}
	22–23 ^{*3}	599	14,7–15,5

^{*1} В скобках приведены значения c в интервале 20–1000 °С. ^{*2} В интервале 20–200 °С.
^{*3} То же 20–900 °С. ^{*4} То же 20–550 °С.

Графитизация понижает теплоемкость чугуна, поэтому у белого чугуна она несколько выше, чем у серого и высокопрочного (см. табл. 2.9).

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 [8]. Указанное влияние графитизации меньше при шаровидном графите (см. табл. 2.9).

Форма графита, его выделение и распределение также влияют на теплопроводность. Например, высокопрочный чугун имеет более низкую теплопроводность, чем серый; теплопроводность чугуна с вермикулярным графитом выше, чем чугуна с шаровидным графитом и близка к этой характеристике у серого чугуна с пластинчатым графитом [10]. Высоколегированные чугуны характеризуются, как правило, более низкой теплопроводностью, чем обычные.

Электрические и магнитные свойства. Удельное электрическое сопротивление ρ , 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 [8].

Удельное электрическое сопротивление серого чугуна ρ можно приближенно оценить по формуле [7]

$$\rho = 10,4 + 14,4 C_r + 3,2 C_{cb} + (10,3 \dots 15,7) Si + (5 \dots 7,2) Mn + 11P.$$

Электросопротивление с повышением температуры возрастает. Структурные составляющие чугуна имеют следующие средние значения $\rho \cdot 10^3$ Ом·м: 10 – феррит, 20 – перлит; 140 – цементит; 30 – графит параллельно базису и 1000 – перпендикулярно базису. Таким образом, наибольшими удельными электрическими сопротивлениями обладают графит и цементит. Поэтому ρ чугуна увеличивается как при графитизации, особенно заметно для графита пластинчатой формы, так и при повышении в структуре количества цементита. Существенно влияет также дисперсность структуры металлической матрицы чугуна. Удельное электрическое сопротивление увеличивается с переходом структуры от феррита к перлиту, сорбиту, троститу и мартенситу (табл. 2.10). Высокими значениями ρ характеризуются чугуны с аустенитной структурой.

Раковины, межкристаллическая пористость, всякого рода включения также повышают удельное электрическое сопротивление чугуна. Поэтому отливки имеют тем меньшее ρ , чем больше их плотность γ . Высоколегированные чугуны характеризуются также большими значениями ρ , чем обычные.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к деталям, чугун можно применять в качестве ферромагнитного (магнитомягкого) или парамагнитного материала. Магнитные свойства в большей степени, чем какие-либо другие, зависят от структуры металла, что определяет их разделение на первичные и вторичные. К первичным относятся индукция, насыщение, 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 индукция, насыщение и проницаемость в слабых и средних полях, коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция. Вторичные свойства мало зависят от состава фаз и определяются главным образом формой и распределением структурных составляющих.

Таблица 2.10. Электромагнитные свойства чугунов [8,10]

Тип и марка чугуна	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	$\mu_{\text{max}} \cdot 10^6$, 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	45–85	565–1256	0,4–0,5	398–796
СЧ20–СЧ25	65–105	440–754	0,4–0,65	398–796
СЧ35	120	565	0,55–0,7	796–1034
Чугун с вермикулярным графитом	70–80	120–600	0,4–0,7	320–800
Чугун с шаровидным графитом (ГОСТ 7293–85):				
ВЧ46 – ВЧ45	40–50	1256–2512	0,35–0,50	119–278
ВЧ60 – ВЧ80	55–65	377–1256	0,55–0,70	318–796
ВЧ100	60–75	377–754	0,55–0,75	796–875
Ковкий (ГОСТ 1215–79):				
КЧ30-6 – КЧ37-12	30–38	1674–2890	0,55–0,70	127–278
КЧ45-6 – КЧ65-3	40–45	377–1005	0,60–0,75	318–796
Легированный (ГОСТ 7789–82):				
никелевый:				
ЧН11Г7Ш	100–110	1,28–1,38	–	–
ЧН15Д7Х2	140–170	1,29–3,77	0,0145–0,0165	–
хромистый:				
ЧХ16	62–73	–	–	–
ЧХ22	72–83	–	–	–
ЧХ28	87–89	–	–	–
ЧХ32	80–84	–	–	–
кремнистый:				
ЧС5	100–200	–	–	–
ЧС15, ЧС17	60–70	–	–	–
алюмниевый:				
ЧЮ22Ш	130–140	1,26–1,27	–	–
ЧЮ30	150–240*	1,26–1,27	–	–
марганцевый ЧГ8Д3	130–160	1,38–3,77	–	–

* Чугун с пластинчатым графитом.

Основными ферромагнитными составляющими чугуна являются феррит и цементит (табл. 2. 11). Цементит является более жесткой магнитной составляющей, поэтому в качестве магнитомягкого материала всегда применяют серый, а не белый чугун. Графитизация приводит к резкому понижению коэрцитивной силы H_c и интенсивному повышению μ_{max} , особенно при распаде последних остатков карбидов. При этом влияние графита, как и других немагнитных фаз, зависит также от формы и размеров включений. Наиболее благоприятной в этом отношении является глобулярная форма, поэтому ковкий и высокопрочный чугуны характеризуются большей индукцией и проницаемостью и меньшей коэрцитивной силой, чем серый при той же матрице (см. табл. 2.10).

Таблица 2.11. Характеристика структурных составляющих чугуна [8, 13]

Структурная составляющая	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	$T_{м.п.}^{*1}$, °C	B_s^{*2}	B_r	H_c , А/м	$\mu_{\max} \cdot 10^3$, Гн/м
			Тл			
Феррит	10	768	1,7–2,0	0,1–0,15	65–80	6,25–12,5
Перлит	20	–	–	–	–	–
Цементит	140	212	1,3–1,6	0,7–1,2	4300–5000	0,25–0,5
Графит:						
параллельно базису	30	–	–	–	–	–
перпендикулярно базису	1000	–	–	–	–	–

*¹ Температура магнитного превращения. *² Магнитная индукция насыщения.

Таким же образом влияет укрупнение эвтектического и ферритного зерна, а также уменьшение количества перлита. Поэтому отпуск после закалки способствует улучшению магнитомягких свойств.

Немагнитные (парамагнитные) чугуны применяют в тех случаях, когда требуется свести к минимуму потери мощности (крышки масляных выключателей, концевые коробки трансформаторов, нажимные кольца на электромашинах и т. д.) или необходимо минимальное искажение магнитного поля (стойки для магнитов и т. п.). В первом случае наряду с низкой магнитной проницаемостью требуется высокое удельное электрическое сопротивление (этому требованию чугуны удовлетворяют даже в большей степени, чем сплавы цветных металлов). Во втором случае необходима особо низкая магнитная проницаемость. Поэтому в ряде случаев не удастся заменить цветные сплавы аустенитными чугунами для отливок второй группы [8].

В зависимости от состава различают следующие 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 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 низкими прочностными и физическими свойствами.

Представляют интерес также ферритные высоколегированные алюминиевые чугуны, характеризующиеся особенно низкой магнитной проницаемостью (см. табл. 2.10).

Коррозионная стойкость. Коррозионное разрушение чугуна вызывается электрохимическими, реже – чисто химическими процессами. Коррозия может быть равномерной, местной, межкристаллитной, избирательной. В общем случае коррозию оценивают как скорость уменьшения массы материала. В зависимости от потери материала различают классы стойкости при коррозии в сильно- и среднеагрессивных средах (табл. 2.12).

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

Металлические материалы характеризуются структурой, химическим составом, шлаковыми и газовыми включениями, напряженным состоянием и качеством поверхности.

Таблица 2.12. Классы стойкости металлических материалов

Класс	Характеристика стойкости	Уменьшение массы при коррозии	
		г / (м ² · ч)	мм / год
1	Вполне стойкие	До 0,1	До 0,12
2	Достаточно стойкие	Св. 0,1 до 1,0	Св. 0,12 до 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	Св. 10,0	Св. 12,0

По сопротивлению коррозии серые чугуны с пластинчатым и шаровидным графитом в различных средах могут быть отнесены к различным классам стойкости (табл. 2.13). В сравнительно чистом и сухом воздухе эти чугуны весьма стойки благодаря образованию пассивирующей пленки ($v_{кор} \approx 0,025$ мм/год). Коррозия начинает возрастать при загрязнении атмосферы главным образом сернистым газом. 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 высокопрочный чугун, особенно перлитный, обладает более высокой коррозионной стойкостью в морской воде, чем серый. 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, а соли, дающие при гидролизе щелочные растворы, замедляют коррозионный процесс.

В условиях почвенной коррозии существенное влияние оказывают такие факторы, как состав и электрическое сопротивление почвы, характер контакта, наличие блуждающих токов и т. д. В частности, с увеличением удельного электрического сопротивления почвы с 100 – 200 до 2000 Ом·см скорость коррозии уменьшается в три раза [8]. Несколько большее сопротивление коррозии в почве оказывают чугуны марок КЧ и ВЧ, особенно в агрессивной почве.

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 %), Sn (до 0,2 %). Так 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 необходимо 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.

Таблица 2.13. Скорость коррозии низкоуглеродистой стали и чугунов в различных средах [10, 13, 16, 23], мм/год

Материал	Промышленная атмосфера	Влажная камера с едливой добавкой 0,3% (об.) SO ₂	Протоочная вода при 25 °С	Морская вода*	10 %-ный раствор соды при 50 °С	3 %-ный раствор NaCl при 10–19 °С	5(10) %-ная кислота		
							H ₂ SO ₄	HCl	HNO ₃
Мягкая сталь	0,122	0,176	0,230	0,09–0,22	–	0,079	45,8	16,6	35,7
Белый чугун	0,065	–	–	0,045	–	–	–	–	–
Серый чугун	0,141	0,242	0,267–0,4	0,15–0,36	0,0185	0,084	30,7 (42–57,6)	26,7 (30–36)	25,8 (72)
Высокопрочный чугун:									
ферритный	0,181	0,285	0,216	0,025–0,247	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 чугун	–	–	–	0,045–0,08	–	–	–	–	–
Коррозионно-стойкий чугун типа ЧН15Д7	–	–	0,049	0,02	–	–	0,152	0,3	21,3
Кремнистый чугун типа ЧС15, ЧС15М4	–	–	–	–	–	–	0,125	0,125	–

Примечание. Скорость коррозии 1 г/(м²·ч) = 1,2 мм/год.

* В протоочной морской воде скорость коррозии выше, чем в протоочной пресной воде.

Повышение сопротивления чугунов 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 [8].

Химическая стойкость чугунов в кислотах резко увеличивается при содержании кремния около 15 % (мас.). Сплавы ЧС15и ЧС17 стойки в азотной, фосфорной, уксусной и, что особенно важно, в серной кислоте при любых концентрациях и температуре, а также в смеси азотной и серной кислот. Ферросилиды стойки также в растворах солей, но легко корродируют под воздействием соляной кислоты, крепких щелочей и фтористых соединений. Для повышения стойкости в соляной кислоте сплавы ЧС15 и ЧС17 легируют до 0,4 % Мо. Образованные при этом сплавы (ЧС15М4, ЧС17М3) получили название антихлоры. Антихлоры устойчивы в соляной кислоте любой концентрации при всех температурах, в азотной кислоте любой концентрации, в лимонной, пикриновой, серной и фосфорной кислотах, в перекиси водорода, четыреххлористом углероде, железном купоросе. Недостатком антихлоров и ферросилидов является большая хрупкость, плохая обрабатываемость и низкие механические свойства, поэтому их применяют только в условиях, когда необходимо обеспечить низкую 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 ЧН15Д7Х2. Эти чугуны стойки также в холодных разбавленных растворах серной кислоты; в соляной кислоте они менее стойки, а в азотной нестойки совсем (см. табл. 2.13).

При большом содержании хрома (12 – 35 %) чугуны оказываются 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 необратимое изменение размеров отливок, которое принято называть ростом. Жаростойкость оценивается по окалиностойкости – увеличению массы отливки и ростоустойчивости – уменьшению плотности чугуна или увеличению длины образца за 150 ч выдержки при определенной температуре. Для жаростойких чугунов при соответствующей температуре увеличение массы образца не должно превосходить $0,5 \text{ г/м}^2$, 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 атмосферы (рис. 2.1). Причинами, вызывающими рост чугуна, являются также графитизация и другие фазовые превращения, протекающие с увеличением объема фаз; окисление основного металла и легирующих элементов; растворение графита и порообразование; релаксация напряжений.

В самых 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.

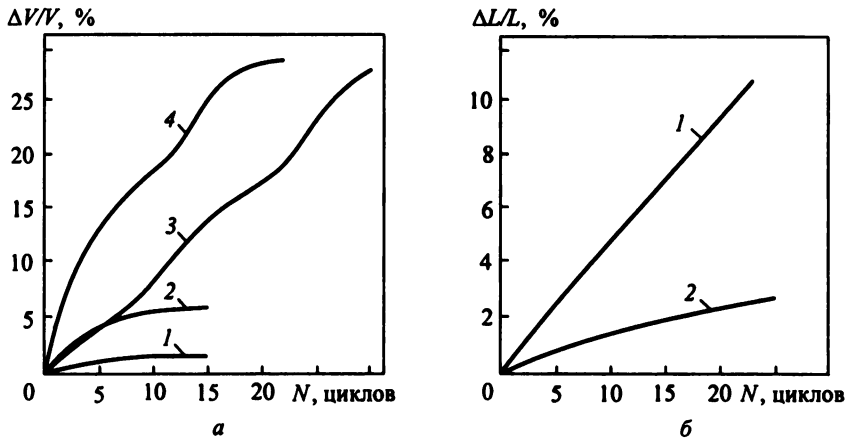


Рис. 2.1. Изменение объема (а) и линейный рост (б) чугуна в зависимости от числа N циклов нагрева до 900°C [8]:

а – нагрев серого чугуна с пластинчатым графитом в водороде (1), в вакууме (2), в атмосфере печных газов (3) и в атмосфере CO_2 (4); б – серый (1) и высокопрочный (2) чугуны с ферритной основой следующего состава, % (мас.): 1 – 3,27–3,43 C; 2,19–2,23 Si; 0,47–0,68 Mn; 0,13–0,20 P; до 0,15 S; 2 – то же за исключением до 0,01 S; кроме того, 0,05–0,077 Mg и 1,5–1,95 Ni

Измельчение и уменьшение количества графита и размера эвтектического зерна, замена перлита ферритом в структуре повышают окалиностойкость и ростоустойчивость серых чугунов. Этому способствуют уменьшение содержания углерода и кремния, замена обычного чугуна модифицированным, низкое содержание легирующих элементов (Cr, Ni и др.). Более высокими окалиностойкостью и ростоустойчивостью обладают высокопрочные чугуны (рис. 2.1, б). Ковкий чугун с типичным для него выделением углерода отжига занимает при одной и той же матрице промежуточное положение между серыми и высокопрочными чугунами.

На воздухе серый чугун сохраняет повышенную стойкость при температурах до $450 - 500^{\circ}\text{C}$, в атмосфере печных газов – лишь до 350°C , в атмосфере водяного пара – не выше 300°C . В высокопрочном чугуне с шаровидным графитом явление роста практически не наблюдается при температурах до $400 - 500^{\circ}\text{C}$. При более высоких температурах следует применять специальные легированные чугуны. Наиболее часто для повышения жаростойкости чугуны легируют Si, Al и Cr.

Влияние Si и Al на окалиностойкость и ростоустойчивость чугуна не однозначно (рис. 2.2). При небольших добавках этих элементов в обычный чугун с пластинчатым графитом рассматриваемые свойства ухудшаются. Даже незначительное количество Si в белых чугунах резко понижает их окалиностойкость. Однако при достаточно высоком содержании Si и Al окалиностойкость и ростоустойчивость чугунов резко повышаются.

Благоприятные результаты действия высоких концентраций Si на окалиностойкость 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_{c1} находится около 950°C , а при 7 % Si – около 1000°C .

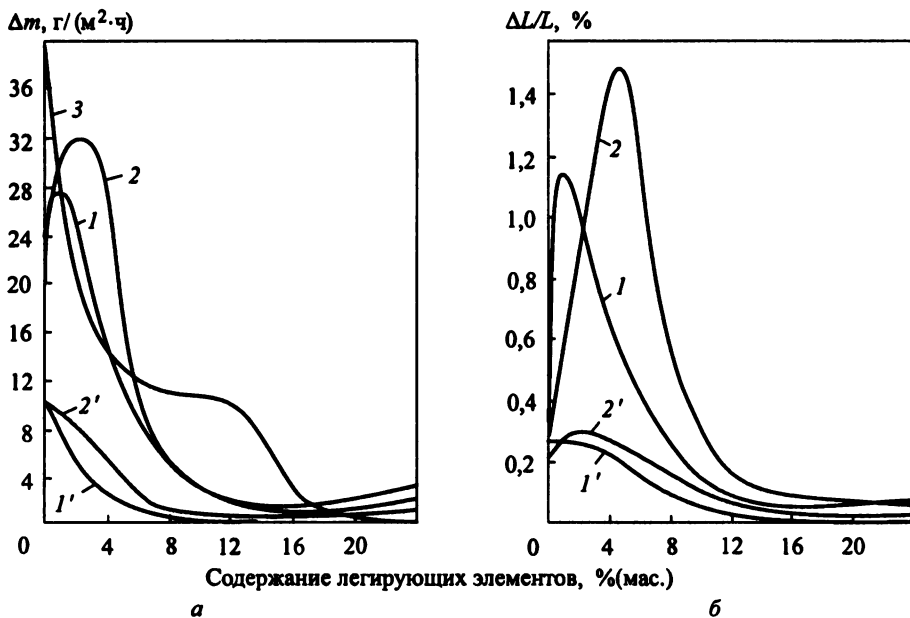


Рис. 2.2. Влияние содержания легирующих элементов на увеличение массы (а) и линейный рост (б) серого (1 – 3) и высокопрочного (1' – 3') чугуна при 950–1000 °С [10]:

1, 1' – увеличение содержания Si; 2, 2' – то же Al; 3 – то же Cr

Кремний, входя в твердый раствор, повышает температуру образования непрочной вюститной фазы FeO_4 , т. е. увеличивает стойкость металлической основы против окисления.

Влияние Al на жаростойкость чугуна проявляется прежде всего путем образования им защитных оксидных пленок [10]. Алюминий повышает температуру возникновения вюститной фазы и способствует образованию оксидных пленок со шпинельным типом решетки ($FeO \cdot Al_2O_3$).

На уменьшение линейного роста и окисления отливок хром влияет уже при концентрации 0,5–1,5 % (мас.) (см. рис. 2.2, а). Ввод хрома в таких количествах тормозит графитизацию эвтектоидного цементита, измельчает включения графита и повышает сопротивляемость окислению металлической основы вследствие повышения температуры образования вюститной фазы. Эти свойства оптимальны при содержании Cr > 15 %. Жаропрочные хромистые чугуны (> 10 % Cr), как правило, являются белыми чугунами.

Никель повышает жаростойкость чугунов даже при небольших добавках (0,5–2,0 %). Однако это влияние ощутимо лишь в области относительно низких температур. При 950 °С жаростойкими являются чугуны, содержащие не менее 25 % Ni. При таких концентрациях никеля чугуны имеют однофазную аустенитную структуру металлической основы.

Для повышения жаростойкости и сохранения других свойств наиболее эффективно комплексное легирование, например хромом и никелем, хромом и медью, кремнием и алюминием и т. д. В табл. 2.14 приведены марки и области применения некоторых жаростойких легированных чугунов.

Таблица 2.14. Жаростойкость некоторых легированных чугунов (ГОСТ 7769–82) [10]

Марка чугуна	Условия применения
	<i>Хромовые чугуны</i>
ЧХ1	В воздушной среде до 500 °С
ЧХ2	То же до 600 °С
ЧХ3	» до 650 °С
ЧХ16	» до 900 °С
ЧХ28, ЧХ32	В расплавах солей до 900 °С, в газовых средах до 1100–1150 °С
ЧХ28П	В цинковых расплавах до 550 °С
	<i>Никелевые чугуны</i>
ЧНМШ	Термостойкости до 500 °С
ЧН19Х3Ш, ЧН11Г7Ш	Жаростойкости до 600 °С
	<i>Кремнистые чугуны</i>
ЧС5 (ЧС5Ш)	В топочных и генераторных газах, в воздушной среде до 700 °С (800 °С)
ЧС13, ЧС15, ЧС17	В кислотах, кроме плавиковой и соляной, до 200 °С
	<i>Алюминиевые чугуны</i>
ЧЮХШ	В воздушной среде и печных газах до 650 °С
ЧЮ7Х2	То же до 750 °С
ЧЮ6С5	» до 800 °С
ЧЮ22Ш	В воздушной среде до 1000–1100 °С; в газовых средах, содержащих S, пары Н ₂ О
ЧЮ30	В воздушной среде до 1100 °С

2.1.3. Механические и технологические свойства чугунов

Чугуны, по существу, являются своеобразным композитным материалом, механические и эксплуатационные свойства которого зависят от характеристик металлической основы (прочности, пластичности, твердости и др.), а также формы, размеров, количества и распределения графитовых включений. При этом в ряде случаев решающее значение имеет графит, а в ряде – металлическая основа. Например, модуль упругости чугуна главным образом зависит от формы и размеров графитовых включений, а твердость в основном определяется свойствами металлической основы. Такие же 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. 2.15.

Таблица 2.15. Механические свойства основных структурных составляющих чугуна [2, 8, 10]

Структурная составляющая чугуна	σ_b , МПа	δ , %	НВ
Феррит	250–400	30–50	110–140
Перлит	800–1000	15–20	200–260
Сорбит	1200–1400	10–15	240–300
Тростит	–	–	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 повышаются. Например, феррит, легированный 2 % Si, имеет $\sigma_b = 600$ МПа.

Получение той или иной структуры чугуна в отливках зависит от многих факторов: химического состава чугуна, вида шихтовых материалов, технологии плавки и выпечки, 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 термообработкой отливок, общие закономерности влияния которой аналогичны закономерностям, возникающим при термообработке углеродистой стали, а особенности связаны с сопутствующими изменениями металлической основы при графитизации.

Среди элементов химического состава углерод и кремний определяют формирование структуры чугуна, а при заданной технологии литья приведенный размер R_{np} стенки отливки характеризует скорость ее охлаждения (R_{np} – отношение площади сечения стенки к ее периметру). Тогда различная структура чугуна в отливках при литье в песчаную форму получается при [8, 10]

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

где $K \leq 4,5$ – для перлитно-цементитной структуры; $4,5–6,0$ – для перлитно-графитной; $10–14$ – для перлитно-ферритно-графитной и ≥ 14 – для ферритно-графитной структуры.

Кроме того, большое значение как графитизирующий элемент имеет алюминий, который иногда частично или полностью заменяет кремний. Это повышает свойства чугуна, особенно пластичность. Наиболее благоприятное сочетание характеристик прочности, вязкости и пластичности достигается в алюминиевых чугунах, содержащих $1,0\% \leq Si$.

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

Первая группа элементов – Ni, Co, Cu – аналогично Si оказывает графитизирующее влияние, способствует измельчению 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, элементы образуют специальные карбиды.

К третьей группе относятся Ti, Zr, Ce, Ca, Mg, B и другие элементы. Они 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, Mg, Ca, Ce и другие редкоземельные металлы входят в состав лигатур для модифицирования чугуна с целью получения графита вермикулярной или шаровидной формы.

Влияние графитовых включений на различные эксплуатационные свойства чугуна также разнообразно и неоднозначно. При нагружении графитовые включения, являясь «надрезами», снижают прочность и пластичность чугуна. Это происходит, во-первых, вследствие некоторого уменьшения живого сечения металлической основы за счет полостей, занятых графитом, который имеет 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. Причем, чем длиннее пластинки графита, тем больше коэффициент концентрации напряжений. Все это приводит к резкой локализации пластической деформации в металлической основе, исчерпанию пластичности материала в этих местах, развитию трещин, а в итоге – к квазихрупкому разрушению материала при средних напряжениях и показателях пластичности намного ниже, чем прочность и пластичность металлической основы чугуна.

Кроме того, из-за разного коэффициента термического расширения графита и металлической основы (см. табл. 2.8) 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 любая дополнительная внешняя нагрузка вызывает небольшие (при малых нагрузках) необратимые пластические деформации в материале, и чугун с пластинчатым графитом в литом состоянии, по существу, не имеет предела упругости [7]. Однако он может приобрести это свойство в результате «тренировки» различными нагрузками, приводящими к упрочнению металлической основы в местах концентрации напряжений. Для этого же можно использовать различные варианты термомеханической или термоциклической обработки [1, 10], 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, в результате релаксации высоких напряжений II рода. Несмотря на то, что прочность чугуна при этом практически не изменяется, возрастает сопротивляемость образованию пластических деформаций при нагружении небольшими нагрузками. Указанный процесс интенсифицируется при вылеживании отливок на воздухе, когда добавляется термоциклическое воздействие изменений погодных условий.

Модуль упругости чугуна ниже, чем его металлической основы, так как в чугуне образуются дополнительные обратимые деформации занятых графитом полостей, 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, особенно при его компактных формах (вермикулярный или шаровидный графит). Поэтому ковкий и высокопрочный чугуны при одинаковой структуре металлической основы имеют повышенную прочность, и у них появляется предел упругости.

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

Серый чугун с пластинчатым графитом. В табл. 2.16 приведены механические свойства и рекомендуемый химический состав серых чугунов по ГОСТ 1412–85, а в табл. 2.17 – свойства, не предусмотренные этим стандартом. Аналогичные стандарты на серый чугун с пластинчатым графитом имеются и в других странах. Однако, если, согласно ГОСТ 1412–85, $\sigma_{\text{в}}$ изменяется от 100 МПа у СЧ10 до 350 МПа у СЧ35, то в соответствии со стандартами Германии, Великобритании, Японии и США $\sigma_{\text{в}}$ изменяется от 200 до 600 МПа. Из серого чугуна с пластинчатым графитом изготавливают более 50 % от общего объема чугунных отливок.

Таблица 2.16. Механические свойства и рекомендуемые составы серых чугунов (ГОСТ 1412–85)

Марка чугуна	$\sigma_{\text{в}}^{\cdot 1}$, МПа, не менее	НВ ^{· 2}	Содержание элементов, % (мас.)				
			C	Si	Mn	P	S
						не более	
СЧ10	100	149–200	3,5–3,7	2,2–2,6	0,5–0,8	0,3	0,15
СЧ15	150	156–224	3,5–3,7	2,0–2,4	0,5–0,8	0,2	0,15
СЧ18	180	–	3,4–3,6	1,9–2,3	0,5–0,7	0,2	0,15
СЧ20	200	163–240	3,3–3,5	1,4–2,2	0,7–1,0	0,2	0,15
СЧ21	210	–	3,3–3,5	1,4–2,2	0,7–1,0	0,2	0,15
СЧ24	240	–	3,2–3,4	1,4–2,2	0,7–1,0	0,2	0,15
СЧ25	250	170–255	3,2–3,4	1,4–2,2	0,7–1,0	0,2	0,15
СЧ30	300	187–270	3,0–3,2	1,0–1,3	0,7–1,0	0,2	0,12
СЧ35	350	201–290	2,9–3,0	1,0–1,1	0,7–1,1	0,2	0,12

Примечание. Чугуны марок СЧ30 и СЧ35 обычно модифицируют FeSi, поэтому содержание Si для них дано после введения модификатора.

^{· 1} Для отливок с толщиной стенки 15 мм. ^{· 2} Для отливок с толщиной стенки от 8 мм (максимальное значение НВ) до 80 мм.

**Таблица 2.17. Механические свойства серых чугунов,
не регламентированные ГОСТ 1412-85 [10, 13]**

Свойство	СЧ10 – СЧ18	СЧ20 – СЧ30	СЧ30 – СЧ35
<i>E</i> , ГПа:			
при растяжении	60–80	85–125	125–145
» сжатии	65–90	93–130	130–155
G^{*1} , ГПа	40–44	130–155	54–64
σ_B , МПа:			
при сжатии	500–800	850–1 000	1 000–1 200
» изгибе	240–360	400–500	500–540
τ_B , МПа:			
при кручении	240–320	280–360	360–400
» срезе	150–220	250–355	355–400
δ , %	0,2–1,0	0,4–0,65	0,65–0,9
ψ , %	20–40	15–30	15–20
μ^{*2}	0,245–0,260	0,262–0,270	0,275–0,285
σ_{-1} , МПа:			
при растяжении	50–70	90–115	115–140
» сжатии	70–90	120–145	145–170
» изгибе	58–66	67–133	133–155
τ_{-1}^{*3} , МПа	60–80	100–120	120–140
KC , кДж/м ²	40–70	80–100	80–90
ϕ^{*4} , %, при вибрации с нагрузкой, равной $1/3 \sigma_{0,2}$	30–32	23–30	23–25

Примечание. Здесь и далее в аналогичных таблицах μ – коэффициент Пуассона.

*¹ При срезе. *² При сжатии. *³ При кручении. *⁴ Здесь и далее в аналогичных таблицах ϕ – циклическая вязкость, характеризующая скорость затухания вибрации, а значит, чувствительность к надрезам.

В общем случае, чем меньше графита, мельче и благоприятнее по распределению его включения, дисперснее перлит, мельче эвтектическое зерно, тем выше указанные свойства. Однако, если σ_B , τ_{-1} , τ_B , ϕ – зависят как от графита, так и от металлической основы, то модуль E главным образом от графита, а твердость HB – почти полностью от структуры металлической основы. Малую чувствительность серого чугуна к надрезам характеризуют следующие данные по его сопротивлению усталости при вибрации [10]:

σ_B , МПа	140	175	210	255	300
σ_{-1} , МПа:					
гладкий образец	65	84	105	140	163
образец с надрезом	65	80	95	120	130

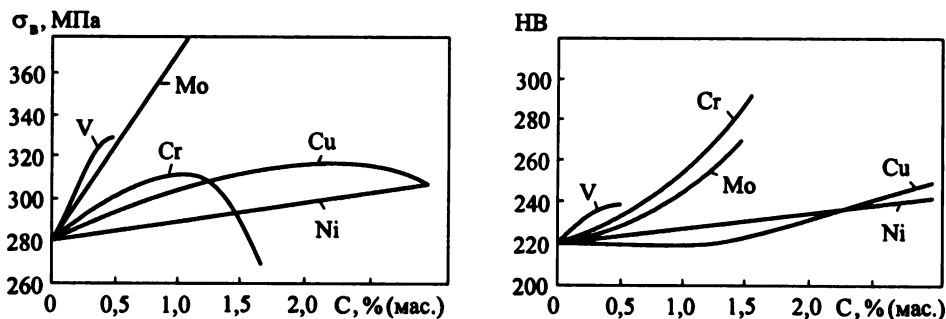


Рис. 2.3. Влияние легирующих элементов на временное сопротивление и твердость серого чугуна с пластинчатым графитом состава, % (мас.): 3,2 С; 1,85 Si; 0,7 Mn; 0,14 P [8]

Влияние легирующих элементов на механические свойства серого чугуна показано на рис. 2.3, а изменение временного сопротивления в зависимости от толщины стенки отливки, полученной в песчаной форме, – на рис. 2.4.

Для различных групп отливок путем варьирования содержания основных элементов и легирующих добавок обеспечивают комплекс оптимальных эксплуатационных свойств изделий из чугунов. Так, для блоков цилиндров карбюраторных двигателей чугун легируют 0,2–0,5 % Cr и до 0,2 % Ni, а для автомобильных двигателей дополнительно 0,2–0,4 % Cu. Для тракторных двигателей необходимые свойства обеспечиваются путем повышения содержания Mn до 1,4 %. 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 0,5–0,08 % Sb, 0,4–0,6 % Cr и 0,1–0,3 % Ni или 0,65 % Ni и 0,65–0,57 % P.

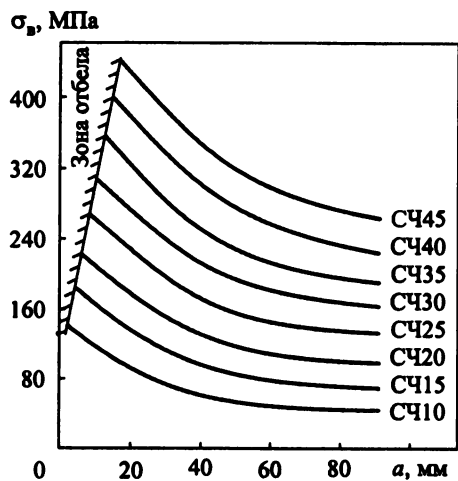


Рис. 2.4. Изменение временного сопротивления серого чугуна различных марок в зависимости от толщины a стенки отливки

В станкостроении для повышения твердости средних по массе отливок наряду с модифицированием чугуна FeSi и SiCa применяют ковшевое легирование 0,3–0,4 % Cu и 0,2–0,3 % Cr. При толщине стенки более 15–20 мм используют легирование 0,8–1,0 % Cu и 0,3–0,5 % Cr. Для средних и тяжелых отливок, в которых допускается наличие в микроструктуре карбидных включений, применяют комплексное легирование 0,3–0,8 % Mo, 0,7–1,2 % Ni и 0,2–0,6 % Cr. В отдельных случаях для повышения твердости применяют легирование 0,04 % V совместно с 0,4–0,6 % Cu или 0,5–0,6 % Ni.

Максимальная прочность чугунов при плавке в индукционных печах достигается при отношении $Si/C = 0,85 \dots 1,0$ (при постоянной степени эвтектичности). В случае ваграночной плавки чугунов СЧ30, СЧ35,

более низкое отношение $Si/C = 0,6 \dots 0,7$ компенсируют повышением содержания до 1,0 – 1,5 % Mn.

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 показали полную герметичность. Чугунные отливки с мелким графитом и низким содержанием фосфора при отсутствии волосяных трещин могут противостоять давлению жидкости до 100 МПа и газов до 70 МПа.

Свариваемость серого чугуна значительно хуже, чем углеродистой стали, поэтому газовую и электродуговую сварку, как и заварку дефектов (особенно крупных) на отливках проводят по особой технологии. Обрабатываемость серого чугуна пропорциональна его твердости. Она улучшается при увеличении 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.

Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом. Отличительная особенность чугунов с шаровидным графитом – высокие механические свойства (табл. 2.18; 2.19), обусловленные шаровидной формой графита, который не оказывает сильного надрезывающего воздействия на металлическую основу. Как и другие чугуны, их можно получать со всеми известными структурами металлической основы, выбирая состав металла, в том числе его легирование, технологию производства и методы термической обработки (табл. 2.20).

Таблица 2.18. Механические свойства чугунов с шаровидным (ГОСТ 7293–85) и вермикулярным (ГОСТ 28394–89) графитом

Марка чугуна	σ_s	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	НВ	Структура металлической основы
	МПа				
<i>Чугуны с шаровидным графитом</i>					
ВЧ35	350	220	22	140–170	Ферритная
ВЧ40	400	250	15	140–202	»
ВЧ45	450	310	10	140–225	Феррито-перлитная
ВЧ50	500	320	7	153–245	»
ВЧ60	600	370	3	192–277	Перлитно-ферритная
ВЧ70	700	420	2	228–302	Перлитная
ВЧ80	800	480	2	248–351	»
ВЧ100	1000	700	2	270–360	Бейнитная
<i>Чугуны с вермикулярным графитом</i>					
ЧВГ30	300	240	3	130–180	Ферритная
ЧВГ35	350	260	2	140–190	Феррито-перлитная
ЧВГ40	400	320	1,5	170–220	»
ЧВГ45	450	380	0,8	190–250	Перлитная

Таблица 2.19. Механические свойства высокопрочных чугунов, не регламентированные ГОСТ 28394–89 [10, 13, 23, 24]

Свойство	Чугун с шаровидным графитом со структурой металлической основы		
	ферритной	перлитной	бейнитной
E^{*1} , ГПа	150–175 (130–140) ^{*2}	175–185 (140–170) ^{*2}	180–200
G^{*3} , ГПа	65–75	75–80	80–85
σ_B , МПа:			
при сжатии	600–1200	1500–2000	1800–2200
» изгибе	750–900	850–1200	1200–1400
τ_B , МПа:			
при кручении	400–460	500–780	700–900
» срезе	320–400	400–550	550–700
ψ , %	15–20	4–8	2–4
μ^{*4}	0,28–0,29	0,28–0,29	0,28–0,29
σ_{-1} , МПа:			
при растяжении	180–200	200–280	320–460
» изгибе	200–240	330–340	415
» срезе	110–130	170–180	–
τ_{-1}^{*5} , МПа	140–160	180–230	220–300
KC , кДж/м ²	300–1500	150–300	300
ϕ , %, при вибрации с нагрузкой, равной $1/3 \sigma_{0,2}$	10–14	8–10	7–10

^{*1} При растяжении. ^{*2} Для чугуна с вермикулярным графитом. ^{*3} При срезе. ^{*4} При сжатии. ^{*5} При кручении.

В развитых капиталистических странах стандартами предусмотрены различные диапазоны изменения механических свойств этих чугунов. Так, в Германии σ_B чугуна с шаровидным графитом в зависимости от его марки изменяется в диапазоне от 360 до 600 МПа, в Японии – от 350 до 800 МПа, в Великобритании – от 350 до 900 МПа, в США – от 600 до 1000 МПа. Появившийся в производстве во второй половине XX в. этот тип чугуна занимает сейчас $\approx 30\%$ общего производства чугунных отливок в мире.

Чугун с шаровидным графитом имеет хорошие коррозионную стойкость (не ниже, чем серый чугун, см. табл. 2.13), жаростойкость (см. рис. 2.1, б), хладостойкость, антифрикционные свойства, обрабатываемость; может подвергаться сварке и автогенной резке. Весьма важно, что у него хорошие литейные свойства: высокая жидкотекучесть и незначительная склонность к образованию горячих трещин. Вместе с тем его склонность к образованию усадочных раковин и литейных напряжений выше, чем у серого чугуна, и находится на уровне стали и ковкого чугуна.

Наиболее существенным для механических свойств чугуна с шаровидным графитом является получение графита правильной шаровидной формы, которая зависит от состава металлической основы, условий модифицирования, шихтовых материалов и других условий плавки, а также от скорости охлаждения отливки. Чем больше скорость охлаждения, тем ближе к шаровидной форме и дисперсней включения графита.

Для обеспечения заданных свойств в отливках с большой толщиной стенки уменьшают содержание С и Si в чугунах с повышением их отношения (табл. 2.20), а чугуны высоких марок легируют небольшим количеством Ni, Cr, Cu и Mo.

Таблица 2.20. Рекомендуемые химический состав, % (мас.) и термическая обработка чугунов с шаровидным графитом [8, 10]

Марка чугуна	C/Si при толщине стенки отливки, мм			Mn	S	Cr	Cu	Ni	Термическая обработка
	< 50	50–100	> 100		не более				
ВЧ35	$\frac{3,3-3,8}{1,9-2,9}$	$\frac{3,0-3,5}{1,3-1,7}$	$\frac{2,7-3,2}{0,8-1,5}$	0,2–0,6	0,02	0,05	–	–	Отжиг
ВЧ40	$\frac{3,3-3,8}{1,9-2,9}$	$\frac{3,0-3,5}{1,3-1,7}$	$\frac{2,7-3,2}{0,5-1,5}$	0,2–0,6	0,02	0,1	–	–	»
ВЧ45	$\frac{3,3-3,8}{1,9-2,9}$	$\frac{3,0-3,5}{1,3-1,7}$	$\frac{2,7-3,2}{0,5-1,5}$	0,3–0,7	0,02	0,1	–	–	Без обработки
ВЧ50	$\frac{3,2-3,7}{1,9-2,9}$	$\frac{3,0-3,3}{2,2-2,6}$	$\frac{2,7-3,2}{0,8-1,5}$	0,3–0,7	0,02	0,15	–	–	»
ВЧ60	$\frac{3,2-3,6}{2,4-2,6}$	$\frac{3,0-3,3}{2,4-2,6}$	–	0,4–0,7	0,02	0,15	0,3	0,4	Нормализация
ВЧ70	$\frac{3,2-3,6}{2,6-2,9}$	$\frac{3,0-3,3}{2,6-2,9}$	–	0,4–0,7	0,015	0,15	0,4	0,6	»
ВЧ80	$\frac{3,2-3,6}{2,6-2,9}$	–	–	0,4–0,7	0,01	0,15	0,6	0,6	Двойная нормализация
ВЧ100	$\frac{3,2-3,6}{3,0-3,8}$	–	–	0,4–0,7	0,01	0,15	0,6	0,8	Закалка и отпуск

Примечание. Чугуны всех марок также содержат не более 0,1 % P.

Некоторые примеси оказывают вредное влияние на процесс модифицирования, а следовательно, и на свойства чугуна с шаровидным графитом. Поэтому их содержание должно быть ограничено (0,009 % Pb; 0,013 % Sn; 0,026 % Sb; 0,04 % Ti; 0,08 % As; 0,3 % Al). Получение шаровидного графита 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 и Ca. Чтобы подавить демодифицирующее влияние 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 рассмотренных выше, за исключением меньшего количества глобуляризирующих элементов, вводимых в расплав при модифицировании.

Механические свойства чугуна с вермикулярным графитом ближе к свойствам чугуна с шаровидным графитом, чем с пластинчатым, однако по сравнению с последними он обладает меньшей чувствительностью к изменению толщины стенки отливки [10]

и вследствие этого может более успешно использоваться в качестве конструкционного материала для крупногабаритных массивных деталей. Связь основных механических свойств чугуна с вермикулярным графитом с его химическим составом может быть выражена уравнениями [13]:

$$\sigma_{\text{в}} = 85,5 - 12,5 \text{ C} - 1,5 \text{ Si} + 7,5 \text{ Mn} + 25 \text{ P};$$

$$\delta = 13,6 + 4,25 \text{ C} + 1,25 \text{ Si} - 2,0 \text{ Mn} - 12,5 \text{ P};$$

$$\text{HB} = 455 - 75 \text{ C} - 12,5 \text{ Si} + 50 \text{ Mn} + 125 \text{ P},$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – в МПа; δ – в %. Эти соотношения справедливы при изменении массовой доли основных элементов в следующих пределах, % (мас.): 3,0–3,8 C; 2,2–3,0 Si; 0,2–1,2 Mn и 0,02–0,1 P.

Чугун с вермикулярным графитом характеризуется упругостью при увеличении напряжений до 125 МПа при растяжении и до 200 МПа при сжатии. Модуль упругости у него значительно выше, чем у чугуна с пластинчатым, но несколько ниже, чем у чугуна с шаровидным графитом (см. табл. 2.17; 2.19). По показателю ударной вязкости этот чугун ближе к чугуну с шаровидным графитом, чем с пластинчатым.

Изменение механических свойств чугунов при повышенных температурах показано в табл. 2.21. Видно, что 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 чугунов всех типов монотонно снижается с повышением температуры.

Общая закономерность изменения механических свойств нелегированных чугунов с различной формой графита при пониженных температурах (меньше 20 °С) – некоторое повышение прочности и твердости, уменьшение пластичности. Ферритные чугуны упрочняются больше, чем перлитные, и у них меньше снижается пластичность. У чугуна с пластинчатым графитом эти изменения невелики.

По герметичности высокопрочный чугун значительно превосходит серый вследствие отсутствия графитовой пористости и пригоден для деталей, работающих под давлением до 50 МПа [23].

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 ЧШГ является перлитная, характеризующаяся меньшим коэффициентом трения $f_{\text{тр}}$. У чугуна с перлитной основой (270НВ) $f_{\text{тр}} = 0,63$ при давлении $p = 1,4$ МПа и 0,52 при $p = 2,5$ МПа, а у чугуна с перлитно-ферритной основой (207 НВ) – соответственно 0,7 и 0,62.

Сила резания в случае ЧШГ на 50–60 % выше, чем серого чугуна той же твердости, но при эквивалентных значениях $\sigma_{\text{в}}$ обрабатываемость первого лучше, чем второго. Шероховатость поверхности у чугуна с шаровидным графитом меньше вследствие обособленности выделений графита в нем.

Таблица 2.21. Изменение механических свойств чугунов при повышенных температурах [10, 13, 23]

Температура испытания, °С	σ _в , МПа				δ, %				E, ГПа			
	ЧШГ	ЧВГ	КЧ35-10	СЧ30	ЧШГ	ЧВГ	КЧ35-10	СЧ30	ЧШГ	ЧВГ	КЧ35-10	СЧ30
20	$\frac{432}{585}$	$\frac{387}{480}$	333	319,7	$\frac{15,8}{1,2}$	$\frac{5}{2,6}$	12,0	0,13	$\frac{160}{177,4}$	$\frac{151,9}{164,6}$	166	139
200	-	-	315	307	-	-	7,7	0,31	$\frac{150,5}{170,5}$	$\frac{146,2}{158,7}$	144	134
350	-	$\frac{382}{493}$	341	315	-	$\frac{4,0}{2,0}$	9,4	0,64	$\frac{137,6}{162,7}$	$\frac{130,3}{141,1}$	126	126
400	$\frac{351^*}{567^*}$	$\frac{372}{470}$	312	323	$\frac{14,6^*}{7,2^*}$	$\frac{3,0}{1,8}$	9,6	0,83	$\frac{138,5}{159,7}$	$\frac{134,2}{148,9}$	117	122
450	-	$\frac{363}{420}$	261	304	-	$\frac{4,5}{1,2}$	12,2	1,0	-	-	111	-
500	$\frac{223}{362,5}$	$\frac{314}{392}$	223	276,7	$\frac{15,2}{11,1}$	$\frac{6,0}{1,5}$	15,7	1,18	$\frac{130}{152,9}$	$\frac{130,3}{141,1}$	102	118
550	-	$\frac{269}{309}$	169	246	-	$\frac{10,0}{3,2}$	23,4	1,28	-	-	-	-
600	$\frac{130}{-}$	$\frac{206}{237}$	107,6	212	$\frac{21,9}{-}$	$\frac{14,0}{7,0}$	34,6	1,6	$\frac{145,0}{-}$	$\frac{114,4}{134,2}$	-	116

Примечание. Для чугунов с шаровидным (ЧШГ) и вермикулярным (ЧВГ) графитом в числителе приведены свойства для ферритной металлической основы, а в знаменателе – для перлитной.

* При 425 °С.

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 пластинчатый графит в сером чугуне (табл. 2.22). Металлическая же основа у ковкого чугуна, как и у других чугунов, может быть ферритной или перлитной в зависимости от его химического состава (табл. 2.23) и применяемого режима термической обработки.

Таблица 2.22. Механические свойства ковких чугунов по ГОСТ 1215-79

Марка чугуна	σ_b , МПа	δ , %	HB
	не менее		
КЧ30-6	294	6	100-163
КЧ33-8	323	8	100-163
КЧ35-10	333	10	100-163
КЧ37-12	362	12	110-163
КЧ45-7	441	7*	150-207
КЧ50-5	490	5*	170-230
КЧ55-4	539	4*	192-241
КЧ60-3	588	3	200-269
КЧ65-3	637	3	212-269
КЧ70-2	686	2	241-285
КЧ80-1,5	784	1,5	270-320

* По согласованию изготовителя с потребителем допускается понижение на 1 %.

Таблица 2.23. Рекомендуемый химический состав ковких чугунов, % (мас.) [10]

Марка чугуна	Способ выплавки	C	Si	C + Si	Mn	P	S	Cr
<i>Чугуны с ферритной основой</i>								
КЧ30-6, КЧ33-8	В вагранке	2,6-2,9	1,0-1,6	3,7-4,2	0,4-0,6	0,18	0,20	0,08
КЧ35-10	В вагранке и электропечи	2,5-2,8	1,1-1,3	3,6-4,0	0,3-0,6	0,12	0,020	0,06
КЧ37-12	Последовательно в двух электропечах	2,4-2,7	1,2-1,4	3,6-4,0	0,2-0,4	0,12	0,06	0,06
<i>Чугуны с перлитной основой</i>								
КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3	В вагранке и электропечи	2,5-2,8	1,1-1,3	3,6-3,9	0,3-1,0	0,10	0,20	0,08
КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5	Последовательно в двух электропечах	2,4-2,7	1,2-1,4	3,6-3,9	0,3-1,0	0,10	0,06	0,08

Основные преимущества отливок из ковкого чугуна заключаются в однородности их свойств по сечению, практическому отсутствию напряжений. Эти чугуны применяют преимущественно для отливок с толщиной стенок 3 – 50 мм, что связано со стремлением обеспечить безусловное получение структуры белого чугуна при литье и однородность строения и свойств во всех сечениях отливки. Наибольшую прочность можно получить при высокодисперсном перлите и малом количестве при наибольшей компактности графита, а наибольшую пластичность – при феррите и таком же графите (табл. 2.24). Если отливки из ковкого чугуна не имеют литейных дефектов, они могут быть герметичны при $p \geq 20$ МПа.

Таблица 2.24. Механические свойства ковких чугунов, не регламентированные ГОСТ 1215–79 [10]

Свойство	Ферритные чугуны				Перлитные чугуны
	КЧ30-6	КЧ33-8	КЧ35-10	КЧ37-12	
E^{*1} , ГПа	155	160	166	170	176–185
G^{*2} , ГПа	63	64	65	70	68–75
σ_b , МПа:					
при сжатии	90–120	90–120	90–120	90–120	140–180
» изгибе	310	330	340	350	900–1200
τ_b , МПа:					
при кручении	340	345	350	370	460–720
» срезе	270	290	300	300	360–500
$\sigma_{0,2}^{*1}$, МПа	190	210	220	230	300–500
ψ , %	10–18	10–18	10–18	10–18	3,5–6,0
μ_n	0,23	0,25	0,27	0,29	0,28–0,29
σ_{-1} , МПа:					
при растяжении	70	80	80	85	110–140
» изгибе	120	130	140	140	180–220
τ_{-1}^{*3} , МПа	110	120	130	130	180–210
KC , кДж/м ²	120	130	140	160	50–160
ϕ , %, при вибрации с нагрузкой, равной $1/3 \sigma_{0,2}$	13–15	13–15	13–15	13–15	10–13

*¹ При растяжении. *² При срезе. *³ При кручении.

Влияние температуры на механические свойства ковкого чугуна проявляются главным образом выше 400 °С (см. табл. 2.21) Выражается оно в понижении σ_b , $\sigma_{0,2}$ и повышении δ . Ферритные группы характеризуются более низким порогом хрупкости, чем перлитные (обычно –80 °С), с повышением твердости перлитного ковкого чугуна порог хрупкости также возрастает.

Перлитный ковкий чугун обладает высокой износостойкостью в условиях работы со смазкой при давлении до 20 МПа и быстро изнашивается при сухом трении, тогда как перлитно-ферритный имеет сравнительно низкие антифрикционные свойства в условиях

работы со смазкой и весьма хорошие при сухом трении. Обрабатываемость ковкого чугуна находится примерно на том же уровне, как и высокопрочного.

Объемная линейная усадка велика 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. В связи с этим сложные отливки практически невозможно получать в металлических формах, оказывающих существенное сопротивление усадке. Для уменьшения склонности чугуна к образованию трещин необходимо до минимума снижать содержание фосфора и серы, уменьшать содержание азота и кислорода, использовать оптимальные температуры заливки и т. д.

В сравнении с ковким высокопрочный чугун обладает лучшими литейными и более высокими механическими свойствами, во многих случаях к нему можно не применять термообработку и использовать для производства деталей любой массы и размеров. Поэтому отливки из ковкого чугуна в последние годы все чаще заменяют отливками из высокопрочного чугуна, особенно там, где это является экономически целесообразным.

Антифрикционный чугун. Антифрикционные свойства, являющиеся комплексными (учитывают износостойкость, прирабатываемость, износ сопряженной детали и пр.), для ряда чугунов весьма высоки и в некоторых условиях могут быть выше, чем у бронз. Марки антифрикционного чугуна, предусмотренные ГОСТ 1585–85, и условия его применения приведены в табл. 2.25. В качестве антифрикционного можно использовать (в зависимости от условий эксплуатации) каждую из трех разновидностей чугуна: серый с пластинчатым графитом, высокопрочный с шаровидным графитом и ковкий. Поэтому в данном случае ГОСТ 1585–85 регламентирует не механические свойства, а химический состав чугунов по легирующим элементам и микроструктуру: форму, размеры и распределение графитовых включений, тип структурных составляющих металлической основы, их количество и дисперсность.

Таблица 2.25. Структура и условия применения антифрикционных чугунов (ГОСТ 1585–85)

Марка чугуна	НВ	Микроструктура		Предельные режимы работы			Термическая обработка вала
		Вид графита	Металлическая основа	p , МПа	v , м/с	pv , МПа·м/с	
АЧС-1	180–241	Пластинчатый	Перлитная	5,0; 14,0	5,0; 0,3	12,0; 2,5	Закалка + нормализация
АЧС-2	180–229	»	»	10,0; 0,1	0,3; 3,0	2,5; 0,3	То же
АЧС-3	160–190	»	Перлитно-ферритная	6,0	1,0	5,0	Без ТО
АЧС-4	180–229	»	Перлитная	15,0	5,0	40,0	Закалка + нормализация
АЧС-5*	180–290	»	Аустенитная	20,0; 30,0	1,0; 0,4	20,0; 12,5	То же
АЧС-6	100–120	»	Перлитная пористая	9,0	4,0	9,0	Без ТО

Марка чугуна	HB	Микроструктура		Предельные режимы работы			Термическая обработка вала
		Вид графита	Металлическая основа	P , МПа	v , м/с	Pv , МПа·м/с	
АЧВ-1	200–260	Шаровидный	Перлитная	1,5; 20,0	10,0; 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 ТО
АЧК-1	187–229	Хлопьевидный	Перлитная	20,0	2,0	20,0	Закалка + нормализация
АЧК-2	167–197	То же	Феррито-перлитная	0,5; 12,0	5,0; 1,0	2,5; 12,0	Без ТО

Примечание. Для некоторых марок чугуна два предельных значения для P , v и их произведения указывают допустимые сочетания значений каждого из этих показателей.

* В закаленном состоянии твердость 140–180 HB.

2.1.4. Легированные чугуны 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 табл. 2.10, 2.13, 2.14 и на рис. 2.1, 2.2. Механические свойства легированных чугунов даны в табл. 2.26 – 2.29.

Хромистые чугуны. Эти чугуны применяют главным образом как жаростойкие, коррозионно-стойкие и износостойкие материалы. Износостойкость чугуна определяется структурой и твердостью. Большую часть изделий из высокохромистых чугунов успешно используют в условиях ударного абразивного износа и истирания. Износостойкие чугуны твердостью 400 HB и более можно обрабатывать резцами с пластинами из ВК4, ВК6М.

С увеличением содержания хрома возрастает склонность чугуна к образованию усадочных раковин и холодных трещин. Вследствие этого при высоком содержании хрома необходимо предусматривать установку прибулей для питания отливок и обеспечивать равномерное охлаждение отливок в форме и при термообработке.

Кремнистые чугуны. Применяют эти чугуны главным образом как окалиностойкие, ростоустойчивые и коррозионно-стойкие материалы. Механические свойства кремнистых чугунов относительно низкие как при нормальной, так и при повышенных температурах (см. табл. 2.26, 2.27) и понижаются с увеличением содержания Si. Ударная вязкость не превышает 50 кДж/м² (без надреза). С целью повышения механических свойств кремнистые чугуны иногда легируют медью. Добавка 8 – 10 % Cu в чугун ЧС15 повышает его σ_s до 200 МПа, а KC до 100 кДж/м²; однако коррозионная стойкость при этом понижается.

Таблица 2.26. Механические свойства легированных чугунов (ГОСТ 7769–82)

Марка чугуна	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$f_{300}^{\text{с1}}$, мм	НВ	Марка чугуна	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$f_{300}^{\text{с1}}$, мм	НВ
<i>Хромистые чугуны</i>				<i>Алюминиевые чугуны</i>			
ЧХ1	170	2,5	200–280	ЧЮХШ ^{*2}	390	–	180–355
ЧХ2	150	2,5	200–280	ЧЮ6С5 ^{*2}	120	–	235–295
ЧХ3	150	3,0	220–355	ЧЮ7Х2 ^{*2}	120	–	255–295
ЧХ3Т ^{*2}	200	–	440–585	ЧЮ22Ш	290	–	235–355
ЧХ9Н5 ^{*2}	350	–	490–605	ЧЮ30	200	–	355–535
ЧХ16	350	3,0	390–440	<i>Марганцевые чугуны</i>			
ЧХ16М2 ^{*2}	170	–	490–605	ЧГ6С3Ш ^{*2}	490	–	215–255
ЧХ22 ^{*2}	290	3,0	330–605	ЧГ7Х4 ^{*2}	150	–	490–585
ЧХ22С	290	–	215–330	ЧГ8Д3	150	–	175–285
ЧХ28	370	6,0	215–265	<i>Никелевые чугуны</i>			
ЧХ28П	200	1,5	245–390	ЧНХТ	280	–	195–280
ЧХ28Д2 ^{*2}	390	–	385–635	ЧНХМД	290	–	195–280
ЧХ32	390	–	245–330	ЧНХМДШ	600	–	270–320
<i>Кремнистые чугуны</i>				ЧНМШ	490	2,0 ^{*3}	180–280
ЧС5	150	–	140–295	ЧН2Х	290	–	215–280
ЧС5Ш	290	–	220–295	ЧН3ХМДШ	550	–	350–550
ЧС13	100	–	295–390	ЧН4Х2 ^{*2}	200	1,5	460–645
ЧС15	60	–	295–395	ЧН11Г7Ш	390	4,0 ^{*3}	120–250
ЧС17	40	–	390–450	ЧН15Д3Ш	340	4,0 ^{*3}	120–250
ЧС15М4	60	–	390–450	ЧН15Д7	150	–	120–290
ЧС17М3	60	–	390–450	ЧН19Х3Ш	340	4,0 ^{*3}	120–250
				ЧН20Д2Ш	500	25,0 ^{*3}	120–220

^{*1} Стрела прогиба на базе 300 мм. ^{*2} Износостойкий чугун. ^{*3} Относительное удлинение δ , %.

Таблица 2.27. Прочность легированных чугунов при различных температурах [10, 13]

Марка чугуна	$\sigma_{\text{в}}$, МПа, при t , °С				
	500	600	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	–	168	137	78
ЧН19Х3Ш	–	260	230	–	–
ЧН11Г7Ш	–	330	250	–	–

Таблица 2.28. Механические свойства легированных чугунов с шаровидным графитом при 800 °С [10]

Марка чугуна	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KC , кДж/м ²	σ_{-1} , МПа	τ^{*1} , ч	$v_n^{*2} \cdot 10^4$, %/ч, при $\sigma = 40$ МПа
	не менее					
ЧН19Х3Ш	180	2,0	200	120	1000	1,0
ЧН11Г7Ш	180	10,0	200	120	1000	1,8
ЧЮ22Ш	–	0,5	50	100	100	0,4 ^{*3}

^{*1} Время до разрушения. ^{*2} Скорость ползучести. ^{*3} При 700 °С.

Таблица 2.29. Изменение модуля упругости некоторых легированных чугунов с повышенным температур [13]

Марка чугуна	E , ГПа, при t , °С										
	20	100	200	250	300	400	450	500	600	700	800
ЧХ9Н5	196	192	–	–	178	173	–	170	162	144	130
ЧС5	97	94	90	–	85,6	75	–	–	–	–	–
ЧЮ7Х2	107	102	95	–	88	81,5	–	74,5	–	–	–
ЧЮ22 ^{*1}	97	–	–	93	–	–	79	–	73	69	–
ЧЮ22Ш	178	–	–	169	–	–	140	–	128	124	88
ЧН11Г7Ш	162,9	–	–	–	–	–	–	134,6 ^{*2}	123,6	120,0	–
ЧН19Х3Ш	163,5	–	–	–	–	–	–	140 ^{*2}	127	124	–

^{*1} Чугун с пластинчатым графитом. ^{*2} При 550 °С.

Литейные свойства низкокремнистых чугунов мало отличаются от свойств серого чугуна или чугуна с шаровидным графитом. Высококремнистые чугуны (> 12,0 % Si) имеют повышенную усадку и склонны к образованию усадочных раковин. Для предупреждения образований холодных и горячих трещин отливки из этих чугунов удаляют из формы сразу после затвердевания и охлаждают в печи, нагретой до 700–800 °С, или же обеспечивают медленное охлаждение в форме. Отливки очень хрупки и требуют осторожного обращения при механической обработке, транспортировке и монтаже.

Алюминиевые чугуны. Применяют алюминиевые чугуны главным образом как жаростойкие и износостойкие материалы. Увеличение содержания алюминия до 12 % приводит к снижению прочности чугунов, которая в дальнейшем стабилизируется. Максимальную твердость имеют чугуны, содержащие 10–17 % и более 26 % Al. Наиболее технологичным является чугун, содержащий 19–25 % Al (ЧЮ22), причем чугун с шаровидным графитом обладает повышенной прочностью и жаропрочностью (см. табл. 2.27, 2.28). Чугуны с высоким содержанием алюминия имеют повышенную склонность к образованию усадочных раковин.

Марганцевые чугуны. Применяют их главным образом в качестве немагнитных и износостойких материалов. В марганцевых антифрикционных чугунах, как и в высоконикелевых, медленное охлаждение и отпуск способствуют образованию большого 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 (180–290 НВ и 140–180 НВ соответственно).

Обработываемость марганцевых чугунов затруднена вследствие наличия в структуре карбидов. Эти чугуны имеют повышенную склонность к образованию усадочных дефектов (раковин, трещин и т. п.).

Никелевые чугуны. Используют эти чугуны в качестве немагнитных, коррозионно-стойких, жаропрочных и хладостойких материалов. Прочность и твердость никелевых чугунов возрастает с увеличением содержания никеля и хрома. При получении шаровидного графита механические свойства чугунов, особенно пластичность, заметно возрастают (см. табл. 2.26). Аустенитный чугун с шаровидным графитом обладает высокой жаропрочностью (см. табл. 2.27, 2.28). Дополнительное легирование молибденом повышает жаропрочность чугунов. 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 термообработка необходима только для высоконикелевого чугуна с шаровидным графитом, применяемого в качестве жаропрочного материала. Для других целей используют только низкотемпературный отжиг. Чугун ЧН20Д2Ш является жаропрочным и хладостойким.

2.2. Медные сплавы

2.2.1. Латунь

Латунь представляют собой двойные или многокомпонентные сплавы на основе меди, 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, называют томпаком (латунь, содержащие 14–20 % Zn, – полутомпаком).

Диаграмма состояния Cu – Zn характеризуется пятью перитектическими реакциями. В результате из жидкого раствора в зависимости от состава кристаллизуется шесть различных фаз. Практическое значение имеют сплавы, содержащие до 50 % Zn. Часть диаграммы состояния, соответствующая этому содержанию, включает область твердого раствора цинка в меди – α -фазу с ГЦК решеткой. Граница растворимости цинка в меди при комнатной температуре равна 39 % (мас.). Фаза β является твердым раствором на основе соединения CuZn с ОЦК решеткой. Ширина области гомогенности β -фазы в зависимости от температуры изменяется: от 37 до 57 % Zn при высоких температурах и от 45 до 49 % Zn при комнатной [9].

В соответствии с диаграммой состояния двойные латуни в зависимости от структуры подразделяют на α -, ($\alpha + \beta$)- и β -латуни. При 454 – 468 °С происходит упорядочение β -твердого раствора, т. е. ниже этой температуры 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 -латуней, которые хорошо обрабатываются давлением в холодном состоянии.

В многокомпонентных (специальных) латунях введение третьего, четвертого и т. д. элемента может повысить их твердость, прочность, упругость, коррозионную стойкость, антифрикционные и технологические характеристики. В зависимости от дополнительных легирующих элементов латунь, содержащую Al, называют алюминиевой; Fe и Mn – железомарганцевой; Mn, Sn и Pb – марганцево-оловянно-свинцовой. Двойные латуни маркируют буквой Л и числом, характеризующим среднее содержание меди в сплаве в процентах. В обозначении многокомпонентной латуни после буквы Л указывают легирующие элементы и их содержание (числа после букв).

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

Двойные латуни, обрабатываемые давлением. Составы, физические и механические свойства этих латуней (ГОСТ 15 527–70) даны в табл. 2.30–2.32.

Полуфабрикаты из латуней, обрабатываемых давлением, поставляют в виде горяче- и холоднокатаных, тянутых и прессованных изделий (проволока, полосы, листы, ленты, трубы и др.) в мягком (отожженном), полутвердом (степень обжатия 10 – 30 %), твердом (30 – 50 %) и особо твердом (степень обжатия более 60 %) состоянии. Все двойные латуни имеют достаточную прочность и хорошо обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии (за исключением латуни Л60, которая хорошо обрабатывается только в горячем состоянии). Кроме высоких механических и литейных свойств латунь Л96 отличается высокой коррозионной стойкостью и не склонна к обесцинкиванию и коррозионному растрескиванию под напряжением. Ее применяют для изготовления радиаторных, конденсаторных и капиллярных трубок.

Латуни Л90, Л85, Л80 обладают хорошими механическими и коррозионными свойствами. Из них изготавливают змеевики, сиффоны, детали теплотехнической и химической аппаратуры. Латунь Л90 хорошо сваривается со сталью при совместной прокатке, поэтому ее успешно применяют для плакирования и изготовления биметалла. Благодаря расцвету золотистому цвету, латунь Л90 используют для производства фурнитуры и крашений. Из латуни Л85 делают гибкие шланги, детали холодильного оборудования, конденсаторные трубки. Латунь Л80 идет на изготовление проволочных сеток в целлюлозно-бумажной и шиферной промышленности.

Таблица 2.30. Химический состав латуней, обрабатываемых давлением, % (мас.)

Марка латуни	Основные элементы (ос-тальное Zn)	Примеси, не более					Всего
		Pb	Fe	Sb	Bi	P	
Л96	95–97 Cu	0,03	0,1	0,005	0,002	0,01	0,2
Л90	88–91 Cu	0,03	0,1	0,005	0,002	0,01	0,2
Л85	84–86 Cu	0,03	0,1	0,005	0,002	0,01	0,3
Л80	79–81 Cu	0,03	0,1	0,005	0,002	0,01	0,3
Л70* ¹	69–72 Cu	0,03	0,07	0,002	0,002	0,005	0,2
Л68	67–70 Cu	0,03	0,1	0,005	0,002	0,01	0,3
Л63	62–65 Cu	0,07	0,2	0,005	0,002	0,01	0,5
Л60	59–62 Cu	0,3	0,2	0,01	0,003	0,01	1
ЛА77-2	76–79 Cu; 1,75–2,5 Al	0,07	0,1	0,005	0,002	0,01	0,3
ЛАЖ60-1-1	58–61 Cu; 0,75–1,5 Fe; 0,1–0,6 Mn; 0,75–1,5 Al	0,4	–	0,005	0,002	0,01	0,7
ЛАН59-3-2	57–60 Cu; 2,5–3,5 Al; 2–3 Ni	0,1	0,5	0,005	0,003	0,01	0,9
ЛЖМц59-1-1	57–60 Cu; 0,6–1,2 Fe; 0,5–0,8 Mn; 0,1–0,4 Al; 0,3–0,7 Sn	0,2	–	0,01	0,003	0,01	0,25
ЛН65-5	64–67 Cu; 5–6,5 Ni	0,03	0,15	0,005	0,002	0,01	0,3
ЛМц58-2	57–60 Cu; 1,0–2,0 Mn	0,1	1	0,005	0,002	0,01	1,2
ЛМцА57-3-1	55–58,5 Cu; 2,5–3,5 Mn; 0,5–1,5 Al	0,2	1	0,005	0,002	0,01	1,3
ЛО90-1	88–91 Cu; 0,25–0,75 Sn	0,03	0,1	0,005	0,002	0,01	0,2
ЛО70-1	69–71 Cu; 1,0–1,5 Sn	0,07	0,1	0,005	0,002	0,01	0,3
ЛО62-1	61–63 Cu; 0,7–1,1 Sn	0,1	0,1	0,005	0,002	0,01	0,3
ЛО60-1	59–61 Cu; 1,0–1,5 Sn	0,3	0,1	0,005	0,002	0,01	1
ЛС63-3	62–65 Cu; 2,4–3 Pb	–	0,1	0,005	0,002	0,01	0,25
ЛС74-3	72–75 Cu; 2,4–3 Pb	–	0,1	0,005	0,002	0,01	0,25
ЛС64-2	63–66 Cu; 1,5–2 Pb	–	0,1	0,005	0,002	0,01	0,3
ЛС60-1	59–61 Cu; 0,6–1 Pb	–	0,15	0,005	0,002	0,01	0,5
ЛС59-1	57–60 Cu; 0,8–1,9 Pb	–	0,5	0,01	0,003	0,02	0,75
ЛС59-1В	57–60 Cu; 0,8–1,9 Pb	–	0,5	0,01	0,003	0,02	1,5
ЛЖС58-1-1	56–58 Cu; 0,7–1,3 Pb	–	–	0,01	0,003	0,02	0,5
ЛК80-3* ²	79–81 Cu; 2,5–4 Si	0,1	0,6	0,05	0,003	0,02	1,5
ЛМш68-0,05	67–70 Cu; 0,025–0,06 As	0,03	0,1	0,005	0,002	0,01	0,3
ЛАМш77-2-0,05	76–79 Cu; 1,75–2,5 Al; 0,025–0,06 As	0,07	0,1	0,005	0,002	0,01	0,3
ЛОМш70-1-0,05	69–71 Cu; 1–1,5 Sn; 0,025–0,06 As	0,07	0,1	0,005	0,002	0,1	0,3
ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5	73–76 Cu; 0,3–0,7 Mn; 1,6–2,2 Al; 0,3–0,7 Si; 2–3 Ni	0,05	0,1	0,005	0,002	0,1	0,5

*¹ Содержит также в качестве примесей по 0,005 % As и Sn, а также 0,002 % S. *² То же, а также 0,5 % Mn; 0,2 % Sn и 0,1 Al.

Таблица 2.31. Физические свойства двойных латуней, обрабатываемых давлением [12, 21]

Марка латуни	Температура начала плавления, °С	$\gamma, \frac{3}{\text{м}}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, при		$\lambda, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C})}$	$c, \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{ } ^\circ\text{C})}$	$\rho \cdot 10^6, \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}$	$\alpha_p \cdot 10^3, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$E, \text{ ГПа}$
			20 °С	20–300 °С					
Л96	1055	8,85	17,0	18,0	244,92	389,37	0,043	2,31	111,7
Л90	1025	8,78	17,1	18,4	180,03	397,75	0,045	1,86	108,9
Л85	990	8,75	18,7	18,7	152,40	397,75	0,047	1,60	102,9
Л80	965	8,66	18,8	19,1	142,35	399,37	0,054	1,50	109,8
Л75	980	8,63	–	19,6	–	–	0,057	–	102,9
Л70	915	8,61	19,1	19,9	121,42	376,81	0,069	1,48	112,7
Л68	909	8,60	19,9	20,0	113,04	376,81	0,072	1,50	112,7
Л66	905	8,47	–	20,1	119,74	376,81	0,069	–	102,9
Л63	900	8,44	20,5	20,6	108,86	376,81	0,074	1,70	113,7
Л60	895	8,40	20,7	21,0	104,67	376,81	0,075	2,50	115,6

* Здесь и далее в аналогичных таблицах температурный коэффициент электрического сопротивления.

Латунь Л70 в основном используют для химической аппаратуры, а Л68 – для изготовления деталей холодной штамповкой и глубокой вытяжкой. Из латуней Л68 и Л63 делают полосы, листы, ленты, прутки, трубы, проволоку, фольгу и профили различных размеров, а из Л63 – крепежные изделия, детали автомобилей и конденсаторных труб. Латунь Л60 устойчива к общей коррозии, ее применяют в основном для толстостенных патрубков, шайб, деталей машин.

Многокомпонентные латуни, обрабатываемые давлением. Основными легирующими элементами в многокомпонентных латунях (ГОСТ 15527–70) являются Al, Fe, Si, Mn, As, Ni, Sn и Pb (см. табл. 2.30). При этом Al, Ni, Sn и Si повышают прочность, коррозионную стойкость и улучшают антифрикционные характеристики латуней, а Fe, измельчая зерно, увеличивает температуру рекристаллизации и твердость; Mn повышает жаростойкость, а As предохраняет от обесцинкивания в агрессивной пресной воде; добавки Pb в латуни улучшают обработку резанием.

Таблица 2.32. Механические свойства в характерные температуры двойных латуней, обрабатываемых давлением [4, 21]

Латуни	σ_s		$\sigma_{0.2}$		σ_T		σ_{-1} , МПа, при N циклов		δ		ψ	KCU, кДж/м ²	НВ	Обработываемость, % ²	прокатки и прессования	Температура, °С		начала рекристаллизации
	МПа		МПа		МПа				отжиг	нагревом-перетурного отжига								
	σ_s	$\sigma_{0.2}$	σ_s	$\sigma_{0.2}$	σ_T	δ	%											
Л190: мягкая твердая	235–275	69	125	125	83 при 50·10 ⁶	44–52	80	176	49–59	–	750–900	650–720	200	335–370	–	–	–	
	430–590	363	295	295	123 при 50·10 ⁶	2–4	60 ¹	–	127–142	20	–	–	–	–				
Л185: мягкая твердая	235–295	55	98	98	104 при 100·10 ⁶	43–55	80	–	49–61	30	–	–	–	–	–	–	–	
	510–570	412	495	495	137 при 300·10 ⁶	2–5	80	–	118–142	30	–	–	200	350				
Л180: мягкая твердая	290–340	78	120	120	103 при 90·10 ⁶	45–55	70	157	52–64	30	820–870	650–720	260	320–360	–	–	–	
	550–670	412	355	355	151 при 50·10 ⁶	2–10	40	–	137–147	30	–	–	–	–				
Л170: мягкая твердая	290–340	98	130	130	155 при 50·10 ⁶	50–60	77	167	54–64	–	–	–	200	320–360	–	–	–	
	615–690	490–590	440	440	151 при 50·10 ⁶	3–6	57	–	142–152	–	–	–	200	320–360				
Л168: мягкая твердая	290–340	39	98	98	117 при 100·10 ⁶	50–60	70	167	54–64	30	750–830	520–650	260	300–370	–	–	–	
	510–725	340–390	412	412	147 при 100·10 ⁶	3–12	52	–	142–152	–	–	–	–	–				
Л163: мягкая твердая	350–440	78	108	108	118 при 10·10 ⁶	40–50	66	137	54–67	40	650–850	600–700	300	350–370	–	–	–	
	665–735	412	470	470	151 при 300·10 ⁶	2–4	60	–	137–156	–	–	–	–	–				
Л160: мягкая твердая	360–410	78	147	147	151 при 400·10 ⁶	40–50	62	78	30–49	45	730–820	600–770	–	350–370	–	–	–	
	635–735	390	570	570	178 при 500·10 ⁶	2–4	40	–	152–162	–	–	–	–	–				

¹ Полутвердая. ² Здесь и далее в аналогичных таблицах по сравнению с ЛС63-3.

Физические и механические свойства многокомпонентных латуней, обрабатываемых давлением, приведены в табл. 2.33 и 2.34, а механические свойства при низких температурах – в табл. 2.35.

Таблица 2.33. Физические свойства многокомпонентных латуней, обрабатываемых давлением [11, 20, 21]

Марка латуни	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{т/м}^3$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$, при		$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$c, \text{Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$E, \text{ГПа}$
			20 $^\circ\text{C}$	20–300 $^\circ\text{C}$				
ЛА85-0,5	1020	8,6	18,6	–	108,8	376,8	–	–
ЛЛ77-2	930	8,6	18,3	18,5	113	–	0,075	99,96
ЛАЖ60-1-1	904	8,2	21,6	–	75,3	–	0,090	102,90
ЛАН59-3-2	892	8,4	19,0	–	83,7	–	0,0785	105,84
ЛЖМц59-1-1	885	8,5	22,0	–	100,4	–	0,093	103,88
ЛН65-5	960	8,6	18,2	–	58,6	–	0,140	109,76
ЛМц58-2	865	8,4	21,2	–	71,2	372,6	0,108	102,90
ЛМцА57-3-1	870	8,1	20,1	–	67	–	0,121	101,92
ЛО90-1	995	8,8	18,4	18,4	125,6	–	0,054	102,90
ЛО70-1	890	8,7	19,7	–	117	–	0,072	103,88
ЛО62-1	885	8,5	19,3	–	108,9	–	0,078	102,90
ЛО60-1	885	8,5	21,4	21,4	100,4	376,8	0,078	102,90
ЛО63-3	885	8,5	20,5	–	117	376,8	0,069	96,04
ЛС74-3	965	8,7	17,5	19,8	121,4	–	0,068	102,90
ЛС64-2	910	8,5	20,3	–	117	–	0,070	102,90
ЛС60-1	900	8,5	20,8	20,8	104,7	376,8	0,065	102,90
ЛС59-1	900	8,5	20,6	18,3	104,7	376,8	0,066	102,90
ЛС59-1В	900	8,5	20,6	18,3	104,7	376,8	0,066	102,90
ЛЖС58-1-1	895	8,4	20,4	–	108,9	–	0,070	103,88
ЛК80-3	890	8,2	17,0	17,0	87,9	401,9	0,200	101,92
ЛМш68-0,05	937	8,6	19,1	20,0	113	–	0,075	98,98
ЛАМш77-2-0,05	985	8,7	19,2	18,5	134	376,8	0,068	99,96
ЛОМш70-1-0,05	949	8,6	19,0	–	117	–	0,710	101,92
ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5*	940	8,6	18,3	–	92,1	–	0,137	112,70
–	–	–	–	–	125,6	–	0,105	–

* В числителе приведены свойства в закаленном, а в знаменателе – в состаренном состоянии.

Латуни, обрабатываемые давлением, упрочняют деформационным наклепом, за исключением латуни ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5, которая является дисперсионно-твердеющим сплавом, упрочняемым не только деформационным наклепом, но и в результате термической обработки (закалки и старения). Эта латунь обладает высокой пластичностью в закаленном состоянии и высокими упругими и прочностными свойствами после старения. Упрочнение латуней обеспечивается холодной деформацией после закалки.

Таблица 2.34. Механические свойства и характерные температуры температуры многокомпонентных литейных, обрабатываемых давлением [4, 20, 21]

Литейный	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_T	σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ	ψ	КСУ, % кДж/м ²	НВ	Обрабатываемость резанием, %	Температура, °С			
										прокатки и прессовки в ваннах	отжига	низкотемпературного отжига	начала рекристаллизации
ЛА85-0,5: мягкая твердая	295-390	-	73,5 ⁰¹	-	60	50	-	53 ⁰¹	-	650-700	-	-	400
	490-690	-	-	-	3-10	-	-	147	-	-	-	-	-
ЛА77-2: мягкая твердая	340-440	7,5	-	-	42-52	58	-	44-54	-	600-650	-	-	400
	550-650	54	-	-	7-11	-	-	147-157	30	-	-	300	-
ЛАЖ60-1-1: мягкая твердая	390-440	-	19,6 ⁰¹	-	45-55	30 ⁰¹	-	44-79	-	600-650	-	-	400
	690-745	-	-	-	7-10	-	-	162-172	25	-	-	-	-
ЛАН59-3-2: мягкая твердая	440-540	-	255-345 ⁰	-	40-50	-	-	108-118	15	600-650	-	350	400
	635-735	-	-	-	7-11	20 ⁰²	40,2 ⁰²	172-182	-	-	-	-	-
ЛЖМп59-1-1: мягкая твердая	412-470	-	165	-	45-55	58	118	74-93	25	600-650	-	-	400
	590-735	-	175 ⁰¹	125 при 100-10 ⁶	5-10	15	-	152-162	-	-	-	-	-
ЛН65-5: мягкая твердая	370-440	10	137	-	45-65	-	-	54-64	-	600-650	-	-	400
	665-785	52	637	-	3-6	-	-	157-167	-	-	-	-	-

Литунь	σ_b	$\sigma_{0.2}$	σ_T	σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ	ψ	КСУ, кДж/м ²	НВ	Обработы- ваемость резанием, %	Температура, °С			
										прокатки и прессо- вания	отжига	низкотем- пературного отжига	начала рекристал- лизации
ЛМп58-2: мяткая	370-440	88 ^{*1}	153 ^{*1}	125 при 150-10 ⁶	36-45	52,5	1180 ^{*1}	79-88	-	650-750	600-650	-	300-400
	590-735	-	-	-	5-10	-	-	118-176	22,1	-	-	-	-
ЛМцА57-3-1: мяткая	390-490	-	-	-	40-50	-	-	83-93	22	650-750	600-650	-	350
	685-735	-	-	-	4-8	-	-	171-181	-	-	-	-	-
ЛО90-1: мяткая	245-304	-	89	110 при 60-10 ⁶	42-50	55	-	49-59	30	700-900	550-720	-	350-370
	470-550	-	-	206 при 300-10 ⁶	4-8	-	735	137-147	-	-	-	-	-
ЛО70-1: мяткая	314-370	-	159	104 ^{*1} при 10-10 ⁶	55-65	70	610	47-64	-	650-750	550-650	-	300
	568-735	186 ^{*2}	-	-	3-10	28	-	137-152	-	-	-	-	-
ЛО62-1: мяткая	370-420	105	147	-	55-65	56	-	74-83	30	700-780	550-650	-	300-350
	668-735	265	372	142 ^{*2} при 100-10 ⁶	3-5	-	550 ^{*2}	137-147	40	-	-	-	-
ЛО60-1: мяткая	353-390	137	176	-	38-44	46	760 ^{*1}	71-81	-	700-800	550-650	-	350-400
	558-610	353	412	-	3-10	-	-	142-152	40	-	-	-	-

Литунь	σ_b	$\sigma_{0.2}$	σ_T	σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ	ψ	КСУ, % кДж/м ²	НВ	Обработана весомость резаньем, %	Температура, °С			
										прокатки и прессова- ния	отжига	низкотем- пературного отжига	начала резанья
	МПа				%								
ЛС63-3: мягкая твердая	295-390	78	89	-	40-50	-	-	39-49	100	760-820	600-650	-	300-370
	540-640	412	440	-	3-6	-	-	127-137	-	-	-	-	-
ЛС74-3: мягкая твердая	295-390	60-120	98	118 при 50-10 ⁶	40-55	-	-	39-49	80	-	600-650	-	400
	590-685	390-440	510-610	167 при 50-10 ⁶	2-5	-	-	127-137	-	-	-	-	-
ЛС64-2: мягкая твердая	310-375	59-98	78-120	-	55-65	-	-	49-59	90	-	620-720	-	300-350
	570-660	390-460	440-490	-	4-6	-	-	137-147	-	-	-	-	-
ЛС60-1: мягкая твердая	340-390	103	120	-	45-55	-	-	59-68	-	780-820	600-650	-	350-400
	570-640	412	550	-	3-6	-	-	147-157	75	-	-	-	-
ЛС59-1: мягкая твердая	290-412	98	140	-	36-50	62,5	490	68-79	-	640-820	600-650	285	360
	590-690	412	412	159 при 50-10 ⁶	4-6	57	590	147-157	80	-	-	-	-
ЛЖС58-1-1: мягкая твердая	340-440	-	-	-	35-45	-	-	74-84	70	-	600-650	-	-
	640-735	-	-	-	2-5	-	-	157-167	-	-	-	-	-
ЛК80-3: мягкая твердая	275-335	-	105*1	-	53-60	55	390*1	93-103	30	750-850	500-600	-	350
	570-640	-	-	-	3-5	-	-	167-186	-	-	-	-	-

Литнугь	σ_b	$\sigma_{0.2}$	σ_T	σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ	ψ	КСУ, % кДж/м ²	НВ	Обработываемость резальем, %	Температура, °С			
										прокатки и прессовывания	отжига	низкотемпературного отжига	начала рекристаллизаци
ЛМш68-0,05: мягкая	310-375	39	98	120 при 100-10 ⁶	50-60	70	1670	49-59	30	700-850	550-650	260-270	300-370
	660-735	-	412	147 при 100-10 ⁶	3-5	52	-	142-152	-	-	-	-	-
ЛАМш77-2-0,05: мягкая	245-340	74	-	-	40-55	58	-	59-68	25	720-770	600-700	300	350
	490-590	470-530	-	-	3-5	-	-	157-167	-	-	-	-	-
ЛОМш70-1-0,05: мягкая	310-375	190 ^{а2}	160	104 ^{а1} при 10-10 ⁶	50-60	70	610	49-59	30	700-850	550-650	-	300-350
	670-690	-	-	-	2-4	28	-	137-147	-	-	-	-	-
ЛАНКМп75-2- 2,5-0,5-0,5 после: закалки	530	-	220	-	48,4	61,4	-	-	-	-	-	-	-
	690	-	456	-	25,5	41,4	-	-	-	-	-	-	-
старения закалки, старения и деформации (50%)	865	-	835	-	8	38,5	-	-	20	800-850	-	-	-
	1010	-	990	-	3,5	10,9	-	284-294	-	-	-	-	-

Примечание. Температуры термической обработки литнуги ЛАНКМп75-2-2,5-0,5-0,5: закалки 780 °С; старения 500 °С, 2 ч для закаленных образцов и 350 °С, 2 ч для закаленных и деформированных на 50 % образцов.

^{а1} В литом состоянии. ^{а2} Полутвердая.

**Таблица 2.35. Механические свойства латуни
при низких температурах [20, 21]**

Латунь	t, °C	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
Л68: отожженная 550 °C, 2 ч деформированная на 40 %	20	392	270	50,4	72
	-78	420	300	49,8	76,6
	-183	524	392	50,8	70,7
	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 % отожженная 550 °C, 2 ч	20	547	391	19,8	65,6
	-78	569	412	21,0	67,7
	-183	675	550	24,4	64,1
	20	376	137	51,3	75,5
	-78	420	155	53,0	74,6
	-183	520	196	55,3	71,0
ЛС59-1: отожженная 550°C, 2 ч холоднокатаная, 12 %	20	362	141	50,2	62,5
	-78	374	169	49,8	64,0
	-183	475	198	50,6	62,0
	22	437	314	28,2	57
	-78	483	371	27,0	59
	-183	594	480	30,8	57
ЛМц58-2 горячекатаная и отожженная	20	412	176	41	-
	0	431	147	38	-
	-40	431	186	39	-

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, ее применяют в морском судостроении для

изготовления конденсаторных труб. Латунь ЛАН59-3-2 используют в морском судостроении, электрических машинах и в химическом машиностроении для высокопрочных и химически стойких изделий, работающих при комнатной температуре. Из ЛАНМц75-2-2,5-0,5-0,5 производят цельнотянутые круглые трубы для манометрических трубок и пружин, используемых в приборах повышенного класса точности. Из латуни ЛЖМц59-1-1, обладающей повышенной коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и морской воде, изготавливают детали для авиационного и морского флота, а также сепараторы для подшипников. Латунь ЛН65-5 имеет повышенные механические и коррозионные свойства, обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии. Кроме различных видов проката из нее делают манометрические и конденсаторные трубки для морского судостроения, сетки для бумажной промышленности и другие детали.

Марганцевые латуни кроме хороших механических и технологических свойств (обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии) обладают высокой коррозионной стойкостью в морской воде, в хлоридах и перегретом паре. Латуни ЛМц58-2 и ЛМцА57-3-1 в основном применяют в судостроительной промышленности, а также для изготовления крепежных изделий и арматуры.

Оловянные латуни (кроме ЛО62-1) хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии, имеют высокую коррозионную стойкость в пресной и морской воде. Из 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 обрабатывают резанием. Они обладают высокими антифрикционными свойствами. Латуни ЛС74-3, ЛС63-3, ЛС64-2 применяют в часовой и автографторной промышленности, а ЛС64-2 – в типографском деле. Латуни ЛС60-1, ЛС59-1 и ЛС51-1В используют для изготовления крепежных изделий, зубчатых колес, втулок.

Кремнистые латуни обрабатывают давлением в горячем и холодном состоянии, применяют их для коррозионно-стойких деталей машин. Латунь ЛК80-3 имеет высокие механические свойства; она не подвержена коррозионному растрескиванию под напряжением, атмосферной сезонной коррозии и обесцинкованию, так как содержит менее 20 % Zn. Применяют ее для деталей, работающих в атмосферных условиях в напряженном состоянии, в частности для деталей контактной сети – электрифицированного транспорта.

Полуфабрикаты из латуней, обрабатываемых давлением. Поставляют эти полуфабрикаты в виде круглого и плоского проката (табл. 2.36, 2.37). Коррозионные и механические свойства в различных средах приведены в табл. 2.38.

Таблица 2.36. Размеры и механические свойства плоского проката из латуней [12, 20, 21, 25]

Полуфабрикат	Размеры, мм		Марка латуни	σ , МПа, δ , %	
	Толщина	Ширина, ширина \times длина		не менее	
Полосы прямоугольные пресованные (ГОСТ 6 688–91)	5–25	20–60	Л63	294	30
			ЛЖМц59-1-1	431	31
			ЛМц58-2	421	25
			ЛО62-1	343	25
			ЛС59-1	372	21
Го же тянутые (ГОСТ 6 688–91)	3–10	6–18	ЛС59-1	–	–
Горячекатаные листы (ГОСТ 931–90)	5; 6–21; 22; 25	600 \times 1 500; 1 000 \times 2 000	Л63	294	30
			ЛО62-1	343	20
			ЛС59-1	363	18

Полуфабрикат	Размеры, мм		Марка латуни	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %
	Толщина	Ширина, ширина × длина			
Холоднокатаные полосы	0,4–10	40–500	Л90:		
Холоднокатаные листы	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	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
			четверть твердая	343	20
			полутвердая	412	10
			твердая	490	4
			особо твердая	588	–
			ЛС59-1:		
мягкая	343	25			
твердая	461	5			
ЛМц58-2:					
мягкая	382	30			
полутвердая	421	15			
твердая	588	3			
ЛО62-1:					
твердая	392	4			
Лента (ГОСТ 2208–91)	0,14–0,22 0,25–0,45 0,50–2,00	10–200 10–250 20–600	Л90:		
			мягкая	235–245	35
			полутвердая	392–421	10
	0,10–0,22 0,25–0,45 0,50–2,00	10–600 10–600 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			

Полуфабрикат	Размеры, мм		Марка латуни	σ , МПа	δ , %
	Толщина	Ширина, ширина \times длина		не менее	
Лента (ГОСТ 2208–91)	0,05–0,09 0,10–0,22 0,25–0,45 0,50–2,00	10–175 10–300 10–600 20–600	Л68 твердая	431–539	10
	0,14–0,22 0,25–0,45 0,50–1,00	10–300 10–600 20–600	Л68 особо твердая Л63: мягкая полутвердая твердая особо твердая	> 519 294–412 412–539 539–617 > 587	– 38 10 4 –
	0,14–0,22 0,25–0,45 0,50–2,00	10–200 10–250 20–600	Л63 четверть твердая	343–470	20
	0,14–0,40 0,45–1,40 1,50–2,00	10–175 20–280 20–600	ЛС59-1 мягкая	343–490	25
	0,10–0,40 0,45–1,4 1,50–2,00	10–175 20–280 20–180	ЛС59-1 твердая	461–587	5
	0,35–1,20	20–300	ЛС59-1 особо твердая ЛМц58-2: мягкая твердая	> 587 382–490 587	3 30 4
	0,14–0,40 0,45–1,40	10–175 20–280	ЛМц58-2 полутвердая	421–587	15
	Лента радиаторная (ГОСТ 20707–80)	0,05–0,75	10–200	Л63 и Л90 мягкая, полутвердая, твердая; Л63 четверть твердая	–
Ленты (ГОСТ 4442–72)	0,10–2,00	10–150	ЛС63-3: мягкая полутвердая	> 294 343–441	25 –
Полосы (ГОСТ 4442–72)	1,50–80	20–180	ЛС63-3 особо твердая	627	5
Ленты томпаковые для плакирования (ГОСТ 2205–71)	0,7; 0,9; 1,0; 1,1; 1,5; 1,6; 1,7; 2,0	100–500	Л90	–	–
Полосы (ГОСТ 2205–71)	2,5; 2,6; 3,0; 3,6; 4,0	100–500	Л90	–	–

Таблица 2.37. Размеры и механические свойства
круглого проката из латуни [4, 25]

Полуфабрикат	d, мм	σ_p , МПа	δ , %	Полуфабрикат	d, мм	σ_p , МПа	δ , %
Прутки круглые, квадратные и шестигранные (ГОСТ 2060 90) из: Л60: прессованной тянутой мягкой полутвердой твердой Л63: прессованной тянутой мягкой полутвердой твердой ЛС59-1: прессованной мягкой полутвердой твердой ЛС63-3: тянутой твердой полутвердой ЛО62-1: прессованной тянутой полутвердой ЛЖС58-1-1: прессованной тянутой полутвердой ЛМц58-2: прессованной тянутой полутвердой ЛЖМц59-1-1: прессованной тянутой полутвердой ЛАЖ60-1-1 прессованной	10-160	294	30	Проволока для холодной высадки (ГОСТ 12920-67; ГОСТ 1066-90) из Л63: полутвердой твердой Проволока (ГОСТ 19703-79) из ЛС63-3: мягкой полутвердой твердой особо твердой Трубы (ГОСТ 494-90) из: Л63, Л68 тянутой, холоднокатаной Л60, Л63, ЛС59-1, ЛЖМц59-1-1 прессованной Трубы тонкостенные (ГОСТ 11383-75) из: Л63: тянутой мягкой твердой Л96: тянутой мягкой твердой	1; 1,2; 1,32; 1,4; 1,45; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2; 2,16; 2,2; 2,35; 2,4; 2,5; 2,6; 2,64; 2,85; 3; 3,26; 3,35; 3,48; 3,5; 3,6; 3,85; 4; 4,1; 4,38; 4,43; 4,8; 5; 5,2; 5,28; 5,8; 6; 7; 7,1; 7,8; 8; 8,3; 8,85; 9; 10	363	18
	10-160	294	30		0,45-12	>294	32
	3-50	333	30		0,45-12	392-510	3
	3-40	392	17		0,45-12	510-617	-
	3-12	470	9		0,45-6,5	617-715	-
	10-160	294	30		7-8	617-686	-
	10-160	294	40		3-100	-	-
	3-50	334	30		(0,5-10) ^{*2}	-	-
	3-40	372	15		21-195	-	-
	3-12	441	10		(1,5-42,5) ^{*2}	-	-
	10-160	363	18		1,5-28	-	-
	3-50	333	22		(0,15-0,7) ^{*2}	-	-
	3-40	392	15		294	38	
	3-12	490	5		392	10	
	10-20	353	12		206	35	
	10-160	363	20		294	30	

Полуфабрикат	d , мм	σ_p , МПа	δ , %	Полуфабрикат	d , мм	σ_p , МПа	δ , %
Проволока круглая, квадратная, шестигранная (ГОСТ 1066–90) из Л80, Л68, Л63, ЛС59-1 мягкой, полутвердой, твердой	0,1–12 (3–12) ^{*1}	–	–	Трубы для теплообменных аппаратов (ГОСТ 21646–76) из: ЛО70-1 мягкой ЛОМш70-1-0,05, Л68, ЛМш68-0,05, ЛА77-2 мягкой Л68, ЛО70-1 полутвердой	10–50 ^{*3}	294 323 343	40 35 35
					(0,8–3) ^{*3}		

*¹ Сторона квадрата или шестиугольника. *² Толщина стенки. *³ Наружный диаметр.

Таблица 2.38. Коррозионная стойкость латуней, обрабатываемых давлением

Латунь	$v_{кор} \cdot 10^3, (м^2 \cdot ч)$					
	Морская вода	H_2SO_4		HNO_3 1 %-ная	Дистиллированная вода	Атмосфера (98 % влажности)
		10 %-ная	1 %-ная			
Л63: отожженная при 650 °С холоднокатаная и отожженная при 200 °С	20	61	57	630	3	0,1
	22	61	50	1110	2	0,1
ЛАН59-3-2: мягкая полутвердая	0,04	–	–	–	–	–
	–	1,2	–	–	–	–
ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5: закаленная и состаренная	3	–	32	310	0,9	0,07
	3	–	49	320	0,9	0,05
ЛЖМц59-1-1	9	74	–	–	–	–
ЛМц58-2	17	66	–	–	–	–
ЛО90-1	17–21	–	–	–	–	–
ЛО70-1 мягкая	23	69	–	–	–	–
ЛО62-1: полутвердая	23	–	–	–	–	–
	–	63	–	–	–	–
ЛС59-1 мягкая	15	59	–	–	–	–

Литейные латуни. Согласно ГОСТ 17711–93, существует 10 марок литейных латуней. Литейные латуни в виде чушек (ГОСТ 1020–97) содержат те же легирующие 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 свойствами. Составы и свойства литейных латуней приведены в табл. 2.39–2.41.

Таблица 2.39. Химический состав литейных латуней, % (мас.)

Марка латуни	Основные элементы (остальное Zn)	Примеси, не более							
		Si	Sn	Sb	Fe	Al	Ni	Прочие	Всего
ЛЦ40С	57–61 Cu; 0,8–2,0 Pb	0,3	0,5	0,05	0,8	0,5	1,0	0,5 Mn	2,0
ЛЦ40Сд	58–61 Cu; 0,8–2,0 Pb	0,2	0,3	0,05	0,5	0,2	1,0	0,2 Mn	1,5
ЛЦ40Мц1,5	57–60 Cu; 1,0–2,0 Mn	0,1	0,5	0,1	1,5	–	1,0	0,7 Pb; 0,03 P	2,0
ЛЦ40Мц3Ж	53–58 Cu; 0,5–1,5 Fe; 3,0–4,0 Mn	0,2	0,5	0,1	–	0,6	0,5	0,5 Pb; 0,05 P	1,7
ЛЦ40Мц3А	55–58,5 Cu; 0,5–1,5 Al; 2,5–3,5 Mn	0,2	0,5	0,05	1,0	–	1,0	0,2 Pb; 0,03 P	1,5
ЛЦ38Мц2С2	57–60 Cu; 1,5–2,5 Mn; 1,5–2,5 Pb	0,4	0,5	0,1	0,8	0,8	1,0	0,05 P	2,2
ЛЦ37Мц2С2К	57–60 Cu; 1,5–2,5 Mn; 0,5–1,3 Si; 1,5–3,0 Pb	–	0,6	0,1	0,7	0,7	1,0	0,05As; 0,01Bi; 0,1 P	1,7
ЛЦ30А3	66–68 Cu; 2,0–3,0 Al	0,3	0,7	0,1	–	–	0,3	0,7 Pb; 0,5 Mn; 0,05 P	2,6
ЛЦ25С2	70–75 Cu; 0,5–1,5 Sn; 1,0–3,0 Pb	0,5	–	0,2	0,3	0,3	1,0	0,5 Mn	1,5
ЛЦ23А6Ж3Мц2	64–68 Cu; 4,0–7,0 Al; 2,0–4,0 Fe; 1,5–3,0 Mn	0,3	0,7	0,1	–	–	1,0	0,7 Pb	1,8
ЛЦ16К4	78–81 Cu; 3,0–4,5 Si	–	0,3	0,1	0,6	0,04	0,2	0,3 Pb; 0,8 Mn; 0,1 P	2,5
ЛЦ14К3С3	77–81 Cu; 2,5–4,5 Si; 2,0–4,0 Pb	–	0,3	0,1	0,6	0,3	0,2	0,3 Pb; 1,0 Mn	2,3

Таблица 2.40. Физические свойства и технологические характеристики литейных латуней [15]

Марка латуни	γ , г/см ³	λ , Вт/(м·°С)	$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м	$t_{ш}$, °С	Линейная усадка, %	Жидкотекучесть, см	Коэффициент трения в паре со сталью			Скорость коррозии, г/(м ² ·ч)		Обработываемость резанием, %
								со смазкой	без смазки	морская вода	пар		
ЛЦ16К	8,3	83,7	17	0,2	900	1,7	80	0,010	0,19	0,068	0,312	30	
ЛЦ14КЗС3	8,6	83,7	17	0,2	900	1,7	60	0,009	0,15	—	—	50	
ЛЦ23А6Ж3Мц2	8,5	50,2	19,8	—	900	1,8	40	—	—	—	—	25	
ЛЦ30А3	8,5	113	—	0,08	995	1,25	57	—	—	—	—	30	
ЛЦ40АЖ	8,5	113	21,6	0,09	904	1,7	—	—	—	—	—	30	
ЛЦ38Мц2С2	8,5	46	20,6	0,11	885	2	22	0,016	0,24	0,050	—	60	
ЛЦ35Н2ЖА	8,4	—	—	—	916	1,7	—	—	—	—	—	20	
ЛЦ40С	8,5	108,8	20,1	0,068	885	2,2	61	0,013	0,17	0,059	0,020	80	
ЛЦ36Мц2О2С2	8,5	50,2	—	0,12	890	1,8	—	—	—	—	—	35	
ЛЦ40Мц1,5	8,4	71,2	21,2	0,108	880	1,45	36	0,012	0,32	—	—	22	
ЛЦ40Мц3Ж	8,5	100,5	22	0,12	870	1,6	60	—	—	—	—	25	
ЛЦ25С2	8,5	100,5	—	0,09	920	1,8	47	—	—	0,047	—	60	

Таблица 2.41. Механические свойства и область применения литейных латуней [12, 15, 20, 25]

Марка латуни	Способ литья ¹	σ_b , МПа		σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ , %	НВ	KCU, кДж/м ²	Область применения
		σ_b	σ_{-1}					
ЛЦ16К4	П	245–343	115–195	100 при 20·10 ⁶	15	98–108	1180	Детали, работающие в морской воде, при протекторной защите арматуры до 250 °С; арматура контактной сети
	К	295–490	—	—	15	98–109	1200	
	Ц	295–490	—	—	—	—	—	
ЛЦ14КЗС3	П	245–295	135	—	7	88	390	Подшипники, втулки
	К	295–390	—	—	15	98	—	
	Ц	345–390	—	—	—	—	—	
ЛЦ23А6Ж3Мц2	П	540–635	295–345	—	7	157	—	Гайки винтов; массивные червячные винты, работающие в тяжелых условиях
	К	585–585	—	—	7	157	—	
	Ц	635–735	—	—	7	—	—	

Марка латуни	Способ литья ^{*1}	σ_b		σ_T	σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ , %	НВ	KCU, кДж/м ²	Область применения
		МПа							
ЛЦ30А3	П	275–335	145–175	–	–	12	78	–	Коррозионно-стойкие детали
	К	345–440	–			15	88	–	
ЛЦ40АЖ	П	335–430	245	–	–	20	78	–	Арматура, втулки, подшипники
	К	390–470	–			18	88	–	
ЛЦ35Н2ЖА	П	345	175–195	–	–	20	98	–	Арматура без притираемых поверхностей, работающая в воде, на воздухе, в масле и жидком топливе до 250 °С
	К	370–450	–			18	83	–	
ЛЦ40С	К	345–390	145	–	–	–	78	255	Арматура, втулки, сепараторы подшипников качения
	Ц	200	–			20	–	–	
ЛЦ40Сд	Д	200	–	–	–	6	69	–	Зубчатые колеса
ЛЦ36Мп2О2С2	П	295–390	225–285	–	–	6	88	85	То же
	К	295–345	–			4	98	–	
ЛЦ38Мп2С2	П	295–390	215–275	–	–	10	69	685	Антифрикционные детали
	К	345–440	–			8	78	–	
Лп40Мц1,5	П	345	155	90 при 20·10 ⁶	–	20	98	1180	Авандетали, несущие силовую нагрузку; неотответственные подшипники и арматура, детали, подвергающиеся лужению, заливке баббитом
	К	345	–			20	98	–	
	Ц	345	–			20	98	–	
ЛЦ25С2	П	245–295	–	–	–	8	69–78	–	Штуцера гидросистем автомобилей
ЛЦ40Мц3А	К, Ц	441	–	–	–	15	113	–	Детали несложной конфигурации
ЛЦ40Мп3Ж	П	390–540	165–235	–	–	18	88	1760	Несложные по конфигурации детали ответственного назначения и арматура для морского судостроения, работающие при температурах до 350 °С; массивные детали (гребные винты, лопасти, сепараторы)
	К	540–635	–			10	98	–	
	Д	390	–			10	88	–	

*1 П – литье в песок; К – литье в кокиль; Ц – центробежное литье. *2 В морской воде.

2.2.2. Бронзы

Бронзами называют сплавы меди, в которых цинк или никель не являются основными легирующими элементами. По химическому составу бронзы подразделяют на две группы: оловянные (основной легирующий элемент – олово) и безоловянные (не содержащие олово в качестве легирующего элемента). По технологическому признаку бронзы делят на литейные и деформируемые. Литейные бронзы предназначены для фасонных отливок, деформируемые хорошо поддаются обработке давлением. По сравнению с латунью бронзы обладают лучшими механическими, антифрикционными свойствами и коррозионной стойкостью. В качестве легирующих элементов в бронзах используют Sn, Al, Ni, Mn, Fe, Si, Pb, P, Be, Cr, Zr, Mg 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 изменяется от 15,8 % при 586 °С до 1 % при 200 °С. Причем в реальных условиях затвердевания и охлаждения (в песчаных 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 - и ϵ -твердые растворы: β – на основе соединения Cu_5Sn с ОЦК решеткой, δ и γ – на основе $Cu_{31}Sn_8$ со сложной кубической решеткой и ϵ – на основе Cu_3Sn с ГП решеткой. К числу однофазных сплавов относятся бронзы, содержащие до 5–6 % Sn. В бронзах с более высокой концентрацией олова при кристаллизации образуются α - и β -фазы. В процессе охлаждения β -фаза при 586 °С распадается с образованием эвтектоида $\alpha + \gamma$, а γ -фаза при 520 °С – с образованием эвтектоида $\alpha + \delta$. На этом обычно заканчиваются фазовые превращения в бронзах.

Механические свойства оловянных бронз достаточно высоки. С увеличением содержания олова возрастают прочность и твердость 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. Высокие триботехнические характеристики оловянных бронз можно объяснить на основе теории самоорганизации. В поверхностных слоях оловянных бронз при трении происходит неравновесный процесс выделения олова из твердого раствора [15], что приводит к снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания [5].

Добавки фосфора к оловянным бронзам значительно улучшают их механические, антифрикционные и литейные характеристики. Для механических свойств оптимальным является содержание фосфора около 0,5 %. При больших концентрациях фосфора бронзы охрупчиваются, особенно при горячей прокатке. Однако в литейных антифрикционных бронзах возможно до 1,2 % P. Небольшие добавки Zr, Ti, Nb, В улучшают механические свойства и обрабатываемость давлением в холодном и горячем состояниях. 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 влияя на механические свойства, улучшает технологические характеристики. Железо повышает механические свойства и температуру рекристаллизации, однако с увеличением его содержания ухудшаются технологические и коррозионные свойства бронз.

Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением (деформируемые), подразделяют на следующие группы (ГОСТ 5017–74): оловянно-фосфористые БрОФ8-0,3, БрОФ6,5-0,4, БрОФ6,5-0,15, БрОФ7-0,2, БрОФ4-0,25; оловянно-цинковую БрОЦ4-3 и оловянно-цинково-свинцовые БрОЦ4-4-2,5, БрОЦ4-4-4.

Составы, физические и механические свойства оловянных бронз приведены в табл. 2.42–2.44, а механические свойства при низких температурах – в табл. 2.45.

Таблица 2.42. Составы оловянных бронз, обрабатываемых давлением, % (мас.)

Марка бронзы	Основные элементы, (остальное Cu)	Примеси, не более							
		Fe	Pb	Sb	Bi	Al	Si	Прочие	Всего
БрО8,0-0,3	7,5–8,5 Sn; 0,25–0,35 P; 0,1–0,2 Ni	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03 Zn	0,1
БрОФ7-0,2	7,0–8,0 Sn; 0,10–0,25 P	0,05	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	–	0,1
БрОФ6,5-0,4	6,0–7,0 Sn; 0,26–0,40 P; 0,1–0,2 Ni	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03 Zn	0,1
БрОФ6,5-0,15	6,0–7,0 Sn; 0,10–0,25 P	0,05	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	–	0,1
БрОФ4-0,25	3,5–4,0 Sn; 0,20–0,30 P	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	–	0,1
БрОЦ4-3	3,5–4,0 Sn; 2,7–3,3 Zn	0,05	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03 P	0,2
БрОЦ4-4-2,5	3,0–5,0 Sn; 3,0–5,0 Zn; 1,5–3,5 Pb	0,05	–	0,002	0,002	0,002	–	0,03 P	0,2
БрОЦ4-4-4	3,0–5,0 Sn; 3,0–5,0 Zn; 3,5–4,5 Pb	0,05	–	0,002	0,002	0,002	–	0,03 P	0,2

Таблица 2.43. Физические свойства оловянных бронз, обрабатываемых давлением [11, 20, 21]

Марка бронзы	$t_{пл}^{\circ}, ^{\circ}C$	$\gamma, \tau/м^3$	$\alpha \cdot 10^6, ^{\circ}C^{-1}$, при		$\lambda, \text{Вт}/(м \cdot ^{\circ}C)$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot м$	$E, \text{ГПа}$
			20 $^{\circ}C$	20–300 $^{\circ}C$			
БрОФ6,5-0,4	–/995	8,8	17,1	19,1	71,2	0,176	109,8
БрОФ6,5-0,15	–/995	8,8	17,1	19,0	71,2	0,176	109,8
БрОФ7-0,2	–/900	8,6	17,0	–	41,9	0,17	112,7
БрОФ8-0,3	–/880	8,6	17,0	–	41,0	0,175	115,6
БрОФ4-0,25	–/1060	8,9	17,6	19,4	83,7	0,091	98,0
БрОЦ4-3	–/1045	8,8	18,0	–	83,7	0,087	121,6
БрОЦ4-4-2,5	1018/887	9,0	18,2	–	83,7	0,087	73,5
БрОЦ4-4-4	1015/–	9,1	18,1	–	83,7	0,09	70,6

* В числителе – ликвидуса, в знаменателе – солидуса.

Таблица 2.44. Механические свойства и технологические характеристики оловянных бронз, обрабатываемых давлением [4, 20, 21, 25]

Мара бронзы	σ_s	σ_T	σ_{-1} , МПа, при N циклов	$KCU, \frac{kJ/m^2}{\sqrt{cm}}$	δ	ψ	HB	Коэффициент трения в паре со сталью		Температура, °C				Обрабатываемость резанием, %
								со смазкой	без смазки	горячей обработки	отжига	начала ретаргитации	низкотемпературного отжига	
	МПа		%											
BrOФ6,5-0,15 BrOФ6,5-0,4: литая мяткая твердая	245-345	140	265-335 при $10 \cdot 10^6$	490-590	15-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	295-440 685-785	195-245 580-640	-	-	60-70 7-12	80 61	69-82 157-216	0,01	0,12	700-800	600-650	350-370	260	20
	370-440	-	165 при $10 \cdot 10^6$	1745	55-65	-	84-93	0,011	0,33	-	600-650	-	-	16,1
BrOФ7-0,2: мяткая твердая	880-1080	540	-	-	1-2	-	172-225	-	-	-	-	-	-	-
	390-490 980-1180	-	-	-	55-65 1-2	-	88-98 176-235	-	-	-	600-650	-	-	-
	295-375 590-685	530	151 при $5 \cdot 10^6$ 245 при $5 \cdot 10^6$	-	40-58 6-10	85 60	54-69 157-167	-	-	700-800	600-650	350-370	250	20
BrOЦ4-3: литая мяткая твердая	195-295 295-390 490-590	65	-	390	15 35-45 3-6	-	59-69 59-69 157-167	-	-	700-800	600-650	400	250	-
	185 295-345 540-640	100 130 275	-	-	11 35-45 2-4	13 34	66 48-69 147-176	0,016	0,26	-	-	400	-	-
	315-335 490-590	130	-	360	30-40 1-2	34	61	0,016	0,26	-	550-650	-	-	90
BrOЦС4-4-2,5: литая мяткая твердая	315-335 490-590	130	-	360	30-40 1-2	34	61	0,016	0,26	-	550-650	-	-	90
	315-335 490-590	130	-	360	30-40 1-2	34	61	0,016	0,26	-	550-650	-	-	90

Таблица 2.45. Изменение механических свойств оловянных бронз с уменьшением температуры [19, 20, 21]

t, °C	σ_b	σ_T	δ	ψ
	МПа		%	
	<i>БрОФ6,5-0,4</i>			
17	615	—	12	61
-196	825	—	29	54
-253	930	—	29	51
	<i>БрОЦ10-2</i>			
20	245	175	8	36
-190	305	205	15	24
-253	390	315	18	38

Из оловянно-фосфористых бронз БрОФ8-0,3 и БрОФ6,5-0,4 изготавливают сетки для целлюлозно-бумажной промышленности, из БрОФ6,5-0,15 – ленты, полосы, прутки, детали подшипников и биметаллические изделия, из БрОФ7-0,2 – прутки, шестерни, зубчатые колеса, втулки и прокладки высоконагруженных машин, из БрОФ4-0,25 – трубки контрольно-измерительных и других приборов, манометрические пружины. Из оловянно-цинковой бронзы БрОЦ4-3 выпускают ленты, полосы, прутки, применяемые в электротехнике; токоведущие пружины, контакты штепсельных разъемов, пружинную проволоку для химической промышленности и точной механики; арматуру, шаберы для бумажной промышленности. Наконеч из оловянно-цинково-свинцовых бронз БрОЦС4-4-2,5 и БрОЦС4-4-4 делают втулки и подшипники для автотракторной и автомобильной промышленности.

Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением, поставляют, как и латуни, в мягком (отожженном), полутвердом, твердом и особо твердом состоянии.

Бронзы БрОФ6,5-0,4, БрОФ6,5-0,15 и БрОЦС4-4-2,5 обрабатывают обычно в холодном состоянии (прокатка, волочение), а в горячем состоянии – лишь прессованием. Бронза БрОЦ4-3 хорошо обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии. Виды и свойства плоского и круглого проката из оловянных бронз приведены в табл. 2.46, 2.47.

Таблица 2.46. Плоский прокат из оловянных бронз [12, 20]

Полуфабрикат	Размеры, мм		σ_b , МПа	δ , %
	толщина	ширина		
Полосы, ленты (ГОСТ 1761–79) из: БрОФ6,5-0,15: мягкой полутвердой твердой особо твердой термообработанной БрОЦ4-3: мягкой полутвердой твердой особо твердой	1–10	40–300		
	0,1–2	10–300		
			295	34–38
			440	8–10
			665	3–5
			745	—
			590	10
			295	38
			440	4–8
			620	2–4
		685	—	
Полосы и ленты (ГОСТ 15885–77) из БрОЦС4-4-2,5: мягкой полутвердой твердой	1,53–3	50–300		
	0,5–2	100–200		
			295	35
			440	10
		540	5	

Таблица 2.47. Круглый прокат из оловянных бронз [12, 20]

Полуфабрикат	d , мм	σ_b , МПа	δ , %
Прутки круглые (ГОСТ 10025–78) из: БрОФ6,5-0,15 тянутой БрОФ7-0,2 прессованной	6–40 40–110	410 440	15 15
Заготовки для изготовления проволоки, сеток и поясов поршневых колец из: БрОФ6,5-0,15 мягкой БрОФ7-0,2 мягкой БрОФ8-0,3 мягкой БрОФ6,5-0,4 твердой	– – – –	345 355 380–480 530	55 55 55 –
Проволока из БрОФ6,5-0,4: твердой мягкой	0,115–2 0,5–2	880 295	0,5 40
Прутки круглые, квадратные, шестигранные (ГОСТ 6511–60) из БрОЦ4-3: тянутой тянутой тянутой тянутой прессованной	5–12 13–15 26–35 36–40 42–120	430 370 335 315 275	10 15 16 16 25
Проволока круглая, квадратная (ГОСТ 5221–77) из БрОЦ4-3 тянутой	0,1–12	765	–

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

Оловянные шихтовые литейные бронзы в чушках (ГОСТ 614–97) служат шихтой: БрО3Ц8С4Н1 – для литейной бронзы БрО3Ц7С5Н; БрО3Ц13С4 – для БрО3Ц12С5; БрО4Ц7С5 – для БрО3,5Ц7С5; БрО5Ц6С5 – для БрО5Ц5С и БрО4Ц4С17. Перечисленные литейные бронзы (ГОСТ 613–79) применяют для литья антифрикционных деталей. Кроме того, бронзы БрО3Ц12С5 и БрО3Ц7С5Н используют для арматуры, работающей в воде и водяном паре давлением до 245 МПа (бронза БрО3Ц7С5Н – в морской воде и маслах).

Литейные нестандартные бронзы БрО10, БрО19 ответственного назначения применяют для арматуры и фасонных отливок; БрО10Ф1 – для подшипников, шестерен и втулок ответственного назначения; БрО10Ц2 – для арматуры, подшипников, фасонных отливок; БрО8Ц4 – для частей насосов и арматуры; БрО6Ц6С3 – для паровой и водяной арматуры; БрО8БС12 – для ответственных подшипников, работающих при высоких давлениях; БрО5С25 и БрО1С22 – для изготовления подшипников и втулок, работающих при малых нагрузках и больших скоростях, маслоуплотнительных колец; БрО6Ц6С3 – для

паровой и водяной арматуры. Бронзы Бр05С25, Бр01С22, Бр08С12 входят в группу свинцовых бронз, к которым относятся БрС30 (для подшипников, сальников), БрС60Н2,5 (для подшипников, фасонных отливок). Вследствие невысоких механических свойств двойные свинцовые бронзы применяют для втулок и подшипников в виде тонкого слоя на стальной основе. Свинцовые бронзы с повышенным содержанием олова (Бр08С12, Бр010С10, Бр010С2Н3) характеризуются более высокими механическими свойствами, чем двойные свинцовые бронзы. Поэтому из этих бронз изготавливают втулки и вкладыши подшипников без стальной основы. Составы, физические и механические свойства литейных оловянных бронз приведены в табл. 2.48–2.50.

Таблица 2.48. Химический состав оловянных литейных бронз, % (мас.)

Марка бронзы	Основные элементы (остальное Cu)				Примеси, не более							
	Sn	Zn	Pb	Другие	Zn	Pb	Al	Fe	Si	P	Sb	Всего
Бр03Ц12С5	2,0–3,5	8,0–15,0	3,0–6,0	–	–	–	0,02	0,4	0,02	0,05	0,5	1,3
Бр03Ц7С5Н1	2,5–4,0	6,0–9,5	3,0–6,0	0,5–2,0 Ni	–	–	0,02	0,4	0,02	0,05	0,5	1,3
Бр04Ц7С5	3,0–5,0	6,0–9,0	4,0–7,0	–	–	–	0,05	0,4	0,05	0,1	0,5	1,3
Бр04Ц4С17	3,5–5,5	2,0–6,0	14,0–20,0	–	–	–	0,05	0,4	0,05	0,1	0,5	1,3
Бр05Ц5С5	4,0–6,0	4,0–6,0	4,0–6,0	–	–	–	0,05	0,4	0,05	0,1	0,5	1,3
Бр05С25	4,0–6,0	–	23,0–26,0	–	0,5	–	0,02	0,2	0,02	0,05	0,5	1,2
Бр06Ц6С3	5,0–7,0	5,0–7,0	2,0–4,0	–	–	–	0,05	0,4	0,02	0,05	0,5	1,3
Бр08Ц4	7,0–9,0	4,0–6,0	–	–	–	0,5	0,02	0,3	0,02	0,05	0,3	1,0
Бр010Ф1	9,0–11,0	–	–	0,4–1,1 P	0,3	0,3	0,02	0,2	0,02	–	0,3	1,0
Бр010Ц2	9,0–11,0	1,0–3,0	–	–	–	0,5	0,02	0,3	0,02	0,05	0,3	1,0
Бр010С10	9,0–11,0	–	8,0–11,0	–	0,5	–	0,02	0,2	0,02	0,05	0,3	0,9

Коррозионная стойкость оловянных бронз. Оловянные бронзы стойки по отношению к атмосферной коррозии. В сельской местности скорость коррозии бронз Бр05 и Бр08 равна $(1,5–8) \cdot 10^{-3}$ г/(м²·ч), в морской атмосфере – $(0,1–2) \cdot 10^{-3}$ г/(м²·ч). В водяном паре при малых скоростях истечения скорость коррозии оловянных бронз $< 2,5 \cdot 10^{-3}$ г/(м²·ч), а при высоких скоростях истечения – $< 0,9$ г/(м²·ч). В перегретом до 250 °С водяном паре оловянные бронзы устойчивы до давления 2 МПа.

В морской воде оловянные бронзы более стойки, чем медь и латуни. 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 г/(м²·ч), в растворах аммиака – 1,28–2,55 г/(м²·ч), в водных растворах этилового спирта скорость коррозии $< 2,5 \cdot 10^{-3}$ г/(м²·ч). Скорость коррозии оловянных бронз в сухом четыреххлористом углеводе или хлористом этиле менее $2,5 \cdot 10^{-3}$ г/(м²·ч), а в этих же средах в присутствии влаги – 1,28 г/(м²·ч).

Таблица 2.49. Физические свойства и технологические характеристики литейных оловянных бронз

Марка бронзы	$\gamma, \text{г/м}^3$	$\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\lambda, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	$c, \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$	$E, \text{ ГПа}$	$\rho \cdot 10^6, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Температура, $^\circ\text{C}$			Линейная усадка, %	Жидкотекучесть, см	Обработываемость резанием, %
							плавления	лития	наикотемпературного отжига			
БрО3Ц7С5Н	8,7	17,61	62,8	364,3	83,3	-	1022	-	-	-	50	-
БрО3Ц12С5	8,7	-	-	-	82,3	-	998	-	-	-	60	-
БрО4Ц4С17	8,9	-	-	-	-	-	970	-	-	-	40	-
БрО5Ц5С5	8,8	19,1	-	393,6	92,6	-	-	1250-1300	-	1,4-1,6	30	90
БрО3,5Ц7С5	8,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	90
БрО10	8,8	18,5	48,1	368,4	103,9	-	1020	1150	200	1,44	20	20
БрО19	8,6	18,8	-	-	96,0	-	880	-	-	-	-	-
БрО10Ф	8,7	17,3	49	427	100,9	0,16	934	1150	200	1,44	-	-
БрО10Ц2	8,5	17,3	55,3	381	98,0	0,155	1015	1120-1150	-	1,45-1,54	7	-
БрО8Ц4	8,8	16,6	68,2	355,9	98,0	0,135	1000	1100-1150	-	1,40-1,54	54	-
БрО8С12	9,1	17,1	-	-	73,5	-	940	1150	-	1,4	45	-
БрО5С25	-	17,6	58,6	-	68,6	-	940	1150	-	1,5	40	-
БрО6Ц6С3	8,82	17,1	75,4	-	88,2	0,09	967	1150	-	1,6	40	-
БрО8Н4Ц2	8,86	17,61	-	-	-	-	810	-	-	-	-	-

Таблица 2.50. Механические свойства литейных оловянных бронз [4, 20, 21, 25]

Марка бронзы	Способ литья*	σ _в		σ _т	σ ₋₁ , МПа, при N циклов	KCU, кДж/м ²	δ		ψ %	HB	Коэффициент трения в паре со сталью	
		МПа	МПа				8	5			со смазкой	без смазки
БрО3Ц7С5Н	П	175	-	-	-	-	8	-	-	59	-	0,24
	К	205	176	115 при 20·10 ⁶	-	-	5	-	-	59	0,028	-
БрО3Ц2С5	П	175	-	-	-	-	8	-	-	59	-	-
	К	205	-	-	-	-	5	-	-	59	-	-
БрО17Ц4С4	П	145	-	-	-	-	5	-	-	59	-	-
	К	145	-	-	-	-	6	-	-	59	-	-
БрО5Ц5С5	П	145	-	-	-	-	6	-	-	59	0,016	0,26
	К	175	-	-	205	-	4	-	-	59	-	-
БрО3,5Ц7С5	П	145	-	-	-	-	6	-	-	59	-	-
	К	175	-	-	-	-	4	-	-	59	-	-
БрО10	П	215	175	175	-	90	3-10	10-14	69-79	0,0056	0,17	-
	К	295	-	185 при 20·10 ⁶	-	295	3-10	10	108	-	-	-
БрО19	К	295	175	175	-	41	0,5	-	157	0,005	0,4	-
БрО16С5	К	245	-	-	-	-	0,5	-	118	-	-	-
БрО10Ф1	П	195	135	135	-	59	3	3	79-98	0,008	0,15	-
	К	245-295	195	195	-	88	3-10	10	88-118	-	-	-
БрО10Ц2	П	195-245	175	175	110 при 20·10 ⁶	98	8	10-14	69	0,008-0,06	0,16-0,20	-
	К	195-245	-	-	-	147	5	-	88	-	-	-
БрО8Ц4	П	195	115	115	-	186	6-15	8-12	64	0,006	0,3	-
	К	245	-	-	-	245	4-10	-	74-84	-	-	-
БрО8С12	П	145-175	100	100	-	98-137	3-8	-	69-98	0,005	0,1	-
	К	145-195	115	115	-	-	-	-	79-118	-	-	-
БрО5С25	П	115-135	80-100	-	-	78	4-6	7	44-54	0,004	0,14	-
	К	135-175	-	-	-	98-196	6-8	12	54-64	-	-	-
БрО6С6Ц3	П	145-195	-	-	-	225	8-12	-	59	0,009	-	-
	К	175-215	80-195	80-195	-	294	4-8	8	64-74	-	0,16	-
БрС30	К	74	45	45	-	-	5	34	>24	-	-	-
БрС60Н2,5	К	>29	-	-	-	-	>5	-	>13	-	-	-
БрО8Н4Ц2	П	265	175	175	150 при 20·10 ⁶	-	14	-	79	-	-	-
	К	345	-	-	-	-	16	-	79	-	-	-
БрО10С12Н3	К	245	-	-	-	-	5	-	74	0,02	0,38	-

* П – литье в песок; К – литье в кокиль.

При комнатной температуре кислород и сухие сернистый газ, газогалогены или их водородные соединения практически не влияют на оловянные бронзы. При высоких температурах коррозия в газогалогенах значительно возрастает. Скорость коррозии в сернистом газе при наличии влаги достигает $2,51 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Значительна скорость коррозии оловянных бронз и во влажных парах сероводорода при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ $1,31 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Скорости коррозии оловянных бронз в различных средах приведены в табл. 2.51.

Таблица 2.51. Скорость коррозии оловянных бронз в различных средах, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Марка бронзы	Морская вода	H_2SO_4^*		
		10 %-ная	45 %-ная	55 %-ная
БрО10	0,016	170/990	-/354	52,5/296
БрО5	0,019	-	-	-
БрО10Ц2	0,17	146/650	-/325	22/192
БрОС10-15	0,08	-	-	-
БрОФ6,5-0,4	0,04	212,5/746	-/358	40/217
БрОФ4-0,25	0,03	-	-	-
БрОЦ4-3	0,022	-	-	-
БрО4Ц4С2,5	0,028	-	-	-
БрО6Ц6С3	0,028	204/733	-/292	17/233
БрО6Ц3Н6	0,005	-	-	-

* В числителе – при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, в знаменателе – при $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Безоловянные бронзы. По своим свойствам эти бронзы не уступают, а часто превосходят оловянные бронзы, поэтому их широко применяют в машиностроении.

Безоловянные бронзы, обрабатываемые давлением (ГОСТ 18175–78). Алюминиевые бронзы (двух- и многокомпонентные) имеют большое распространение в машиностроении. Алюминий растворяется в меди, образуя α -твердый раствор замещения с пределом растворимости 9,4 %. Двойные алюминиевые однофазные бронзы (БрА5, БрА7, БрА10) отличаются высокой прочностью и пластичностью, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Предназначены они для упругих элементов – пружин, мембран, сильфонов, деталей, работающих в морской среде. Алюминиевые бронзы морозостойки, не магнитны, не дают искры при ударах, а по коррозионной стойкости превосходят латуни и оловянные бронзы. Вместе с тем эти сплавы плохо поддаются пайке 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. Алюминиево-железные бронзы, например БрАЖ9-4, для улучшения прочностных характеристик после

закалки при 950 °С подвергают старению при 250–300 °С в течение 2–3 ч. Эти бронзы применяют для шестерен, червяков, втулок, седел клапанов, гаек, нажимных винтов в основном в авиационной промышленности. Никель повышает механические свойства, жаростойкость, температуру рекристаллизации, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства и устойчивость при низких температурах алюминиевых бронз. Алюминиево-железоникелевые бронзы используют для направляющих втулок, клапанов, шестерен и других деталей ответственного назначения в основном в авиационной промышленности. В алюминиевых бронзах марганец улучшает технологические характеристики и коррозионную стойкость. Бронзы, содержащие марганец, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Применяют их для червячных винтов, шестерен, втулок, в морском судостроении для деталей, работающих при температурах 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 при 750–790 °С, старение – при 300–325 °С. Добавки никеля, кобальта или железа способствуют замедлению скорости фазовых превращений 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 применяют для пружин, мембран, пружинящих деталей, в часовой промышленности.

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

Кремниевые бронзы обычно содержат никель или марганец. Эти сплавы отличаются высокими механическими, упругими и антифрикционными свойствами, не теряют пластичности при низких температурах. Кремниевые бронзы хорошо паяются, обрабатываются давлением при низких и высоких температурах. Они не магнитны и не дают искры при ударах. Применяют их для антифрикционных деталей, пружин, подшипников, в морском судостроении, для сеток, решеток, испарителей, направляющих втулок. Составы, механические и физические свойства, в том числе при низких температурах, безоловянных бронз, обрабатываемых давлением, приведены в табл. 2.52–2.55. Виды и свойства круглого и плоского проката из безоловянных бронз даны в табл. 2.56, 2.57.

Литейные безоловянные бронзы (ГОСТ 493–79). Эти бронзы характеризуются высокой прочностью, хорошими антифрикционными и коррозионными свойствами. Применяют их 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. Составы и свойства литейных безоловянных бронз приведены в табл. 2.58–2.60.

Таблица 2.52. Химический состав безоловянистых бронз, обрабатываемых давлением, % (мас.)

Марка бронзы	Основные элементы (остальное Cu)							Примеси, не более						
	Al	Fe	Mn	Ni	Другие	Sn	Si	Pb	P	Fe	Zn	Прочие	Всего	
БрА5	4-6	-	-	-	-	0,1	0,1	0,03	0,01	0,5	0,5	0,5 Mn	1,1	
БрА7	6-8	-	-	-	-	0,1	0,1	0,03	0,01	0,5	0,5	0,5 Mn	1,1	
БрАМц9-2	8-10	-	1,5-2,5	-	-	0,1	0,1	0,03	0,01	0,5	1	-	1,5	
БрАМц10-2	9-11	-	1,5-2,5	-	-	0,1	0,1	0,03	0,01	0,5	1	-	1,7	
БрАЖ9-4	8-10	2-4	-	-	-	0,1	0,1	0,01	0,01	-	1	0,5 Mn	1,7	
БрАЖМц10-3-1,5	9-11	2-4	1-2	-	-	0,1	0,1	0,03	0,01	-	0,5	-	0,7	
БрАЖН10-4-4	9,5-11	3,5-5,5	-	3,5-5,5	-	0,1	0,1	0,02	0,01	-	0,3	0,3 Mn	0,6	
БрБ2	-	-	-	0,2-0,5	1,8-2,1 Be	-	0,15	0,005	-	0,15	-	0,15 Al	0,5	
БрБНТ1,9	-	-	-	0,2-0,4	1,85-2,1 Be; 0,1-0,25 Ti	-	0,15	0,005	-	0,15	-	0,15 Al	0,5	
БрБНТ1,9Mг	-	-	-	0,2-0,4	1,85-2,1 Be; 0,1-0,25 Ti; 0,07-0,13 Mg	-	0,15	0,005	-	0,15	-	0,15 Al	0,5	
БрКМц3-1	-	-	1-1,5	-	2,7-3,5 Si	0,25	-	0,03	-	0,3	0,5	0,2 Ni	1	
БрКН1-3	-	-	0,1-0,4	2,4-3,4	0,6-1,1 Si	0,1	-	0,15	-	0,1	0,1	0,02 Al	0,4	
БрМц5	-	-	4,5-5,5	-	-	0,1	0,1	0,03	0,01	0,35	0,4	-	0,9	
БрАЖНМц9-4-4-1	8,8-10	4-5	0,5-1,2	4-5	-	0,1	0,1	0,02	0,01	-	0,5	-	0,7	

Таблица 2.53. Физические свойства и технологические характеристики безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [4, 11, 25]

Бронза	$t_{\text{пл}}$, °C	γ , т/м ³	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ , при 20 °C	λ , Вт/(м·°C)	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м	E , ГПа	σ_c , Дж/(кг·°C)	Температура, °C			Обрабатываемость резанием, %
								горячей обработки	отжига	нагревом-пературно-го отжига	
БрА5	1056	8,2	18,2	88–104,7	0,099	102,9	–	750–880	600–700	–	20
БрА7	1040	7,8	17,8	79,5	0,11	117,6	–	750–880	600–760	275	20
БрАЖ9-4	1040	7,5	16,2	58,6	0,123	110,7	423	750–850	700–750	–	20
БрАЖц10-3-1,5	1045	7,5	16,1	58,6	0,189	98,0	–	750–850	650–750	–	20
БрАЖН10-4-4 состаренная при 400 °C	1040	7,5	17,1	75,4	0,193	112,7	–	800–900	700–750	–	20
БрАМп9-2	1060	7,6	17,0	71,2	0,11	90,2	461	800–850	650–750	–	20
БрБ2: мягкая	955	8,2	16,6	83,7	0,1	114,7	419	750–800	530–650	–	20
закаленная при 760–780 °C и состаренная при 320 °C, 10 ч	955	8,23	16,6	104,7	0,068	128,4	–	750–800	–	–	20
деформированная	955	8,23	16,6	75,4	–	–	–	750–800	–	–	20
БрБНТ1,9: мягкая	860	8,3	16,5	–	–	–	–	780–800	530–650	–	20
закаленная при 760–780 °C и состаренная при 310–320 °C, 10 ч	860	8,3	16,5	100,5	0,09	127,0	–	–	–	–	20
БрБНТ1,7: мягкая	865	8,2	17,0	–	–	–	–	780–800	650–700	–	20
закаленная при 755–775 °C и состаренная при 320–330 °C, 10 ч	865	8,2	17,0	96,3	0,09	125,4	–	–	–	–	20
БрКМц3-1	970	8,4	18	37,7	0,15	112,7	377	800–850	600–750	275	30
БрКН1-3 закаленная при 850 °C и состаренная при 450 °C, 10 ч	1050	8,6	16,1	104,7	0,046	140,1	–	890–910	–	–	–
БрМц5	1007	8,6	20,4	41,9	0,143	102,9	–	800–850	–	700–750	20

Таблица 2.54. Механические свойства безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [4, 17, 20, 21]

Бронза	σ_b	σ_T	σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ	ψ	НВ	$KCU, 2$ кДж/м	Коэффициент трения в паре со сталью	
	МПа			%				со смаз- кой	без смаз- ки
БрА5: литая в кокиль мягкая твердая	275	68	—	55	48	64	1570	0,007	0,3
	370	155	—	65	70	59	1080	—	—
	785	490	130 при $100 \cdot 10^6$	4	—	196	—	—	—
БрА7: литая в кокиль мягкая твердая горячекованая	295	245	—	45	—	69	1470	0,012	—
	410–490	—	—	65–75	75	69	—	—	—
	970	—	153 при 10^6	2–10	40	157–220	—	—	—
	410–490	—	153 при 10^6	60–70	70–75	60–78	—	—	—
БрАЖ9-4: литая в кокиль мягкая твердая	295–390	195	—	10–20	3	120–137	620	0,004	0,18
	390–490	—	—	35–45	—	98–120	—	—	—
	490–689	345	206 при $40 \cdot 10^6$	4–6	—	157–196	—	—	—
БрАЖМц10-3-1,5: литая мягкая твердая	490	155	—	20	25	—	590–780	0,012	—
	390–490	—	—	20–30	55	123–137	—	—	0,21
	590–690	185	275 при $15 \cdot 10^6$	9–12	—	157–196	—	—	—
БрАЖН10-4-4: литая мягкая твердая	750	295	—	10	12	196	295–390	0,011	0,23
	440–590	—	—	35–45	45	142	410	—	—
	735–815	—	345 при $50 \cdot 10^6$	9–15	11	176–225	—	—	—
БрАМц9-2: литая мягкая твердая	390–490	195	—	20	—	88–118	685	0,006	0,18
	700	490	206 при 10^6	4–5	—	167	—	—	—
	390	235	—	25	—	157	—	—	—
БрМц5: литая мягкая твердая	245	145	—	30	—	69	1960	0,013	0,7
	295–350	—	—	35–45	50	75	—	—	—
	490–590	490	—	2	—	157	—	—	—
БрБ2: мягкая твердая термообработанная литая	390–590	245–349	—	30–50	65	127–147	—	—	—
	785	860	185 при $100 \cdot 10^6$	2–4	—	—	—	—	—
	1370	1250	—	1–2	—	343–392	685–1123	0,05	—
	—	—	—	—	46	137	655	0,016	—

Бронза	σ_b	σ_T	σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ	ψ	НВ	KCU , кДж/м ²	Коэффициент трения в паре со сталью	
	МПа			%				со смаз- кой	без смаз- ки
БрБ2,5: литая термообработанная	440	—	—	30	42	113	—	—	—
	1220	1080	—	2	—	390	—	—	—
БрБНТ1,9: мягкая твердая термообработанная	390–590	—	—	30–50	70	83	—	—	—
	590–880	—	—	1–3	—	127	—	—	—
	1220	980	—	2,5	—	333	—	—	—
БрБНТ1,7: мягкая твердая термообработанная	390–490	—	835 при 10^6	50	75	—	—	—	—
	590–880	—	—	—	—	—	—	—	—
	1130	—	3530 при 10^6	3,5	—	—	—	—	—
БрКМц3-1: литая мягкая твердая	340	100	108 при 10^8	25	—	93	1470	0,013	0,4
	340–390	155	98 при 10^8	55–60	—	79	—	—	—
	685	410	206 при 10^8	6–13	—	190	—	—	—
БрКН1-3: мягкая твердая термообработанная закаленная, дефор- мированная и со- старенная	340	145	—	30	70	74	—	—	0,7
	610	590	206 при $20 \cdot 10^6$	6	50	167	—	0,017	—
	885	540	—	8	20	176	—	—	—
	835	785	285 при $20 \cdot 10^6$	10	30	216	390–980	—	—

Таблица 2.55. Механические свойства безоловянных бронз при низких температурах [20, 21]

Бронза	t , °C	σ_b	σ_T	δ	ψ	KCU , кДж/м ²
		МПа		%		
БрА5	17	412	—	61	70	—
	–196	568	—	81	76	—
	–253	637	—	83	72	—

Бронза	t, °C	σ_b	σ_T	δ	ψ	КСУ, кДж/м ²
		МПа		%		
БрА7	20	529	182	26	29	—
	-10	529	184	33	30	—
	-40	539	185	35	36	—
	-80	566	186	31	30	—
	-120	607	190	32	31	—
	-180	662	201	29	30	—
БрБ2,5 закаленная	20	524	167	36	50	—
	-80	598	201	48	54	—
	-180	769	343	41	57	—
БрБ2,5 термообработанная	20	1282	865	2,6	5	—
	-10	1303	872	0,8	9	—
	-40	1293	813	0,4	5	—
	-80	1392	1015	0,4	5	—
	-120	1372	960	0,4	4	—
	-180	1470	1370	3	6	—
БрКМц3-1 холоднотянутая	25	510	—	39,8	75,1	—
	0	523	—	31,2	70,4	—
	-80	568	—	31,7	72,4	—
	-190	690	—	36,2	72,5	—
БрАМц9-2 отожженная после прессования	20	529	147	51	—	129
	-20	539	196	45	—	129
	-40	549	196	48	—	129
БрАЖ9-4 отожженная после прессования	20	602	255	31	—	32,3
	-20	622	274	27	—	29,4
	-40	632	284	27	—	26,5

Таблица 2.56. Круглый прокат из безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [12, 25]

Полуфабрикат	d, мм	σ_b , МПа	δ , %	НВ
Прутки круглые (ГОСТ 1 628–78) из: БрАЖ9-4 прессованной БрАМц9-2: тянутой прессованной БрАЖМц10-3-1,5 прессованной	5–40; 16–160	> 539	> 15	108–176
	5–40; 16–160	> 539	> 12	—
	5–40; 16–160	> 470	> 15	—
	30–100	> 588	> 12	127–196
Прутки квадратные и шестигранные (ГОСТ 1 628–78) из: БрАЖН10-4-4 прессованной БрКМц3-1: прессованной тянутой катаной БрКН1-3 прессованной	5–36*	> 637	> 5	167–196
		> 343	> 20	—
		> 470	> 15	—
		> 392	> 15	—
		> 490	> 10	—

Полуфабрикат	d , мм	σ_p , МПа	δ , %	НВ
Прутки (ГОСТ 15 835–70) из БрБ2: мягкой твердой закаленной и холоднодеформированной прессованной термообработанной и тянутой состаренной после закалки и холодной деформации	5–40; 42–100	392–588	>25	98–147
		637–882	>1	147
		>441	>20	–
		1078	>2	314
		1176	>2	333
Проволока круглая, квадратная (ГОСТ 5 222–72) из БрКМц3-1 твердой	0,1–10	> 833	>1	–
Проволока (ГОСТ 15 834–77) из БрБ2: мягкой твердой термообработанной	0,06–12 0,06–12	392–637	>20	–
		735–1176	–	–

* Сторона квадрата или шестигранника.

Таблица 2.57. Плоский прокат из безоловянных бронз,
обрабатываемых давлением [12, 20, 21]

Полуфабрикат	Размеры*, мм	σ_p , МПа	δ , %	НВ
Полосы, ленты (ГОСТ 1789–70) из: БрБ2: мягкой твердой термообработанной твердой термообработанной БрБНТ1,9: мягкой твердой термообработанной твердой термообработанной БрБНТ1,7: твердой твердой термообработанной	(0,02–6) × (10–300) × × 2000	392–588	30	<127,4
		588–931	2,5	<167,0
		1078–1470	2	<323,4
		1127–1568	1,5	<352,8
		392–588	30	<117,6
		588–931	2,5	156,8
		1078–1470	2	323,4
		1127–1568	1,5	352,8
		588–931	2,5	147,0
		1078–1470	2	333,2
Ленты для пружин (ГОСТ 1048–79) из: БрА5: мягкой полутвердой твердой БрА7: мягкой термообработанной твердой особо твердой	3,1 × (200–300)	>274	>33	–
		>480	>10	–
		>588	>2,5	–
		393	35	–
		>539	10	–
		539–735	5	–
		>735	–	–
		>735	–	–
		>735	–	–
		>735	–	–
Полосы, ленты (ГОСТ 1595–71) из БрАМц9-2: горячекатаной мягкой твердой	(1–22) × (10–300) × × (1000–1500)	>441	>15	–
		>441	>18	–
		>588	>5	–

Полуфабрикат	Размеры*, мм	σ_b , МПа	δ , %	НВ
Полосы и ленты (ГОСТ 4748–92) из БрКМцЗ-1: мягкой полутвердой твердой особо твердой	(0,05–10) × (10–300) × × (500–5000)	> 343	> 35	–
		470–588	> 10	–
		588–784	> 5	–
		> 784	–	–

* Толщина × ширина × длина.

Таблица 2.58. Химический состав безоловянных литейных бронз, % (мас.)

Марка бронзы	Основные элементы (остальное Cu)	Примеси, не более								
		As	Sb	Sn	Si	Pb	P	Zn	Прочие	Всего
БрА9Мц2Л	8,0–9,5 Al; 1,5–2,5 Mn	0,05	0,05	0,2	0,2	0,1	0,1	1,5	1,0 Ni; 1,0 Fe	2,8
БрА10Мц2Л	9,6–11,0 Al; 1,5–2,5 Mn	0,05	0,05	0,2	0,2	0,1	0,1	1,5	1,0 Fe; 1,0 Ni	2,8
БрА9ЖЗЛ	8,0–10,5 Al; 2,0–4,0 Fe	0,05	0,05	0,2	0,2	0,1	0,1	1,0	0,5 Mn; 1,0 Ni	2,7
БрА10ЖЗМц2	9,0–11,0 Al; 2,0–4,0 Fe; 1,0–3,0 Mn	0,01	0,05	0,1	0,1	0,3	0,01	0,5	0,5 Ni	1,0
БрА10Ж4Н4Л	9,5–11,0 Al; 3,5–5,5 Fe; 3,5–5,5 Ni	0,05	0,05	0,2	0,2	0,05	0,1	0,5	0,5 Mn	1,5
БрА11Ж6Н6	10,5–11,5 Al; 5,0–6,5 Fe; 5,0–6,5 Ni	0,05	0,05	0,2	0,2	0,05	0,1	0,6	0,5 Mn	1,5
БрА9Ж4Н4Мц1	8,8–10,0 Al; 4,0–5,0 Fe; 0,5–1,2 Mn; 4,0–5,0 Ni	0,05	0,05	0,2	0,2	0,05	0,03	1,0	–	1,2
БрС30	27–31 Sn	0,1	0,3	0,1	0,02	–	0,1	0,1	0,5 Ni; 0,25 Fe	0,9
БрА7Мц15ЖЗН2Ц2	6,6–7,5 Al; 2,5–3,5 Fe; 14,0–15,5 Mn; 1,5–2,5 Ni; 1,5–2,5 Zn	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,02	–	0,05 C	0,5
БрСуЗНЗЦЗС20Ф	3,0–4,0 Ni; 18–22 Pb; 0,15–0,3 P; 3,0–4,0 Zn; 3–4 Sb	0,1	–	0,5	0,02	–	–	–	0,02 Al; 0,3 Fe; 0,025 Bi	0,9

Таблица 2.59. Механические свойства и коррозионная стойкость легких безоловянных бронз [4, 11, 21]

Марка бронзы	σ_s		σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ	ψ	$KCU, \frac{кгДж}{м^2}$	НВ	Коэффициент трения в паре со сталью		$\nu_{\text{выр}} \cdot 10^3, \frac{г}{(м^2 \cdot с)}$	
	МПа							со смазкой	без смазки		10%-ная H_2SO_4
БрА10ЖЗМп2	490	157	275 ^{е1} при $15 \cdot 10^6$	20	25	686	98	0,012	-	113	41,7
БрА10Ж4Н4Л	590	294	343 ^{е2} при $50 \cdot 10^6$	10	12	490	167	0,011	0,23	24,2	7,5
БрА9Мц2Л	440	196	137 при $20 \cdot 10^6$ 98 ^{е1} при $40 \cdot 10^6$	20	-	686	98	0,006	0,18	-	0,87-7,81 ^{е3}
БрА10Мп2Л	490	-	-	12	-	-	108	-	-	-	-
БрА9Ж4	390	196	137 при $20 \cdot 10^6$ 108 ^{е1} при $40 \cdot 10^6$	10-20	30	588	98	0,004	0,18	16,7	10,4
БрА7Ж1,5С1,5	290	-	-	18	-	-	98	-	-	-	-
БрА11Ж6Н6	590	-	-	2	-	-	245	-	-	-	-
БрС30	74,5	39	-	5	7	76,5	28	0,009	0,165	-	-
БрС60Н2,5	-	-	27,5 при 10^6	-	-	-	-	-	-	-	-
БрА9Ж3Л	490	196	108 при $40 \cdot 10^6$ 127 ^{е1} при $20 \cdot 10^6$	10-12	-	196	98	0,004	0,18	-	-
БрСу6С12Ф0,3	147	-	-	2	-	-	59	-	-	-	-
БрСу6Н2	255	-	-	6	-	-	80	0,013	-	-	-
БрСу6Ф1	216	-	-	5	-	-	78	-	-	-	-
БрСу3НЗЦЗС20Ф	167	-	-	2	-	-	64	-	-	-	-
БрА9Ж4Н4Мц1	587	-	-	12	-	-	157	-	-	-	-
БрА7Мц15ЖЗН2Ц2	607	-	-	18	-	-	64	-	-	-	-

^{е1} В морской воде.

^{е2} В морском тумане.

^{е3} Миллиметров в год.

Таблица 2.60. Физические свойства и технологические характеристики литейных безоловянных бронз [4, 11, 21]

Марка бронзы	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{т/м}^3$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$E, \text{ГПа}$	Линейная усадка, %	Жидкотекучесть, см	Обрабатываемость резанием, %
БрА10ЖЗМц2	1045	7,5	16	58,6	0,189	98	2,4	70	20
БрА10Ж4Н4Л	1040	7,5	17,1	75,4	0,193	112,7	1,8	66–85	20
БрА9Мц2Л	1060	7,6	17	71,2	0,11	90,28	1,7	48	20
БрА10Мц2Л	–	–	–	–	–	–	–	–	–
БрА9Ж4	1040	7,6	16,32	58,6	0,123	110,7	2,49	85	20
БрА7Ж1,5С1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
БрА11Ж6Н6	–	–	–	–	–	–	–	–	–
БрС30	954	9,54	18,4	142,4	–	75,5	–	–	–
БрС60Н2,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
БрА9ЖЗЛ	1040	7,6	16	58,6	0,11	120,5	–	–	–
БрСу6С12Ф0,3	–	8,0	17,8	46	–	78,4	1,3	–	–
БрСу6Н2	1065	8,7	17,9	62,8	–	93,1	–	22	–
БрСу6Ф1	–	8,5	17,3	4,6	–	93,10	1,3	35	–
БрСу3НЗЦС20Ф	–	9,1	17,4	54,4	–	73,5	1,25	30	–

2.2.3. Медно-никелевые сплавы

К медно-никелевым сплавам (ГОСТ 492–73) 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 конструкционным относятся коррозионно-стойкие и высокопрочные сплавы типа мельхиор, нейзильбер и куниаль. В качестве дополнительных легирующих элементов в них добавляют Mn, Zn, Fe, Co, Al, Pb, Cr, Ce, Mg, Li.

Мельхиоры (МНЖМц30-1-1, МН19) имеют высокую коррозионную стойкость в различных средах: в пресной и морской воде, в органических кислотах, растворах солей, 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 элементами являются никель и цинк, называются нейзильберами (МНЦ15-20, МНЦС16-29-1,8). Они представляют собой твердые растворы на основе меди. Легирование цинком приводит к повышению механических свойств медно-никелевых сплавов, приданию им красивого серебристого цвета и удешевлению. Нейзильберы отличаются высокой коррозионной стойкостью – они не окисляются на воздухе, сравнительно устойчивы в органических кислотах и растворах солей. Нейзильберы обрабатывают давлением в горячем (за исключением свинцового нейзильбера) и холодном состоянии. Для улучшения обработки резанием в них вводят небольшое количество свинца.

Сплавы на основе тройной системы Cu–Ni–Al называются кунниалями (МНА13-3, МНА6-1,5). Эти сплавы отличаются высокими механическими и упругими свойствами, коррозионной стойкостью, устойчивостью при низких температурах. Обрабатывают их давлением в горячем состоянии. Согласно диаграмме состояния предел растворимости α -твердого раствора на основе меди резко уменьшается с понижением температуры. Поэтому кунниали относятся к дисперсионно-твердеющим сплавам. Для их упрочнения используют термическую обработку по режиму: закалка 900–1000 °С в воде + старение 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 относятся сплавы МН95-5 и МНЖ5-1, обладающие высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью. Они не склонны к коррозионному растрескиванию.

Составы, физические и механические свойства, технологические характеристики и области применения медно-никелевых сплавов, а также выпускаемые из них полуфабрикаты приведены в табл. 2.61–2.67.

Таблица 2.61. Химический состав конструкционных медно-никелевых сплавов, % (мас.)

Марка сплава	Основные элементы (остальное Cu)	Примеси, не более								
		Fe	Si	Mn	Pb	S	C	P	Прочие	Всего
МНЖМц 30-1-1	0,5–1,0 Fe; 0,5–1,0 Mn; 29,0–33,0 (Ni +Co)	–	0,15	–	0,05	0,01	0,1	0,006	–	0,4
МНЖ5-1	1,0–1,4 Fe; 0,3–0,8Mn; 5,0–6,5 (Ni +Co)	–	0,15	–	0,005	0,01	0,03	0,04	0,002 Bi; 0,5 Zn; 0,01 As; 0,1 Sn; 0,005 Sb;	0,7
МН19	18,0–20,0 (Ni +Co)	1,0	0,15	0,3	0,005	0,01	0,05	0,01	0,05 Mg; 0,002 Bi; 0,01 As; 0,005 Sb	1,5
МНЦ 15-20	18–22 Zn; 13,5–16,5 (Ni +Co)	0,5	0,15	0,3	0,02	0,005	0,03	0,005	0,05 Mg; 0,002 Bi; 0,01 As; 0,002 Sb	0,9
МНА13-3	2,3–3,0 Al; 12,0–15,0 (Ni +Co)	1,0	–	0,5	0,002	–	–	–	–	1,9
МНА6-1,5	1,2–1,8 Al; 5,5–6,5 (Ni +Co)	0,5	–	0,2	0,002	–	–	–	–	1,1
МН95-5	4,4–5,0 (Ni +Co)	0,2	–	–	0,01	0,01	0,03	0,02	0,002 Bi; 0,01 As; 0,005 Sb	1,0
МНЦ16-29-1,8*	1,6–2,0 Pb; 15,0–16,5 (Ni +Co); 51–55 Cu	–	–	–	–	–	–	–	–	1,0

* В свинцовом нейзильбере остальное Zn.

Таблица 2.62. Физические свойства и технологические характеристики конструкционных медно-никелевых сплавов [4, 20, 21, 25]

Марка сплава	$t_{\text{пл}}^{\circ}\text{C}$	γ , т/м ³	λ , Вт/(м·°C)	c , Дж/кг·°C	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м	$\alpha_p \cdot 10^3$, °C ⁻¹	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ при 20 °C	E, ГПа	Температура, °C				Обработка весомость резанием, %
									горячей обработки	отжига	низкотемпе- ратурного отжига	рекристал- лизации	
МНЖМц30-1-1	$\frac{1230}{1170}$	8,9	37,3	-	0,42	1,2	16	142,1	860-950	750-810	250-300	450	20
МН19	$\frac{1190}{1130}$	8,9	38,5	-	0,287	0,29	16	137,2	900-1030	600-780	-	420	-
МНЦ15-20	$\frac{1080}{-}$	8,76	$\frac{27,2}{35,6}$	397,7	0,256	0,2	16,6	137,2	800-970	700-750	250-300	400-450	20
МНЦ16-29-1,8	$\frac{1120}{965}$	8,82	-	-	-	-	-	124,5	-	700-750	250	400	50
МНА13-3	$\frac{1183}{1120}$	8,5	-	-	-	-	-	-	900-1000	-	-	600	-
А6-1,5	$\frac{1145}{-}$	8,7	-	-	-	-	-	-	850-900	-	-	600	-
МН95-5	$\frac{1120}{1086}$	8,7	100,5	376,5	0,08	1,5	16,4	-	950-1000	650	-	350	-
МНЖ5-1	$\frac{1120}{-}$	8,7	129,8	-	0,07	1,5	16,4	-	900-1000	800-850	-	350	-

* В числителе – ликвидуса, в знаменателе – солидуса.

Таблица 2.63. Механические свойства и области применения конструкционных медно-никелевых сплавов [4, 20, 21, 25]

Сплав	σ_s	σ_t	σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ , %		ψ	KCU, кДж/м ²	HB	Область применения
				25-40	3-9				
МНЖМц30-1-1: мягкий	343-441	-	176 при $40 \cdot 10^6$	25-40	50	882* ¹	59-69	Теплообменные аппараты в морском судостроении (конденсаторные трубы и термостаты), медицинский инструмент, детали точной механики и хи-	
твердый	539-637	-	216 при $40 \cdot 10^6$	3-9	-	-	98		

Сплав	σ_s МПа		σ_r	σ_{-1} , МПа, при N циклов	δ %	ψ	КСУ, кДж/м ²	НВ	Область применения
	σ_s	σ_r							
МН19: мягкий твердый	294-392	-	-	118 при 100·10 ⁶	35-40	76	-	69	мической промышленности, штампованные детали, чеканка
	490-784	392-588	-	-	3-5	-	-	118	
МНЦ15-20: мягкий твердый литой	372-441	137	-	118-137 при 100·10 ⁶	35-50	-	-	69	Детали приборов в электро- технике, радиотехнике, меди- цине, armатуре, техническая посуда, точная механика
	588-784	-	-	-	2-4	5,2 32	-	157-172	
МНЦ16-29-1,8: мягкий твердый	343-441	-	-	-	40-45	-	-	-	Детали часовой промышлен- ности и приборов
	588-686	-	-	-	2-4	-	-	-	
МН13-3: мягкий твердый	372-461	-	-	-	10-15	-	490	-	Изделия повышенной проч- ности в машиностроении
	882-931	-	-	-	2-5	-	-	255	
МН16-1,5: мягкий твердый	343-441	78,4	-	-	28-40	80	1176	-	Пружины ответственного на- значения, изделия электротех- нической промышленности
	637-735	-	-	-	4-7	50	-	206	
МН95-5: мягкий твердый	245-294	196	-	-	30-50	70	-	86	Изделия машиностроения
	441-490	343-392	-	-	2-6	-	-	-	
МНЖ5-1: мягкий твердый	216-255	-	-	-	50-60	-	-	-	Конденсаторные трубы, свар- ные конструкции в судо- строении
	390-490	-	-	-	5-10	-	-	-	
МН10: мягкий твердый	245-294	98-196	-	-	44-50	40	-	88-98 ^{*2}	То же
	490	294-392	-	-	2-8	-	-	37	

*1 В литом состоянии. *2 Твердость по Викерсу.

Таблица 2.64. Коррозионная стойкость конструкционных медно-никелевых сплавов [4, 21, 25]

Марка сплава	$v_{кор} \cdot 10^3, \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$						
	Пресная вода	Морская вода	Водяной пар	Морская атмосфера	Сельская атмосфера	50 %-ная HNO_3	10 %-ная H_2SO_4
МНЖМц30-1-1	30,5	30,5–132,1	2,54	1,12	0,36	6,4*	81,3
МН19	30,5	–	–	10,18	0,36	–	101,6
МНЖ5-1	–	9,93	–	–	–	–	–

* Миллиметров в сутки.

Таблица 2.65. Механические свойства медно-никелевых сплавов при низких температурах [12, 20, 21]

Сплав	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	σ_T	δ	ψ	
		МПа		%		
МП19 мягкий	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	
МНЦ15-20: холоднокатаный	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
МНА 6-1,5: мягкий	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	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

Были предложены новые дисперсионно-твердеющие сплавы на основе системы Cu–Ni для токоведущих пружин, работающих при высоких температурах (до 250 °C). Они имеют следующие составы, %: 1) 15–20 Ni; 3,5–4 Cr; 2,1–3 Mn; 0,01–0,5 V; 0,01–0,05 Ce, остальное Cu; 2) 4–4,5 Ni; 0,8–1,2 Si; 0,4–0,6 Cr; 0,7–1,1 Al; 0,3–0,6 Mg; 0,005–0,04 Li, остальное Cu. После термической обработки (заковки и старения) первый сплав имеет следующие свойства: твердость 370 HV, $\sigma_b = 1250$ МПа, $\delta = 3$ %; второй – твердость 310 HV, $\sigma_b = 1000$ МПа, $\sigma_{0,2} = 930$ МПа, $E = 130$ ГПа, электропроводность составляет 20 % от электропроводности меди.

Таблица 2.66. Плоский прокат из медно-никелевых сплавов [12, 21, 25]

Полуфабрикат	Размеры, мм	σ_p , МПа	δ , %
Полоса горячекатаная, холоднокатаная (ГОСТ 5063-73) из: МНЖМЦ30-1-1: мягкого твердого МН19: мягкого твердого МНЦ15-20: мягкого твердого особо твердого	(0,5-20)×(40-600)×(400-2000)	294	30
		392	3
		294	30
		392	3
		343	35
		539 637	1 1
Лента (ГОСТ 5187-70) из: МН19: мягкого твердого МНЦ15-20: мягкого полутвердого твердого особо твердого	(0,1-2)×(6-300)×5000	294	25
		392	2,5
		343	30
		441-539	4
		539-686	2
		686	-
Полосы из МНА6-1,5 термообработанного	-	539	3
Листы из МНЖ5-1 мягкого	4,5-22*	245	30

* Толщина.

Таблица 2.67. Круглый прокат из медно-никелевых сплавов [12, 21, 25]

Полуфабрикат	d , мм	σ_p , МПа	δ , %
Трубы (ГОСТ 10092-75) из МНЖМц30-1-1: мягкого полутвердого	10-35 (0,8-4)*	372	23
		490	10
Трубы (ГОСТ 17217-79) из МНЖ5-1: тянутого прессованного	6-275 (1-60)*	255	30
		225	25
Трубы из МН95: мягкого твердого	25-168	216	33
		284	-
Прутки из: МНЦ15-20 мягкого МНА13-3 прессованного МНЖ5-1 прессованного	6-50	294	30
	6-22	441	5
	23-30	392	7
	32-50	343	8
	60	686	7
	60	196	30
Проволока (ГОСТ 5220-78) из МНЦ15-20: мягкого полутвердого твердого	0,1-5,0	343	20
	0,1-5,0	441	4
	0,1-2,0	686-1078	-

* Толщина стенок.

Разработана принципиально новая группа сплавов типа нейзильбер с двухфазной ($\alpha + \beta$)-структурой, например Cu (15–20) % Ni 37,5 % Zn. К этим сплавам применяют обработку «микродулекс», которая заключается в закалке с последующей холодной деформацией с заданной степенью обжатия, определяющей возможность прохождения рекристаллизации при старении с одновременным выделением β -фазы. 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 [17].

Список литературы

1. *Адоян Г.А., Шевчук С.А.* Технология старения литых чугуновых деталей станков: Справочник. М.: Информационное агентство «Мобиле», 1998.
2. *Бунин К.П., Малиночка Я.И., Таран Ю.Н.* Основы металлографии чугуна. М.: Металлургия, 1969.
3. *Воробьев Ю.А., Рябов С.П.* Повышение точности отливок / ЦП НТО Машпром. М.: Машиностроение, 1980.
4. *Гершман И.С.* Латунни. Конструкционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1990.
5. *Гершман И.С., Буше Н.А.* Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // Трение и износ. 1995. Т. 16. № 1.
6. *Гини Э.Ч.* Прогноз некоторых тенденций развития литейного производства России // Литейное производство. 1995. № 11.
7. *Гини Э.Ч.* К вопросу о пластических свойствах серого чугуна // Машины и автоматизация литейного производства: Труды МВТУ № 87. М., 1975.
8. *Гиршович Н.Г.* Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М–Л.: Машиностроение. 1966.
9. *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди:* Справочник / М.Е. Дриц, Н.Р. Бочвар, Л.С. Гузей и др. М.: Наука, 1979.
10. *Конструкционные материалы:* Справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буже и др. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение. 1990.
11. *Мальцев М.В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1970.
12. *Машиностроительные материалы:* Справочник / Под ред. В.М. Раскатова. М.: Машиностроение, 1980.
13. *Машиностроение. Энциклопедия:* В 40 т. Т. II–2. Стали. Чугуны / Под ред. О.А. Банных, Н.Н. Александрова. М.: Машиностроение. 2000.
14. *Миронов А.Е.* О качестве бронзобаббитовых подшипников коленчатых валов дизелей тепловозов // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 6.
15. *Осинцев О.Е., Федоров В.Н.* Литейные медные сплавы // Приложение № 1 к журналу «Справочник». 2003. № 1.
16. *Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В. Захарченко, Ю.Н. Левченко, В.Г. Горенко.* Киев: Наукова Думка, 1986.

17. *Пастухова Ж.П., Рахматдт А.Г.* Пружинные сплавы цветных металлов. М.: Металлургия, 1984.
18. *Прейскурант № 25-01.* Оптовые цены на отливки, поковки и горячие штамповки. М.: Прейскурантиздат. 1989.
19. *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.
20. *Рубин М.Б., Бахарева В.Е.* Подшипники в судовой технике. Л.: Судостроение, 1987.
21. *Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В.* Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Металлургия, 1974.
22. *Солнцев Л.А., Зайденберг А.М., Малый А.Ф.* Получение чугунов повышенной прочности. Харьков: Выща школа, 1986.
23. *Чугун: Справочник / Под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова.* М.: Металлургия. 1991.
24. *Шебастинов М.П., Абраменко Ю.Е., Бех Н.И.* Высокопрочный чугун в автомобилестроении. М.: Машиностроение. 1988.
25. *Шпичинецкий Г.Е., Шпичинецкий Е.С.* Медь, никель и их сплавы: Справочник металлиста. М.: Машиностроение. 1976. Т. 2.

3. МАТЕРИАЛЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Триботехнические материалы используют в трущихся деталях различных механизмов и машин. Они осуществляют работу в условиях трения скольжения, качения, верчения, возвратно-поступательного движения и др. К этим материалам предъявляют определенные требования, гарантирующие достаточно надежную работу трибосопряжений. Они должны обеспечивать сопротивляемость износу, безаварийную работу, а в случае экстремальной ситуации обладать соответствующей живучестью. К триботехническим относятся антифрикционные, фрикционные, электротехнические и другие материалы.

3.1. 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 [54]. На участках фактического контакта шероховатых поверхностей действуют удельные нагрузки, определяемые в пределе 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 высокие деформации сдвига и при тяжелых режимах трения (повышенные скорости и нагрузки) возникают температуры (температурные всплески), вплоть до точки плавления материалов, находящихся в контакте. В результате материал поверхностных неровностей, непосредственно участвующих в трении, а также оксидные и адсорбированные пленки и расположенная между поверхностями смазка находятся в своеобразных миниатюрных химических реакторах с экстремальными параметрами (по нагрузкам, температурам и сдвиговым деформациям). В этих недолговечных (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.

Согласно ГОСТ 23 001–88, изнашивание представляет собой 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, вычисляемый в абсолютных или относительных единицах. В абсолютных единицах износ определяют 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 повышенной 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 23 001–88, согласно которому различают механическое изнашивание, происходящее в результате механических воздействий; коррозионно-механическое, когда помимо механических действуют химические или электрические воздействия, и абразивное, которое возникает 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 – эрозийное изнашивание.

Нередко детали машин работают в условиях кавитации. Изнашивание в этом случае, получившее название кавитационного [22], 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 токосъема. В этом случае возникает электроэрозийное изнашивание поверхностей трения в результате действия разрядов при прохождении электрического тока.

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

Наибольший урон сельскохозяйственным машинам, горнодобывающему оборудованию, дорожностроительным машинам и т. д. наносит абразивное (и коррозионно-абразивное) изнашивание. Закономерности абразивного изнашивания (рис. 3.1) установлены фундаментальными исследованиями М.М. Хруцова и М.А. Бабичева [72, 73]. От естественного абразива (главным образом частиц SiO_2) с твердостью 1000 HV_{0,1} 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, дополнительным наклепом поверхностных слоев, лазерной обработкой, нанесением поверхностных слоев различными методами (электрохимическими, плазменными, вакуумными ионно-плазменными и др.). Эффективно применение высоколегированных сталей (содержащих большое количество твердых карбидов), твердых сплавов, керамических материалов (например, корундовой керамики).

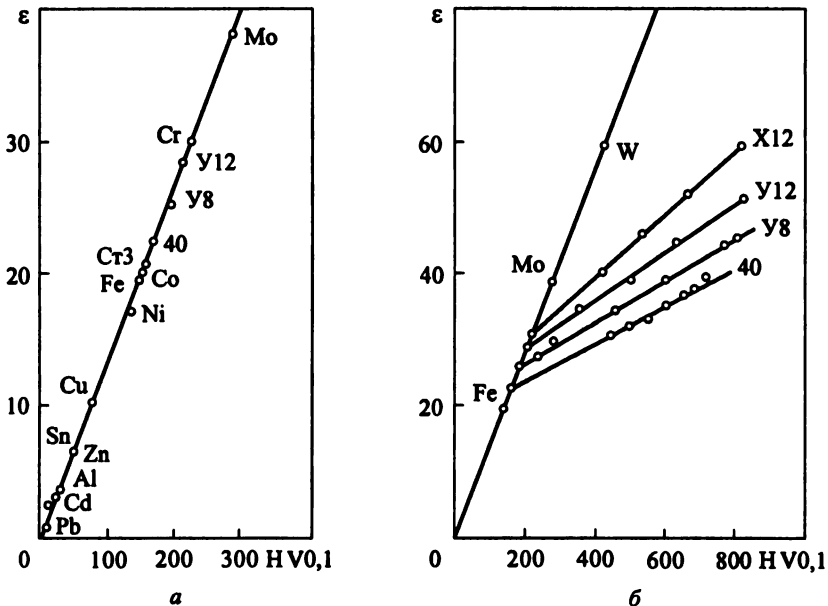


Рис. 3.1. Зависимости относительной износостойкости ϵ при абразивном изнашивании (испытания при трении о шлифовальную шкурку) от твердости чистых металлов и сталей в отожженном (а) и термически обработанном (б) состоянии

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 образования прочных связей между контактирующими поверхностями некоторого энергетического порога (энергии активации) [24, 55]. К рассмотрению механизма схватывания на микроуровне привлекают теорию дислокаций (дислокационные представления о природе схватывания), а в последние годы учитывают процессы развитой пластической деформации, включая теорию ротационных эффектов и термодинамики необратимых процессов [4, 76].

Явление схватывания при неблагоприятном соотношении механических свойств твердых тел, находящихся в контакте, приводит к образованию наростов («узлов схватывания»), задиров, заеданию, катастрофическому повреждению поверхностей трения и изнашиванию. Оно лежит также в основе так называемой фреттинг-коррозии [11] 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 противозадирных 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 (In, Cd, Sn, Ag, Cu, латуней и т. п.);

е) вводят мягкие составляющие (Pb, Sn) в антифрикционные сплавы (свинцовистые бронзы, алюминий-оловянные сплавы);

ж) используют материалы, выполняющие функции твердой смазки (графит, дисульфид молибдена и другие халькогениды 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 контртела низкой адгезионной способностью (полимерные материалы, естественная и модифицированная древесина, углеграфитовые антифрикционные материалы, рубин, другие оксидные керамики, алмаз).

Эффективность действия смазочных материалов (жидких и пластичных) в предотвращении проявления схватывания трущихся поверхностей может быть повышена введением в смазки поверхностно-активных, химически активных и полимерообразующих присадок, способствующих образованию на поверхностях прочных защитных пленок

непосредственно в процессе трения; введением в смазки 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 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 значительной мере такую роль выполняет кислород воздуха).

Закономерности изнашивания некоторых трибосистем рассмотрим на примере подшипников скольжения коленчатых валов различных двигателей (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Виды поврежденных подшипников скольжения [8]

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

В условиях жидкостного трения интенсивность изнашивания незначительна и износ большей частью происходит вследствие попадания абразивных частиц. Для трущихся узлов характерен режим смешанного трения, когда имеются участки как жидкостного, так и граничного трения. 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 безззорных подшипников скольжения грузовых вагонов. Несущую способность таких подшипников с учетом износа баббитового слоя и условий работы определяют по толщине масляного слоя, давлению и произведению ρv [7]. Результаты расчетов позволили установить допустимые нормы эксплуатации вагонных подшипников по износу баббитового слоя, определяемому по изменению его толщины в зависимости от нагрузки, скорости и первоначального диаметрального зазора.

При обнаружении повышенного износа шеек валов, подшипников и определении с помощью расчетов и соответствующих экспериментов наличия смешанного режима трения ищут пути перехода на жидкостный режим трения. В соответствии с диаграммой Герси-Штрибека (рис. 3.2) это возможно вследствие повышения вязкости

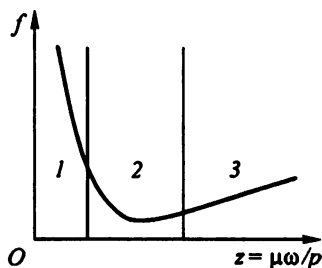


Рис. 3.2. Изменение коэффициента трения от комплексного параметра Зоммерфельда $z = \mu \omega / p$ (кривая Герси-Штрибека):

1 — зона граничной смазки; 2 — зона полужидкостной смазки; 3 — зона жидкостной смазки

Таблица 3.2. Области рационального применения антифрикционных сплавов для подшипников скольжения [8]

Сплавы	Условия работы			Рекомендуемые технологические и конструктивные факторы			
	P , МПа	v , м/с	$t_{см}$, °С	Толщина слоя сплава, мм	Точность пригонки подшипника, мм	Твердость НВ шейки	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	10	80	1,0	То же	–	»
	8–15	15	100	0,1–0,3	Тысячные доли	–	»
Цинковые, нанесенные на сталь	15–25	15	100	1,0	То же	300	Металлургический (прокатка или заливка)
Алюминиевые без мягкой составляющей, нанесенные на сталь	15–25	15	100	0,5	»	300	Металлургический (прокатка)
Цельнолитые алюминиевые с мягкой составляющей	15–20	15	100	–	»	200	–
Свинцовистая бронза, нанесенная на сталь	15–25	15	110	0,5	»	400	Металлургический (заливка или напекание)
Алюминиевые с мягкой составляющей, нанесенные на сталь	20–30	20	120	0,5	»	300	Металлургический (прокатка)

* Температура смазки.

смазки μ , угловой скорости ω и снижения давления p (участок 3). 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 режим жидкостного трения, устранить случаи задиrow шеек коленчатых валов и существенно поднять долговечность трущегося узла [16].

В тех случаях, когда не удается перевести работу трибосистемы в режим жидкостного трения, приходится изыскивать пути обеспечения устойчивой работы и при смешанном режиме. Это достигается подбором смазочных материалов (и присадок к ним), антифрикционных материалов и материалов цапф. При выборе смазочного материала надо ориентироваться на смазки, у которых переход из режима жидкостного трения в режим нарушения сплошности происходит при более высокой температуре. Последнее достигается введением в смазку определенного количества поверхностно-активных веществ (присадок), добавок различных металлических частиц (металлоплакирующие смазки), позволяющих в определенных условиях реализовать эффект избирательного переноса, а также других частиц, увеличивающих при контактировании поверхностей в режиме смешанного трения долю участков с твердой смазкой. Области рационального использования различных антифрикционных сплавов и материалов цапф представлены в табл. 3.2 [8]. Рекомендации по использованию различных металлов составлены с учетом технологических и конструктивных факторов. При этом учитывали показатели совместности 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, металлофторопластовый материал, алюминниво-оловянные сплавы и т. п.).

В процессе трения деталей трибосистемы проходят процессы самоорганизации поверхностей, в результате которых образуется равновесная шероховатость [25], изменяется их геометрия и происходит структурная самоорганизация [4, 76].

3.2. Износостойкие материалы высокой твердости

Материалы высокой твердости используют главным образом в трибосистемах, подверженных абразивному изнашиванию. Основным показателем, определяющим износостойкость при изнашивании закрепленным абразивом, твердость которого намного превышает твердость изнашиваемого материала, является твердость (микротвердость) поверхностного слоя [72, 73]. Определенная корреляция установлена и между износостойкостью материалов и модулем упругости. Если твердость материала близка или 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 ϵ 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 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 [55], важные для деталей машин, работающих в контакте не с абразивом, а между собой.

Из простых веществ высокой твердостью обладают лишь алмаз (углерод) и бор. Подавляющее большинство веществ с высокой твердостью – тугоплавкие химические соединения [24, 48, 49, 50, 79].

Представляют интерес металлоподобные карбиды, нитриды, бориды, силициды тугоплавких переходных металлов IV–VI групп Периодической системы элементов. 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 переходных металлов (лантаноидов и актиноидов) с легкими элементами первых двух периодов (B, C, N, O, Si). Однако эти металлы более дороги и дефицитны.

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 самими различными способами.

3.2.1. Сверхтвердые материалы

К сверхтвердым материалам (микротвердость которых превышает 5000 HV_{0,1}) относятся кубические модификации углерода (алмаз) и нитрида бора, свойства которых приведены в табл. 3.3 и 3.4.

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. Их σ_b при одноосном сжатии достигает 5000 МПа. Алмазы марки СВ предназначены для буровых коронок и долот, а также пил, применяемых при резке неметаллических материалов. Дисмит при-

меняют для изготовления горнобурового инструмента, а также режущего инструмента (резцов, сверл и др.), используемого при обработке цветных металлов и сплавов, пластмасс, стеклопластиков.

Таблица 3.3. Основные параметры и свойства алмаза и кубического нитрида бора [50, 79]

Показатель	Алмаз	Кубический нитрид бора
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	15000	6000
Режущая способность при шлифовании корунда порошком с зернистостью 10/7	3,2	0,8
Модуль Юнга, ГПа	900	809–973

Таблица 3.4. Износостойкость в алмаза, поликристаллических твердых материалов и твердых сплавов при трении о прослойку карбида бора № 8 (испытания по ГОСТ 5744–85) [74]

Материал	Основа	ε , км/мм
Алмаз (природный монокристалл)	Алмаз	50,0
Поликристаллические материалы:		
СВСП	»	10,0
СКМ	»	10,0
исмит	BN	10,0
СВА	Алмаз	7,7
АСПК	»	6,6
гексанит-Р	BN	2,5
композит-05	BN	0,2
ВК6-ОМ	WC	0,3
ВК6	WC	0,2

Кубический нитрид бора получают только синтетическим путем из гексагональной модификации [79] и применяют главным образом для изготовления абразивного инструмента. По твердости кубический нитрид бора уступает алмазу, но существенно превосходит его по теплостойкости. Кроме того, он значительно менее адгезионно и химически активен по отношению к материалам на основе железа, никеля и кобальта [58]. В США кубический нитрид бора выпускают под названием боразон, в России – эльбор и кубонит: ЛО и КО – эльбор и кубонит обычной прочности, ЛР, КР – то же повышенной прочности [79]. Разновидности поликристаллического материала (созданные на основе эльбора, кубонита, вюрцитоподобного и гексагонального нитрида бора) – эльбор-Р, гексанит-Р, исмит, ПНТБ, композит-0,5 и другие производят в виде пластин различной формы и цилиндрических вставок массой от 0,5 до нескольких карат. Изготавливают из

них металлорежущий инструмент, применяемый при обработке труднообрабатываемых закаленных сталей, чугунов и сплавов с твердостью > 40 HRC₃. Стойкость такого инструмента в 10–20 раз больше стойкости твердосплавного (при этом обеспечивается повышение производительности в 2–4 раза).

К композиционным сверхтвердым материалам относится славутич, не уступающий природным алмазам по износостойкости, но значительно превышающий их по прочности [79]. Изготавливают его в виде цилиндров и пластин различных размеров (до 25 мм). Применяют славутич для буровых долот, кругов (карандашей, брусков, роликов) и т. п.

3.2.2. Металлоподобные соединения

Высокой твердостью и износостойкостью обладают металлоподобные карбиды переходных металлов с незаполненными *d*-электронными оболочками [24, 48, 49, 50, 52, 79]. Они представляют собой фазы внедрения или близкие к ним структуры, в которых атомы углерода занимают октаэдрические или тетраэдрические пустоты плотноупакованных металлических подрешеток (табл. 3.5).

Таблица 3.5. Структура и свойства металлоподобных карбидов переходных металлов [48, 52, 79]

Карбид	Тип решетки	γ , т/м ³	$t_{пл(разл)}$, °C	HV0,1	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м	E , ГПа	$-\Delta G_{293}^{\circ}$, кДж/моль
TiC	Кубическая	4,94	3 067	2 900	52,2	494	205,55
ZrC _{0,97}	»	6,56	3 420	2 600	50,0	401	193,26
HfC _{0,99}	»	12,76	3 828	2 700	45,0	480	205,61
VC _{0,87}	»	5,71	2 648	2 900	65,0	495	99,02
NbC _{0,99}	»	7,80	3 600	2 400	51,1	479	137,59
TaC _{0,98}	»	14,50	3 983	2 500	42,1	550	143,30
Cr ₂₃ C ₆	»	6,96	1 500	970	127	–	600,43
Cr ₇ C ₃	Гексагональная	6,90	1 780	1 380	109	–	209,75
Cr ₃ C ₂	Ромбическая	6,60	1 810	1 330	75	369,8	98,90
Mo ₂ C	Гексагональная	9,18	2 400	1 500	71	530,7	46,93
WC	»	15,67	2 776	2 100	19,2	737	38,79
W ₂ C	Гексагональная компактная	17,23	2 700	1 990	80,0	–	–

Порошки карбидов 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 [24, 58].

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

Высоким сопротивлением абразивному изнашиванию обладают металлоподобные нитриды переходных металлов с незаполненными *d*- и *f*-оболочками (табл. 3.6).

Металлоподобные нитриды – металлические проводники с высокой теплопроводностью – представляют собой фазы внедрения с кубической и гексагональной решетками. Пластичность их выше, чем других тугоплавких соединений (карбидов, боридов, силицидов). Характерным для металлоподобных нитридов является широкая область гомогенности. Применяют их в виде упрочнителей пластичной металлической матрицы в композиционных материалах, а также в виде покрытий, наносимых газофазными и вакуумными ионно-плазменными методами. Твердость нитридных покрытий, получаемых этими способами, существенно превышает твердость компактных материалов. Создают твердые сплавы с использованием нитридов в качестве твердой составляющей.

Таблица 3.6. Структура и свойства металлоподобных нитридов [1, 48, 52, 79]

Нитрид	Тип решетки	Область гомогенности N, % (ат.)	γ , т/м ³	$t_{пл}$, °С	HV0,1	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	E , ГПа	$-\Delta G_{293}^{\circ}$, кДж/моль
TiN	ГЦК	37,5–50,0	5,43	3200	2000	25	390–500	294,34
ZrN	ГЦК	46–50	7,09	2980	1850	21	300–450	342,96
HfN	ГЦК	–	13,84	3000	2150	33	480	345,45
V ₃ N	ГП	25–33	5,97	–	1900	123	–	–
VN	ГЦК	41–50	6,04	2050	1520	85	350–460	192,01
Nb ₂ N	ГП	28,5–33,5	8,23	2420	1720	142	–	–
NbN	ГП	50,0–50,6	8,40	2300	1650	78	400–483,6	194,83
Ta ₂ N	ГП	28,5–31,0	15,81	2050	1220	263	–	242,36
TaN	ГП	44,5–47,3	15,46	3087	1080	128	575,8	223,85
Cr ₂ N	ГП	32–33	6,51	1650	1570	84	310	–
CrN	ГЦК	–	6,14	1500	1093	640	319,8	–
Mo ₂ N	ГЦК	32–33	9,44	895	630	20	–	–
WN	ГЦК	–	–	700*	–	–	–	–

* Разлагается при $t > 700$ °С.

Высокой твердостью и износостойкостью обладают бориды переходных металлов IV–VI групп Периодической системы элементов (табл. 3.7) [48, 52, 79] и редкоземельных металлов. Структура низших боридов (богатых металлом) определяется подрешеткой металла основы. В высших боридов (богатых бором) структуру определяют атомы бора, образующие жесткие подрешетки с ковалентными связями В–В. Образование взаимных твердых растворов боридов, как правило, приводит к улучшению свойств по сравнению с исходными боридами. Например, твердый раствор двойных боридов титана

и хрома ($TiB_2 + CrB_2$) имеет более высокую твердость, износостойкость и жаростойкость, чем одинарных.

С ростом V/Me уменьшаются удельное электрическое сопротивление и коэффициент термического расширения, увеличиваются температура плавления, микротвердость, 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 металлов V, а затем и к VI групп 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 чугунах (бориды титана, хрома и их сплавы).

Таблица 3.7. Структура и свойства боридов [48, 52, 79]

Борид	Тип решетки	$\gamma, \text{т/м}^3$	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	HV0,1	$\rho \cdot 10^8, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$, при 20–1000 $^\circ\text{C}$	$E, \text{ГПа}$	$-\Delta G_{293}^0, \text{кДж/моль}$
TiB_2	Гексагональная	4,45	2980	3480	9,0	4,5	540,5	319,5
ZrB_2	»	6,17	3200	2190	9,7	5,9	495,8	323,62
HfB_2	»	10,5	3250	2900	10,6	6,3	479,7	325,50
VB_2	»	5,1	2400	2800	22,7	7,9	340,4	–
NbB	Ромбическая	7,6	2300	2200	40,0	12,9	–	–
NbB_2	Гексагональная	6,97	3000	2600	25,7	7,7	637,6	–
TaB_2	»	11,7	3037	2600	32,5	7,9	686,7	188,25
Cr_2B	Ромбическая	6,5	1870	1350	107,0	14,2	410,1	–
CrB	»	6,2	2100	2100	45,5	12,3	360,6	77,04
CrB_2	Гексагональная	5,6	2200	2200	30,0	10,5	450,3	123,23
MoB	Тетрагональная	8,8	2600	2300–2450	–	–	–	70,74
WB	»	16,0	2800–2920	–	–	–	–	71,11

Силициды переходных металлов IV–VI групп Периодической системы элементов [24, 48, 49, 52, 79] находят применение в самолетостроении, атомной, ракетной и космической технике главным образом в качестве жаропрочных и жаростойких материалов, а также защитных покрытий. Свойства дисилицидов тугоплавких металлов приведены в табл. 3.8 [48, 52, 79].

Наибольшее применение получил дисилицид молибдена благодаря тому, что он обладает хорошей электропроводностью и высокой стойкостью к окислению вследствие образования при взаимодействии с кислородом воздуха плотной защитной пленки оксида кремния. Из него изготавливают электрические нагревательные элементы, эксплуатирующиеся на воздухе при температурах до 1600 $^\circ\text{C}$.

Таблица 3.8. Свойства дисилицидов [48, 52, 79]

Дисилицид	γ , т/м ³	$t_{пл}$, °C	HV0,1	E, ГПа	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹ при 20–1000 °C	$-\Delta G_{293}^{\circ}$, кДж/моль
TiSi ₂	4,13	1540	892	355,1	10,3	132,15
ZrSi ₂	4,86	1700	1063	259,9	8,37	149,36
HfSi ₂	9,03	1750	912	–	–	225,94
VSi ₂	4,66	1660	890–960	–	12,0	148,47
NbSi ₂	5,66	2100	1082	255,1	10,6 ¹	123,32
TaSi ₂	9,1	2200	1407	–	10,2	116,01
CrSi ₂	5,0	1500	996–1150	–	12,9 ²	98,77
MoSi ₂	6,24	2030	1200–1350	440,5	8,3	118,49
WSi ₂	9,25	2165	1300–1400	530,7	7,35	91,86

¹ При 20–1100 °C. ² При 20–700 °C.

Таблица 3.9. Свойства карбида кремния [48, 52, 79]

Тип решетки	γ , т/м ³	Твердость		$t_{дис}^{\circ}$, °C	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	E, ГПа	$-\Delta G_{293}^{\circ}$, кДж/моль
		по Моосу	HV0,1				
Гексагональная	3,214	9,0–9,3	2130–2950	2780	4,2–4,7 (при 427 °C)	408	69,49
Кубическая	3,166	9,2–9,8	2610–3740	2830	3,8 (при 200 °C)	401,3–432,4	–

[°] Температура диссоциации.

3.2.3. Неметаллические бескислородные соединения

Карбид кремния SiC (или карборунд) представляет собой соединение кремния с углеродом [24, 48, 52, 79]. Кроме модификации α -SiC с гексагональной кристаллической решеткой имеется модификация β -SiC с кубической структурой типа алмаза. Карбид кремния отличается высокой твердостью, теплопроводностью, огнеупорностью, специфическими электрическими и полупроводниковыми свойствами (табл. 3.9). Карбид кремния химически стоек (на него действует только смесь азотной и плавиковой кислот, а также фосфорная кислота при температуре 230 °C). При нагреве в воздушной среде на поверхности образуется тонкий слой 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 нитридкремниевыми 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 карбидкремниевых материалов (со связующими) изготавливают абразивный инструмент (применяемый для обработки твердосплавного инструмента), огнеупорные материалы, изделия электротехнического назначения (электрические нагреватели, поджигатели игнитронов 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 [79].

Приведенные в табл. 3.10 неметаллические нитриды отличаются высокой износостойкостью (кроме гексагонального BN), высокой стойкостью в агрессивных средах, значительной термостойкостью при быстрых теплосменах и высокой огнеупорностью [48, 52, 79]. Применяют их для футеровки металлургических устройств, сопел для распыления металлов, тиглей для получения чистых металлов, а также для изготовления конструктивных элементов в газотурбостроении, энергетике, космической технике. Широкое использование получили кубический и вюрцитоподобный (гексанит-Р или исмит) нитрид бора в качестве инструментальных материалов. Высокоэффективным инструментальным материалом является и нитрид кремния. Существенное улучшение свойств достигается введением в нитрид кремния различных оксидов (алюминия, магния, иттрия и др.), углерода, карбидов, нитридов [1]. К перспективным материалам относятся композиции $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ (сиалон) и $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ (силинит) [1, 24]. Нитрид кремния также является перспективным материалом для изготовления деталей так называемых адиабатных двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок.

Таблица 3.10. Свойства неметаллических нитридов и нитрида алюминия [1, 24, 48, 79]

Нитрид	Тип решетки	γ , т/м ³	$t_{\text{пл}}$ или $t_{\text{дис}}$, °С	HV0,1	E , ГПа	$\rho \cdot 10^2$, Ом·м	$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	$-\Delta G_{293}^0$, кДж/моль
AlN	Гексагональная плотноупакованная	3,12–3,27	2400 ^{*1}	1230	–	$>10^{13}$ (при 20 °С)	4–6	288,01
α -BN	Гексагональная	2,29	3000 ^{*2}	1–2 ^{*3}	86,5–34,4	10^{13} (при 20 °С)	0,5–1,7	224,61
β -BN	Кубическая	3,45	–	6000	809–973	–	–	–
Si_3N_4	Гексагональная	3,18	1900 ^{*1}	3300±120	320	$10^{13}\text{--}10^{14}$	2,75	675,93

*¹ Разлагается. *² Под давлением азота. *³ По Моосу.

Бескислородное соединение B_4C отличается высокими твердостью (3780 HV0,1) и модулем упругости ($E=483,4$ ГПа), что предопределило его использование в качестве абразивного материала. Высокая износостойкость компактного карбида бора обеспечила применение его в качестве деталей точных приборов. Карбид бора успешно используют для изготовления деталей газодинамических подшипников гироскопических приборов.

3.2.4. Керамики и ситаллы

Высокой твердостью и износостойкостью обладают керамические материалы. К ним, в частности, относятся тугоплавкие оксиды (алюминия, бериллия, циркония, хрома и др.) [70, 79].

В качестве твердого износостойкого материала наибольшее распространение получил оксид алюминия. Устойчивая модификация $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 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 с гексагональной кристаллической решеткой имеет твердость по Моосу 9 (2000 HV_{0,1}), модуль Юнга $E \approx 350$ ГПа, плотность $\gamma = 3,95 \dots 4,02$ т/м³ и температуру плавления $t_{\text{пл}} = 2050$ °С. Основным сырьем для его получения являются бокситы, содержащие от 50 до 100% Al_2O_3 .

Порошки корунда (природного и особенно синтетического) широко применяют для изготовления разнообразного абразивного инструмента. Компактные поликристаллические корундовые материалы (минералокерамики), например микролит ЦМ-332, характеризуются высокими твердостью (90–93 HRA), теплостойкостью, химической стойкостью и износостойкостью. Кроме оксида алюминия эта керамика содержит в качестве модификатора некоторое количество оксида магния.

Минералокерамический материал применяют с целью изготовления резцов (режущих пластин) для полустойковой и 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. Корундовую керамику используют также в нефтяной промышленности (износостойкие насадки гидромониторных долот, горловины насосов пескоструйных аппаратов, штуцера фонтанной арматуры), для изготовления нитепроводителей ткацких станков, в приборостроении (например, для изготовления деталей газодинамических подшипников гироскопов), 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.

Рубин – синтетический окрашенный в красный цвет прозрачный монокристаллический оксид алюминия (легированный оксидом хрома в количестве 2–3 %) применяют для изготовления часовых камней, некоторых деталей точных приборов и т. п. Монокристаллические стержни рубина используют в лазерной технике.

Возрос интерес к стабилизированному оксиду циркония ($\gamma = 5,6$ т/м³, твердость по Моосу 7, $E \approx 170$ ГПа), который является перспективным материалом для изготовления деталей, предназначенных для работы при высоких температурах, в частности в адиабатных двигателях.

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) представляют собой поликристаллические материалы, получаемые регулируемой кристаллизацией стекол [79]. Состоят они из кристаллов (размером менее 1 мкм) и остаточной стекловидной фазы, содержание которой, как правило, менее 50 % (об.). Существует много разновидностей ситаллов, различающихся входящими в них оксидами. Микротвердость ситаллов достигает высоких значений (до 1000 HV_{0,1}). Высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью обладают петроситаллы (на основе габро-норитовых, базальтовых и других горных по-

род), пироксеновые ситаллы ($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) и шлакоситаллы (получаемые из стекла, сваренных на основе металлургических и топливных шлаков). Из них изготовляют детали пар трения (плунжеры, 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.

3.2.5. Твердые сплавы

Высокой 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) [24, 66, 79]. Сведения о составе и свойствах твердых сплавов приведены в гл. 8, а об износостойкости при различных видах абразивного изнашивания – в табл. 3.11–3.13 [74, 75].

Таблица 3.11. Износостойкость твердых сплавов при трении по электрокорундовой шлифовальной шкурке с зернистостью абразива 10 (ГОСТ 5009–82) [74, 75]

Марка сплава	HRA, не менее	ϵ , км/мм	Марка сплава	HRA, не менее	ϵ , км/мм
ВК4	89,5	1,2	T30K4	92,0	0,2
ВК6	88,5	1,0	T15K6	90,0	0,3
ВК8	87,5	0,8	T5K10	88,5	0,2
ВК10	87,0	0,6	TT7K12	87,0	0,2
ВК15	86,0	0,4	TH-20	90,0	0,2
ВК20	84,0	0,2	KXH-15	85,0	0,1
ВК25	82,0	0,1	KHT-16	89,0	0,1

Примечание. Износостойкость W и Co составляет 0,055 и 0,021 км/мм соответственно.

Таблица 3.12. Износостойкость твердых сплавов при изнашивании о прослойку из различных абразивных материалов

Абразивный материал	HV0,1	ϵ , км/мм сплава	
		ВК6	ВК15
Синтетический алмаз AC2	10000	0,2	0,2
Карбид бора	3700–4300	0,2	0,2
Карбид кремния (зеленый)	3000–3300	0,4	0,2
Электрокорунд	2000–2400	1,7	0,8
Кварц	1100–1200	6,6	3,1

Твердые сплавы применяют для изготовления горнобурового, режущего инструмента, а также инструмента для обработки металлов давлением, и быстроизнашивающихся 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 делают инструмент для обработки резанием чугунов и других материалов, не образующих сливных стружек. Инструмент из

сплавов марок ТК и ТТК применяют для обработки резанием сталей и труднообрабатываемых сплавов. Инструмент для обработки давлением и износостойкие детали делают обычно из средне- и высококобальтовых твердых сплавов типа ВК. Из безвольфрамовых сплавов изготавливают инструмент (режущий, для обработки давлением, измерительный), пресс-формы и детали, от которых требуется высокая износостойкость.

Таблица 3.13. Износостойкость твердых сплавов при изнашивании об абразивную прослойку (СТП ИСМ 610–81) из электрокорунда с зернистостью 8 (ГОСТ 3 647–80)

Марка сплава	HRA, не менее	ϵ , км/мм	Марка сплава	HRA, не менее	ϵ , км/мм
ВК3	89,5	1,2	ВК15	86,0	0,8
ВК3-М	91,0	2,0	ВК20	84,0	0,6
ВК4	89,5	1,3	ВК20-КС	82,0	0,4
ВК4-В	88,0	0,9	ВК20-К	79,0	0,4
ВК6	88,5	1,7	ВК25	82,0	0,4
ВК6-М	90,0	3,3	Т30К4	92,0	0,6
ВК6-ОМ	90,5	10,0	Т15К6	90,0	1,7
ВК6-В	87,5	0,8	Т14К8	89,5	1,1
ВК8	87,5	1,4	Т5К10	88,5	1,1
ВК8-В	86,5	1,1	Т5К12	87,0	0,8
ВК8-ВК	87,5	3,3	ТТ7К12	87,0	0,9
ВК10	87,0	1,1	ТТ8К6	90,5	3,3
ВК10-М	88,0	2,0	ТТ10К8-Б	89,0	3,3
ВК10-ОМ	88,5	5,0	ТТ20К9	89,0	1,7
ВК10-КС	85,0	1,1	ТН-20	90,0	0,3
ВК11-В	86,0	1,1	КНТ-16	89,0	0,3
ВК11-ВК	87,0	1,2	КХН-15	85,0	0,2

Примечание. Износостойкость S_0 составляет 0,14 км/мм.

3.2.6. Наплавочные материалы

Износостойкие материалы высокой твердости часто в виде толстых слоев (единицы и десятки миллиметров) наплавляют на поверхности деталей различными методами. Применяемые для этой цели материалы (электроды, проволоки, порошки) получили название наплавочных. Используют их для восстановления изношенных деталей (восстановительная наплавка) и повышения надежности деталей (износостойкая и антикоррозионная наплавки). Наиболее распространенный вид наплавочных материалов – покрытые металлические электроды, применяемые для ручной дуговой наплавки. Восстановительную и антикоррозионную наплавку осуществляют сварочными, а износостойкую – наплавочными электродами.

Для маркировки электродов применяют в основном буквенно-цифровую систему обозначения, стандартизованную для сталей [18, 24, 79]. Используемые для изготовления сварочной проволоки стали дополнительно маркируют буквами Св (ГОСТ 2246–80), а наплавочной проволоки – буквами Нп (ГОСТ 10543–98).

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, а цифры, следующие за буквенными обозначениями элементов, указывают их

среднее содержание в процентах (если содержание элемента менее 1,5 %, цифра не ставится). При среднем содержании Si до 0,8 % и Mn до 1,0 % буквы С и Г не ставятся.

Прутки для наплавки обозначают буквами ПрН, а гранулированные порошки из сплавов – буквами ПГ, за которыми следуют буквы и цифры, обозначающие элементы и их среднее содержание в сплаве. Порошковые проволоку и ленту обозначают соответственно ПП и ПЛ, спеченную из порошков ленту – ЛС.

Заметим, что встречаются электроды и порошки, марки которых не отвечают изложенным выше правилам.

Наплавочные электроды применяют для повышения износостойкости деталей (табл. 3.14) [24, 79]. Электроды группы I используют 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 карбиды). Наплавленные 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 обрабатываемые в отожженном состоянии. После закалки и отпуска твердость наплавленного металла высокая (до 54–62 HRC). Электроды группы V предназначены для наплавки металлорежущего инструмента и штампов для горячей обработки металлов давлением.

Таблица 3.14. Наплавочные электроды [24, 79]

Группа	Тип электрода	Марка электрода	Назначение
I	Э-10Г2 Э-11Г3 Э-12Г4 Э-15Г5	ОЗН-250У ОЗН-300У ОЗН-350У ОЗН-400У	Детали, эксплуатируемые в условиях интенсивного изнашивания, сопровождающегося ударами
II	Э-30В8Х3 Э-35Х12В3СФ	ЦШ-1, ИН-1 Ц-16	Горячие штампы
III	Э-37Х9С2 Э-70Х3СМТ Э-100Х12М	ОЗШ-3 ЭН-60М ЭН-Х12М	Холодные штампы
IV	Э-65Х11Н3 Э-65Х25Г13Н3	ОМГ-Н ЦНИИН-4	Изнюшеннне детали из стали 110Г13Л
V	Э-90В10Х5Ф2 Э-105В6Х5М3Ф3 Э-08К15В7М5Х3СФ	ЦИ-2У И-1 ОЗИ-4	Металлорежущий инструмент, вытяжные и прошивные горячие штампы
VI	Э-95Х7Г5С Э-30Х5В2Г2СМ	12АН/ЛИВТ ТКЗ-Н	Детали, работающие в условиях ударно-абразивного изнашивания
VII	Э-300Х28Н4С4 Э-110Х14В13Ф2	ЦС-1 ВСН-6	Детали, эксплуатируемые в условиях интенсивного абразивного изнашивания с ударными нагрузками
VIII	Э-320Х23С2ГТР Э-320Х25С2ГР	Т-620 Т-590	Детали, эксплуатируемые в условиях преимущественно абразивного изнашивания
IX	Э-08Х17Н8С6Г Э-13Х16Н8М5С5Г4Б Э-190К62Х29В5С2	ЦН-6М ЦН-6Л, ЦН-12М УН-12Л, ЦН-2	Уплотнительные поверхности трубопроводной арматуры для энергетики и нефтеаппаратуры

Электроды групп VI–VIII служат для наплавки деталей, работающих при различных сочетаниях ударного и абразивного воздействий, соответственно при максимальной, средней и минимальной ударных нагрузках. Структура наплавки с твердостью 48–62 HRC, состоит преимущественно из мартенсита и избыточного карбида хрома. Металл, наплавленный при использовании электродов группы IX, обладает высокими противозадирными свойствами при трении без смазки, высокими антиэрозионными и антикоррозионными свойствами, а также высокой износостойкостью при обычных и высоких температурах.

Состав и свойства наплавочных электродов регламентированы [24].

Наплавочную проволоку из углеродистых, легированных 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.

Стальную наплавочную проволоку марок Нп выпускают по ГОСТ 10543–98, а стальную сварочную для наплавки марок Св – по ГОСТ 2246–80. Твердость слоев, наплавленных проволоками марок Нп, колеблется в пределах 160–340 НВ (после наплавки) и 32–56 HRC, (после закалки), а слоев, наплавленных проволоками марок Св, – в пределах 120–300 НВ (после наплавки) и 550–600 HV0,1 (после закалки).

Порошковые проволоки, которые представляют собой оболочку из пластичного металла, заполненную семью легирующими, газо- и шлакообразующими материалами (табл. 3.15), обычно применяют для наплавки материалов с повышенным содержанием углерода и легирующих компонентов [24, 79].

Таблица 3.15. Порошковая проволока [24, 79]

Марка проволоки	Наплавляемый металл	Дополнительная защита	HRC, наплавленного металла	Назначение
ПП-АН105	100Г13Н4	–	20–25	Железнодорожные крестовины, отливки из стали 110Г13Л
ПП-АН106	10Х14Т	–	42–48	Уплотнительные поверхности арматуры для $t \leq 450^\circ\text{C}$
ПП-АН 125	200Х15СТР	–	50–58	Зубья и козырьки ковшей экскаваторов, лопатки дымососов
ПП-АН 170	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

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 имеют аналогичное строение. Порошковые ленты используют, в частности, для наплавки деталей засыпного аппарата доменных печей. Состав и свойства порошковых проволок и лент регламентированы [24].

Спеченные ленты изготавливают прокаткой смеси порошка пластичного металла (железа, никеля, меди) и порошков легирующих материалов с последующим их спеканием в защитной среде. При наплавке под флюсом АН-60 спеченной электродной ленты ЛС-70ХЗМН получают износостойкий наплавленный слой твердостью 58–62 HRC₂. Наплавленная спеченная электродная лента ЛС-5Х4ВЗФС обладает высокой термостойкостью (применяют для наплавки валков для горячей прокатки металлов). Спеченные ленты используют в автомобильной промышленности, в металлургическом и химическом машиностроении и др. [24, 79].

Для защиты наплавляемого материала используют флюсы. Расплавляясь при наплавке, они защищают расплавленный электрод от окисления, обеспечивают стабильность дуги и получение наплавленного материала заданного состава.

Присадочные кольца марок ПК-НХ35СЗ (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 [24]. Спеченные электроды из карбидохромовых керметов КХН-15, КХН-20 и КХН-30 (на основе карбида хрома с никелевой связкой) применяют для наплавки слоев, обладающих высокими твердостью, износостойкостью и стойкостью к окислению и коррозии [79].

Присадочные литые прутки из сормаита, стеллита и релита: Пр-С1, Пр-С2, Пр-С27, Пр-ВЗК, Пр-ВЗК-Р (ГОСТ 21449–75); Релит-3, Релит-ТЗ (ТУ 48-42-34–70), АН-ЛЗ (ТУ 26-02-769–77) применяют для наплавки износостойких и жаростойких слоев газопламенным и дуговым (неплавящимся электродом) способами. Литые кольца марок ЭП (ТУ 14-131-133–73, ТУ 14-131-344–77) используют для плазменной наплавки клапанов автомобильных двигателей [24].

В табл. 3.16 приведен химический состав сормаитов и их свойства [24, 79].

Таблица 3.16. Химический состав и свойства сормаитов (ГОСТ 21449–75)

Сормайт	Содержание элементов (остальное Fe), % (мас.)							Свойства				
	Cr	Ni	C	Si	Mn	S	P	$\sigma_{\text{н}}$, МПа	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	$t_{\text{пл}}$, °C	γ , т/м ³	HRC ₂
№ 1 (Пр-С1)	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)	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

Сормайт № 1 – заэвтектический сплав, близкий по составу и структуре к высокохромистым чугунам; сормайт № 2 – доэвтектический сплав, близкий к высокохромистым сталям. Структура сормаитов состоит из эвтектики и сложных карбидов хрома и железа. Сормаиты наплавляют на детали, подверженные абразивному изнашиванию (плужные лемеха, ножи бульдозеров и грейдеров, шнеки цементных насосов и др.); на инструменты для обработки металлов давлением; на детали, работающие в среде агрессивных газов при повышенных температурах (засыпные аппараты доменных печей и др.). Выпускают их в виде прутков (диаметром 6–7 мм) и крупных (с размерами частиц до 1,25мм) и мелких (0,02–0,04 мм) порошков. Прутковый сормайт обычно наплавляют дуговым методом или с помощью газовой горелки, порошковый – с помощью токов высокой частоты.

Высокой износостойкостью и стойкостью против коррозии обладают хромовольфрамокобальтовые наплавочные сплавы – стеллиты. В России изготавливают и применяют стеллиты В2К, В3К (табл. 3.17) и В3К-Р [24, 79]. Основой стеллитов является вязкий аустенит, обуславливающий высокую ударную стойкость и прочно удерживающий карбидные зерна. Содержание карбидной фазы в них составляет 30–45 %. Для повышения пластичности в стеллиты вводят редкоземельные элементы. Стеллиты выпускают 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. При этом износостойкость повышается в 3–5 раз. Твердость и соответственно износостойкость наплавленных слоев мало изменяются до 700 °С. Широкому применению стеллитов препятствует дефицитность основных компонентов (кобальта, вольфрама).

Таблица 3.17. Химический состав и свойства стеллитов

Марка стеллита	Содержание элементов (остальное Fe), % (мас.)									Свойства			
	Cr	W	Co	Ni	C	Si	Mn	P	S	$\gamma_{т/м^3}$	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	HRC ₃
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

Релит – эвтектическая смесь карбидов вольфрама (WC и W_2C) – содержит 95–96 % W и 3,6–4,0 % C (свободного не более 0,1 %). Он обладает более высокой твердостью (2400–3000 HV0,1), чем монокарбид вольфрама. Выпускают релит в виде крупки марки 3 (зерновой) и в виде электродов марки ТЗ (трубчато-зерновой), представляющих собой заполненные крупкой трубочки из низкоуглеродистой стали. Применяют релит для армирования бурового инструмента, наплавки режущего инструмента машин, разрабатывающих мерзлые грунты, щек дробилок, зубьев ковшов экскаваторов и других деталей, подверженных интенсивному абразивному изнашиванию.

Гранулированные порошки, получаемые распылением струн жидкого металла водой высокого давления или азотом, применяют при индукционной, плазменной и газопорошковой (газопламенной) наплавке. По гранулометрическому составу различают крупные (1,25–0,8 мм), средние (0,8–0,4 мм), мелкие (0,40–0,16 мм) и очень мелкие (< 0,16 мм) порошки. Крупные порошки применяют для наплавки токами высокой частоты, средние и мелкие – для плазменной наплавки, очень мелкие – для газопламенной наплавки.

Достаточно широко используют порошки на железной и никелевой основах (табл. 3.18) [79].

Для наплавки применяют также различные смеси порошков, приготовляемые механическим смешиванием размолотых ферросплавов, углеродистых материалов, а также карбидов и боридов. Предназначаются они 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); детали прессформ для брикетирования угля, лопаток дробебетов (смесь КБХ и т. п.).

Таблица 3.18. Средний химический состав и назначение гранулированных порошков

Марка порошка	Содержание элементов, % (мас.)							HRC ^o , не менее	Назначение
	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	–	»	55	Лемехи плугов и детали, подвергающиеся абразивному изнашиванию без ударов
ПГ-СР2	0,35	2,5	–	13,5	Основа	1,8	≤5,0	35	Уплотнительные поверхности арматуры тепловых и атомных электростанций для температур до 600 °С
ПГ-СР3	0,55	3,0	–	15,0	»	2,4	≤5,0	45	То же

^o Наплавленного металла.

Промышленно выпускают следующие гранулированные порошки на железной и никелевой основах (главным образом высокохромистые): ПГ, СНГН, ВСНГН, НПЧ, а также наплавочные смеси С-2М, БХ, КБХ, ФБХ6–2, ПС [5, 24, 79].

3.3. Износостойкие покрытия и модифицированные слои

Твердые износостойкие тугоплавкие соединения хрупки. По этой причине, а также вследствие 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 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 следует учитывать при разработке конструкций машин и механизмов. Существует много традиционных способов создания поверхностных слоев с повышенной износостойкостью [24, 30, 31, 49]. Наиболее широко используют методы поверхностной закалки, поверхностного наклепа, различные химико-термические способы обработки (в первую очередь цементацию и азотирование). Все шире применяют 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 [14, 19, 20, 24, 32, 53] и лазерную

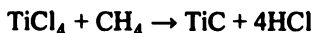
обработку [23, 24, 27, 78]. Существенное развитие получили способы осаждения покрытий из газовой фазы при атмосферном давлении и в разряженной атмосфере [24, 29, 37]. Мощный импульс получило применение газотермических методов нанесения покрытий в связи с развитием плазменных [5, 26, 31] и детонационного [3, 31, 38, 60] способов напыления порошкообразных материалов различного состава. Значительный интерес представляет возможность создания поверхностных слоев с использованием метода контактного эвтектического плавления [24].

Предшественниками вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев являются методы химического осаждения из газовой фазы [24, 29, 37] и термовакуумные методы [24].

3.3.1. 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 (либо переведенных в паровую фазу твердых веществ) с образованием на поверхности слоя химического соединения [24, 29, 37].

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.

Вследствие высоких температур, необходимых для прохождения реакции и образования прочного соединения с подложкой, этот метод непригоден для закаленных углеродистых и быстрорежущих сталей. Однако можно наносить покрытия из других износостойких соединений при значительно более низких температурах (табл. 3.19) или закаливать детали сразу после нанесения покрытий [24].

Таблица 3.19. Твердые тугоплавкие соединения, получаемые химическим осаждением из газовой смеси

Материал покрытия	HV0,1	Исходные вещества	Температура подложки, °С
VC	2 000–3 000	$\text{VCl}_4 + \text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3 + \text{H}_2$	1 500–2 000
Si_3N_4	2 500–3 000	$\text{SiCl}_4 + \text{NH}_3$	1 200–1 600
SiC	2 500–4 000	$\text{CH}_3\text{SiCl}_2 + \text{H}_2$	≈ 1 400
B_4C	3 000–3 500	$\text{BCl}_3 + \text{CH}_4 + \text{H}_2$	≈ 1 300
HfC	1 800–2 500	$\text{HfCl}_4 + \text{CH}_4 + \text{H}_2$	1 000–1 300
Al_2O_3	2 000–2 500	$\text{AlCl}_3 + \text{H}_2 + \text{CO}_2$	800–1 300
TiN	2 000–2 700	$\text{TiCl}_4 + \text{N}_2 + \text{H}_2$	650–1 700
TiC	> 3 200	$\text{TiCl}_4 + \text{CH}_4$	800–1 100
WC	≈ 1 700	$\text{WCl}_6 + \text{CH}_4$	900–1 100
W_2C	2 000–2 500	$\text{WF}_6 + \text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2$	325–600

Существенным усовершенствованием процессов газофазного осаждения покрытий явилось создание установок, работающих по замкнутому циклу без выброса вредных веществ в атмосферу [24].

3.3.2. Покрытия, получаемые термовакuumным напылением

Термовакuumный метод нанесения покрытий [24, 32] основан на конденсации на поверхностях деталей пленки металла или химического соединения, переведенного в паробразное 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 покрытие – 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.

3.3.3. 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, фокусировкой и конденсацией на поверхности детали или подложки. Для генерации потока вещества используют разогрев потоком электронов и различные формы газовых разрядов (тлеющий, дуговой с нерасходуемым термоэмиссионным катодом, дуговой с термоавтоэмиссионным расходуемым катодом) [14, 32, 53].

Применительно к нуждам машиностроения вакуумные ионно-плазменные методы нанесения покрытий и создания модифицированных поверхностных слоев можно условно разделить на четыре группы: 1) ионно-диффузионные, осуществляемые в тлеющем разряде; 2) катодное распыление в разряде постоянного тока и в высокочастотном разряде; 3) ионное осаждение; 4) ионное легирование (имплантация).

Примером методов первой группы является ионное азотирование [24, 29], которое возможно при более низких температурах и со значительно большей скоростью (табл. 3.20), чем традиционное (в результате радиационного стимулирования скорость диффузии азота многократно увеличивается). Ионно-диффузионные методы можно также применять для насыщения поверхностных слоев кремнием, углеродом и другими элементами; получения карбонитридных слоев и т. п.

Таблица 3.20. Влияние режима ионного азотирования на толщину и твердость износостойкого слоя

Марка стали	$t, ^\circ\text{C}$	Длительность азотирования, ч, для получения слоя толщиной, мм					HV0,1
		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	500–550
40XФА	520	4–5	6–8	8–10	12–15	15–18	510–560
18XГТ	550	3–4	4–5	6–8	9–12	15–18	530–600
30X3МФ	530	4–5	6–8	9–12	15–18	–	700–760
38X2МЮА	550	4–5	5–7	7–9	9–12	15–18	900–950

При использовании методов второй группы покрытие образуется в результате конденсации главным образом нейтральных частиц, выбиваемых из мишени бомбардировкой ионами инертного газа (аргона, криптона) [24, 53]. 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, нанесение которых термовакуумными методами невозможно, с сохранением их стехиометрического состава. Находят применение системы с автономными ионными источниками. Системы распыления на постоянном токе используют для нанесения покрытий из проводящих электрический ток материалов, системы высокочастотного распыления – для покрытий из диэлектриков.

Наиболее полно преимущества методов, основанных на явлении катодного распыления, реализуются в системах магнетронного распыления [30], в которых разряд осуществляется в скрещенных электрических и магнитных полях. Благодаря этому производительность магнетронных распылительных систем одного порядка с производительностью установок, работающих по методу конденсации при ионной бомбардировке (КИБ) с электродуговым испарителем. Преимуществом их является отсутствие капельной фазы, что позволяет наносить покрытия практически без искажения исходного качества поверхности.

При использовании методов третьей группы частицы наносимого материала, переведенного тем или иным способом в газообразное или парообразное состояние, ионизируются и ускоряются в электрическом поле [14, 53]. Адгезия и служебные характеристики покрытий повышаются при увеличении энергии частиц, задаваемой ускоряющим напряжением. В России применяют методы конденсации при ионной бомбардировке, реактивного электронно-плазменного напыления и др. В табл. 3.21 приведены сведения об износостойкости покрытий, нанесенных методом КИБ [20].

Наконец, к методам четвертой группы относится ионное легирование, или имплантация [19, 24]. Основано оно 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 в результате искажений кристаллической решетки, возникающих при «вбивании» в нее ионов легирующего компонента.

Таблица 3.21. Триботехнические характеристики покрытий TiN, нанесенных на сталь Р6М5 методом КИБ, при трении со смазкой М14В2 по разным материалам (линейный контакт)

Материал контртела	HV ^{0,2}	Удельный объемный износ $\Delta \cdot 10^9$, мм ³ /мм		Коэффициент трения
		контртела	покрытия	
Медь М1	90	16000/600	58/5,4	0,11/0,09
Техническое железо Э	160	9000/140	110/80	0,12/0,08
Серый чугун	320	70/2,1	40/3,5	0,13/0,03
Сталь 45	560	2100/1,4	17/2,7	0,11/0,08
Сталь 20Х2Н4А цементованная	940	140/2,8	6,7/1,3	0,14/0,03
Сталь 38ХМЮА азотированная	1110	340/4,9	11/2,0	0,12/0,09

Примечание. В числителе – значения для покрытия в исходном состоянии, в знаменателе – после полирования.

* Твердость материала контртела.

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 плазмохимические реакции с ионами рабочего газа или специально вводимых в камеру добавок. Таким образом получают покрытия из самых разнообразных материалов и в самых невероятных комбинациях. Освоено получение чистых металлов, карбидов, нитридов, силицидов, халькогенидов, оксидов и т. п. Можно осаждать покрытия сложного состава (например, оксикариды), многослойные или переменного по толщине состава. Разработаны методы нанесения алмазоподобных пленок с очень высокой твердостью [17]. Образование покрытий при использовании реактивных (плазмохимических) процессов происходит в неравновесных условиях. Благодаря этому в тонких слоях могут возникать 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 неперетачиваемого инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, а также штампового инструмента и оснастки повышается в несколько раз при ионном реактивном нанесении тонких слоев (до 10 мкм) некоторых тугоплавких веществ (карбидов, нитридов, оксидов, оксикаридов). Высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия из MoS₂ без связующего, наносимые с помощью катодного распыления [10, 53].

3.3.4. Газотермические покрытия

Часть газотермических методов – газопламенных и электродуговой металлзации – 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 [6, 26, 31] материал плавится и распыляется струей дуговой низкотемпературной плазмы, состоящей из электронов, положительных ионов и нейтральных атомов. Ионизированный поток газа характеризуется высокими температурами (5000–10000 °С) 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 осуществляют в камерах, предварительно заполненных инертным газом. Получили развитие и другие методы нанесения покрытий, например 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, MoS₂).

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 отличаются высокой износостойкостью (табл. 3.22).

Таблица 3.22. Относительная износостойкость плазменных покрытий (при истирании по шлифовальной шкурке в течение 1 мин при скорости скольжения 8 м/с и давлении 1,7 МПа)

Материал покрытия	Износ, мг	$\epsilon_{отн}$
Сталь:		
низкоуглеродистая	900	1
легированная молибденом 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

При детонационном способе нанесения покрытий [3, 31, 38, 60] в канал открытого с одного конца ствола через смеситель подают порцию газовой смеси, способной детонировать при зажигании, и порцию порошка наносимого материала. С помощью запального устройства инициируют 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 °С) и разгоняются до очень высоких скоростей (примерно до 1000 м/с).

Таблица 3.23. Основные свойства наиболее широко применяемых за рубежом детонационных покрытий

Марка и состав покрытия, % (мас.)	HV0,1	$t_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	σ_b		σ^1	Поржестость, %	R_z , мкм, после		$\gamma, \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$	Обеспечиваемые параметры
				МПа				нанесения покрытия	обработки		
LW-1 (WC+9 % Co)	1250–1400	540	2,2 ^{*2}	560	175,7	175,7	0,5	–	–	14,2	Высокая износостойкость Высокая износостойкость, повышенная стойкость к механическим и термическим воздействиям
LW-1N30 (WC+13 ... 15 % Co)	1100–1250	540	2,5 ^{*2}	560–630	175,7	175,7	0,5–1	3	0,025	13,4	
LW-5 (25 % WC+5 % Ni+ смесь карбидов W и Cr)	1000–1200	760	2,6	280	140,6	140,6	0,5–1	–	–	10,1	Сопротивление коррозии
LC-1C (Cr ₃ C ₂ +15 % (Ni+Cr))	1000–1200	980	3,6	530	–	–	0,5–1	–	–	6,5	Износостойкость при высоких температурах и в коррозийных средах, стойкость в струе пламени
Cr ₃ C ₂ +35 % (об.) (Ni+Cr)	700	980	–	–	126,5	126,5	1	4	0,05	6,5	Сопротивление при повышенных температурах износу и ударным нагрузкам
LCN-1 (Cu+41 % Ni+4 % In)	300	–	–	–	77,3	77,3	0,5–1	6	–	8,4	Адгезионные свойства
LC-4 (99 % Cr ₂ O ₃)	1350	540	6–7 ^{*2}	140	–	–	–	–	–	5	Стойкость против окисления, пониженная стойкость к ударам
LC-5 (Cr ₂ O ₃ +20 % Al ₂ O ₃)	925	870	–	105	–	–	0,75–1,5	–	–	4,77	Сопротивление износу, химическому воздействию и высоким температурам
LA-2 (99 % Al ₂ O ₃)	1100–1200	650–980	2,2 ^{*3}	150	70,0	70,0	1–2	4	0,05	3,45	Сопротивление износу, химическому воздействию и высоким температурам

^{*1} Прочность сцепления с базовым материалом. ^{*2} При 20–540 °С. ^{*3} При 20–1000 °С.

При ударе частиц, обладающих высокой кинетической энергией, о твердую поверхность освобождается большое количество теплоты и температура частиц может достигать 4000 °С.

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 высокую 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 °С.

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. 3.23 [60].

Нанесение детонационных покрытий позволяет многократно увеличивать износостойкость деталей машин. Ниже приведены относительные износ и износостойкость детонационных покрытий толщиной 150–200 мкм твердых сплавов на титановом сплаве из ВТ3-1 в одноименном сочетании ($p=29,4$ МПа; $t=300$ °С; амплитуда виброперемещений 110 мкм; $N=5 \cdot 10^5$ циклов) [38]:

	ВК8	ВК15	ВК20
Относительный износ	0,553	0,35	0,282
Относительная износостойкость . . .	1,81	2,86	3,55

Примечание. Износ и износостойкость титанового сплава ВТ3-1 приняты равными 1.

3.3.5. Покрытия, получаемые методами лазерного модифицирования и легирования поверхностных слоев

Значительные возможности повышения износостойкости поверхностей появились с разработкой промышленных лазеров [23, 24, 27, 78]. 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 [23] предварительным нанесением каким-либо способом слоя легирующего компонента на поверхность с последующим расплавлением лучом лазера, а также введением порошка напыляемого материала в луч лазера.

Накоплен достаточно большой опыт лазерного упрочнения деталей из сталей и чугунов. В табл. 3.24 и 3.25 [24] приведены сведения о повышении износостойкости сталей в результате лазерной закалки (в сопоставлении с другими методами упрочнения).

Таблица 3.24. Износ образцов из сталей, упрочненных разными методами (трение по сферическому образцу из стали ШХ15 со смазкой маслом И-12)

Марка стали	Метод упрочнения	HV0,1	Линейный износ, мкм		Износ по массе, мг		Суммарный износ	
			образца	сферы	образца	сферы	линейный, мкм	по массе, мг
40X	Лазерная закалка	730–980	2,45	52,51	1,74	0,27	54,96	2,01
3X2B8	Азотирование	–	2,66	110,20	2,79	1,16	112,86	3,95
20	Цементация	–	10,50	52,17	3,75	0,26	62,67	4,01
40X	Закалка и отпуск	437	23,00	23,43	12,74	0,05	46,43	12,79
40X	То же	250	70,00	31,25	40,44	0,09	101,25	40,53

Таблица 3.25. Триботехнические характеристики образцов из стали 45 после лазерной закалки (трение по бронзе БрОФ10–1 с пластичной смазкой ЦИАТИМ-201)

Схема испытания	Состояние стального образца	Линейная интенсивность изнашивания	Коэффициент трения
Вал – частичный вкладыш	Исходное	$0,18 \cdot 10^{-9}$	0,040
	После обработки лазером	$0,98 \cdot 10^{-10}$	0,033
Вал – плоский образец	Исходное	$1,15 \cdot 10^{-8}$	0,189
	После обработки лазером	$0,40 \cdot 10^{-8}$	0,072

Примечание. Длительность испытаний для первой схемы 3 ч, для второй – 8 ч.

3.3.6. Электроискровые покрытия

Метод электроискрового легирования основан на переносе материала электрода (преимущественно материала анода) при импульсном искровом разряде в газовой среде на обрабатываемую поверхность [77]. Для нанесения электроискровых покрытий применяют вибрирующие электроды. В Болгарии был разработан способ упрочнения вращающимся электродом. В России 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 элементов, входящих в наносимый материал, с элементами основы с образованием химических соединений. Нанесение электроискровых покрытий существенно повышает износостойкость и антифрикционность поверхностей. Установленная при испытаниях по методике М.М. Хруцова и М.А. Бабичева [72] (изнашивание по электрокорундовой шкурке) относительная износостойкость электроискровых покрытий различных тугоплавких соединений на стали 45 (износостойкость стали 45 в исходном состоянии $\epsilon = 1$) приведена ниже [77].

Материал электрода . . .	TiB ₂	ZrB ₂ + +5 % Mo	Cr ₂ C ₂ + +15 % Ni	B ₄ C	Cr ₃ C ₂	TiC
$\epsilon_{отн}$	8,0	7,6	6,6	5,6	5,5	5,0
Материал электрода . . .	TiC+30 % 12X18H9T	T15K6	ZrC	ZrN	NbC	
$\epsilon_{отн}$	4,7	4,7	4,0	3,3	3,5	

В табл. 3.26 [77] даны значения относительной износостойкости и твердости стали Ст3, упрочненной переходными металлами и их карбидами.

Таблица 3.26. Твердость и относительная износостойкость стали Ст3, упрочненной переходными металлами и их карбидами

Материал электрода	Толщина слоя, мкм	HV0,1	$\epsilon_{отн}$	Материал электрода	Толщина слоя, мкм	HV0,1	$\epsilon_{отн}$
Ti	280–300	1100–1200	1,2	W	150–200	2100–2900	3,4
Zr	300–350	1300	1,4	TiC	80–120	3040	9,9
V	230	930–1200	1,66	ZrC	70–120	2650	7,8
Nb	200–250	1300–1370	1,7	NbC	80–150	1660	5,0
Ta	200	1500–1600	2,4	Cr ₃ C ₂	120–160	1600	4,0
Cr	300	1013–1250	1,7	Mo ₂ C	100–180	1400	1,4
Mo	150–200	1700–1900	1,9	WC	110–180	1700; 3200	2,0

Примечание. Износостойкость стали Ст3 принята равной 1.

При гидроабразивном изнашивании в результате электроискрового легирования существенно повышается износостойкость сталей (табл. 3.27) [77]. Разгаростойкость поверхностей после электроискрового легирования также значительно возрастает (табл. 3.28) [77].

Области целесообразного применения электроискрового легирования достаточно многообразны. Однако дискретность и пористость покрытий, небольшая толщина, низкая производительность, высокая шероховатость обработанных поверхностей и остаточные напряжения растяжения препятствуют широкому их внедрению. Электроискровое легирование применяют для увеличения надежности деталей машин, приборов и механизмов, инструмента (режущего и деформирующего), кокилей для литья металлов, а также для размерного восстановления деталей машин.

Таблица 3.27. Твердость и относительная износостойкость стали 45, упрочненной карбидами и боридами переходных металлов, при гидроабразивном изнашивании*

Материал электрода	HV0,1	$\epsilon_{отн}$
TiC	1950	5,22
Cr ₃ C ₂	1450	4,07
TiB ₂	2900	3,76
ZrB ₂	2100	3,62
ZrC	2050	3,08
NbC	1850	3,05

Примечание. В исходном состоянии сталь 45 имеет твердость 380 HV0,1 и $\epsilon = 1$.

* Испытания в течение 4 ч при диаметре струи 6 мм и скорости закрепленных на диске образцов 60 м/с.

Таблица 3.28. Относительная разгаростойкость* стали 5ХНВ, упрочненной электронским легированием

Материал электрода	Число циклов до образования сетки трещин	Относительная разгаростойкость	Материал электрода	Число циклов до образования сетки трещин	Относительная разгаростойкость
Сталь 5ХНВ в исходном состоянии	100–150	1	Тантал	550–700	5,0
Феррохром	600–700	5,2	14 % В+86 % Fe	700–800	6,0
Сплав 93 % TiC+7 % Fe	600–700	5,2	Молибден	600–700	5,2
			Хром	600–700	5,2

* При циклическом нагреве ТВЧ до 650 °С и охлаждении в проточной воде до 30–40 °С.

3.3.7. Гальванические покрытия

Гальваническими методами можно наносить покрытия из металлов, сплавов и композиционных материалов [6, 12, 24, 79].

Таблица 3.29. Твердость и относительная износостойкость никелевых композиционных покрытий

Основа покрытия	MoS ₂ , % (об.)	HV0,1	ε _{отн}
Ni+WC	6,4	390	1,1
Ni+TiC	8,6	450	5,5
Ni+Al ₂ O ₃	7,3	380	2,7
Ni+ZrO ₂	6,2	380	1,1
Ni+ZrB ₂	6,2	380	1,5
Ni+HfB ₂	4,0	400	2,7

Примечание. Износостойкость дана в сравнении с основной покрытием (без MoS₂).

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 (табл. 3.29) [6]. Значения коэффициента трения существенно снижаются при введении в состав покрытия даже небольшого количества твердой смазки (около 1 % MoS₂).

Введение в состав покрытий на основе хрома, железа и никеля частиц других материалов (КЭП) существенно повышает их триботехнические свойства [6, 12]. Так, добавление порошков карбидов, оксидов, боридов, алмаза позволяет существенно повысить износостойкость, а халькогенидов, графита и полимеров – антифрикционность покрытий. Методом электролитического осаждения можно получать покрытия толщиной до 100 мкм с содержанием частиц до 40 % (об.).

В покрытия вводят карбиды (WC, TiC, ZrC, HfC, SiC, B₄C), бориды (TiB₂, ZrB₂, HfB₂, TaB₂), силициды (TaSi₂), нитриды (BN, Si₃N₄), оксиды (Al₂O₃, Cr₂O₃, SiO₂, ZrO₂, ThO₂), сульфиды (MoS₂, WS₂).

При одновременном введении в покрытие

3.3.8. Покрытия, получаемые при химико-термическом модифицировании поверхностных слоев

Этот метод сочетает в себе одновременное термическое и химическое воздействия с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя [24, 29, 37, 63, 79]. Осуществляется он в результате отдельного, а в ряде методов совместного диффузионного насыщения металла или сплава неметаллами (C, N, B, Si и др.) или металлами (Al, Cr, Zr и др.) в определенном температурном интервале в активной или специально-активируемой среде.

Для повышения износостойкости и долговечности деталей из сталей широко применяют цементацию (науглероживание), нитроцементацию (цианирование, карбонитрацию) и азотирование; в меньшей степени используют насыщение бором и кремнием, а также металлами (Cr, Al и др.). Выбор того или иного способа насыщения и диффундирующего элемента (элементов) осуществляют с учетом требований, предъявляемых к свойствам модифицированной поверхности, вида производства, размеров обрабатываемых деталей, требуемой толщины получаемого слоя и т. п.

В табл. 3.30 в качестве примера приведены значения относительной износостойкости сталей 45, 10 и У8 после различных видов химико-термической обработки [29].

Таблица 3.30. Относительная абразивная износостойкость отдельных фаз диффузионных слоев, полученных при различных видах химико-термической обработки ($p = 1$ МПа, $v = 30$ м/с)

Вид обработки	Марка стали	Фазовый состав слоя	$\epsilon_{отн}$
Борирование двухфазное (в расплаве $B_4C + Na_2B_3O_7$)	45	FeB	6,75
	45	Fe ₂ B	2,24
	10	FeB	5,00
	10	Fe ₂ B	2,07
	У8	FeB	6,10
	У8	Fe ₂ B	1,76
Борирование однофазное (в расплаве $SiC + Na_2B_4O_7$)	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	1,56
	10	α -фаза	0,98
Хромосилицирование	45	Cr ₂₃ C ₆ + Cr ₇ C ₃	5,17
	У8	Cr ₂₃ C ₆ + Cr ₇ C ₃	6,75
Алюмосилицирование	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

Примечание. Износостойкость закаленной стали 45 принята равной 1.

3.4. Материалы, устойчивые к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок

При повышенных нагрузках, особенно при ударном ее приложении, износ и повреждения 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 [9] следующие виды изнашивания: ударно-абразивное, ударно-гидроабразивное, ударно-усталостное и ударно-тепловое.

Разрушение металла при ударно-абразивном изнашивании осуществляется в результате малоциклового усталости микрообъемов металла вследствие циклического приложения нагрузки при упругопластическом контакте. Ударно-абразивное изнашивание связано с внедрением в металл твердых частиц. 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 есть результат связанного с ударом внедрения частиц и относительного их перемещения (последнее приводит к микрорезанию).

Ударно-усталостное изнашивание осуществляется при многократном соударении поверхностей в отсутствии абразивных частиц. В основе этого механизма изнашивания лежит многократная деформация поверхностного слоя, приводящая к наклепу, охрупчиванию и последующему отделению частиц. Износостойкость существенно снижается с увеличением энергии удара.

Для ударно-теплового изнашивания характерно соударение 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: повышенная твердость и одновременно определенный запас по пластичности; повышенная теплостойкость и высокая коррозионная стойкость.

В России и за рубежом основными материалами для эксплуатации в условиях высоких давлений и ударных нагрузок являются инструментальные стали [24]. 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 [9, 24, 25, 36, 63, 64, 70].

При ударно-абразивном и ударно-гидроабразивном изнашивании основным критерием интенсивности изнашивания является твердость [63]. М.М. Тененбаум [64] оценивает способность абразивных частиц внедряться в поверхностный слой и разрушать его при перемещении по отношению значений микротвердости испытуемого материала H и абразива H_a : $K_T = H/H_a$. При критическом значении коэффициента $K_T = 0,5 \dots 0,7$ возможно разрушение металла при однократном воздействии абразивной частицы (микрорезание); при $K_T > 0,7$ процесс изнашивания переходит в многоцикловой (частицы износа отделяются в результате многократного деформирования металла) с резко снижающейся интенсивностью изнашивания по мере увеличения значения K_T . При микрорезании интенсивность изнашивания обратно пропорциональна твердости, а при многоцикловом разрушении эта зависимость не является линейной.

При одинаковой твердости стали интенсивность изнашивания уменьшается по мере увеличения содержания остаточного аустенита [64]. По существу, это стали с метастабильным аустенитом. В процессе разрушения микрообъемов металла происходит превращение аустенита в мартенсит; при этом достигается определенное упрочнение поверхностного слоя, создаются сжимающие внутренние напряжения, выделяются мелкодисперсные карбиды по плоскостям скольжения.

При ударно-абразивном изнашивании линейная связь между износостойкостью и твердостью сохраняется до определенного значения энергии удара [64], при превышении которого наблюдается либо увеличение темпа интенсивности изнашивания при возрастании твердости, либо твердость в определенном интервале вообще не влияет на износостойкость. При ударно-гидроабразивном изнашивании повышение содержания углерода и соответственно твердости в зависимости от энергии удара неоднозначно влияет на интенсивность изнашивания.

При ударно-усталостном изнашивании износостойкие материалы выбирают не только по критерию твердости. Динамический характер приложения нагрузок не позволяет использовать инструментальные стали, обладающие высокой твердостью (60–63 HRC₃). У этих сталей низкая пластичность, не способствует перераспределению напряжений на участках их концентраций. Поэтому сопротивляемость изнашиванию, связанная с накоплением повреждений 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 более 52–54 HRC₃ не наблюдается прямой зависимости между твердостью и прочностью. При перегреве в процессе закалки, несмотря на высокую твердость, прочность резко падает (рис. 3.3) [24]. При термической обработке необходимо достичь благоприятного сочетания высоких твердости и прочности с удовлетворительной пластичностью.

Снижение твердости с 68 до 55 HRC₃ мало изменяет показатели пластичности. Существенное возрастание этих показателей происходит при снижении твердости до 45–48 HRC₃ благодаря коагуляции карбидов. Пластичность возрастает в большей степени у сталей, содержащих меньшее количество карбидов с большей способностью к коагуляции (карбиды Me₃C, Me₂₃C₆), и в меньшей степени для более легированных сталей с карбидами типа Me₆C.

Рекомендуются следующие интервалы значений твердости для сталей различного назначения:

более 59–66 HRC₃ (высокий) – для металлорежущих инструментов и штампов холодного деформирования (твердость, близкую к верхнему значению, устанавливают для инструментов чистового резания, а также для штампов для прессования и вытяжки);

42–50 HRC₃ (умеренный) – для штампов горячего деформирования, в первую очередь для создания высокой сопротивляемости термической усталости; штампов холодного деформирования (например, высадочных), работающих в условиях ударных нагрузок; некоторых деревообрабатывающих и слесарно-монтажных инструментов.

Износостойкость сталей по мере увеличения температуры отпуска (рис. 3.4) снижается [9]. Темп снижения

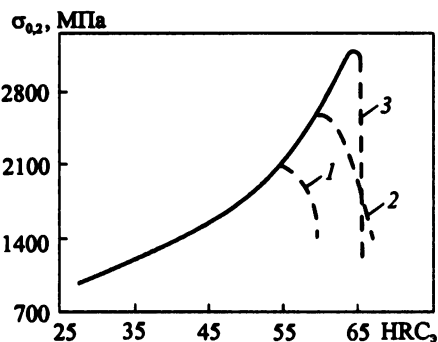


Рис. 3.3. Изменение временного сопротивления инструментальных сталей в зависимости от твердости при растяжении для HRC₃ до 52–53 и при изгибе для HRC₃ > 54–55. Штриховые линии указывают зависимости, полученные в результате перегрева при закалке:

- 1 – сталь с 0,5 % C; 1,5 % Cr и 2,5 % W;
- 2 – сталь с 1,2 % C; 1,7 % W; 0,7 % Cr и 1 % Si;
- 3 – быстрорежущая сталь типа P6M5

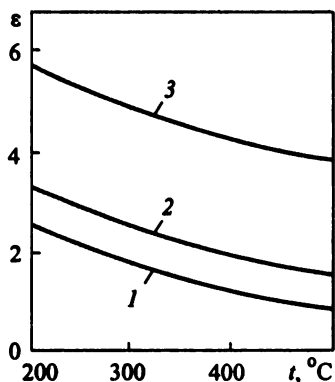


Рис. 3.4. Влияние температуры отпуска на относительную износостойкость углеродистых сталей:

- 1 – сталь 45; 2 – сталь У12; 3 – сталь У8

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 [9]. Легированные стали оказываются более износостойкими, чем углеродистые. Так, сталь У12 имеет в 2–3,2 раза меньшую износостойкость, чем Х12М [9]. Сложные карбиды в легированной стали положительно влияют на износостойкость при малой (5 Дж/см^2) энергии удара. С увеличением энергии удара до 14 Дж/см^2 карбидная фаза 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 большее содержание легирующих элементов в стали допускается.

При ударно-тепловом изнашивании надежность инструментов определяется прежде всего сопротивляемостью термической усталости. Эта характеристика определяется теплостойкостью – способностью сплавов при нагреве рабочей части, возникающем в процессе 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 теплостойкость больше.

У сталей с интерметаллидным упрочнением теплостойкость определяется выделяющимися частицами фаз-упрочнителей, которые могут эффективно задерживать общее разупрочнение вследствие большей дисперсности, отличного типа кристаллической решетки и большей сопротивляемости к коагуляции при нагреве, чем твердого раствора.

Сопротивление термической усталости характеризуется также разгаростойкостью – сопротивляемостью стали образованию поверхностных трещин при многократном нагреве – охлаждении. Особенно это существенно для штамповых теплостойких и полутеплостойких сталей. На разгаростойкость влияют структурное состояние, запас пластичности, чувствительность к окислению и другие факторы.

При твердости стали в готовом штампе 45–50 HRC₃ структура трооститная. Слабыми участками в таких сталях являются отдельные включения феррита и карбиды. При содержании феррита более 10–15 % сопротивление разгаростойкости снижается весьма существенно. Карбиды или интерметаллиды сильно снижают разгаростойкость при содержании более 5–8 % и неравномерном их распределении [24].

Для основной группы штамповых сталей, чем больше пластичность (вязкость), тем выше 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 Ребиндера [46]), коррозии и эрозии.

Для изготовления деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, широко применяют высокомарганцовистые стали [24], в частности аустенитная сталь марки 110Г13 (1–1,3 % С, 11–14 % Мn, до 0,3 % Si, ≤ 0,03 % Р и ≤ 0,03 % S). В литом состоянии ее структура представляет аустенитную матрицу и карбиды. Для повышения прочности и пластичности ее закалывают в воде от 1100–1150 °С (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 изготовляют звенья гусениц (траки) тракторов и других гусеничных машин, шары дробильных мельниц, щеки камнедробилок и другие изделия, работающие при ударно-абразивном изнашивании.

Высокой износостойкостью при значительных давлениях и ударных нагрузках обладают высококобальтовые (20–30 % Co) твердые сплавы. Их применяют для оснащения бурового и штампового инструмента, работающего при значительных ударных нагрузках.

3.5. 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 °С.

В кавитационном разрушении материала определенное значение имеет абразивное изнашивание, так как в потоке жидкости в том или ином количестве всегда имеются абразивные частицы [22, 24]. На разрушение также влияет 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, 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 деформации расходуется на разрушение: большая же ее часть превращается в теплоту, идет на накопление дефектов, меньшая 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 отличаются весьма существенно (рис. 3.5) [39].

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 отличаются весьма существенно (рис. 3.5) [39].

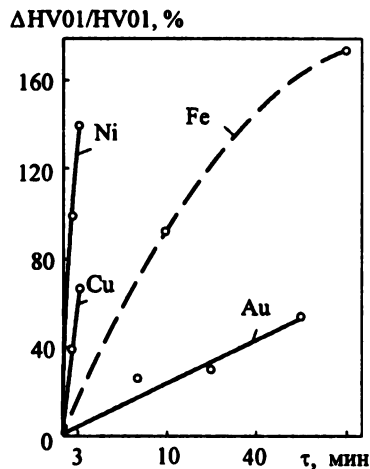


Рис. 3.5. Относительное изменение микротвердости разных металлов при микроударном нагружении

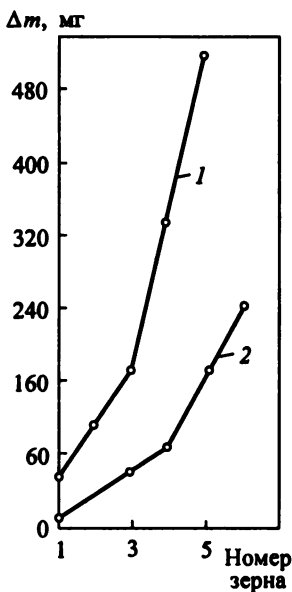


Рис. 3.6. Влияние величины зерна на сопротивление разрушению феррита (1) и аустенита (2) (Δm – потеря массы за 6 ч)

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 значительная роль отводится структурному фактору. Так, стали ферритного класса сопротивляются кавитационному разрушению хуже, чем аустенитные (рис. 3.6) [39]. Кавитационная стойкость обратно пропорциональна размеру зерна. Легирование увеличивает кавитационную стойкость. Для сталей ферритного класса более эффективно легирование хромом, чем кремнием. Еще больший эффект достигается при легировании молибденом.

У аустенитных сталей легирование в значительно большей степени влияет на сопротивление кавитационному разрушению, чем у ферритных. В качестве легирующих компонентов в них используют марганец и никель. По продолжительности инкубационного периода и кавитационной стойкости марганцевые стали существенно превосходят никелевые. Кавитационная стойкость резко повышается при распаде аустенита с образованием мартенситной структуры. Мартенсит, не содержащий углерода, обладает низкой кавитационной стойкостью. Максимальная кавитационная стойкость достигается при 0,4 % С. Дальнейшее повышение содержания углерода не приводит к увеличению кавитационной стойкости. Мартен-

ситная структура обеспечивает большую кавитационную стойкость не только в сталях, но и в медных и титановых сплавах [39].

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 в процессе деформации, субзерна имеют малые размеры, а искажения решетки проявляются в большей степени, чем у мартенсита, образованного в результате закалки. Поэтому твердость первого выше, чем второго. Такие стали хорошо сопротивляются разрушению при кавитации.

Предложены два варианта получения мартенситной структуры, обладающей высокой кавитационной стойкостью [39]:

1) использование легированных хромом и марганцем стали, которые образуют нестабильные твердые растворы, способные упрочняться при деформации в процессе эксплуатации либо вследствие образования мартенсита;

2) образование в сталях безуглеродистого мартенсита, упрочняющего их при последующем старении.

К сплавам первой группы относятся аустенитные стали, типичным представителем которых является сталь 30X10Г10 (табл. 3.31) [39]. 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.

Таблица 3.31. Химический состав, свойства и кавитационная стойкость некоторых сталей, используемых в гидротурбостроении

Марка стали	Содержание элементов (остальное Fe), % (мас.)				σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	$\Delta m^*, \text{мг}$
	C	Mn	Cr	Ni				
30Л	0,14–0,22	0,3–0,65	–	–	400	225	25	1456
20Х 13	0,14–0,22	–	12–14	–	600	400	20	870
17Х18Н9	0,13–0,20	–	17–19	8–10	570	210	40	890
30Х10Г10	0,3–0,4	9–11	9–11	–	700	400	16	15

* Потеря массы после 6 ч испытаний.

Нередко в рабочих условиях детали должны сочетать высокую кавитационную стойкость с коррозионной и абразивной стойкостью. С этой целью в хромомарганцевые стали, содержащие, % (мас.): до 0,1 С, 13–17 Cr и 10–15 Mn, добавляют 0,1–0,3 % N₂.

К сплавам второй группы относятся стали с высоким содержанием никеля и низким – углерода (0,03–0,05 %), что позволяет при закалке получать безуглеродистый мягкий мартенсит. Легирующие элементы подбирают с учетом того, чтобы при отпуске происходил распад пересыщенного твердого раствора с образованием интерметаллидов. Такими легирующими элементами являются алюминий и титан, которые в сочетании с никелем могут давать интерметаллиды типа Ni₃Ti, Ni₃Al и Ni₃(Ti, Al).

Разработан новый класс сталей, названный трипсталями, в которых превращение инициируется деформацией (*Transformation Induced Plasticity*). Высокая прочность и пластичность, а также кавитационная стойкость достигаются у них выбором определенного состава стали, а также режимов термической обработки и температурной деформации. Трипстали имеют состав, % (мас.): 0,3 С, 9 Cr, 8 Ni, 4 Mo, 2 Mn, 2 Si или 0,25 С, 25 Ni, 4 Mo, 1,5 Mn. Это сплавы, сочетающие самую высокую прочность и вязкость. Поэтому трипстали являются самыми надежными конструкционными материалами.

Кавитационная стойкость чугунов, как правило, ниже, чем стали. Наиболее слабыми участками микроструктуры, подверженными разрушению от кавитации, являются графитовые включения. Серый чугун с пластинчатым графитом обладает низкой кавитационной стойкостью. По сравнению с серым чугуном с шаровидным графитом имеет более высокую сопротивляемость кавитационным разрушениям, а белые чугуны 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, содержащий 1 % Ni и 0,28 % Mo, имеет в два раза большую кавитационную стойкость, чем нелегированный [39].

Нередко в условиях воздействия кавитации работают детали, изготавливаемые из цветных сплавов [79]. 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 микроударов при кавитации начинается на границах и распространяется в сторону менее прочной α -фазы. С увеличением количества β -фазы и более равномерным ее распределением кавитационная стойкость возрастает. В бронзах со структурой α -твердого раствора повышение кавитацион-

ной стойкости достигается легированием. В табл. 3.32 это прослеживается на примере различных бронз, легированных кремнием, бериллием, марганцем и др. [39].

Таблица 3.32. Сравнительная стойкость бронз со структурой α -фазы

Марка бронзы	Режим термической обработки	Δt , мг, через τ , ч					НВ
		1	2	3	4	5	
БрОЦ4-3	Закалка 800 °С, вода	215	446	958	1154	1640	65
БрКМц3-1	То же	170	351	608	962	1200	57
БрБ2	Закалка 850 °С, вода	150	214	470	545	700	117
БрАЖМц10-3-1,5	Нагрев до 700 °С, охлаждение с печью	84	188	356	451	580	150
БрАМц9-2	Закалка 1000 °С, вода + отпуск 480 °С, 2 ч, воздух	29	57	119	240	34	115
БрАЖМц6-2-3	Закалка 800 °С, вода	10	28	42	96	12	240

Таблица 3.33. Сравнительная стойкость бронз со структурой α - и β -фаз

Марка бронзы	Структура	Δt , мг, через τ , ч									
		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

Δt , мг

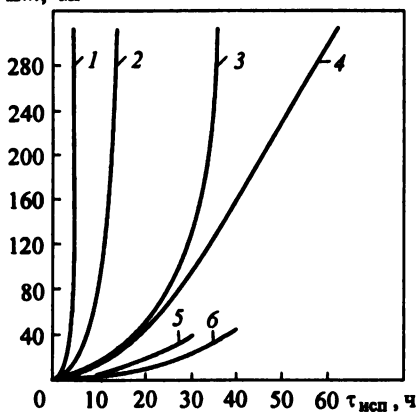


Рис. 3.7. Кавитационная стойкость титановых сплавов в зависимости от фазового состава и времени испытания:

1 – α -фаза; 2 – α + Ti₂Me (40 % (об.) β -фазы + 60 % (об.) α -фазы); 3 – 40 % (об.) β -фазы + 60 % (об.) α -фазы (высокодисперсной); 4 – β -фаза; 5 – β -фаза + ω -фаза; 6 – 70 % (об.) β -фазы + 30 % (об.) α -фазы

Еще в большей степени легирование повышает кавитационную стойкость в бронзах со структурой β -фазы (табл. 3.33).

Существенно влияет на кавитационную стойкость форма структурных составляющих. Предпочтительной является зернистая форма, а не пластинчатая, так как она способствует меньшей концентрации напряжений и распределяет энергию удара на большую площадь.

В качестве кавитационностойких получают распространение титановые сплавы. Наиболее высокой стойкостью обладают сплавы, содержащие до 70 % (об.) β -фазы и мелкодисперсные выделения α -фазы [39] (рис. 3.7). В титановых сплавах, так же как и в медных, кавитационная стойкость во многом определяется фазовым составом. Химический состав сплавов, содержащих β -фазу, приведен в табл. 3.34 [77]. Титановые (α + β)-сплавы подразделяют на упрочняемые и не упрочняемые после закалки. Высокопрочные (термически упрочняемые) титановые сплавы марок ВТ6, АТ-6, ВТ3-1, ВТ14, ВТ16, ВТ22, ВТ23, ВТ 15 содержат от 4 до 85 % (об.) β -фазы.

Таблица 3.34. Химический состав титановых сплавов (остальное Ti), % (мас.)

Марка сплава	Al	Mo	Cr	Fe	Si	V	Nb
<i>$\alpha + \beta$-сплавы</i>							
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	—
<i>Псевдо-β-сплавы</i>							
BT15	3,0	7,5	11,0	—	—	—	—
TC6	3,0	5,0	11,0	—	—	6	—
<i>β-сплавы</i>							
4201	—	33,0	—	—	—	—	—
HT-50	—	—	—	—	—	—	50

3.6. 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 предъявляют 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 приспособливаться 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 металлические и неметаллические (полимерные, древесные, графитовые и др.) комбинированные (металлополимерные, графитометаллические и др.) антифрикционные материалы.

3.6.1. Металлические материалы

Наиболее распространенными являются сплавы на основе свинца и олова (бabbиты), медные (бронзы и латуни), алюминиевые и цинковые сплавы. В меньшей мере используют чугуны и стали.

Бabbиты. Наиболее давними подшипниковыми материалами являются мягкие сплавы на оловянной и свинцовой основах [63]. Бabbиты обладают низкой твердостью 13–32 НВ, имеют невысокую температуру плавления (240–320 °С), повышенную размягчаемость (9–24 НВ при 100 °С), отлично прирабатываются и обладают высокими антифрикционными свойствами. В то же время у них низкое сопротивление усталости, что влияет на работоспособность подшипников.

В России стандартизованы две группы сплавов (табл. 3.35) [24]. В 1981 г. литейные сплавы на основе свинца и олова для многослойных подшипников регламентированы международным стандартом ИСО 4381–91. Наиболее распространенные в зарубежной практике баббиты, их химический состав и свойства приведены в табл. 3.36–3.38.

Таблица 3.35. Химический состав баббитов, применяемых в России

Марка баббита	Sn	Pb	Sb	Cu	Ca	Na	Ni	Cd	Mg
<i>ГОСТ 1320–74</i>									
Б88	Основа	–	7,3–7,8	2,5–3,5	–	–	0,15–0,25	0,8–1,2	–
Б83	»	–	10,0–12,0	5,5–6,5	–	–	–	–	–
Б83С	»	1,0–1,5	9,0–11,0	5,0–6,0	–	–	–	–	–
Б16	15,0–17,0	Основа	15,0–17,0	1,5–2,0	–	–	–	–	–
БН ^{*1}	9,0–11,0	»	13,0–15,0	1,5–2,0	–	–	0,1–0,5	0,1–0,7	–
БС6	5,5–6,5	»	5,5–6,5	0,1–0,3	–	–	–	–	–
<i>ГОСТ 1209–90</i>									
БКА ^{*2}	–	»	–	–	0,95–1,15	0,7–0,9	–	–	–
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
БК2Ц ^{*3}	1,5–2,1	»	–	–	0,95–1,15	0,7–0,9	–	–	–

*¹ Сплав также содержит 0,5–0,9 As. *² То же 0,05–0,20 Al. *³ То же 0,4–0,6 Zn.

Таблица 3.36. Химический состав литейных свинцовых и оловянных баббитов, % (мас.) (ИСО 4381–91)

Марка сплава	Pb	Sb	Sn	Cu	As	Cd	Ni	Fe
<i>Свинцовые баббиты</i>								
PbSb15SnAs	80,0–84,0	13,5–15,5	0,9–1,7	0,7	0,8–1,2	0,02	–	–
PbSb15Sn10	71,0–77,0	14,0–16,0	9,0–11,0	0,7	0,6	0,05	–	0,1
PbSb14Sn9CuAs	70,0–78,0	13,0–15,0	8,0–10,0	0,7–1,5	0,3–1,0	0,3–0,7	0,2–0,6	0,1
PbSb10Sn6	80,0–86,0	9,0–11,0	5,0–7,0	0,7	0,25	0,05	–	0,1
<i>Оловянные баббиты</i>								
SnSb12Cu6Pb	1,0–3,0	11,0–13,0	79,0–81,0	5,0–7,0	0,1 ^{*1}	–	–	0,1
SnSb8Cu4	0,35	7,0–8,0	88,0–90,0	3,0–4,0	0,1 ^{*2}	–	–	0,1
SnSb8Cu4Cd	0,35	7,0–8,0	88,0–90,0	3,0–4,0	0,5	0,8–1,2	0,1–0,5	0,05

Примечание. Все свинцовые баббиты содержат 0,1 % Bi; 0,005 % Al и 0,2 % других элементов, а оловянные – 0,08 % Bi; 0,005 Al; 0,005 Zn и 0,2 % других элементов (кроме SnSb12Cu6Pb, где других элементов содержится 0,4 %).

*¹ В отдельных случаях допускается до 0,8 %. *² То же до 0,5 %.

Выбор подшипниковых сплавов следует осуществлять 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) [24].

Таблица 3.37. Свойства прутков из литейных свинцовых баббитов (ИСО 4381–91)

Свойство	PbSb15SnAs	PbSb15Sn10	PbSb14Sn9CuAs	PbSb10Sn6
НВ при $t, ^\circ\text{C}$:				
20	18	21	22	16
50	15	16	22	16
120	14	14	16	14
150	10	10	10	8
$\sigma_{0,2}$, МПа, при $t, ^\circ\text{C}$:				
20	39	43	46	39
50	37	32	39	32
100	25	30	27	27
σ^* , МПа	60	70	67	65
τ_{-1} , МПа, при $N=10^7$ циклов	± 24	± 25	± 26	± 21
$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	25	24	24,7	25,3
$\Delta t, ^\circ\text{C}$:				
плавления	240–350	240–270	240–420	240–260
литья	450–500	480–520	480–520	480–520
$\gamma, \text{т/м}^3$	9,7	9,9	9,7	10,3

* Прочность связи между материалом подшипника и сталью, содержащей 0,1 % С.

Таблица 3.38. Свойства прутков из литейных оловянных баббитов (ИСО 4381–91)

Свойство	SnSb12Cu6Pb	SnSb8Cu4	SnSb8Cu4Cd
НВ при $t, ^\circ\text{C}$:			
20	25	22	28
50	20	17	25
120	12	11	19
150	8	8	13
$\sigma_{0,2}$, МПа, при $t, ^\circ\text{C}$:			
20	61	47	62
50	60	44	44
100	36	27	30
σ^* , МПа	40	80	90
τ_{-1} , МПа, при $N=10^7$ циклов	± 28	± 31	± 34
$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	22,7	23,9	23,9
$\Delta t, ^\circ\text{C}$:			
плавления	183–400	233–360	233–360
литья	480–520	440–460	440–460
$\gamma, \text{т/м}^3$	7,4	7,3	7,3

* Прочность связи между материалом подшипника и сталью, содержащей 0,1 % С.

Баббиты, используемые для тонкослойных вкладышей, должны удовлетворять следующим требованиям:

не иметь резко выраженной неоднородной структуры (возможно использование однофазных сплавов при достаточном сопротивлении металла смятию);

иметь повышенное сопротивление усталости, поскольку работа тонкослойных прецизионных вкладышей протекает в основном в условиях жидкостного трения (антифрикционные свойства материала менее важны);

твердость баббитового антифрикционного слоя должна быть невысокой (до 15–20 НВ), так как при этом улучшается прирабатываемость, а сопротивляемость смятию в тонком слое повышается под влиянием подложки;

способность слоя полуды сопротивляться разрушению должна быть высокой для обеспечения надлежащей долговечности подшипников.

В России для тонкослойных биметаллических подшипников применяют баббиты СОС6-6, БС2 и БК2 с добавкой переplава (табл. 3.39) [24].

Таблица 3.39. Химический состав баббитов, используемых для тонкослойных подшипников, % (мас.)

Баббит	Sn	Sb	As	Другие элементы
СОС6-6	5,5–6,5	5,5–6,5	–	–
БС2	1,5–2,5	9,0–10,0	0,5–0,8	–
БК2 с добавкой переplава	1,5–2,1	–	–	0,08–0,3 Са, 0,04–0,09 Mg, 0,15–0,3 Na

* Остальное Pb.

Биметаллы сталь–баббит получают методом заливки сплава на движущуюся стальную ленту; подшипники, вкладыши и другие детали изготавливают простыми операциями штамповки.

Подшипники с толщиной баббитового слоя около 3 мм используют при сравнительно легких условиях работы. Баббитовый слой (Б83, Б16, БН, БКА, БК2Ц) таких подшипников 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 вкладыши тихоходных мощных судовых двигателей, компрессоров и др.

Сплавы на медной основе. Употребляемые в качестве антифрикционных, эти сплавы 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 бронз, обладающих достаточной прочностью и твердостью. Бронзы, употребляемые в таких подшипниках, подразделяют на сплавы с высоким (до 10 %) и низким (до 3 %) содержанием олова. 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 употребляют бронзы, содержащие повышенное количество свинца без олова (БрС30) или с 1 % Sn. Биметаллы сталь–свинцовая бронза изготавливают заливкой бронзы или напеканием порошка бронзы на движущуюся стальную ленту. Вкладыши подшипников и другие детали производят из биметаллической ленты штамповкой. На рабочую поверхность подшипников обычно наносят тонкий слой из мягких металлов (Pb, Sn, Cu). Для монометаллических подшипников иногда используют свинцовистую бронзу БрОС5-25 (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 тяжелонагруженных трущихся деталях (дорожные машины, тяжелое станочное оборудование, скользящие соединения теплопередающего оборудования и др.) применяют высокопрочные алюминиевые бронзы [43]. В качестве антифрикционных используют так называемые кремнистые и марганцовистые латуни [63] и находят применение алюминиево-железные латуни.

Сплавы на основе алюминия. Эти сплавы обладают достаточным сопротивлением усталости, коррозионной стойкостью в маслах, имеют сравнительно высокую задиристость и хорошие антифрикционные свойства. Перечисленные свойства определили тенденцию к замене ими антифрикционных сплавов на свинцовой и оловянной основе, а также свинцовистой бронзы.

Таблица 3.40. Химический состав алюминиевых антифрикционных сплавов (ГОСТ 14113–78), % (мас.)

Марка сплава	Ni	Mg	Sb	Cu	Si	Sn	Ti
<i>Сплавы группы I</i>							
АН-2,5	2,7–3,3	–	3,5	–	–	–	–
АСМ	–	0,3–0,7	3,5–6,5	–	–	–	–
<i>Сплавы группы II</i>							
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

* Остальное Al.

Алюминиевые сплавы используют для производства монометаллических деталей (втулок, 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 получения биметаллов большой толщины применяют сварку взрывом. Для монометаллических подшипников употребляют сравнительно твердые сплавы, а слой биметаллических вкладышей изготавливают из менее твердого пластичного металла.

Алюминиевые сплавы подразделяют преимущественно по микроструктурному признаку [24], что отражает антифрикционные свойства сплавов, так как общепризнанной является роль мягких структурных составляющих в уменьшении износа и увеличении сопротивляемости задиру трущейся пары. К группе I относятся сплавы, имеющие включения твердых структурных составляющих (FeAl_3 , Al_3Ni , CuAl_2 , Mg_2Si , AlSb , Si и др.) в пластичной основе металла. В сплавах группы II наряду с твердыми составляющими имеются мягкие включения. Составы применяемых антифрикционных сплавов на алюминиевой основе представлены в табл. 3.40 [24, 40, 43].

Наиболее употребляемые сплавы вошли в международный стандарт ИСО [4383–91] (табл. 3.41).

Таблица 3.41. Химический состав^{*1} сплавов на основе алюминия (ИСО 4383–91), % (мас.)

Сплав	Cu	Sn	Ni	Cd	Si	Fe	Mn	Ti	Другие элементы
AlSn20Cu	0,7–1,3	17,5–22,5	0,1	–	0,7 ^{*2}	0,7 ^{*2}	0,7 ^{*2}	0,2	0,5
AlSn6Cu	0,7–1,3	5,5–7,0	1,3	–	0,7 ^{*2}	0,7 ^{*2}	0,7 ^{*2}	0,2	0,5
AlSi4Cd	0,05–0,15	–	–	0,8–1,4	3,5–4,5	0,35	0,2	0,2	0,25
AlCd3CuNi	0,7–1,3	–	0,7–1,3	2,7–3,5	0,7 ^{*2}	0,7 ^{*2}	0,7 ^{*2}	0,1	0,15
AlSi11Cu	0,7–1,3	0,2	0,1	–	10,0–12,0	0,3	0,1	0,1	0,3

*1 Остальное Al. *2 Общее содержание Si, Fe и Mn не более 1 % (мас.).

С появлением тяжело нагруженных двигателей в автомобилестроении, тракторостроении, транспортном машиностроении и других появилась острая необходимость в материалах подшипников, обладающих повышенной задиростойкостью. В связи с этим в России, Японии, Англии и Америке разрабатывают алюминиево-оловянные сплавы, содержащие до 30 и даже 40 % Sn, и отработывают технологию изготовления сплавов, содержащих свинец. Такие сплавы обладают [43] способностью хорошо сопротивляться задиру при ультратонких смазочных слоях, однако эта особенность достигается наиболее полно при ≥ 14 % Pb. В России разработан метод получения алюминиево-свинцовых (до 30 % Pb) сплавов из гранул [40]. Гранулы отливают 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 10^2 – 10^4 °C/с. Дальнейшее прессование гранул осуществляют различными способами.

В последние годы в России получил распространение алюминиевый сплав AO10C2, содержащий, %: 10 Sn, 2 Pb, 0,3 Zn, 1,5 Cu, 1,5 Si, обладающий повышенной (до 40 %) усталостной прочностью и задиростойкостью по сравнению со сплавом AO20-1 [44]. Для более тяжелых условий эксплуатации разработаны сплавы с высоким содержанием кремния. Однако для них из-за низких противозадирных свойств на рабочую поверхность подшипников приходится наносить приработочный слой из мягких металлов.

Сплавы на основе цинка. Обладая низкой температурой плавления (около 400 °C), эти сплавы 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 попадании 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 [24], либо с помощью слоя жидкого цинка, наносимого способом горячего цинкования.

Подшипники и другие детали из цинковых сплавов используют в литом и обработанном давлением (прокатка, прессование) состояниях. Составы стандартных сплавов (ГОСТ 21437–91) и их свойства приведены в табл. 3.42 [62].

Таблица 3.42. Химический состав и механические свойства стандартных цинковых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Zn), % (мас.)			Механические свойства [*] , не менее		
	Al	Cu	Mg	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	НВ
ЦАМ9-1,5	9,0–11,0	1,0–2,0	0,03–0,06	250/300	1,0/10,0	95/85
ЦАМ10-5	9,0–12,0	4,0–3,5	0,03–0,06	250/350	0,4/4,0	100/90

^{*} В числителе – литых, а в знаменателе – обрабатываемых давлением.

После горячей обработки давлением (250–300 °С) прочность и пластичность цинковых сплавов повышаются. Это сказывается и на сопротивлении усталости. Например, для литого сплава ЦАМ9-1,5 предел выносливости при переменном изгибе вращающихся круглых образцов $\tau_{-1} = 50$ МПа, а для прессованного сплава – $\tau_{-1} = 100–110$ МПа [24].

Составы наиболее употребляемых за рубежом цинковых сплавов приведены в табл. 3.43 [62].

Таблица 3.43. Химический состав^{*} зарубежных цинковых сплавов, % (мас.)

Сплав	Al	Cu	Mg	Mn
1010 (Германия)	9–11	0,6–1,0	0,02–0,05	–
410 (Германия)	3,7–4,3	0,6–1,0	0,02–0,05	–
Алцен 305 (Австрия)	30	5	–	–

^{*} Остальное Zn.

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. 3.44 [24].

Таблица 3.44. Химический состав^{*} антифрикционных сталей, % (мас.)

Сталь	Cu	Al	C	Si	Mn	S	P
Медистая	3,2	2,5	0,1	–	–	–	–
Графитизированная	–	–	1,6	1,0	0,3	0,03	0,03

^{*} Остальное Fe.

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. Чугуны с глобондальной формой графита и с толстыми пластинками более износостойки, чем чугун с тонкими пластинками. В структуре антифрикционного чугуна желательнее иметь минимальное количество свободного феррита (не более 15 %), а, кроме того, в нем должен отсутствовать свободный цементит [24]. Область использования антифрикционных чугунов ограничивается легкими условиями работы (см. гл. 2).

Сплавы, изготавливаемые методом порошковой металлургии. Прессованием или прокаткой порошков на железной и медной основах и последующим спеканием удается изготовить различные пористые антифрикционные детали [33, 69]. Такие детали перед установкой пропитывают маслом. Как правило, их эксплуатируют в условиях недостатка смазки, хотя они устойчиво работают и при обильной смазке (трение со смазочным материалом) [69]. 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 изделия.

Для определения границ использования антифрикционных сплавов необходимо знать их предел выносливости, прирабатываемость, сопротивляемость изнашиванию, совместимость и задиристость [8, 24, 43].

3.6.2. Комбинированные неметаллические материалы

Антифрикционные материалы на основе полимеров предназначены, как правило, для работы с жидкостями, не обладающими смазочными свойствами (например, вода), и в условиях 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 конструкционной основы (металлической, углеграфитовой, древесной).

Полимеры являются также существенной частью (связующим) большинства твердо-смазочных 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 АСП вместо традиционных (металлических) смазываемых подшипников скольжения и подшипников качения предпочтительнее вследствие упрощения конструкции подшипниковых узлов, снижения трудоемкости при изготовлении и эксплуатации, уменьшения размеров и массы, экономии нефтяных смазочных материалов и т. д.

По составу АСП можно разделить на несколько групп [63, 67].

К первой группе относятся 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 поли-

меры (полиэтилен, фторопласт-4 и другие фторполимеры), а также жидкие или пластичные смазочные материалы (типа маслянистых). Выбор типа и количества наполнителя проводят 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 его оптимальное количество колеблется в широких пределах.

Механические и теплофизические свойства АСП с антифрикционными добавками мало отличаются от соответствующих свойств наполненных полимеров (им присущи многие недостатки исходных полимеров: низкая теплопроводность, высокие и нестабильные значения коэффициента термического расширения, повышенное водопоглощение и др.).

Вторую группу образуют композиции с комплексными наполнителями. Наряду с антифрикционными добавками они содержат 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.

В третью группу входят комбинированные материалы типа металлофторопластовой ленты [59]. Они совмещают в себе преимущества составных частей: прочность и теплопроводность металлической (стальной) основы; высокие теплопроводность, прочность и противозадирные свойства пористого слоя из сферических частиц антифрикционного сплава; антифрикционные свойства заполняющей поры и образующей поверхностный слой смеси полимера с наполнителем. В России выпускают комбинированные материалы для работы без смазки (с фторопластом-4) и со смазкой (фторопласт-4 заменен полиформальдегидом).

В качестве основы (связующего) АСП применяют термопластичные и терморезистивные полимеры [2, 21, 24, 41, 45, 61, 65, 67, 71]. Из термопластичных наиболее часто используют высокопрочные кристаллические полиамиды (П6, П12, П66, П610, ПА610), капрон, нейлон, сополимеры формальдегида, поликарбонат, терлостойкие 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, эпоксиднокремниорганические и др.

По методу переработки в изделия АСП подразделяют на литые, 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 штамповкой производят втулки и подшипники другой формы (в том числе сферические). АСП применяют для изготовления втулок подшипников скольжения, уплотнений, поршневых колец, сепараторов шарикоподшипников, направляющих, мелкокомодульных зубчатых колес и т. п.

Важным показателем АСП является теплопроводность. Наибольшей теплопроводностью, приближающейся к теплопроводности металлов, обладают графитопласты, в которых содержание углеродного наполнителя достигает 75–85 %. Однако такие материалы имеют малую сопротивляемость 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, оксидных 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 обладают АСП на основе фторопласта-4).

Разработано большое количество АСП разнообразных составов [2, 24, 41, 45, 59, 61, 63, 65, 67, 71]. 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 оценивают по допустимым значениям произведения $p\nu$ (где p – давление, МПа; ν – скорость скольжения, м/с) для заданного ресурса работы. Так как в большинстве случаев значения коэффициента трения зависят от скорости скольжения, то долговечность можно характеризовать произведением $f p \nu$, представляющим собой мощность трения (работу сил трения в единицу времени). Учитывая, что практически вся работа сил трения превращается в теплоту, в некоторых случаях о долговечности судят по произведению $p\nu$ и возникающей в зоне трения температуре [15, 59].

Наполненные фторполимеры. Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) обладает уникальными антифрикционными свойствами [21, 71]. При трении без смазки по самому себе, металлам и другим твердым телам при малых скоростях скольжения коэффициент трения составляет сотые доли единицы. При повышении температуры значения коэффициента трения уменьшаются, а в диапазоне отрицательных температур – возрастают. 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

$$f = (824 - 3,1t)\nu^{0,3} \cdot 10^{-4},$$

где t – температура, °С; ν – скорость скольжения, см/с.

В отличие от большинства 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 антискачковыми и демпфирующими свойствами. Однако у него низкие механическая прочность, износостойкость и теплопроводность; высокий коэффициент термического расширения. Введение наполнителей во фторопласт-4, не изменяя коэффициента трения, существенно повышает его износостойкость (в сотни и даже тысячи раз) и механические свойства [21].

В нашей стране выпускают композиционные антифрикционные материалы на основе фторопласта-4 с различными наполнителями: Ф4Г21М7 (21% графита и 7 % дисульфида молибдена); Ф4Г20М5С10 (20 % графита, 5 % дисульфида молибдена и 10 % рубленого стекловолокна), Ф4К20 (20 % кокса), Ф4ГЗ (3 % графита), Ф4Г10 (10 % графита), Ф4С15 (15 % стекловолокна), Ф4К15М5 (15% кокса и 5% дисульфида молибдена) [21, 41, 67, 71]. Согласно ОСТ 48-75-73, материалы 7В-2А и АФГ-80ВС содержат в качестве наполнителя графит, а АФГМ – графит (35 %) и дисульфид молибдена (15 %) [21].

Свойства графитофторопластовых материалов приведены в табл. 3.45 [21].

Таблица 3.45. Свойства графитофторопластовых материалов

Материал	$\gamma, \text{т/м}^3$	Водопоглощение, %	$\sigma_p, \text{МПа, при}$		НВ	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$	$\alpha \cdot 10^5, \text{°C}^{-1}$	$E_{\text{сж}}, \text{ГПа}$	$t_{\text{раб}}, \text{°C}$
			сжатии	изгибе					
7В-2А	1,9–2,0	0–0,1	35–38	20–30	9–13	8,2–17,4	1,5–2,5	0,9–1,2	250
АФГМ	2,1–2,3	0–0,02	15–26	10–15	7–14	1,16–1,74	4,0–7,0	0,7–1,0	180
АФГ-80ВС	2,05–2,15	0–0,05	11–19	–	6–10	0,58–1,16	8,0–13,0	0,6–0,9	200

* Допустимая рабочая температура.

Разработаны и другие композиционные материалы на основе фторопласта-4 (наполненные фторопласты) [67, 71]: 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, а значения коэффициента трения приблизительно такие же, как у чистого фторопласта-4.

Композиционные материалы на основе фторопласта-4 могут работать без смазки при p 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 превышают 0,1–0,2 МПа·м/с (для 1000 ч работы).

Металлофторопластовые материалы. Предназначены эти материалы для подшипниковых узлов машин и приборов, работающих в различных условиях [15, 56, 57, 59].

Подшипники скольжения, изготавливаемые штамповкой из ленточного металлофторопластового комбинированного материала [15, 56, 59], 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) и p до 150 МПа. Металлофторопластовый материал состоит из стальной основы (стали 08кп, 10кп), тонкого напеченного пористого слоя из высокооловянистой бронзы (0,3 мм), поры которого заполнены смесью фторопласта-4 с дисульфидом молибдена (рис. 3.8).

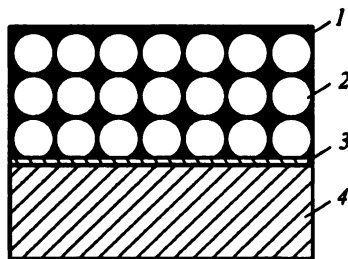


Рис. 3.8. Строение металлофторопластового материала:

1 – фторопласт-4 с наполнителем;
2 – сферические частицы бронзы;
3 – медный подслей; 4 – стальная основа

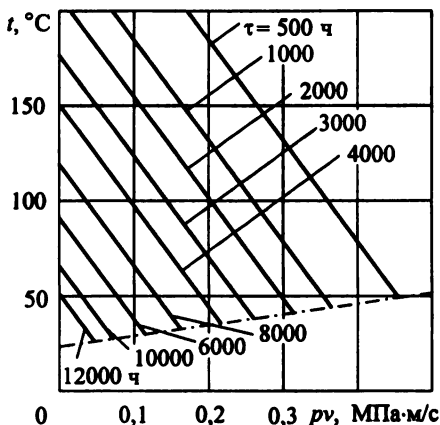


Рис. 3.9. Номограмма для определения длительности работы металлофторопластовых подшипников по значению произведения pv и температуре

Разработана методика выбора подшипников для работы без смазки по значениям произведения pv и температуры в зоне контакта, определяемой расчетным методом или экспериментально. Номограмма для определения длительности работы подшипников без смазки приведена на рис. 3.9. Задавая долговечностью узла и его температурой, можно определить допустимые значения произведения pv и в конечном счете размеры подшипника.

Работоспособность подшипников в жидких средах, не обладающих смазочным действием (воде, бензине, керосине, спирте), а тем более при наличии скачков, существенно выше, чем при работе без смазки. При использовании 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 [21].

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 использование в сельскохозяйственном машиностроении (в том числе в зерноуборочных комбайнах), в станкостроении взамен игольчатых подшипников качения и монометаллических бронзовых подшипников, для высоковольтной аппаратуры. Их успешно применяют в аксиально-поршневых насосах гидроприводов кузнечно-прессового оборудования, перспективно их использование в роботостроении. Последнее обусловлено малыми размерами и массой этих подшипников, 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

Ленточный материал (ТУ 27-01-01-1-75) изготавливают на линиях непрерывного действия с использованием методов порошковой металлургии, а подшипники (свертные втулки, упорные шайбы, сферические подшипники) из него — штамповкой. Обработка резанием сведена к минимуму. Рабочая и тыльная поверхность подшипников не подвергаются обработке. Исходные материалы расходуются экономно, так как технологические процессы изготовления ленты и подшипников практически безотходные. Наружный диаметр металлофторопластовых подшипников в два 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 размеров и массы корпусных деталей.

свойствами, что подтверждает их многолетняя эксплуатация в несущей системе соосных вертолетов. Перспективно применение металлофторопластовых подшипников в машинах, узлы трения которых работают при низких и криогенных температурах. Безграничны возможные области их использования в сельскохозяйственном машиностроении и машиностроении для животноводства и кормопроизводства.

Металлофторопластовую ленту выпускают шириной до 100 мм и толщиной 1,1; 1,6 и 2,6 мм (ТУ 27-01-01-1-75). В соответствии со стандартом СТП 27-01-20-117-75 изготавливают свертные металлофторопластовые втулки диаметром 6–55 мм (разной длины). В табл. 3.46 приведены размеры металлофторопластовых подшипников [59].

Таблица 3.46. Размеры металлофторопластовых подшипников (СТП 27-01-20-117-75), мм

Диаметр		Толщина	Длина ²	Диаметр		Толщина	Длина ²
внутренний ¹	наружный ¹			внутренний ¹	наружный ¹		
8	10	1,0	8, 10, 12	25	28	1,5	16, 20, 25, 32, 40, 45
10	13	1,5	6, 10, 12, 16, 25	30	33	1,5	20, 25, 32, 40, 45, 50
12	15	1,5	8, 10, 12, 16, 20, 25	32	37	2,5	20, 25, 28, 32, 40, 50
15	18	1,5	10, 12, 16, 20, 22, 25	36	41	2,5	25, 32, 40, 50
16	19	1,5	10, 12, 16, 20, 25	40	45	2,5	32, 40, 45, 50, 60
18	21	1,5	12, 16, 20, 25, 32	45	50	2,5	32, 40, 50, 60, 65
20	23	1,5	12, 16, 20, 25, 32, 40	55	60	2,5	32, 40, 50, 60, 65, 70, 75
22	25	1,5	16, 20, 25, 32, 36, 40				

¹ Предельные отклонения размеров подшипников в запрессованном состоянии по Н8. Внутренний диаметр посадочного места в изделии выполняется по посадке Н8/у8 с параметром шероховатости поверхности $Ra \leq 0,63$ мкм. ² Предельное отклонение 0,2 мм.

Рекомендуемые зазоры при работе металлофторопластовых подшипников без смазки приведены ниже [59]:

Внутренний диаметр втулок, мм	10–18	18–30	30–40	40–55
Расчетный диаметральный зазор, мкм	30	35	40	45
Гарантированный зазор, мкм:				
минимальный	30	35	40	45
максимальный	100	125	140	145
средний	65	80	90	95

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 меняется. Незначительное изменение зазора наблюдается лишь вследствие несколько большего, чем у стали, коэффициента термического расширения у бронзы (слой пористой бронзы имеет толщину $\approx 0,3$ мм) и некоторого «выпучивания» при нагреве фторопласта с наполнителем из пор этого слоя.

В некоторых отраслях промышленности действуют собственные стандарты, в том числе и на свертные втулки с фланцем.

Для смазки водой (в том числе горячей) нашли применение изготовляемые индивидуально подшипники и подпятники из металлофторопластового материала С-I и С-I-У.

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, при этом 0,2–0,3 мм; благодаря чему 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 («скользкие» резины).

Достаточно широкое применение находят антифрикционные материалы на основе природного полимерного материала – древесины. Как правило, используют древесину твердых пород (бакаут, самшит, бук), содержащую смолистые, обладающие смазочным действием, вещества. Менее ценные породы дерева модифицируют – уплотняют, пропитывают смазочными материалами, полимерами, соединениями металлов [24, 41, 61, 67]. . .

Для подшипников скольжения применяют материалы ДСП-Б, ДСП-В и ДСП-Г. В табл. 3.47 приведены свойства материалов, разработанных в ИММС АН Белоруссии [65]. Древесную крошку и шпон используют в качестве наполнителей в древеспластах-антифрикционных материалах на основе полимеров.

Таблица 3.47. Свойства антифрикционных материалов на основе древесины

Материал	$\gamma, \text{т/м}^3$	НВ (с торца)	Водопогло- щение ¹ , %	Коэффициент трения (без смазки)	$l^2 \cdot 10^9$	$t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$
АПД-1	1,15–1,25	10–11	10–12	0,08–0,12	0,7	90–100
АПД-2	1,1–1,5	10–11	25–30	0,03–0,04	0,0055	80–90
АПД-3	1,3–1,4	16–18	3–6	0,09–0,12	0,84	200–210

Примечание. Древесина АПД-1 наполнена раствором полиэтилена в масле МС-20; АПД-2 – солями меди, ее оксидами и глицерином; АПД-3 – стеаратом в кремнеорганическом соединении.

¹ За 30 сут при влажности 95 %. ² Интенсивность линейного изнашивания.

Расширяется применение тканых антифрикционных материалов, которые состоят из волокон (нитей) фторопласта-4 («полифена»), сотканых вместе с волокнами из другого материала (полимера, металла и т. д.) таким образом, что лицевая сторона состоит преимущественно из волокон фторопласта-4, а обратная – из волокон другого материала. Освоено производство тканых материалов нафтлен-8 и даклен. Такие

материалы к конструкционной основе приклеивают (в случае использования металлических волокон их можно припаивать). Их свойства приведены ниже [2]:

	Нафтлен-8	Даклен
Масса 1 м^2 , кг	$\geq 1,5$	< 0,6 (легкий) 0,6–1,2 (средний) > 1,2 (тяжелый)
Толщина, мм	$2,5 \pm 0,5$	0,3–0,5
Диапазон рабочих температур $\Delta t_{\text{раб}}$, °С	–80...+120	–194...+200
Допустимое рабочее давление, МПа	600	200–600
Коэффициент трения при $p = 20$ МПа:		
по полированной стали	0,032–0,016	0,028–0,016
по шлифованной стали	0,044–0,041	0,036–0,032

Углеродистые 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 [24, 34, 51, 63, 79]. Они выгодно отличаются от других неметаллических материалов высокими теплопроводностью (93–210 Вт/(м·°С)) и электропроводностью ($\rho = (5...50) \cdot 10^{-6}$ Ом·м), термической стойкостью в нейтральных и восстановительных газовых средах (до 3000 °С) и очень низкими значениями коэффициента термического расширения ($\alpha = (2...3) \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹). Графитовые материалы стойки в большинстве кислот и щелочей, растворах солей и органических растворителях. При трении по ряду металлов без смазки коэффициент трения графитовых материалов может составлять 0,04–0,05. В вакууме [58], инертных газах, осушенном воздухе и ряде других обезвоженных газах значения коэффициента трения могут возрастать на порядок, что сопровождается интенсивным пылевидным изнашиванием.

Графитовые антифрикционные материалы применяют 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 (> 1500 °С) прочность графитовых материалов в инертных средах самая высокая.

По технологическим признакам графитовые антифрикционные материалы подразделяют 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. 3.48 [24, 63, 79].

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 отпрессованные заготовки (при 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 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.

Таблица 3.48. Свойства графитовых антифрикционных материалов

Материал	σ_p , МПа, при		E , ГПа	Твердость по Шору	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	λ , Вт/(м·°C)	γ , т/м ³	$t_{\text{рвб}}$, °C, в среде	
	сжатии	изгибе						окислительной	восстановительной и нейтральной
АО-1 500	150–180	60–80	16	60–65	2,5	93	1,65–1,70	350–400	1300–1500
АО-600	110–150	50–70	14	55–60	2,5	87	1,5–1,6	300–350	1200–1400
АГ-1 500	80–100	40–50	13	45–50	2,7	186	1,7–1,8	400–450	2300–2500
АГ-600	60–80	35–40	10	43–45	2,7	186	1,6–1,7	400–450	2300–2600
АО-1 500-Ф	300–350	140–170	16,5	70–75	2,5	93	1,75–1,80	–	–
АО-1 500-К	230–250	90–100	16	70–72	2,5	93	1,70–1,75	–	–
АГ-1 500-Ф	160–180	70–80	13,5	55–60	2,7	186	1,75–1,80	–	–
АГ-1 500-К	100–120	50–60	13	50–60	2,7	186	1,70–1,75	–	–
АО-1 500-CO5	260–280	100–120	17	70–75	3,7	105	2,7–3,0	300	300
АО-1 500-Б83	250–270	90–100	17	70–75	3,7	105	2,6–2,9	230	230
АГ-1 500-CO5	150–160	60–75	13,5	65–70	3,8	210	2,5–3,1	–	–
АГ-1 500-Б83	140–150	50–60	13,5	70–72	3,8	210	2,4–2,8	–	–
АГ-1 500-БрС30	150–160	60–70	13,2	70–75	3,7	204	2,2–2,5	–	–

Примечание. Ф – феноло-формальдегидная смола; К – кремнийорганическая смола; CO5 – свинец с 5 % олова; Б83 – высокооловянистый баббит; БрС30 – свинцовистая бронза.

Полученные таким образом материалы – пористые. При заполнении пор металлами или полимерами повышаются плотность и прочностные характеристики материалов.

Разработаны другие материалы на основе углерода. К ним относятся углеситалл, силицированный графит, углеграфитовые материалы с различными пропитками (для работы на воздухе при повышенных температурах) и т. п. В качестве фрикционных (антифрикционных) применяют 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 применяют в качестве компонентов композиционных материалов на основе полимеров и металлов. Значительное количество мелкодисперсного графита (природного и синтетического) используют 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 (керамикам, различным твердым тугоплавким соединениям) на поверхности контртела 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 [58], 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 агрегатов, 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.

3.7. 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 и нагрузок; 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 [41]. Наименьший коэффициент трения назначают из условий создания необходимой силы трения, наибольший определяется ограничением по самозаклиниванию. В автомобильных тормозах и на железнодорожном транспорте расчетный коэффициент трения принят равным 0,35 и 0,2 соответственно, а в авиационных тормозах 0,25–0,5. Коэффициент трения изменяется в зависимости от многих параметров: скорости, нагрузки, температуры и определяется также материалами трущихся поверхностей [63].

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 [24]. 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 в условиях эксплуатации средней тяжести, применяют асбестофрикционные и спеченные на основе бронз материалы. Для тяжелых и сверхтяжелых условий эксплуатации используют спеченные материалы на железной основе, а в последние годы – углеродные материалы (углеродные или графитовые волокна в углеродной матрице). При выборе материала также принимают во внимание способность их прирабатываться и сопротивление изнашиванию.

Тормозные детали (накладки, колодки и др.) испытывают напряжения сжатия, растяжения, сдвига, в ряде случаев ударные нагрузки [24]. Поэтому необходимо учитывать характеристики механических свойств (пределы текучести при растяжении и сжатии, временное сопротивление, ударную вязкость, твердость) как при комнатной, так и рабо-

чей температурах. Из физических свойств большое значение имеют теплоемкость и теплопроводность [24], от которых в значительной мере зависит температура, возникающая при торможении. Тепловой режим трения определяется также конструкцией и размерами фрикционного сочленения. Важной характеристикой является коэффициент взаимного перекрытия $K_{вз}$ [24], 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 передается в глубь трущихся тел, и тепловой режим сопряжения становится более напряженным.

Фрикционные материалы разделяют на две группы: металлические и 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 [28]. 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 уменьшается также интенсивность изнашивания колес.

Перспективно использование спеченных фрикционных материалов на основе железа и меди. Из материалов на железной основе наибольшее распространение получили материалы ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50А и СМК-80 [42, 61, 68]. Их состав и свойства приведены в табл. 3.49.

Фрикционные спеченные материалы на основе меди широко используют 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 дан в табл. 3.50 [68].

В тормозах автотранспорта, тракторов, железнодорожного транспорта нашли широкое применение асбофрикционные материалы [41]. Главным компонентом фрикционных асбополимерных материалов является хризотил-асбест (ГОСТ 12871-97), 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 используют шлаковую или минеральную вату, 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 фрикционных асбополимерных материалах углеродные наполнители: измельченный кокс, графит, технический углерод. Для снижения температуры на поверхности трения добавляют металлические наполнители в виде порошков или стружки меди, латуни, цинка, алюминия, железа и т. п., повышающие теплопроводность.

Связующими в таких материалах являются каучуки и смолы, а также их комбинации. Наибольшее распространение находят бутадиеновые (СКБ, СКБСР, СКД), бутадиен-нитрильные (СКН-26м), бутадиен-метилвинилпиридиновые, стирольные, метилстирольные и другие синтетические каучуки, а также натуральный каучук. Широкое применение нашли феноло-формальдегидные и фенолоанилино-формальдегидные (модифицированные) смолы.

Таблица 3.49. Химический состав и свойства фрикционных материалов на железной основе, получаемых методом порошковой металлургии [42, 61, 68, 79]

Материал	Содержание, % (мас.)					Другие добавки	γ_3 , т/м ³	НВ	σ_b	$\sigma_{ср}$	$\sigma_{сж}$	λ , Вт/(м ² С)	Износ ² , мм	
	Fe	Cu	Ni	C ¹	SiO ₂								Ас-бест	фрикционного материала
ФМК-8	45	-	25	7	-	-	6,0	60-90	9-100	70-90	450-500	37,7	5-8	1-2
ФМК-11	64	15	0	9	3	6 BaSO ₄	6,0	80-100	50-70	80-100	300-350	19-46	16	2
МКВ-50А	64	10	0	8	0	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	5,0	80-100	30-40	67-85	150-210	18,8-27,2	6	5,5
СМК-80	48	23	0	0	0	0	5,7	80-100	-	65-80	200-250	21-29	1,25	4

¹ Графит. ² За одно торможение при скорости 20 м/с и мощности торможения $2,5 \cdot 10^7$ Вт(м²с)

Таблица 3.50. Состав фрикционных материалов на медной основе, получаемых методом порошковой металлургии, % (мас.)

Cu	Sn	Pb	Fe	C (графит)	Асбест	SiO ₂	Другие добавки
68-76	8-10	7-9	3-5	6-8	0	0	-
60-75	6-10	20	5	1-8	0	0	Ti, V, Si, 2-10 As, < 6 MoS ₂
18	2	3	3	3	30	0	40 стеклянной фритты, 10 сульфида алюминия
68-86	5-10	5-15	2	4-8	3	3	До 2 Ni
75	8	5	4	1-20	0	0	0,75 Si; 6 Zn

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 применяют 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 теплостойкость. 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, поэтому использование их нельзя считать перспективным.

Фрикционные асбополимерные детали крепят к металлическому каркасу или основе (колодке, ведомому диску сцепления и т. п.) различными способами: механически (заклепками, болтами, винтами), приклеиванием, приформовыванием (в процессе изготовления).

Тормозные и фрикционные устройства рассчитывают на теплостойкость и долговечность [41] с использованием инженерных методов расчета фрикционных пар и процессов торможения [24, 63], разработанных на основе уравнений тепловой динамики трения. Для оценочных практических расчетов применяются методы, базирующиеся на эмпирических и статистических данных стендовых испытаний и эксплуатации фрикционных устройств аналогичных конструкций [24].

В табл. 3.51 приведены некоторые сведения о серийно выпускаемых нашей промышленностью асбофрикционных материалах [41].

Более 80 % материалов производят 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. 3.52 и 3.53, а также в [41].

Прочностные свойства при повышении температуры для большинства асбофрикционных материалов снижаются (их зависимость описывается экспонентой). Для отдельных материалов при ~ 300 °С наблюдается переход через минимум (что объясняется структурными превращениями в материале в результате термохимических процессов).

Интенсивность изнашивания асбофрикционных материалов с повышением температуры до 600 °С возрастает. В основе механизма износа лежит сначала деструкция полимерного связующего, а затем процессы окисления и выгорания ряда компонентов. В табл. 3.54 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 [41].

Обычно при натурных 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 сроку службы, обусловленному износом.

Таблица 3.51. Краткая характеристика фрикционных асбополимерных материалов и типы изделий на их основе

Код материала	Обозначение асбокаучуковой массы	Типы изделий и краткая характеристика
01	АГ-1Б	Накладки барабанного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала
02	—	Накладки сцепления и пластины, формованные из картона, пропитанного феноло-формальдегидной смолой
03	К-5	Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста, комбинированного связующего (каучуки + 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, пропитанного смолой и армированного латунной или медной проволокой
12	—	Накладки сцепления, формованные из тканой асбестовой ленты, пропитанной олифой из льняного масла и армированной латунной или медной проволокой
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)

Код материала	Обозначение асбокаучуковой массы	Типы изделий 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 асболатексного 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)

Код материала	Обозначение асбокаучуковой массы	Типы изделий 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, пропитанной латексом и армированные латунной проволокой
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 тканые ленты для фрикционных узлов, армированные латунной проволокой, с масляной пропиткой
72	ЛАТ-1	Асбестовые тканые ленты для фрикционных узлов, армированные латунной проволокой, с масляно-смоляной пропиткой
73	—	Фрикционные асбестовые пластины из ткани, пропитанные феноло-формальдегидной смолой
76	5-6	Тормозные колодки для вагонов метрополитена, формованные из асбокаучукового материала
79	АГ-1БС-11	Тормозные колодки для автомобилей и автопоездов семейства МА3-6422
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
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

Таблица 3.52. Физико-механические характеристики накладок барабанных тормозов

Тип накладки	γ , т/м ³	НВ	σ_p , МПа, при			$E_{квр}$, ГПа	Коэффициент трения	c , кДж/(кг·°С)	λ , Вт/(м·°С)
			растяжении	сжатии	срезе				
Формованная на связующем: каучуковом комбинированном смоляном Эластичная	2,0–2,5	20–31	15–52	57–105	36–69	2,1–5,0	0,44–0,56	0,88–1,17	0,40–0,52
	2,0–2,6	21–44	20–25	43–152	21–39	3,9–6,7	0,42–0,50	0,92–1,15	0,41–0,64
	2,1–2,5	25–43	22–28	73–124	28–47	5,1–7,5	0,37–0,40	0,96–1,00	0,76–0,81
	1,9–2,3	2–4	10–12	22–50	14–26	0,11–0,21	0,46–0,49	0,88–1,10	0,43–0,50

Таблица 3.53. Физико-механические характеристики накладок сцепления

Тип накладки	γ , т/м ³	НВ	σ_p , МПа, при			$E_{квр}$, ГПа	Коэффициент трения	c , кДж/(кг·°С)	λ , Вт/(м·°С)
			растяжении	сжатии	срезе				
Формованная на связующем: каучуковом комбинированном Картольно-латескная Картольно-базелитовая Тканобазелитовая Спирально-навитая	2,2	23	34	89	34	3,2	0,47	1,13	0,51
	1,9–2,3	22–27	18–36	63–110	24–45	3,5–4,5	0,38–0,53	0,92–1,13	0,42–0,48
	1,6	19	11	73	51	4,8	0,43	1,09	0,35
	2,0	32	55	104	84	5,6	0,34	1,05	0,35
2,0–2,1	28–37	18–19	95–102	81–90	4,7–4,9	0,41–0,44	1,22	0,44–0,45	
1,5–1,8	11–17	14–28	37–57	11–12	3,3	0,5–0,57	1,26–1,34	0,38	

Таблица 3.54. Энергетическая интенсивность изнашивания фрикционных асбополимерных материалов при различных температурах [24, 41]

Код материала	Обозначение асбокаучуковой массы	Интенсивность изнашивания, мг/Дж, при t , °С				
		100	200	300	400	500
01	АГ-1Б	0,2	0,25	0,3	0,65	1,25
02	—	0,7	0,4	0,35	1,25	2,5
03	К-5	0,1	0,15	0,3	0,65	1,3
04	К-15-6	1,0	0,8	0,7	0,9	2,1
05	—	0,7	0,5	0,4	0,8	1,9
06	ФК-16Л	0,37	0,36	0,35	0,65	0,9
07	ФК-24А	0,13	0,15	0,25	0,6	0,9
08	43-612	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
13	Т-167	0,35	0,75	1,5	2,2	—
14	Т-266	0,6	0,4	0,35	0,75	1,6
15	Т-332	0,4	0,3	0,75	1,6	2,3
16	1-43	0,2	0,25	0,4	0,75	1,7
17	1-271	0,1	0,13	0,15	0,25	1,15
18	2-61	0,15	0,1	0,25	0,6	1,25
21	2-339	0,15	0,2	0,25	0,6	1,25
22	2-540	0,1	0,15	0,25	0,7	1,25
23	3-2	0,2	0,2	0,5	2,1	—
24	3-55	0,3	0,2	0,4	1,5	—
26	6КВ-10 (ЭМ-2)	0,45	0,5	0,65	1,6	—
27	6КВ-10А	0,43	0,5	0,60	1,5	—
28	6КВ-56А (ЭМ-2)	0,45	0,52	0,60	1,6	—
29	6КХ-1	0,2	0,2	0,6	1,2	1,8
31	6КХ-1Б	0,3	0,31	0,40	0,85	1,7
33	6КХ-15	0,3	0,35	0,40	0,8	1,2
34	6КФ-32	0,25	0,28	0,30	1,2	2,2
36	6КФ-58	0,25	0,27	0,32	1,25	2,3

Код материала	Обозначение асбокаучуковой массы	Интенсивность изнашивания, мг/Дж, при $t, ^\circ\text{C}$				
		100	200	300	400	500
37	6КФ-59	0,17	0,2	0,3	1,25	2,5
41	6КФ-61	0,3	0,25	0,3	0,5	0,8
42	6КФ-62	0,3	0,22	0,3	0,6	0,8
43	6ЛП-55	0,25	0,2	0,75	4	—
44	6-147Н (ЭМ-3)	0,5	0,4	0,5	2,4	—
45	7КФ-3А	0,3	0,32	0,4	0,8	1,6
47	7КФ-34	0,1	0,15	0,3	1,5	1,8
51	8-1	0,2	0,1	0,15	0,5	1,5
52	8-45 (ЭМ-1)	0,13	0,15	0,18	0,8	—
53	40Б-1-10	0,3	0,35	0,45	0,6	0,7
56	41-132	0,13	0,15	0,2	0,4	1,1
59	42-975	0,15	0,16	0,25	0,6	1,0
62	101-303	0,3	0,4	0,75	2,2	2,5
63	143	0,15	0,2	0,3	1,0	2,2
65	143-63Т-4	0,15	0,2	0,3	0,9	1,8
66	145-40	0,3	0,35	0,48	0,7	1,3
73	—	0,9	0,9	0,3	0,8	1,6
76	5-6	0,35	0,3	0,3	0,4	0,7
79	АГ-1БС-11	0,13	0,15	0,23	0,55	1,0
82	1-287	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30
85	2140	0,25	0,30	0,45	0,65	1,2
86	1-4	0,2	0,15	0,2	0,25	0,35
87	328-303	0,1	0,12	0,17	0,4	1,9
94	358-40	0,5	0,4	0,4	0,45	1,5
97	2141	0,15	0,2	0,25	0,8	1,6
99	321-24	0,25	0,35	0,70	2,0	2,3

Наибольшей фрикционной теплостойкостью обладают материалы Ретинакс А (ФК-16Л, код 06) и Ретинакс Б (ФК-24А, код 07). В соответствии с ГОСТ 10851-94, первый из них можно успешно применять в тормозах и муфтах при кратковременной поверхностной температуре до 1100 °С, второй – при температуре до 700 °С. Длительно действующая объемная температура для этих материалов не должна превышать 300 °С. Накладки дисковых тормозов из материалов 145-40 (код 66); Т-266 (код 4); 358-40 (код 94) выдерживают поверхностную температуру до 450–500 °С и объемную до 200–250 °С. Эластичные материалы (коды 26, 27, 28, 44, 52) применяют в узлах трения с поверхностной температурой до 200 °С. Остальные фрикционные асбополимерные материалы работоспособны при максимальных температурах поверхностей трения в пределах 250–350 °С.

Состав и свойства асбофрикционных материалов регламентируются ГОСТ 1786-95, ГОСТ 1198-93, ГОСТ 15960-96, ГОСТ 10851-94.

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 74–77 % N₂; 0,3–0,8 % O₂; 5–12 % CO₂; 5–10 % CO; 0,001–0,5 % углеводов; 0,01 % альдегидов; 0,0002–0,5 % NO₃ [41].

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 т. п. Зарубежные фирмы используют различные волокна для замены асбеста: металлические (стальные, латунные, бронзовые), углеродные, полиамидные, алюмосиликатные, базальтовые, стеклянные и др. (табл. 3.55) [41].

Таблица 3.55. Сравнение свойств асбеста со свойствами его заменителей (по данным фирмы «Феродо»)

Показатель	Хризотил-асбест	Стальное волокно	Стекло-волокно	Натуральные органические волокна	Синтетические органические волокна	Минеральная вата	Арамидные волокна	Углеродные волокна
Термостойкость	в	в	в	н	н	в	в	в
Теплопроводность	н	в	н	н	н	н	н	н
Термическая прочность	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 связующими (смолами)	х	п	х	х	х	х	х	п

Примечание. Приняты следующие обозначения: в – высокая; н – низкая; б – большая; м – маленькая; х – хорошая; п – плохая.

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 при высоких температурах (волокно не плавится). В ряде случаев целесообразно использовать 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 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.
2. Антифрикционные самосмазывающиеся пластмассы и их применение в промышленности. М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1984.
3. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982.
4. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистем. Киев: Знание. 1990.
5. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техника, 1986.
6. Бородин И.Н. Упрочнение деталей композиционными покрытиями. М.: Машиностроение, 1982.
7. Буше Н.А., Азаренко В.А. Расчет несущей способности вагонного подшипника скольжения // Вестник ВНИИЖТа. 1985. № 6.
8. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981.
9. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Механическое изнашивание сталей и сплавов. М.: Недра, 1996.
10. Влияние температуры подложки на структуру и триботехнические свойства тонких слоев MoS_2 , полученных высокочастотным катодным распылением / М.В. Ноженков, А.С. Авилов, Н.А. Воронин и др. // Физика, химия и механика. 1984. № 8.
11. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974.
12. Гурьянов Г.В. Электроосаждение износостойких композиций. Кишинев: Штиинца, 1985.
13. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982.
14. Дороднов А.М., Петросов В.А. О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 3.
15. Ефимов А.И., Семенов А.П. Оценка долговечности металлофторопластовых подшипников // Вестник машиностроения. 1975. № 1.

16. *Захаров С.М., Никитин А.П., Загорянский Ю.А.* Подшипники коленчатых валов тепловозных дизелей. М.: Транспорт, 1981.
17. *Зорин Е.И., Сухоруков В.В., Тетельбаум Д.И.* Осаждение карбиновых и алмазоподобных пленок в плазме газового ВЧ-разряда // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 1.
18. *Износостойкость и структура твердых наплавов* / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев, Е.С. Беркович и др. М.: Машиностроение, 1971.
19. *Ионная имплантация* / Пер. с англ.; Под ред. Дж. К. Хирвонена. М.: Metallurgia. 1986.
20. *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.
21. *Истомин Н.П., Семенов А.П.* Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. М.: Наука, 1981.
22. *Козырев С.П.* Генезис кавитационного изнашивания // Трение и износ. 1980. № 5.
23. *Колесников К.С., Колесников Ю.В., Инютин В.П.* Легирование поверхностных слоев деталей машин с использованием лазерного излучения // Машиноведение. 1987. № 4.
24. *Конструкционные материалы: Справочник* / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990.
25. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977.
26. *Кудинов В.В., Иванов В.М.* Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М.: Машиностроение, 1981.
27. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов* / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. М.: Машиностроение, 1985.
28. *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.
29. *Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов. М.: Metallurgia, 1985.
30. *Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии* / Отв. редактор А.П. Гусенков. М.: Наука, 1992.
31. *Митин Б.С.* Порошковая металлургия и напыленные покрытия. М.: Metallurgia, 1987.
32. *Мовчан Б.А., Малащенко И.С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наукова думка, 1983.
33. *Мошков А.Д.* Пористые антифрикционные материалы. М.: Машиностроение, 1968.
34. *Новые конструкционные материалы на основе углерода: Каталог.* М.: Союзуглерод, 1971.
35. *Огнеупоры и их применение* / Под ред. Я. Инамуры. М.: Metallurgia, 1984.
36. *Основы трибологии (трение, износ, смазка)* / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001.
37. *Повышение качества поверхности и плакирование металлов: Справочник* / Под ред. А. Кнаушнера. М.: Metallurgia, 1984.

38. *Повышение ресурса компрессорных лопаток детонационным напылением износостойких покрытий* / В.А. Венедиктов, А.З. Шарыпов, А.И. Хорошеин, П.Л. Морозов // Трение и износ. 1980. Т. 1. № 6.
39. *Погодаев Л.И., Шевченко П.А.* Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. Л.: Судостроение, 1984.
40. *Подшипники из алюминиевых сплавов* / Н.А. Буше, А.С. Гуляев, В.А. Двоскина, К.М. Раков. М.: Транспорт, 1974.
41. *Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник* / Е.В. Зиновьев, А.Л. Левин, М.М. Бородулин, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1988.
42. *Порошковая металлургия. Материалы. Технология. Свойства. Области применения: Справочник.* Киев: Наукова думка, 1985.
43. *Пратт Д.С.* Подшипниковые сплавы для двигателей внутреннего сгорания // Трибология. Исследования и приложения (Опыт США и стран СНГ). М.: Машиностроение, 1993.
44. *Разработка нового алюминиевого сплава для биметаллических подшипников* / Н.А. Буше, А.В. Зайчиков, Т.Ф. Маркова, А.Е. Миронов // Вторая международная научно-техническая конференция «Новые технологии управления движением технических объектов». Новочеркасск. 1999. Т. 2.
45. *Расчет триботехнических параметров в опорах скольжения* / Н.П. Старостин, А.Г. Тихонов, В.А. Морозов, А.С. Кондаков. Якутск: ЯНЦ СО РАН. 1999.
46. *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.
47. *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986.
48. *Самсонов Г.В., Винницкий И.М.* Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976.
49. *Самсонов Г.В., Эпик А.П.* Тугоплавкие покрытия. М.: Металлургия, 1973.
50. *Сверхтвердые материалы* / И.Н. Францевич, Г.Г. Гнесин, А.В. Курдюмов и др. Киев: Наукова думка, 1980.
51. *Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник* / Под ред. В.П. Соседова. М.: Металлургия, 1975.
52. *Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: Справочник* / Под ред. Т.Я. Косолаповой. М.: Металлургия, 1986.
53. *Семенов А.П.* Применение вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев для повышения износостойкости и снижения трения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. № 1.
54. *Семенов А.П.* Проблемы трения и износа в современном машиностроении // Вестник АН СССР. 1987. № 6.
55. *Семенов А.П.* Схватывание металлов и методы его предотвращения при трении // Трение и износ. 1980. Т. 1. № 2.
56. *Семенов А.П., Воронцов П.А.* Гидродинамические опоры скольжения из металлофторопластового материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1996. № 4.
57. *Семенов А.П., Кацура А.А.* Триботехнические свойства металлофторопластового материала при температурах до 350°C и в жидких средах // Трение и износ. 1994. № 5.
58. *Семенов А.П., Поздняков В.В., Крапошина Л.Б.* Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами. М.: Наука, 1974.

59. Семенов А.П., Савинский Ю.Э. Металлофторопластовые подшипники. М.: Машиностроение, 1976.
60. Семенов А.П., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия и их применение. М.: НИИМаш, 1977.
61. *Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин.* Киев: Наукова думка, 1979.
62. Смирязин А.П., Смирязина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы: *Справочник.* М.: Металлургия, 1975.
63. *Справочник по триботехнике:* В 3 т. / Под редакцией М. Хебды и А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1989. Т. 1; 1992. Т. 3.
64. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976.
65. *Трение и износ материалов на основе полимеров* / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. Минск: Наука и техника, 1976.
66. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1976.
67. *Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс.* М.: ВНИИЦентр ГСССД, 1982.
68. Федорченко И.М., Крячек В.М., Панаюти И.И. Современные фрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1976.
69. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980.
70. *Физико-химические свойства окислов:* Справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1969.
71. *Фторуглеродные пластики:* Каталог-справочник / Под общей ред. С.Г. Малкевич; составитель В.П. Щедрина. Черкассы: Отд-ние НИИТЭХима, 1974.
72. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970.
73. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. М.: АН СССР, 1960.
74. Цыпин Н.В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. Киев: Наукова думка, 1983.
75. Цыпин Н.В. Износостойкость твердых сплавов при абразивном изнашивании // *Трение и износ.* 1983. № 1.
76. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979.
77. *Электроискровое легирование металлических поверхностей* / Г.В. Самсонов, А.Д. Верховуров, Г.А. Бовкун, В.С. Сычев. Киев: Наукова думка, 1976.
78. *Энциклопедия. Машиностроение:* В 40 т. Т. IV–1. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка / Под ред. Д.Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1995.
79. *Энциклопедия неорганических материалов:* В 2 т. / Отв. ред. И.М. Федорченко. Киев: УСЭ, 1977. Т. 1; Т. 2.

4. МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКИМИ УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ

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 последствие (прямое и обратное) и упругий гистерезис.

Таким образом, сопротивление малым пластическим деформациям определяет весь комплекс основных свойств пружинных сталей и сплавов.

4.1. Пружинные сплавы и основные способы их 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), а затем дополнительному отпуску. В первую группу также входят сплавы меди (однофазные латуни, бронзы), молибдена и рения, 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-стареющие 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 создания новых высокопрочных пружинных сплавов является совмещение в каждом из них нескольких структурных механизмов упрочнения. В этом случае деление даже по основным для каждой группы сплавов методам упрочнения теряет свою определенность и становится слишком сложным и в то же время недостаточно четким. Поэтому более целесообразно пружинные сплавы подразделять по назначению.

4.2. Основные группы пружинных сплавов

Пружинные сплавы общего назначения относятся к классу конструкционных материалов, и поэтому они должны в первую очередь обладать высокими временным сопротивлением, пределами упругости и выносливости, релаксационной стойкостью и сопротивлением разрушению. Пружинные сплавы специального назначения наряду с повышенными механическими свойствами должны иметь определенные физико-химические и физические свойства, требования к которым изменяются в зависимости от условий эксплуатации соответствующих упругих элементов. В частности, эти сплавы должны иметь повышенную коррозионную стойкость, немагнитность, малое удельное электрическое сопротивление и др.

4.2.1. 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. 4.1). 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.

Таблица 4.1. Химический состав и назначение легированных пружинных сталей общего назначения (ГОСТ 14959–79)

Марка стали	Содержание элементов (остальное Fe), % (мас.)										Назначение
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Другие				
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				
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				
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 Мо, 0,10–0,20 V				
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	–				

Примечание. Согласно ГОСТ 14959–79 в стали, изготовленной скрап-процессом, содержание остаточных Si и Ni 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.

^{*1} Сталь предназначена для изготовления проволоки. ^{*2} По ГОСТ 4543–61.

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 со временем.

В зависимости от конфигурации упругих элементов, их размеров, требуемых свойств и экономичности технологического процесса производства для их изготовления применяют ленту или проволоку из пружинной стали в следующем состоянии: термически обработанном и затем холоднотемпературнодеформированном; закаленном и отпущенном до заданной прочности и холоднотемпературнокатаном или горячекатаном.

Для изготовления термически обработанной и затем холоднотемпературнодеформированной пружинной проволоки (ГОСТ 9389–75) обычно применяют углеродистые стали с 0,4–1,0 % С (ГОСТ 1050–74, ГОСТ 1435–74), реже стали с повышенным содержанием марганца типа 65Г, а в некоторых случаях низколегированные стали 50ХФА, 70С2ХА (ГОСТ 14959–79) (см. табл. 4.1). До холодной пластической деформации эти стали подвергают термической обработке – обычно патентированию, в результате которой сталь приобретает структуру тонкопластинчатого сорбита. Пружинную проволоку из этой группы сталей по значениям прочности разделяют на три категории:

1 – проволока максимальной прочности обычно из углеродистых сталей У7А–У9А, а также сталей КТ-2 (0,86–0,91 % С; 0,2–0,4 % Мп; 0,17–0,37 % Si) и ЗК-7 (0,68–0,76 % С; 0,5–0,8 % Мп; 0,17–0,37 % Si) с пониженным содержанием примесей;

2 и 2А – проволока повышенной прочности из стали 65Г;

3 – проволока нормальной прочности из стали 45.

Проволоку категории прочности 1, 2 и 2А используют главным образом для изготовления одножильных или многожильных винтовых цилиндрических пружин сжатия и растяжения, работающих в условиях статического или циклического нагружения. Из проволоки категории 3 вследствие ее пониженной прочности делают лишь слабонагружаемые пружины. Прочность проволоки тем выше, чем больше суммарная степень холодной пластической деформации (частые обжатия со степенью 10–12 % за каждый проход при волочении). При этом наибольшее упрочнение при сохранении достаточной пластичности и вязкости достигается только после предварительного патентирования.

В результате упрочняющей холодной пластической деформации патентированная проволока приобретает значительные остаточные напряжения, которые сильно снижают предел упругости, почти не изменяя временное сопротивление. Для уменьшения оста-

точных напряжений, повышения предела упругости и релаксационной стойкости – основных характеристик пружинной стали – готовые пружины после навивки или гибки подвергают последующему, низкотемпературному отпуску при 200–300 °С, в результате которого предел упругости возрастает примерно на 100 % по сравнению с исходным значением, тогда как предел прочности – лишь на 10 %. Релаксационная стойкость пружин после отпуска увеличивается по сравнению с неотпущенным состоянием примерно в 2–3 раза. На 5–10 % возрастает и предел выносливости, 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. 4.2). При назначении режима отпуска следует учитывать влияние не только температуры, но и его продолжительности (табл. 4.3).

Таблица 4.2. Зависимость предела выносливости τ_{-1} проволоки диаметром 0,5 мм из стали У8А от степени обжатия при волочении и температуры последующего отпуска

Степень обжатия, %	τ_{-1} , МПа, после отпуска при t , °С					
	Б. о.*	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

* Без отпуска.

Таблица 4.3. Влияние продолжительности отпуска при 300 и 500 °С на предел выносливости τ_{-1} проволоки диаметром 0,5 мм из стали У8А после волочения с обжатием 70 % (числитель) и 90 % (знаменатель)*

$t_{отп}$, °С	τ_{-1} , МПа, после отпуска 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

* По данным Л.А. Красильникова.

Рекомендуемые режимы отпуска пружин из патентированной высокоуглеродистой стальной проволоки: 175 °С, 2 ч; 220–300 °С, 1 ч или 350 °С, 15 мин.

Пружины, изготовленные из патентированной и холоднодеформированной стальной проволоки или ленты, после дополнительного отпуска приобретают высокую прочность, в том числе и сопротивление усталости, при повышенной вязкости. Эта сталь рекомендуется для изготовления тяжелонагруженных 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 патентированных сталей превосходят упрочненные в результате закалки и отпуска. В то же время у стали, закаленной и отпущенной до равной твердости с патентированной и холодноотянутой, более высокий предел упругости и большая релаксационная стойкость при 20 °С; при нагреве эта стойкость для стали после обеих 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. 4.1). Лента отличается высокой точностью размеров, повышенной прочностью, высоким качеством отделки поверхности в результате шли-

фования 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 проволочной заготовки под валками.

Прочностные свойства термически обработанной или нагартованной ленты (ГОСТ 21997–76) приведены ниже:

Группа прочности . . .	1П	2П	3П
σ_b , МПа	1300–1600	1610–1900	≥ 1900
HV0,1	375–485	486–600	≥ 600

Вязкость термически обработанной или нагартованной ленты характеризуют данные, приведенные в табл. 4.4.

Из термически обработанной или нагартованной плющенной ленты изготавливают пружины сравнительно простой конфигурации путем вырубki 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 из сталей 65ГА, 68ГА, 68А* (табл. 4.5) и 51ХФА.

После закалки и отпуска свойства стальной проволоки зависят от ее диаметра (табл. 4.6).

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.

Таблица 4.4. Число переменных изгибов термически обработанной или нагартованной ленты (ГОСТ 21997–76)

Толщина ленты, мм	Радиус валков, мм	Число перегибов на 180 °С, не менее, по группам прочности		
		1П	2П	3П
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	–/–

Примечание. В числителе – для сталей марок 60, 70, 65Г, У7А, У8А, в знаменателе – для У9А, У10А, У12А, 60С2А, 70С2ХА.

Таблица 4.5. Химический состав сталей для термически обработанной проволоки, % (мас.)

Марка стали	C	Mn	Si	Ni	Cr	Al	Cu
65ГА (ГОСТ 1071–81)	0,65–0,70	0,70–1,0	0,15–0,30	≤ 0,2	≤ 0,15	≤ 0,08	≤ 0,2
68ГА (ГОСТ 1071–81)	0,65–0,70	0,70–1,0	0,15–0,25	≤ 0,2	≤ 0,12	≤ 0,05	≤ 0,15
68А (ГОСТ 14959–79)	0,65–0,70	0,40–0,55	0,15–0,25	≤ 0,2	≤ 0,12	≤ 0,05	≤ 0,15

* 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.

Таблица 4.6. Механические свойства стальной проволоки (ГОСТ 1071–81)

Номинальный диаметр, мм		σ_s , МПа	Число перегибов на 180°, не менее
проволоки	валика		
1,20	7,5	1764–2058	5
1,40	7,5	1715–2009	4
1,60	10	1715–2009	7
1,80	10	1666–1960	7
2,00	10	1666–1960	6
2,30	15	1617–1911	7
2,50	15	1617–1911	6
2,75	15	1617–1911	6
3,00	15	1568–1862	4
3,20	20	1568–1862	8
3,40	20	1568–1862	8
3,50	20	1470–1764	7
3,60	20	1470–1764	7
3,75	20	1421–1715	7
4,00	20	1421–1715	6
4,10	30	1372–1666	8
4,20	30	1372–1666	7
4,50	30	1372–1666	6
4,80	30	1323–1617	4
5,00	30	1323–1617	4
5,50	30	1274–1568	4

Примечание. Число скручиваний на 360° равно 8–10 в зависимости от категории прочности проволоки.

Свойства и режимы термической обработки углеродистых и легированных сталей приведены в табл. 4.8. Закалку пружин из этих сталей проводят в воде или масле. Твердость пружин после обычной закалки и отпуска, как правило, находится в пределах 42–48 HRC₂. При более высокой твердости пружины склонны к хрупкому и в том числе к замедленному разрушению. Пружины, рессоры и другие упругие элементы больших сечений, а также 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.

Таблица 4.7. Механические свойства пружинной ленты (ГОСТ 2283–79)

Марка стали	Толщина ленты, мм	σ_s , МПа	δ_5 , %
		не менее	
50Г, 60Г, 65Г, У7, У7А, У8 У8А	До 1,5	650	15
	Св. 1,5	750	10
У8Г, У8ГА, У9, У9А, У10, У10А, У11, У11А, У12, У12А, 85 У13, У13А	Св. 1,5	750	10
	0,10–4,0	900	–
50ХФА, 60С2А, 60С2, 65С2ВА, 70С2ХА	0,10–4,0	900	8

Примечание. Нагартованную ленту разделяют по классам прочности на Н1, Н2 и Н3 при соответственном увеличении абсолютных значений σ_s от 750 до 1200 МПа.

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 сложной конфигурации и точных размеров, чем из указанных ранее полуфабрикатов. Пружинную холоднокатаную ленту делают из инструментальных (У7–У13 и У7А–У13А) и пружинных (60Г, 65Г, 85, 60С2А, 60С2, 50ХФА, 65С2ВА и 70С2ХА) сталей (см. табл. 4.1). Механические свойства пружинной холоднокатаной ленты приведены в табл. 4.7.

Для производства пружин и рессор крупных сечений применяют сортовой и полосовой горячекатаный прокат из углеродистых и легированных сталей (см. табл. 4.1). Эти упругие элементы изготавливают навивкой или штамповкой в холодном или горячем состоянии. Пружины и другие элементы, изготовленные из холодно- или горячекатаного проката, для достижения требуемого комплекса механических свойств подвергают упрочняющей обработке – закалке и отпуску или ВТМО и отпуску.

Таблица 4.8. Режимы термической обработки и механические свойства (не менее) углеродистых и легированных пружинных сталей

Марка стали	Температура, °С, точки		Режим термической обработки (ориентировочный)			$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	ψ
	A_{c1}	A_{c3}	$t_{зак}, ^\circ\text{C}$	Среда	$t_{отп}, ^\circ\text{C}$	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*	730	—	760–790	Масло (вода)	300–420	—	—	—	—
У10А–У12А*	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, 55С2А	775	840	870	Масло (вода)	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

* При закалке в воде температуру закалки принимают по нижнему пределу, а при закалке в масле – по верхнему.

Указанные в табл. 4.8 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. 4.9–4.13 приведены зависимости свойств наиболее распространенных пружинных сталей от температуры отпуска, по которым можно назначать его оптимальный режим. 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. 4.8, осуществляют переохладение до 280–350 °С и после соответствующей выдержки пружины охлаждают в масле.

Таблица 4.9. Временное сопротивление σ_b после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей, МПа

Марка стали	Температура отпуска (динамического старения), °С					
	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	1500/1520
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

Таблица 4.10. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей, МПа

Марка стали	Температура отпуска (динамического старения), °С					
	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

Таблица 4.11. Предел уругости $\sigma_{0,005}$ после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей, МПа

Марка стали	Температура отпуска (динамического старения), °С					
	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

Таблица 4.12. Предел выносливости σ_{-1} и малоцикловой выносливости σ_N при $N = 10^5$ циклов после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей

Марка стали	σ_{-1} , МПа, при $t_{\text{отп}} (t_{\text{д.с}})$, °С				σ_N , МПа, при $t_{\text{отп}} (t_{\text{д.с}})$, °С					
	250	300	360	400	450	250	300	360	400	450
65Г	500/710	640/750	680/780	650/740	450/550	600/920	580/890	545/1000	650/860	590/760
60С2А	550/710	580/790	630/820	590/780	530/700	620/770	740/1040	840/980	820/960	790/850
65С2ВА	610/830	-	710/900	-	580/850	740/940	-	850/1000	-	660/900
50ХГА	530/660	-	550/630	-	500/570	590/730	-	570/600	-	530/650
50ХГФА	530/710	-	590/700	-	540/650	650/800	-	630/800	-	620/700
50ХФА	570/710	-	590/720	-	540/660	640/810	-	650/820	-	630/710
40ХФА	500/680	-	520/630	-	480/550	540/750	-	560/700	-	520/650

Таблица 4.13. Максимальная релаксационная стойкость пружинных сталей после термической обработки, %

Термическая обработка	65 ^{°1}	65Г ^{°1}	60С2 ^{°1}	65С2ВА ^{°2}	60С2ХА ^{°2}	50ХГА ^{°2}	50ХГФА ^{°1}	50ХФА ^{°1}
Закалка и отпуск	2,4	2,2	2,2	1,2	2,2	2,6	2,3	2,2
Закалка и динамическое старение	1,0	0,9	0,8	0,5	1,0	1,0	0,8	0,8

Примечание. Релаксационную стойкость определяли по формуле $[(\sigma_0 - \sigma_t) / \sigma_0] \cdot 100$ %, где $\sigma_0 = 0,7 \sigma_{0,2}$; σ_t — напряжение после нагружения при испытании в течение 30 мин.

^{°1} Температура отпуска (динамического старения) при 250 °С. ^{°2} То же при 350 °С.

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 HRC₃), 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 температуре, равной температуре предшествующей изотермической выдержки при закалке.

В табл. 4.14 приведены данные о свойствах стали 60C2A 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. 4.9–4.13) в результате применения процесса динамического старения (или отпуска под нагрузением) [3]. Эта обработка заключается в нагружении стали после предварительной закалки и низкого отпуска (170–180 °С) при среднетемпературном нагреве (отпуске) внешней нагрузкой, обеспечивающей в образце $\sigma = (0,7 \dots 0,8) \sigma_{\text{н}}$ 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 стали, отличающегося от наблюдаемого после обычного отпуска. Это связано с влиянием напряжений, возникающих в процессе нагружения, на условия выделения карбидов, их структуру, морфологию. 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.

Таблица 4.14. Влияние изотермической закалки и последующего отпуска на механические свойства стали 60C2A

Термическая обработка	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{нц}}$	δ_5	ψ	KCU, кДж/м ²
	МПа			%		
Изотермическая закалка с выдержкой при 290 °С	2050	1715	1499	11	40	489
То же и отпуск 1 ч при t , °С:						
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

4.2.2. Пружинные сплавы специального назначения

Сплавы этого класса подразделяют на следующие группы: коррозионно-стойкие, немагнитные, с низким температурным коэффициентом модуля упругости и высокоэлектропроводные.

Коррозионно-стойкие сплавы. Эти сплавы (табл. 4.15) 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 30X13 и 40X13. Пружины из этих сталей изготовляют 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 температурах) 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; $\sigma_{\text{пц}} = 1200$ МПа; $\psi = 45\%$ и $\delta = 10\%$; после более высокого отпуска (500 °С): $\sigma_b = 1850$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1500$ МПа; $\sigma_{\text{пц}} = 1250$ 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 изготовляют методами горячей деформации и закалывают с нагревом в печах без защитной атмосферы, необходимы шлифование и полирование поверхности. Более высокую коррозионную стойкость, но при меньшей прочности имеют стали с повышенным содержанием хрома, например 14X17H2. После закалки при 1000 °С с охлаждением на воздухе и отпуска при 300–350 °С она имеет $\sigma_b = 1300$ МПа, $\delta = 10\%$ и $KCU = 1,6$ МДж/м².

Высоким упрочнением, хорошей коррозионной стойкостью, меньшей склонностью к хрупкому разрушению и меньшей деформацией при термической обработке по сравнению с рассмотренными выше отличаются дисперсионно-твердеющие стали аустенитно-мартенситного класса с низким содержанием углерода: 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, 6 ч.

Более высокие прочностные свойства при высоком сопротивлении хрупкому разрушению и сопротивлению коррозии достигнуты у практически безуглеродистых мартенситно-стареющих сталей, упрочняемых закалкой и отпуском (старение). Стали типа 03X12H10Д2ТБ, 04X14K13H4M3ТБВ-ВД, или ЭП767, по прочности и коррозионной стойкости превосходят стали 40X13, 30X13, а также 14X17H2.

У стали 03X12H10Д2ТБ, содержащей, % (мас.): $\leq 0,03$ C; $\leq 0,1$ Si; $< 0,1$ Mn; 10–11 Ni; 11,5–12,5 Cr; 1,0–1,4 Ti; 1,8–2,1 Cu; 0,1–0,3 Nb (ТУ 14-1-1452–75), 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, $\delta = 10\%$,

Таблица 4.15. Химический состав коррозионно-стойких пружинных сталей и сплавов (ГОСТ 5632-72), % (мас.)

Марка стали (сплава)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Mo	Другие
<i>Стали мартенситного класса</i>								
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	-	-	-	-
14Х17Н2	0,11-0,17	≤ 0,8	≤ 0,8	16,0-18,0	1,5-2,5	-	-	-
<i>Стали аустенитного класса</i>								
08Х18Н10Т	≤ 0,08	≤ 0,8	≤ 2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	5-С-0,7	-	-
12Х18Н	≤ 0,12	≤ 0,8	≤ 2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	-	-	-
12Х18Н9Т	≤ 0,12	≤ 0,8	≤ 2,0	17,0-19,0	8,0-9,5	5-С-0,8	-	-
1ГХ18Н9	0,13-0,21	≤ 0,8	≤ 2,0	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
<i>Аустенитно-мартенситные стали, упрочняемые фазовым наклепом и дисперсионным твердением</i>								
09Х15Н8Ю	≤ 0,09	≤ 0,8	≤ 0,8	14,0-16,0	7,0-9,4	-	-	0,7-1,3 Al
09Х17Н7Ю1	≤ 0,09	≤ 0,8	≤ 0,8	16,5-18,0	6,5-7,5	-	-	0,7-1,1 Al
06Х16Н7М2Ю (ЭИ65 ¹)	0,06-0,10	≤ 0,7	≤ 0,7	15,0-16,5	6,5-7,5	-	1,0-2,0	-
17ХНТ (ЭИ814, 0Х17Н7Т ²)	≤ 0,05	≤ 0,6	0,8-1,2	15,5-17,5	6,5-7,5	0,80-1,20	-	0,5 Al
<i>Аустенитные сплавы, упрочняемые дисперсионным твердением (ГОСТ 10991-74)</i>								
36НХТЮ	≤ 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
36НХТЮ5М	≤ 0,05	0,3-0,7	0,8-1,2	12,5-13,5	35,0-37,0	2,7-3,2	4,0-6,0	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	7,5-8,5	1,0-1,3 Al
70НХМБЮ ³	≤ 0,06	≤ 0,55	≤ 0,55	14,0-16,0	Основа	-	2,5-3,5	0,7-1,3 Al 8,0-9,0 Nb

¹ По ТУ 14-1-1369-75. ² По ГОСТ 10994-74. ³ По ТУ 14-1-2796-79.

а у стали 04X14K13N4M3ТБВ-ВД (ЭП767), содержащей, % (мас.): $\leq 0,04$ C; $\leq 0,2$ Si; $\leq 0,2$ Mn; 13,5–15,0 C; 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 (ТУ 14-1-1179–74), 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); возможна также горячая деформация (штамповка), а затем закалка и старение.

Немагнитные сплавы. Широкое применение получили аустенитные хромоникелевые стали типа 12X18Н9Т и 08X18Н10Т, 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.

Полуфабрикаты из сталей этой группы, например 08X18Н10Т, выпускают в виде проволоки или ленты, прочность которой тем больше, чем меньше диаметр или толщина. При диаметре 8,01 мм $\sigma_b = 1400 \dots 1600$ МПа, $\delta \geq 20$ %, а при диаметре 0,11–0,71 мм $\sigma_b = 1750 \dots 2050$ МПа и число скручиваний не менее 4. Используя полуфабрикаты из стали 12X18Н9Т или 08X18Н10Т диаметром или толщиной более 10 мм, нельзя получить большие обжатия, а значит, повышенную прочность. Поэтому из этих сталей пружины больших сечений не производят.

Технология изготовления пружин из указанных сталей состоит из следующих операций: навивки, отпуска (обычно при 450 °С), заневоливания и полирования. При конструировании упругих элементов из сталей 08X18Н10Т и 12X18Н9Т рекомендуется принимать модуль нормальной упругости $E = 190$ ГПа, модуль сдвига $G = 70$ ГПа; допускаемые напряжения для пружин с неограниченной долговечностью 600–800 МПа, а с ограниченной 850–1200 МПа (большие значения для проволоки диаметром 0,2 мм, меньшие – для проволоки диаметром 8 мм). После навивки пружин проводят отпуск, повышающий работоспособность сталей 08X18Н10Т и 12X18Н9Т, для первой стали при 450 °С, а для второй – при 500 °С.

В тех случаях, когда нужна полная немагнитность в сильноупрочненном состоянии, применяют стали 17X18Н9 и 37X12Н8Г8МФБ также после сильной деформации.

Если необходимо изготавливать немагнитные коррозионно-стойкие пружины и другие упругие элементы сложной формы методами холодной пластической деформации с большим обжатием или с глубокой и сложной вытяжкой, например сильфоны, гофрированные мембраны и т. п., используют аустенитные дисперсионно-твердеющие сплавы, упрочняемые термической обработкой. В закаленном аустенитном состоянии они высокопластичны и легко деформируются давлением, а после деформации (формовки) в процессе последующего отпуска (старения) упрочняются. Эти сплавы в отличие от предыдущих упрочняются и в больших сечениях, поэтому могут быть применены для изготовления сравнительно крупных по размерам упругих элементов. К числу таких сплавов на железоникельхромовой основе относятся 36НХТЮ, 36НХТЮ5М и 36НХТЮ8М (см. табл. 4.15), которые помимо коррозионной стойкости отличаются теплостойкостью до 250, 250–300 и 300–350 °С соответственно. Термическая обработка и свойства этих сплавов даны в табл. 4.16.

Таблица 4.16. Рекомендуемые режимы термической обработки и механические свойства лент из немагнитных сплавов (ГОСТ 14117-85) [4]

Марка сплава	Состояние (исходное)	Режим термической обработки	Толщина ленты, мм	σ_s , МПа		$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	HRC _S	$\sigma^{0,005}$, МПа
				σ_s	$\sigma_{0,2}$				
36НХТЮ		Закалка 920–950 °С в воде + старение 650–670 °С, 4 ч	0,1–0,9 1,0–2,0	1180	–	785	5	–	600–700
				1180	–		6	35	–
36НХТЮ5М	Полунагартованное или нагартованное	Закалка 975 ± 10 °С, в воде + старение 700–750 °С, 4 ч	0,1–0,9 1,0–2,0	1230	–	930	4	–	700–800
				1270	–		4	38	–
36НХТЮ8М		Закалка 1000–1050 °С, в воде + старение 750 ± 10 °С, 4 ч	0,1–0,9 1,0–2,0	1270	–	1030	4	–	800–900
				1320	–		4	42	–
40КХНМ	Полунагартованное Нагартованное Высоконагартованное	Старение 450–550 °С, 2–4 ч	0,1–2,0 0,1–2,0 0,1–2,0	1270	–	–	–	–	800–900
				1670	–		–	–	800–900
				1770	–		–	–	800–900
70НХМБЮ		Закалка 1150 °С в воде + старение 750 °С, 5 ч	0,1–0,9	1350–1600	1200–1400	–	8–17	44–46	800–900
				–	–		–	–	–
47ХНМ	–	Закалка 1250 °С в воде + старение 725 °С, 5 ч	1,0–2,0	1350–1450	1250–1350	–	5–10	430–440 HB	–

* Для толщины 0,3 мм.

Таблица 4.17. Химический состав немагнитных коррозионно-стойких высокопрочных пружинных сплавов на кобальт-никельхромовой основе (ГОСТ 10994-74), % (мас.)

Марка сплава	C	Si	Mn	Co	Ni	Cr	Mo	Другие
40КХНМ	0,07–0,12	550,5	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	6–7W; 0,2–0,5 Al; 1,5–2,0 Ti

Таблица 4.18. Режимы упрочняющей обработки и механические свойства проволоки из немагнитных коррозионно-стойких высокопрочных пружинных сплавов на кобальт-никель-хромовой основе

Марка сплава	Режим обработки	σ_s			δ_s , %	HV0,1
		σ_s	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,005}$		
40КХНМ	Закалка 1100–1150 °С в воде + деформация + старение 400–450 °С, 4 ч	2500–2700			3–5	600–700
40КНХМВТЮ		2300–2500				
	Закалка 1100–1150 °С в воде + холодное волочение с обжатием 85 % + старение 500–550 °С, 4 ч	2000–2200			4–6	550–600
		1800–2000				

Таблица 4.19. Химический состав сплавов с постоянным и низким температурным коэффициентом модуля упругости (ГОСТ 10994–74), % (мас.)

Марка сплава	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

Таблица 4.20. Механические свойства и рекомендуемый режим термической обработки сплавов с постоянным и низким температурным коэффициентом модуля упругости (исходное состояние – нагартованное) [5]

Марка сплава	Режим термической обработки	Толщина ленты, мм	σ_s			δ_s , %	HRC _s
			σ_s	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,005}$		
42НХТЮ	Закалка 910 ± 10 °С в воде + старение 690 ± 10 °С, 3 ч	0,1–0,9	980	–	600–700	5	–
		1,0–2,0	1080	735	–	8	30
44НХТЮ	Закалка 910 ± 10 °С в воде + старение 690 ± 10 °С, 3 ч	0,1–0,9	1030	–	600–650	5	–
		1,0–2,0	1080	685	–	8	30

* Для лент толщиной 0,3 мм.

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 теплостойкость, поэтому его можно использовать до 500–550 °С (см. табл. 4.16).

Для упругих элементов малых сечений и простой формы, но от которых требуется очень высокая прочность ($\sigma_{\geq} \geq 2500\text{--}3000$ МПа), высокое сопротивление усталости и коррозионная стойкость при немагнитности, применяют сплавы на кобальтннкельхромовой основе. Основная область применения этих сплавов – заводные пружины различных механизмов. Состав этих сплавов приведен в табл. 4.17. 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. 4.18 [5].

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 ферромагнитные, обычно на железоникельхромовой основе, сплавы упрочняют в результате термической или термомеханической обработки (табл. 4.19 и 4.20).

Сплавы 42НХТЮ и 42НХТЮА имеют постоянный модуль упругости при температуре до 100 °С, а сплав 44НХТЮ – до 200 °С.

Высокоэлектроступроводные сплавы. 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, содержащие от 0,4–0,7 до 2–2,5 % Ве и часто легированные никелем, кобальтом, титаном, серебром, а также весьма эффективно влияющим на их свойства магнием, количество которого не превышает 0,2 % (табл. 4.21). Бронзы с низким содержанием бериллия (0,25–0,7 %), отличающиеся высокой электрической проводимостью, не производят, так как практически та же проводимость может быть достигнута 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 технологическими свойствами – хорошо штампуются, паяются, свариваются и т. д.

Таблица 4.21. Химический состав бериллиевых бронз (ГОСТ 18175–78)

Марка бронзы	Содержание элементов (остальное Cu), % (мас.)		
	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

Примечание. Все указанные бронзы также содержат, % (мас.), не более: 0,15 Si; 0,15 Al; 0,005 Pb; 0,15 Fe.

^{*1} По ТУ 482196–72. ^{*2} Бронза содержит 0,07–0,13% Mg.

Прочностные свойства бериллиевых бронз настолько высоки, что в ряде случаев именно они независимо от физико-химических свойств определяют использование этих сплавов в промышленности. Предел упругости бериллиевых бронз – основное свойство пружинных сплавов – не превышает значений, которые можно получить для сталей, но благодаря почти в 1,5–2 раза меньшему модулю упругости ($E = 110 \dots 130$ ГПа) бериллиевые бронзы характеризуются максимальной энергией упругой деформации $\sigma_{\text{упр}}^2/(2E)$ и максимальной упругой деформацией $\sigma_{\text{упр}}/2E$, которые могут быть достигнуты в упругих элементах. Поэтому при одинаковом напряжении в упругих элементах из бериллиевой бронзы может быть достигнута большая упругая деформация, чем в упругих элементах из стали (упругую деформацию часто используют как основной параметр при конструировании упругих элементов). Соответственно при одинаковой упругой деформации в изделиях из бронзы будут меньше действующие напряжения, чем в стальных изделиях, и поэтому будут меньше значения упругого гистерезиса, упругого последействия и других свойств несовершенной упругости, т. е. основных показателей качества упругих элементов.

Свойства отечественных бериллиевых бронз в разном исходном состоянии – после закалки (мягкое состояние), а также последующей холодной пластической деформации с обжатием 30–40 % (твердое состояние) приведены в табл. 4.22. 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 CuBe.

На рис. 4.1 и 4.2 представлены значения релаксации напряжений в бериллиевой бронзе при 20 °С, а также при нагреве

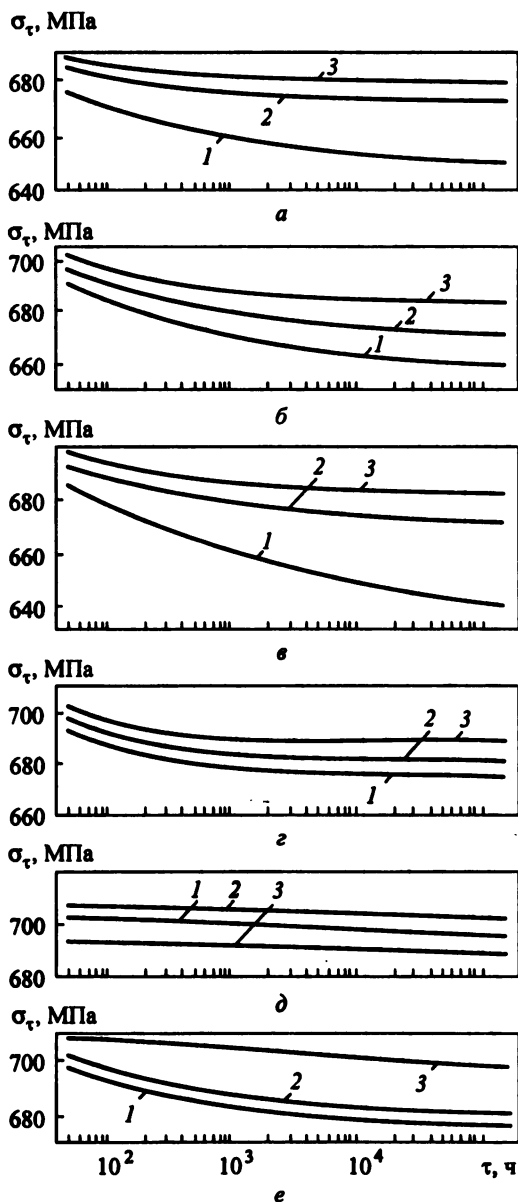


Рис. 4.1. Релаксация напряжений в бронзах БрБ2 (1), БрБ2,5 (2) и БрБНТ1,9 (3) при 20 °С после закалки с 790 °С и старения при 300 °С, 1 ч (а), 320 °С, 2 ч (б), 320 °С, 3 ч (в), 350 °С, 1 ч (г) и 370 °С, 20 мин (д), а также после закалки, деформации с обжатием 30 % и старения при 350 °С, 30 мин (1, 2) и 1 ч (3) (е)[5]

Таблица 4.22. Механические свойства полос и лент из бериллиевых бронз (ГОСТ 1789-70)

Упрочняющая обработка	Толщина полосы, мм	σ_s		$\sigma_{0,002}^{*1}$	E^{*1} , ГПа	δ , %	HV0,1	μ^{*2} м, мм, не менее
		МПа						
Бронза БрБ2								
Закалка	0,15-0,25 > 0,25	400-600 -	120-150 -	110-120		≥ 20 ≥ 30	≥ 130 -	8 -
Закалка + старение	0,15-0,25 > 0,25	1100-1500 1150-1500	580-600 -	-		- $\geq 2,0$	≥ 330 -	- -
То же + деформация (30-40 %)	0,15-0,25 > 0,25	600-900 650-950	440-500 -	-		- $\geq 2,5$	≥ 170 -	3 -
То же + старение	0,15-0,25 > 0,25	1150-1600 1200-1600	800-850 -	-		- $\geq 1,5$	> 360 -	- -
Бронза БрБНТ1,7								
Деформация 30-40 %	0,15-0,25 > 0,25	600-950 -	380-400 -	110-120		- $\geq 2,5$	≤ 150 -	3 -
То же + старение	0,15-0,25	1100-1500	600-650	120-130		$\geq 2,0$	≥ 340	-
Бронза БрБНТ1,9								
Закалка	0,15-0,25	400-600	120-150	120		≥ 20	≤ 120	8
Закалка + старение	0,15-0,25 > 0,25	1100-1500 1150-1500	620-650 -	120-130		- $\geq 2,0$	≥ 330 -	- -
То же + деформация 30-40 %	0,15-0,25 > 0,25	600-900 650-900	450-500 -	110-120		- $\geq 2,5$	≥ 160 -	3 -
То же + старение	0,15-0,25 > 0,25	1150-1600 1200-1600	900-950 -	120-130		- $\geq 1,5$	≥ 360 -	- -

Примечание. Согласно ТУ 482196-72, бронза БрБ2,5 имеет следующие механические свойства: твердость ≥ 340 HV0,1 (после закалки и старения), $\sigma_{0,002} \geq 600$ МПа (для полос толщиной 0,2-0,3 мм); твердость ≥ 384 HV0,1 (после закалки, деформации 30-40 % и старения).

*1 Для полос толщиной 0,3 мм. *2 Вытяжка по Эриксену для полос и лент толщиной 0,10-0,25 мм.

до 150 °С – температуры, которая является предельно высокой для применения бериллиевых бронз, после упрочняющей термической обработки. На рис. 4.3 и 4.4 приведены зависимости деформации и скорости ползучести бронзы БрБНТ1,9 при 20, 100 и 150 °С после закалки и старения, а на рис. 4.5 – 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. 4.6). Оптимальная температура закалки составляет 780 °С; после такой закалки бронза характеризуется мелким зерном, хорошей пластичностью и высоким уровнем упрочнения после старения. Скорость охлаждения при закалке должна быть значительной (в воде), поскольку при замедлении охлаждения происходит высоко-температурный распад твердого раствора с выделением, особенно по границам зерен, мелкодисперсных частиц.

На рис. 4.7 показано изменение свойств бериллиевых бронз в зависимости от продолжительности старения при 320 и 340 °С. Представленные зависимости позволяют выбрать оптимальный режим старения по основному показателю – пределу упругости $\sigma_{0,002}$. Ниже приведены температуры и продолжительности оптимальных режимов старения бериллиевых бронз:

	БрБ2,5	БрБ2	БрБНТ1,9	БрБНТ1,9М	БрБНТ1,7
Режим 1 . . .	320 °С, 3 ч	320 °С, 4–5 ч	320 °С, 4 ч	320 °С, 5 ч	320 °С, 5 ч
Режим 2 . . .	340 °С, 2 ч	340 °С, 1,5–2 ч	340 °С, 2–3 ч	340 °С, 3–4 ч	340 °С, 3 ч

Уровень упрочнения бериллиевых бронз повышается при использовании ступенчатого старения сначала при более низкой (210 °С, 1 ч), затем при более высокой температуре (340 °С), 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 бронзы БрБНТ1,9 предел упругости $\sigma_{0,002} = 570$ 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 динамическое старение, т. е. старения под нагрузкой, прилагаемой в том же направлении, что и в условиях эксплуатации изделия. Оно оказывается наиболее эффективным после основного старения и поэтому по существу является динамическим достариванием. В частности, если после старения бронзы БрБНТ1,9Мг при 340 °С, 3 ч провести достаривание при 200 °С, 1 ч под напряжением 1000 МПа, предел упругости $\sigma_{0,002}$ возрастет с 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 вдвое возрастает релаксационная стойкость изделий из бронзы.

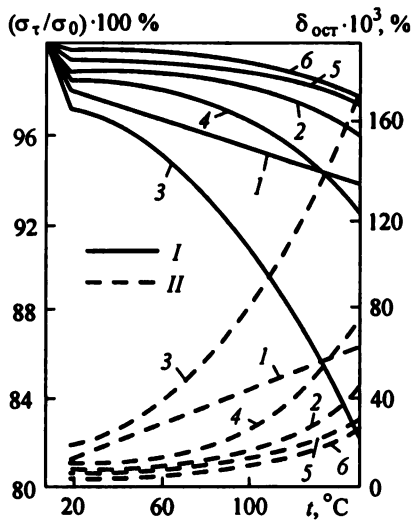


Рис. 4.2. Температурные зависимости релаксационной стойкости σ_τ/σ_0 (I) и остаточной деформации (II) бериллиевых бронз БрБ2 (1), БрБ2Mг (2), БрБ2,5 (3), БрБНТ1,9 (4), БрБНТ1,9Mг (5), БрБНТ1,9MгФ (6) за 1000 ч при $\sigma_0 = 700$ МПа. Исходное состояние – закалка и старение по оптимальным режимам

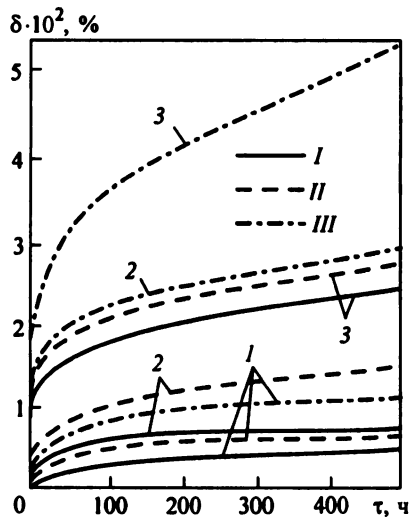


Рис. 4.3. Временные зависимости деформации ползучести δ бронзы БрБНТ1,9 при 20 (1), 100 (2) и 150 °С (3) после закалки и старения при 300 °С, 3 ч [5]:

I – $\sigma_0 = 0,8\sigma_{0,002} = 500$ МПа; II – $\sigma_0 = \sigma_{0,002} = 620$ МПа; III – $\sigma_0 = 1,2\sigma_{0,002} = 740$ МПа

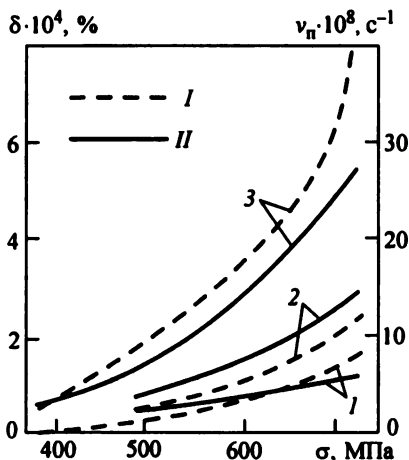


Рис. 4.4. Зависимости деформации ползучести δ за 500 ч (I) и ее скорости v_n (II) бронзы БрБНТ1,9 при 20 (1), 100 (2) и 150 °С (3) от приложенного напряжения σ

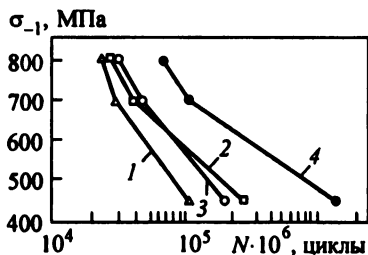


Рис. 4.5. Сопротивление усталости бериллиевых бронз после закалки и старения по оптимальным режимам:

1 – БрБ2; 2 – БрБ2,5; 3 – БрБНТ1,9; 4 – БрБНТ1,9Mг

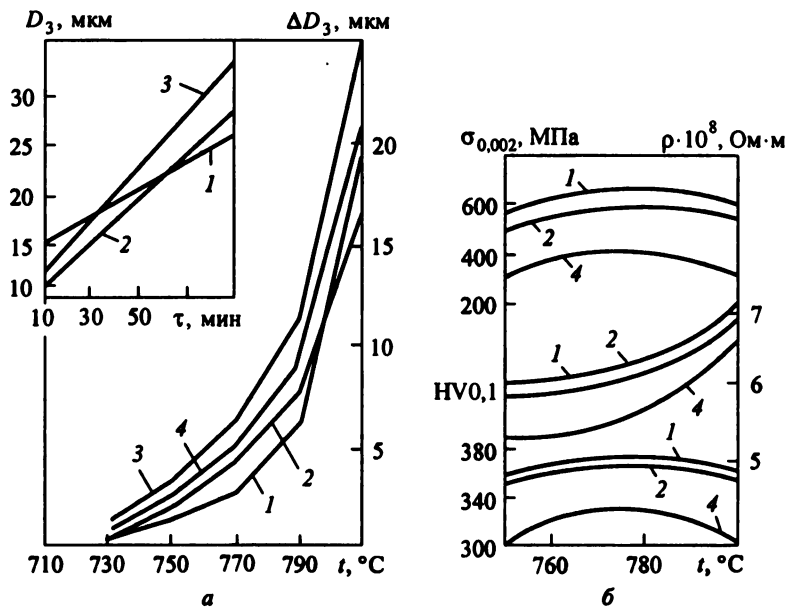


Рис. 4.6. Влияние режима закалки на структуру и свойства бериллиевых бронз:

a – зависимость величины зерна α -твердого раствора от времени выдержки и температуры закалки; *б* – зависимость физико-механических свойств от температуры закалки (после старения при 320 °С, 4 ч): 1 – БрБНТ1,9; 2 – БрБ2,5; 3 – БрБ2,5; 4 – БрБНТ1,7

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 (табл. 4.23).

Таблица 4.23. Влияние степени обжатия при холодной пластической деформации на свойства бериллиевых бронз БрБНТ1,9 (в числителе) и БрБ2 (в знаменателе)

Упрочняющая обработка	$\sigma_{0,002}$, МПа	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	HV0,1
Закалка 780 °С, 15 мин	120/120	9,8/9,8	100/100
То же и деформация со степенью, %:			
10	240/220	10,1/10,1	150/140
15	–/260	10,2/10,2	–/165
33	460/440	10,3/10,2	230/230

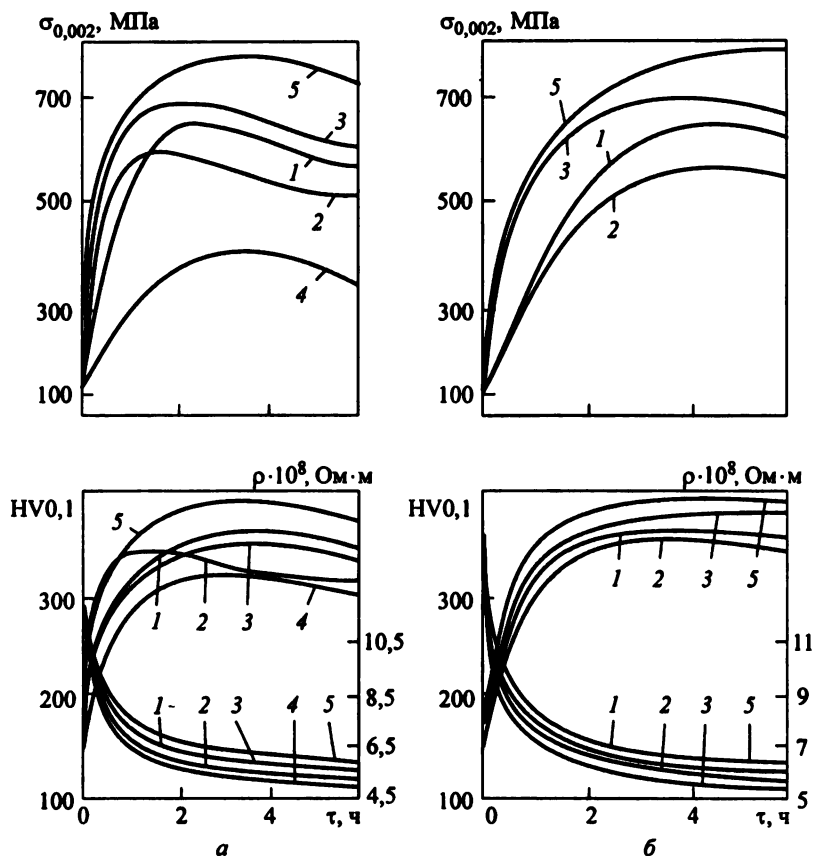


Рис. 4.7. Зависимость физико-механических свойств бериллиевых бронз БрБНТ1,9 (1); БрБ2 (2); БрБ2,5 (3); БрБНТ1,7 (4); БрБНТ1,9Мг (5) от продолжительности старения при 340 (а) и 320 °С (б)

После деформации почти вдвое ускоряется процесс старения, а уровень упрочнения возрастает тем больше, чем выше степень предшествующей деформации (рис. 4.8). Уровень упрочнения повышается еще выше при использовании в цикле НТМО ступенчатого и динамического старения, режимы которых практически те же, что и для недеформированных бронз.

В связи с дороговизной бериллиевых бронз и определенными трудностями, возникающими при их производстве, созданы безбериллиевые пружинные сплавы: камелин, № 156 (или ЛАНКМц, ГОСТ 17527–86)*, камелон, № 538, № 131, также упрочняемые в результате закалки и старения либо НТМО. Из них наиболее высокопрочные сплавы

* По данным А.И. Чипиженко, З.М. Иедлинской сплав после закалки и старения имеет $\sigma_{0,002} = 400 \dots 410$ МПа, а после закалки, обжатия со степенью 40 % и старения – $\sigma_{0,002} = 800$ МПа; кроме того, у него более высокая релаксационная стойкость, чем у Л62 и БрОФ4,5-0,25.

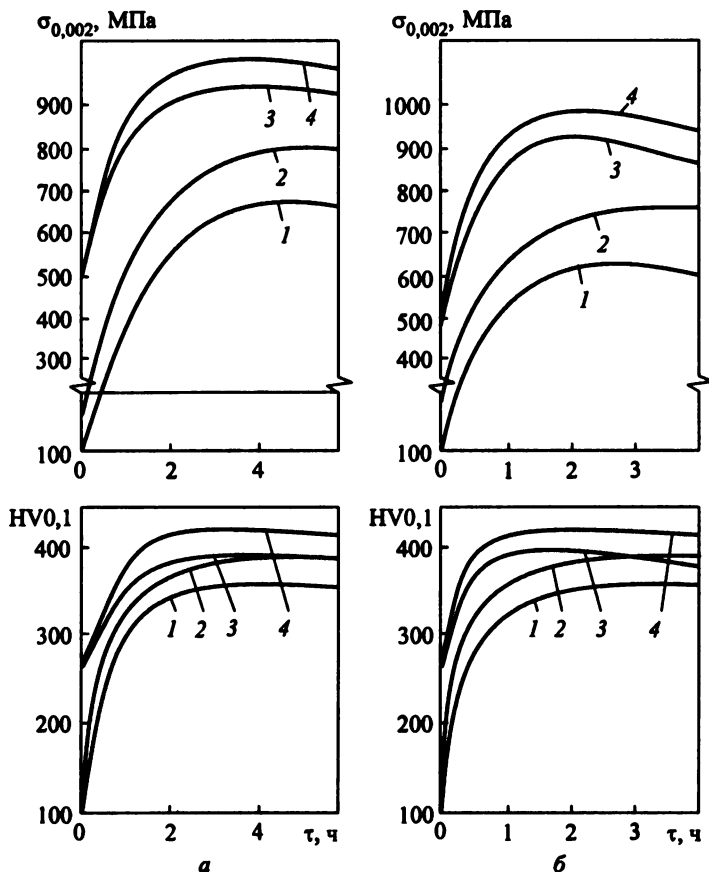


Рис. 4.8. Влияние продолжительности старения при 320 (а) и 350 °С (б) на свойства бериллиевой бронзы БрБНТ1,9 (1, 3) и БрБНТ1,9Мг (2, 4) после закалки (1, 2), а также после закалки и холодной пластической деформации с обжатием 35 % (3, 4)

131, 538 и камелон, созданные в институте «Гипроцветметобработка» на базе систем Cu–Ni–Al и Cu–Zn, дополнительно легированы хромом, марганцем, кремнием, ванадием и магнием. После упрочняющей обработки, особенно в цикле НТМО, они характеризуются ценным комплексом свойств, важнейшими из которых являются теплостойкость (табл. 4.24) и коррозионная стойкость (табл. 4.25).

Сплавы 131, 538 и камелон рекомендуются взамен бериллиевой бронзы в условиях службы упругих элементов при температурах до 250 °С с хорошей коррозионной стойкостью [1]. В том случае, когда упругие элементы должны работать 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 дорекристаллиза-

Таблица 4.24. Физико-механические свойства пружинных сплавов на основе меди [1, 2]

Сплав	σ_b		$\sigma_{0,005}$	$\delta, \%$	HV0,1	E, ГПа	$\frac{\sigma_0^1 - \sigma_0^2}{\sigma_0^1} \cdot 100 \%$ за 100 ч при t, °C		N·10 ⁵ при $\sigma_b=550...600$ МПа	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м
	МПа	МПа					100	250		
БрБ2	1150–1600	900–1150	1,5	360	120–130	2,0	25,0	0,7	7	
131	1200–1250	900–970	2,5	330–360	140	1,0	3,0	10	13	
538	1300	950	2	380	140	0	2,5	2	23	
Камелон	1500	1100	1,5	420	145	0	2,0	2	35	
БрОФ6,5-0,15	700–920	450–550	2	190–220	100–110	1,0	15,0*2	2	15	
Камелин	1100	800–900	4	310	125	1,0	4,0*2	1	22	
156	900–1000	800	2	250–300	120	0,4	9,0*2	1	10	
МНЦ15-20	800–940	650–700	0,5–1,5	230–270	110–125	3,0	12,0*2	1	26	
Нейзильбер 30	1200–1250	360–400	0,5–1,5	1100	140	1,0	7,0*2	3	22	

Примечание. Свойства сплавов приведены в максимально упрошенном состоянии: закалка + деформация (30–40 %) + старение (БрБ2, сплавы 131, 156, 538, камелин; камелон; отжиг + деформация (60–80 %) + дорекристаллизационный отжиг (БрОФ6,5-0,15, МНЦ15-20, нейзильбер 30).

*1 При $\sigma_0 = 0,5\sigma_{0,005}$. *2 При 150 °С.

Таблица 4.25. Скорость коррозии пружинных сплавов меди в атмосфере повышенной влажности и в морском тумане [2]

Среда	$v_{кор} \cdot 10^4, \text{ г/(дм}^2 \cdot \text{сут)}$									
	Камелон	БрБНТ1,9Мг	Нейзильбер 30	БрБНТ1,9	БрОФ6,5-0,15	156	БрА7	БрБ2	131	БрКМз-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

ционного отжига (табл. 4.26), 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.

Таблица 4.26. Изменение свойств пружинных сплавов* в результате холодной пластической деформации

Сплав	HV0,1	$\Delta HV0,1$	$\frac{\Delta HV0,1}{HV0,1} \cdot 100\%$	$\sigma_{0,005}$, МПа	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	$\frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot 100\%$
Л85	50/164	114	192	90/445	4,5/5,52	22,3
Л80	58/174	116	200	90/375	5,2/6,20	19,3
Л68	58/204	146	250	90/400	6,3/7,50	19,2
БрОЦ4-3	67/230	163	270	105/535	8,1/8,65	6,8
БрА7	76,9/269	192	250	120/425	11,0/13,0	18,2
БрКМц3-1	99,6/219	120	120	114/460	26,0/27,5	5,8
МНЦ15-20	61/240	179	296	140/480	25,5/24,6	-3,5

Примечание. В числителе указаны значения после отжига, в знаменателе – после прокатки с обжатием на 80 %.

* Составы сплавов приведены в ГОСТ 5017-74, ГОСТ 18175-78 и ГОСТ 492-73.

В процессе холодной пластической деформации резко возрастает упрочнение сплавов, но при значительном снижении их пластичности. Поэтому из таких сплавов после пластической деформации можно изготавливать упругие элементы простой формы – 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. 4.27) сильно возрастают релаксационная стойкость (табл. 4.28), предел упругости, сопротивление усталости;

Таблица 4.27. Оптимальные режимы отжига и свойства пружинных сплавов на основе меди

Сплав	Режим отжига	$\sigma_{0,002}$	$\sigma_{0,005}$	$\sigma_{0,01}$	HV0,1	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м
		МПа				
БрОЦ4-3	150 °С, 30 мин*	463	532	593	218	8,0
БрОФ4-0,25	150 °С, 30 мин*	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	26,2
БрА7	275 °С, 30 мин	630	725	790	270	11,5
Л68	200 °С, 1 ч	452	519	581	190	8,6
Л80	200 °С, 1 ч	390	475	538	170	5,7
Л85	200 °С, 30 мин	349	405	538	170	5,7
МНЦ15-20	300 °С, 4 ч	548	614	561	230	25,6

Примечание. Исходное состояние – холоднокатаное с обжатием 60 %.

* Вместо указанного режима отжига можно применять нагрев при 250 °С, 1 ч, обеспечивающий аналогичные свойства, но лучше стабилизирующий форму изделий.

**Таблица 4.28. Релаксация напряжений в пружинных медных сплавах
после испытания в течение 20 лет (178 тыс. ч) [5]**

Сплав	σ_0 , МПа	$\frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \cdot 100 \%$	Сплав	σ_0 , МПа	$\frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \cdot 100 \%$
Л85	302/339	29,4/13,6	БрОЦ4-3	321/358	12,4/5,6
Л80	294/332	20,4/11,1	БрА7	308/341	15,6/6,2
Л68	282/331	17,3/7,0	БрКМц3-1	311/334	14,8/4,3
БрОФ6,5-0,15	276/356	11,2/8,4	МНЦ15-20	331/389	10,5/5,6
БрОФ4-0,25	304/369	12,1/8,3			

Примечание. В числителе указаны значения после деформации, в знаменателе – после деформации и отжига.

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 эксплуатации. 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 свойства – 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. Конструкционные материалы: Справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990.
2. Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г., Каплун Ю. А. Динамическое старение сплавов. М.: Металлургия, 1985.
3. Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г. Пружинные сплавы цветных металлов. М.: Металлургия, 1983.
4. Превизионные сплавы: Справочник. / Под ред. Б.В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983.
5. Рахштадт А. Г. Пружинные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1980.

5. МАТЕРИАЛЫ С МАЛОЙ ПЛОТНОСТЬЮ И ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

К основным материалам этой группы относятся алюминий, магний, бериллий, титан, пластмассы, а также композиционные материалы.

Алюминий и его сплавы обладают комплексом свойств, обеспечивающим им в ряде областей техники важные преимущества перед сталью и медными сплавами. Особенно это касается силовых конструкций – самолетов, ракет, судов, двигателей, мостов и т. п. Магниево-алюминиевые сплавы представляют большой интерес для ряда областей машиностроения, что объясняется не только их высокой удельной прочностью, но и способностью поглощать энергию удара и виброколебания. Материалы с высокой удельной прочностью и жесткостью, такие как сплавы бериллия и титана, а также армированные композиционные материалы в основном используют для изготовления легких высоконагруженных деталей современных конструкций.

5.1. Алюминиевые сплавы

Алюминий не имеет полиморфных превращений, обладает ГЦК решеткой с периодом $a = 0,4041$ нм; его атомный номер 13; атомная масса 26,9815; плотность $2,7$ т/м³; температура плавления 660 °С, кипения 2270 °С; модуль упругости 71 ГПа; удельное электросопротивление $\rho = 2,6 \cdot 10^8$ Ом·м; коэффициент линейного расширения в интервале температур $20-100$ °С составляет $\alpha = 23,9 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹.

5.1.1. Деформируемые алюминиевые сплавы

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 разделяют на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой. Свойства сплавов определяются не только способом получения полуфабриката и термической обработкой, но главным образом химическим составом и особенно природой фаз-упрочнителей каждого сплава.

Состояние полуфабрикатов, характер плакировки и направление вырезки образцов обозначают следующим образом:

М – мягкое, отожженное;

T – закаленное и естественно состаренное;

T1 – закаленное и искусственно состаренное;

T2 – закаленное и искусственно состаренное по режиму, обеспечивающему высокую вязкость разрушения и хорошее сопротивление коррозии под напряжением;

ТЗ – закаленное и искусственно состаренное по режиму, обеспечивающему наиболее высокое сопротивление коррозии под напряжением и вязкость разрушения;

Н – нагартованное (нагартовка листов сплавов типа дуралюмин примерно 5–7 %);

П – полунагартованное;

Н1 – усиленно нагартованное (примерно на 20 %);

ТПП – закаленное и естественно состаренное повышенной прочности;

ГК – горячекатаное;

Б, А и УП – технологическая, нормальная и утолщенная (8 % на сторону) плакировка соответственно;

Д, П, В – продольное (вдоль волокна), поперечное и высотное (толщина) направление соответственно;

Х, Р – хордовое и радиальное направление соответственно;

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).

Свойства стареющих алюминиевых сплавов зависят от вида старения: зонное, фазовое или коагуляционное. На стадии коагуляционного старения значительно повышается коррозионная стойкость, причем обеспечивается наиболее оптимальное сочетание характеристик прочности, сопротивления коррозии под напряжением, расслаивающей коррозии, вязкости разрушения K_{Ic} и пластичности (особенно в высотном направлении).

Химический состав, физические и механические свойства деформируемых сплавов на основе алюминия приведены в табл. 5.1–5.8.

Для массивных полуфабрикатов (табл. 5.9) основными характеристиками разрушения при однократном нагружении являются характеристики K_{Ic} и KCT [5, 10].

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 используют в отожженном, нагартованном и полунагартованном состояниях.

Применяют эти сплавы для изделий, получаемых глубокой вытяжкой и сваркой, от которых требуется высокая коррозионная стойкость (трубопроводы для масла и бензина, радиаторы тракторов и автомобилей, сварные бензобаки), а также для заклепок, корпусов и мачт судов, узлов лифтов и подъемных кранов, рам транспортных средств и др. [1, 12].

Сплавы системы Al–Cu–Mg. Дуралюмины Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17 упрочняются термической обработкой; характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности.

Сплавы Д1, Д16 в искусственно состаренном состоянии имеют улучшенную коррозионную стойкость даже при повышенных температурах эксплуатации деталей и высокие значения $\sigma_{0.2}$ и σ_b .

Склонность 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 Д18, Д1 и Д16.

Плакированные полуфабрикаты обладают повышенной коррозионной стойкостью по сравнению с неплакированными, поэтому последние нужно защищать анодно-окисными, химическими и лакокрасочными покрытиями.

Таблица 5.1. Химический состав алюминия (ГОСТ 4784-97)

Марка	Содержание элементов, % (мас.)										
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие	Прочие
АД000	99,80	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	-	0,06	0,02	-	-
АД00	99,70	0,20	0,25	0,03	0,03	0,03	-	0,07	0,03	-	-
АД00Е	99,70	0,10	0,25	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	-	0,02 В + 0,02(V+Ti)	0,10
АД0	99,50	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	-	0,07	0,05	-	-
АД0Е	99,50	0,10	0,40	0,05	0,01	-	0,01	0,05	-	0,05 В + 0,02 (V+Ti)	0,10
АД1	99,30	0,30	0,30	0,05	0,025	0,05	-	0,1	0,15	-	-
АД	99,00	1,00 (Si+Fe)	-	0,05	0,05	-	-	0,10	0,05	-	0,15
АД1пл	99,30	0,30	0,30	0,02	0,025	0,05	-	0,1	0,15	-	-

Примечания: 1. Букву «Е» применяют для обозначения марки алюминия с гарантированными электрическими характеристиками. 2. Фактическое содержание алюминия в нелегированном алюминии определяется разностью между 100 % и суммой всех элементов, присутствующих в количестве 0,010 % или более каждый, выраженных с точностью до второго десятичного знака. 3. При определении марки алюминия содержание титана, введенного в качестве модификатора, не следует учитывать в сумме примесей. 4. В сплаве АД1пл допускается до 0,05 % Си. 5. В алюминии марки АД0 для листовых заготовок, подвергаемых дальнейшей формовке, допускается до 0,15 % Ti.

Таблица 5.2. Химический состав деформируемых алюминиевых сплавов (ГОСТ 4784-97)

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Al), % (мас.)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие	Прочие
	<i>Система Al-Cu-Mg</i>									
Д1	0,2-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1,0	0,4-0,8	0,1	0,25	0,15	0,20 (Ti+Zr)	0,15
Д16	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15	0,20 (Ti+Zr)	0,15
Д16ч	0,2	0,3	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15	-	0,15
В65	0,25	0,2	3,9-4,5	0,3-0,5	0,15-0,30	-	0,1	0,1	-	0,1
Д18	0,8	0,7	2,2-3,0	0,2	0,2-0,5	0,1	0,25	-	-	0,15
Д19	0,5	0,5	3,8-4,3	0,5-1,0	1,7-2,3	-	0,1	0,1	0,0002-0,005 Be	0,1
Д19ч	0,2	0,3	3,8-4,3	0,4-0,9	1,7-2,3	-	0,1	0,1	0,0002-0,005 Be	0,1
ВД17	до 0,3	до 0,3	2,6-3,2	0,45-0,70	2,0-2,4	-	до 0,1	до 0,1	-	0,1
	<i>Система Al-Cu-Mn</i>									
АК4	0,5-1,2	0,8-1,3	1,9-2,5	0,2	1,4-1,8	-	0,3	0,1	0,8-1,3 Ni	0,1
АК4-1	0,35	0,8-1,4	1,9-2,7	0,2	1,2-1,8	0,1	0,3	0,02-0,10	0,8-1,4 Ni	0,1
АК4-1ч	0,10-0,25	0,9-1,3	1,9-2,7	-	1,3-1,8	-	0,1	0,04-0,10	0,9-1,2 Ni	0,15
1201	0,2	0,3	5,8-6,8	0,2-0,4	0,02	-	0,1	0,02-0,10	0,10-0,25 Zr; 0,05-0,15 V	0,15
АК6	0,7-1,2	0,7	1,8-2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,3	0,1	0,1 Ni	0,1
АК8	0,5-1,2	0,7	3,9-5,0	0,4-1,0	0,2-0,8	0,1	0,25	0,15	0,20 (Ti+Zr)	0,15
1105	3,0	1,5	2,0-5,0	0,3-1,0	0,4-2,0	-	1,0	-	0,2 Ni; 0,2 (Ti+Cr)	0,2
	<i>Система Al-Mn</i>									
ММ	0,6	0,7	0,3	1,0-1,5	0,2-0,6	0,1	0,25	0,1	-	0,15
АМп	0,6	0,7	0,05-0,20	1,0-1,5	-	-	0,1	-	-	0,15
АМпС	0,15-0,35	0,25-0,45	0,1	1,0-1,4	0,05	-	0,1	0,1	-	0,1
Д12	0,30	0,7	0,25	1,0-1,5	0,8-1,3	-	0,25	-	-	0,15
	<i>Система Al-Mg</i>									
АМг0,5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4-0,8	-	-	-	-	0,1
АМг1	0,30	0,7	0,2	0,2	0,5-1,1	0,1	0,25	-	-	0,15
АМг1,5	0,40	0,7	0,2	0,1	1,1-1,8	0,1	0,25	-	-	0,15

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Al), % (мас.)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие	Прочие
AMr2	0,4	0,5	0,15	0,1-0,5	0,7-2,4	0,05	0,15	0,15	-	0,15
AMr2,5	0,25	0,4	0,1	0,1	2,2-2,8	0,15-0,35	0,1	-	-	0,15
AMr3	0,5-0,8	0,5	0,1	0,3-0,6	3,2-3,8	0,05	0,2	0,1	-	0,1
AMr3,5	0,25	0,4	0,1	0,1	3,1-3,9	0,15-0,35	0,2	0,2	0,0008 Be; 0,10-0,50 (Mn+Cr)	0,15
AMr4,0	0,4	0,5	0,1	0,2-0,7	3,5-4,5	0,05-0,25	0,25	0,15	-	0,15
AMr4,5	0,4	0,4	0,1	0,4-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15	-	0,15
AMr5	0,5	0,5	0,1	0,3-0,8	4,8-5,8	-	0,2	0,02-0,10	0,0002-0,005 Be	0,1
AMr6	0,4	0,4	0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	-	0,2	0,02-0,10	0,0002-0,005 Be	0,1
1420	0,1-0,3	0,3	-	0,3	5,0-6,0	-	-	0,1	0,09-0,15 Zr; 1,9-2,3 Li	0,005
<i>Система Al-Mg-Si</i>										
AD31	0,20-0,6	0,35	0,1	0,1	0,45-0,9	0,10	0,1	0,1	-	0,15
AD31E	0,30-0,7	0,5	0,1	0,03	0,35-0,8	0,03	0,1	-	0,06 B	0,10
AD33	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	-	0,15
AD35	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	-	0,15
AB	0,5-1,2	0,5	0,1-0,5	0,15-0,35	0,45-0,90	0,25	0,2	0,15	-	0,1
<i>Система Al-Zn-Mg</i>										
1915	0,35	0,4	0,1	0,2-0,7	1,0-1,8	0,06-0,20	4,0-5,0	0,01-0,06	0,08-0,20 Zr	0,15
1925	0,7	0,7	0,8	0,2-0,7	1,3-1,8	0,2	3,4-4,0	0,1	0,1-0,2 Zr	0,1
B95оч	0,1	0,15	1,4-2,0	0,2-0,6	1,8-2,8	0,1-0,25	5,0-6,5	0,05	-	0,1
B95лч	0,1	0,05-0,25	1,4-2,0	0,2-0,6	1,8-2,8	0,1-0,25	5,0-6,5	0,05	0,1 Ni	0,1
B95	0,5	0,5	1,4-2,0	0,2-0,6	1,8-2,8	0,10-0,25	5,0-7,0	0,05	0,1 Ni	0,1
B95лч	0,1	0,2-0,4	0,8-1,2	0,1	1,6-2,2	-	6,5-7,3	0,1	-	0,1
B95-1	1,5	1,0	1,0-3,0	0,2-0,8	0,6-2,6	0,25	0,8-2,0	0,20 (Ti+Zr)	0,2 Ni	0,2
B95-2	1,5	0,9	1,0-3,0	0,2-0,8	1,0-2,8	0,25	2,0-6,5	0,15 (Ti+Zr)	0,2 Ni	0,2
АЦл	0,3	0,3	-	0,025	-	-	0,9-1,3	0,15	-	0,1

Таблица 5.3. Химический состав алюминиевых сплавов, предназначенных для изготовления проволоки (ГОСТ 4784-97)

Марка сплава	Содержание элементов, % (мас.)										Прочие		
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Другие	Прочие			
	<i>Сплавы для изготовления проволоки для холодной высадки</i>												
Д1П	Остальное	0,5	0,5	0,5	3,8-4,5	0,4-0,8	0,4-0,8	0,1	0,1	-	-	0,1	0,1
Д16П	»	0,5	0,5	0,5	3,8-4,5	0,3-0,7	1,2-1,6	0,1	0,1	-	-	0,1	0,1
Д19П	»	0,3	0,3	0,3	3,2-3,7	0,5-0,8	2,1-1,6	0,1	0,1	-	-	0,0002-0,005 Be	0,1
АМГ5П	»	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2-0,6	4,7-5,7	-	-	-	-	-	0,1
В95П	»	0,3	0,3	0,3	1,4-2,0	0,3-0,5	2,0-2,6	5,5-6,5	-	-	-	0,1-0,25 Cr	0,1
	<i>Сплавы для изготовления сварочной проволоки</i>												
СвА99	Не менее 99,99	0,003	0,003	0,003	0,003	-	-	0,003	-	-	-	-	0,01
СвА97	Не менее 99,97	0,015	0,015	0,015	0,005	-	-	-	-	-	-	-	0,03
СвА85Т	Остальное	0,04	0,04	0,04	0,01	-	0,01	0,02	0,2-0,5	-	-	-	0,08
СвА5	Не менее 99,95	0,10-0,25	0,2-0,35	0,2-0,35	0,015	-	-	-	-	-	-	-	0,5
СвАМц	Остальное	0,2-0,4	0,3-0,5	0,3-0,5	0,2	1,0-1,5	0,05	0,1	-	-	-	-	1,35
СвАМг3	»	0,5-0,8	0,5	0,5	0,05	0,3-0,6	3,2-3,8	0,2	-	-	-	-	0,85
СвАМг5	»	0,4	0,4	0,4	0,05	0,5-0,8	4,8-5,8	0,2	0,1	-	-	0,002-0,005 Be	1,4
Св1557	»	0,15	0,3	0,3	0,05	0,2-0,6	4,5-5,5	-	-	-	-	0,07-0,15 Cr; 0,002-0,005 Be; 0,2-0,35 Zr	0,6
Св1577лч	Остальное	0,1	0,15	0,15	0,1	0,5-0,8	5,5-6,5	0,1	-	-	-	0,1-0,2 Cr; 0,15-0,25 Zr	0,1
СвАМг6	»	0,4	0,4	0,4	0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	0,2	0,1-0,2	-	-	0,002-0,005 Be	1,2
СвАМг63	»	0,05	0,05	0,05	0,05	0,5-0,8	5,8-6,8	0,05	-	-	-	0,002-0,005 Be; 0,15-0,35 Zr	0,15
СвАМг61	»	0,4	0,4	0,4	0,05	0,8-1,1	5,5-6,5	0,2	-	-	-	0,0001-0,0003 Be; 0,002-0,12 Zr	1,15
СвАК5	»	4,5-6,0	0,6	0,6	0,2	-	-	0,1(Zn+Sn)	0,1-0,2	-	-	-	1,1
СвАК10	»	7,0-10,0	0,6	0,6	0,1	-	0,10	0,2	-	-	-	-	1,1
Св1201	»	0,08	0,15	0,15	6,0-6,8	0,2-0,4	0,02	0,05	0,1-0,2	-	-	0,05-0,15 V; 0,1-0,25 Zr	0,3

Таблица 5.4. Физические свойства деформируемых алюминиевых сплавов [1, 12, 31]

Марка сплава	γ , т/м ³	$\rho \cdot 10^3$, Ом·м, при 20 °С	$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ , при 20–400 °С	λ , Вт/(м·°С), при t , °С		c , кДж/(кг·°С), при t , °С	
				100	400	100	400
АД0	2,71	2,92 (М) 3,02 (Н)	24,0–25,6 –	226 (М) 216 (Н)	– –	– –	– –
АД1	2,71	2,92 (М) 3,02 (Н)	24,0–25,6 –	226 (М) 216 (Н)	– –	– –	– –
АМц	2,73	3,45 (М) 4,20 (П) 4,32 (Н)	23,2–25,0 (М) – –	180 (М) – –	189 (М) – –	1,09 – –	1,30 – –
АМг2	2,68	4,76 (М)	21,2–27,6	159	168	0,963	1,09
АМг3	2,67	4,96 (М)	23,5–26,1	151	159	0,88	1,05
АМг4	2,67	6,09 (М)	24,3–24,6	138	155	0,963	1,07
АМг5	2,65	6,40 (М)	–	126	147	0,922	1,09
АМг5П	2,65	6,25 (М)	24,1–26,2	126	147	0,922	1,05
АМг6	2,64	6,73 (М)	24,7–27,4	122	138	0,922	1,09
Д18	2,76	3,90 (Т)	23,4–24,5	172	193	0,922	1,17
В65	2,80	5,04 (Т)	–	155	184	0,964	1,17
Д1	2,80	5,4 (Т)	22,9–25	130	174	0,922	1,05
Д16	2,80	5,7 (Т)	22,9	130	163	0,922	1,17
		4,76 (Т1)	22,9	146	167	0,879	1,21
		3,4 (М)	–	–	–	–	–
Д19	2,76	6,1 (Т)	20,3	138	172	0,880	1,09
		5,1 (Т1)	–	–	–	–	–
ВД17	2,75	5,5 (Т1)	23,6–25,4	142	172	0,838	0,964
АК4-1	2,80	5,5 (Т1)	20,8–23,0	146	163	0,797	0,964
АД31	2,71	3,44 (Т1)	23,4–26,7	188	188	0,921	1,05
АД33	2,71	4,38 (Т1)	23,2–25,0	151	172	0,945	1,05
АВ	2,70	3,70 (Т1)	23,5–25,4	180	188	0,797	1,09
АК6	2,75	4,10 (Т1)	21,4–23,8	180	189	0,838	1,00
АК8	2,80	4,3 (Т1)	22,5–24,5	168	180	0,838	1,09
В95оч	2,85	4,2 (Т1)	22	178	179	0,92	1,09
В93	2,84	4,08 (Т2)	23,8	151	163	0,88	1,13
В96Ц1	2,89	4,9 (Т2)	23,9	155	167	0,861	1,133
1420	2,47	10,5	22,2	80	83 (300 °С)	1,07	1,24

* Буква в скобках после числового значения указывает состояние полуфабриката.

Таблица 5.5. Механические свойства деформируемых алюминевых сплавов при 20 °С [1, 15, 31, 42]

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	E	G	σ_{-1} при $N = 2 \cdot 10^7$ циклов	МПа				δ	ψ	КСУ	КСТ
							σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{тл}$	$\sigma_{ск}$				
АД0, АД1 АМЦ	Лист	Отоженное	2	71	27	-	80	40	-	-	35	80	-	-
	Пруток	Без ТО	20	-	-	-	150	100	-	-	6	60	-	-
	Лист	Отоженное	0,7-10,5	-	-	-	110	60	35	-	25	-	-	-
АМг2	Лист	Полунагартованное	0,7-10,5	-	-	-	170	130	-	-	10	-	-	-
		Нагартованное	0,7-10,5	-	-	-	220	180	-	-	5	-	-	-
	Пруток	Без ТО	20	70	26,5	-	170	110	70	-	18	65	-	-
	Плита	То же	25	-	-	-	150	120	-	-	22	-	-	-
АМг3 АМг4	Лист	Отоженное	2	71	27	85	190	100	-	-	23	-	0,25	-
	Пруток	»	20	-	-	-	190	80	-	-	25	65	0,9	-
	Труба	»	50	-	-	-	180	100	-	-	12	-	0,4	0,25
	Лист	»	2	71	27	90	230	120	-	-	25	-	0,3	0,2
АМг5	»	Без ТО	2	71	27	110	280	140	100	-	20	40	0,3	0,2
	Пруток	»	25	-	-	-	320	190	100	-	15	-	0,3	0,2
	Лист	Отоженное	2,5	71	26,5	110	300	150	-	-	20	-	0,3	0,2
	Пруток	»	20	-	-	-	300	160	-	-	14	-	-	-
АМг5П АМг6	Штамповка, поковка	»	До 30 кг	-	-	-	300	160	-	-	16	-	-	-
				71	27	-	270	150	-	23	-	-	-	-
	Проволока	»	»	10	71	27	100	340	170	130	20	-	-	-
	2			71	27	-	-	-	180	-	-	-	-	
Д18	Лист плакированный	Нагартованное на 20 %	-	-	-	-	400	300	230	-	9	-	-	-
		То же на 30 %	-	-	-	420	320	-	330	-	10	-	-	-
	То же на 16 %	30	71	27	-	400	310	240	320	7	-	-	0,2	0,09
	Отоженное	6	-	-	-	345	170	100	170	20,5	-	-	0,2	0,17
Д1	Плита	Без ТО	6	-	-	-	355	190	-	-	19,5	-	-	-
		Отоженное	До 2,5 т	-	-	-	300	150	-	-	14	-	-	-
Д1	Профиль го- рячекатаный	»	Закаленное и ес- тественно состаренное	1,4-10,0	7	27	160	60	-	-	25	-	-	-
				1,4-10,0	-	-	300	170	-	24	50	-	-	-
Д1	Пруток	»	»	До 50	72	27	-	260	200	-	-	-	-	-
				До 10	-	-	360	220	-	-	-	-	-	-
				Св. 20	-	-	410	250	-	-	10	-	-	-

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	E	G	σ_{-1} при $N=2 \cdot 10^7$ циклов	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{тк}$	$\sigma_{ск}$	δ	ψ	КСУ	КСТ
Д16	Лист	Закаленное и естественно состаренное	2-4	72	-	130	450	320	190	-	19	-	-	-
	Профиль прессованный	То же Закаленное и искусственно состаренное	30-40 5-10	72	-	140-150	460 480	360 350	-	-	10 12	-	-	-
Д19	Лист плакированный	Закаленное и естественно состаренное	2-4	70	-	-	440	310	250	330	16	-	-	-
	Панель (полотно)	То же Закаленное и искусственно состаренное	2-4	-	-	-	450	400	350	425	6,5	-	-	0,3-0,4
ВД17	Профиль прессованный	Закаленное и естественно состаренное	7,5	-	-	-	480	350	300	350	10	-	-	-
	Пруток прессованный	То же Закаленное и искусственно состаренное	7,5	-	-	-	490	450	400	450	5,5	-	-	-
АД31	Полоса прессованная	Закаленное и искусственно состаренное	До 5	72	27	-	460	340	300	340	12	-	-	-
	Полоса, прутки прессованные	То же Закаленное и искусственно состаренное	20 60 20-100	- 72 71	- 27 26,5	160 165 90	- - 250	- - 210	- - 15	- - 230	- - 13	-	-	0,5
АД33	Лист неплакированный	Отожженное	2-4	71	26,5	100	140	80	-	-	20	-	-	-
		Закаленное и естественно состаренное	-	-	-	-	230	120	-	-	19	-	-	-

Марка сплава	Вид полу- фабриката	Состояние	Толщина или диа- метр, мм	E	G	σ_{-1} при $N = 2 \cdot 10^7$ циклов	ГПа				МПа				δ	ψ	КСУ	КСТ
							σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{m\kappa}$	$\sigma_{\sigma\kappa}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{m\kappa}$	$\sigma_{\sigma\kappa}$				
АД33	Лист неспла- вленный	Закаленное и искусственно состаренное То же	—	—	—	—	310	260	18	260	—	—	—	14	—	—	—	—
АВ	Профиль прессованный	То же	20	—	—	90	320	280	21	280	—	—	—	12	25	0,3	—	—
АВ	Лист неспла- вленный	Закаленное и естественно состаренное	0,5–10,5	—	—	—	250	160	—	—	—	—	—	23	—	—	—	—
АВ	Лист неспла- вленный	То же	20	71	27	100	350	290	—	—	—	—	—	13	—	0,35	—	—
АК6	Профиль	Закаленное и искусственно состаренное	До 150 кг	—	—	—	310	260	—	—	—	—	—	10	—	—	—	—
АК6	»	»	»	72	72	—	447(Д)	357	—	—	—	—	—	12,5	—	0,19	—	—
АК8	Пруток	»	150–200	—	—	—	450	400	—	—	—	—	—	8	—	—	—	—
АК8	Профиль	»	30–50	—	—	—	490	450	—	—	—	—	—	7	15	—	—	—
АК8	Штамповка	»	До 30 кг	—	—	—	480	380	—	—	—	—	—	10	25	—	—	—
АК8	Поковка	»	Крупнога- баритная	—	—	135	420	310	—	—	—	—	—	10	—	—	—	—
АК4-1	Лист плаки- рованный	»	0,5–0,8	72	—	—	380	310	—	—	—	—	—	6	—	0,2	—	—
АК4-1	Профиль	»	Св. 10	—	—	—	400	330	—	—	—	—	—	8	—	—	—	—
АК4-1	Штамповка	»	До 100 кг	—	—	—	380	280	—	—	—	—	—	6	—	—	—	—
1420	Лист	»	1,5–2	75	—	—	450	270	200	—	—	—	—	10	—	—	—	—
В950ч	Профиль	»	1,5–10	72	—	—	600	550	—	—	—	—	—	9	—	—	—	—
В950ч	Профиль	»	»	180	—	—	600	550	—	—	—	—	—	12	—	—	—	—
В950ч	Лист, плита	»	—	72	—	—	570	500	—	—	—	—	—	12	—	—	—	—
В96Ц1	Профиль	»	»	—	—	—	660	630	—	—	—	—	—	8	14	—	—	—

Таблица 5.6. Механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов при высоких температурах [1, 10, 12, 31]

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	t, °C	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	
					МПа		%		
АМц	Лист	Отожженное	3	20	110	—	30	—	
				100	95	—	35	—	
				200	70	—	41	—	
				300	45	—	45	—	
АМг2	»	Отожженное	1,5–3	20	190	100	25	—	
				100	180	90	25	—	
				200	130	60	45	—	
				300	70	—	75	—	
		Пруток	Отожженное	20	20	290	250	4	—
					100	270	230	6	—
					200	210	150	15	—
					300	80	—	65	—
	»	»	»	20	20–100	190	80	30	65
					200	145	80	54	80
					300	75	65	56	90
АМг3	Лист	Отожженное	2	20	230	120	25	—	
				100	220	110	27	—	
				200	150	90	50	—	
				250	100	60	60	—	
АМг4	»	»	2	20	280	140	20	—	
				100	250	130	25	—	
				200	170	100	45	—	
				300	100	50	60	—	
	Пруток	Без ТО	25	20	320	190	15	40	
				100	260	120	22	70	
				200	200	100	30	85	
				300	120	60	45	85	
АМг5	Лист	Отожженное	2	20	300	150	20	—	
				100	270	150	30	—	
				200	180	120	45	—	
				300	110	60	65	—	
	Пруток	Отожженное (прессованное) и без ТО	20	20	310	160	14	—	
				100	290	150	17	—	
				200	210	130	27	—	
				250	170	110	34	—	

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	t, °C	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ				
					МПа		%					
АМг6	Лист	Отожженное	2	20	350	165	22	—				
				100	320	160	34	—				
				200	195	135	45	—				
				300	130	60	55	—				
	»	Нагартованное	2	20	385	290	11	—				
				100	335	285	15	—				
				200	250	185	25	—				
				20	350	180	18	—				
	Профиль	Отожженное и без ТО	Все размеры	100	310	160	20	—				
				200	200	140	30	—				
				250	170	120	35	—				
				200	200	140	30	—				
Д18	Проволока	Закаленное и состаренное	—	20	300	200	25	50				
				100	260	180	24	60				
				200	250	140	19	70				
				300	20	60	—	—				
Д16	Лист лакированный	Закаленное и искусственно состаренное	5–10	20	455	390	7	—				
				100	440	390	7	—				
				175	410	350	10	—				
	Профиль прессованный	Закаленное и естественно состаренное	5–10	20	380	330	8	—				
				100	460	410	9	—				
				175	410	390	—	—				
				200	380	360	10	—				
				250	290	260	—	—				
				Д19	Лист лакированный	То же	2	100	420	280	16	—
								175	370	260	16	—
200	340	250	—					—				
250	270	220	—					—				
300	180	150	—					—				
20	450	400	—					—				
Профиль прессованный	Закаленное и искусственно состаренное	≤ 5	175		380	340	10	—				
			200		330	300	14	—				
			20		460	340	12	—				
	Закаленное и естественно состаренное	≤ 5	200		380	290	15	—				
			250		280	240	15	—				
			300		180	150	18	—				

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	t, °C	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ				
					МПа		%					
ВД17	Полоса прессованная	Закаленное и искусственно состаренное	60	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	То же	≤ 20	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	»	2	20	300	250	15	—				
				100	260	210	15	—				
				200	190	170	17	—				
				250	140	125	18	—				
				300	80	70	11	—				
	Профиль, прутки прессованный	»	20	20	330	270	12	30				
				100	280	240	12	40				
				200	200	180	11	55				
				300	90	80	8	70				
				АВ	Профиль, прутки прессованный	»	20	20	350	320	12	—
100	320	290	12					—				
200	240	220	12					—				
250	160	130	12					—				
АК6	Поковка	»	110×415×1120	20	400 (П)	—	6	—				
				125	360 (П)	—	7	—				
				200	280 (П)	—	13	40				
				250	180 (П)	—	16	46				
				300	100 (П)	—	23	70				
	Штамповка	»	300 кг	20	420 (Д)	—	10	—				
				125	390 (Д)	—	—	—				
				200	290 (Д)	—	—	—				
				АК8	Лист	»	2	20	430	370	11	—
								200	310	240	12	—
250	200	170	12					—				
Плита катаная	»	25–50	20		460	410	10	—				
			100	440	390	15	—					
			200	320	—	—	—					

Таблица 5.7. Механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов при низких температурах [1, 12, 31]

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	t, °C	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	
					МПа		%		
АД1	Пруток	Без ТО	20	20	60	40	35	—	
				-70	105	45	35	—	
				-196	160	50	50	—	
АМц	Плита	Без ТО	25	20	150	120	24	—	
				-196	300	155	34	—	
АМг2	Лист	Отожженное	2	20	190	—	26	—	
				-70	200	—	40	—	
				-196	310	—	50	—	
	Пруток	Без ТО	20	20	180	—	30	60	
				-70	190	—	40	60	
				-196	310	—	50	60	
Лист	Отожженное	2	20	200	—	30	65		
			-70	200	—	30	65		
			-196	300	—	50	60		
АМг3	Лист	Отожженное	2	20	230	120	25	—	
				-70	250	120	30	—	
				-196	330	130	45	—	
АМг4	»	»	2	20	280	140	20	—	
				-70	300	150	30	—	
				-196	420	170	35	—	
АМг5	»	»	2	20	300	150	20	—	
				-70	310	160	24	—	
				-196	400	190	28	—	
	Плита	Без ТО	18	20	320	170	23	—	
				-196	440	180	46	—	
	Пруток	Отожженное и без ТО	22	20	310	160	14	—	
-70				320	170	20	—		
АМг6	Лист	Отожженное	2,5	20	365	160	22	—	
				-196	470	185	24	—	
	Плита	Нагартованное (18% в направлении Д)	30	20	395	345	10	22	
				-196	505	380	22	32,5	
				Полунагартованное	30	20	405	330	9,5
	-196	515	350			16,5	16		
	Профиль	С повышенным качеством выкатки	30	20	315	280	3,5	5	
				-196	360	325	1,6	2	
				Отожженное и без ТО	Все размеры	20	350	180	18
-70						360	—	22	—
-196	510	—	31	—					
Д1	Штамповка	Закаленное и состаренное	Все размеры	20	460	280	21	—	
				-70	460	310	25	—	
				-196	580	380	23	—	
Д16	Лист плакированный	Закаленное и естественно состаренное	≤ 2	20	440	350	17	—	
				-70	470	370	19	—	
				-196	590	470	24	—	

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	t, °C	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
					МПа			
Д16	Лист плакированный	Закаленное и искусственно состаренное	≤ 2	20	460	420	6	—
				-70	500	460	6	—
				-196	570	520	8	—
		То же, нагартованное	≤ 2	20	460	360	13	—
				-70	510	370	16	—
				-196	620	490	20	—
	Пруток прессованный	Закаленное и естественно состаренное	20-28	20	530	370	15	16
				-70	560	400	12	12
				-196	700	530	11	10
Д19	Лист плакированный	То же	2	20	440	300	20	—
				-70	480	370	23	—
				-196	550	420	26	—
ВД17	Полоса прессованная	Закаленное и искусственно состаренное	60	20	490	—	10	19
				-40	500	—	12	23
				-70	520	—	12	21
АД33	Лист	То же	2	20	300	250	15	—
				-70	330	270	16	—
				-196	400	290	22	—
	Профиль прессованный	»	20	20	330	270	12	30
				-70	350	290	14	30
				-196	430	310	16	25
АВ	Лист неплакированный	Закаленное и естественно состаренное	1-2	20	250	160	23	—
				-196	370	200	30	—
	Пруток, профиль	Закаленное и искусственно состаренное	20	20	350	320	12	—
АК6	Пруток прессованный	То же	30	20	400	300	12	25
				-70	420	320	10	22
				-196	560	425	10	22
АК8	Лист	»	3	20	470	410	10	—
				-70	490	430	10	—
				-196	560	460	14	—
	Пруток	»	50	20	540	460	12	—
				-70	550	490	12	—
				-196	660	580	14	—
	Профиль	»	30-50	20	490	450	7	15
				-70	510	460	8	16
				-196	610	530	10	14
1420	Полуфабрикаты прессованные	»	—	20	490	360	8	—
				-70	560	365	6	—
				-196	570	370	8	—
				-253	660	370	4	—

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	t, °C	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	
					МПа		%		
В93	Штамповки, поковки	Закаленное и искусственно состаренное	—	20	490	450	7	—	
				−70	520	470	8	—	
				−196	580	530	6	—	
В95	Листы	То же	—	20	520	440	14	—	
				−70	560	470	12	—	
				−196	640	520	9	—	
				−253	750	630	7	—	
	Полуфабрикаты пресованные	»	»	—	20	600	550	8	—
					−70	620	560	8	—
					−196	750	640	7	—
					−253	810	730	5	—
В96	Полуфабрикаты пресованные	»	—	20	650	630	6	—	
				−70	710	670	4	—	
				−196	810	730	2	—	
АД31	Пруток, профиль пресованный	»	—	20	240	220	12	50	
				−70	250	—	11	45	

Таблица 5.8. Длительная прочность и ползучесть деформируемых алюминиевых сплавов [5, 15, 17]

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	t, °C	σ_{10}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/10}$	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$
					МПа						
АМг2	Лист	Отожженное	1,5	100	—	140	110	100	—	80	75
				150	—	100	70	50	—	55	35
				200	—	60	40	—	—	20	—
				250	—	30	20	—	—	—	—
АМг3	»	»	1,5	100	—	160	130	110	—	85	80
				150	—	120	70	—	—	65	50
				200	—	60	40	20	—	20	—
АМг4	»	»	2,0	175	130	95	—	—	60	—	—
				200	105	75	—	—	40	—	—
АМг5	»	»	2,0	175	120	100	—	—	85	55	—
				200	90	65	—	—	40	—	—
	Пруток	Без ТО	20	175	140	120	—	—	80	50	—
				200	100	70	—	—	40	—	—
АМг6	Лист	Отожженное	1,5	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	—	—	—	—

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	Толщина или диаметр, мм	t, °C	σ_{10}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/10}$	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$
					МПа						
Д16	Лист	Закаленное и естественно состаренное	1,5–3	100	400	390	380	–	–	280	–
				150	350	300	240	–	–	180	120
				200	240	180	120	–	–	80	45
	Профиль	Закаленное и искусственно состаренное	5–10	175	330	275	225	–	230	150	90
				200	285	225	160	–	170	95	60
	»	То же	50	100	–	390	–	–	–	340	–
				150	–	320	–	–	–	260	–
				175	–	270	–	–	–	210	–
Д19	Лист	Закаленное и естественно состаренное	2	150	–	320	250	–	–	180	–
				175	–	230	170	–	–	135	–
				200	250	180	120	–	120	80	–
ВД17	Полоса	Закаленное и искусственно состаренное	60	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

Таблица 5.9. Характеристики разрушения массивных полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов [5, 31, 42]

Марка сплава	Вид полуфабриката	Режим старения	Направление вырезки образцов	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	KCT , МДж/м ²
Д16	Плита	190 °C, 12 ч	ПД	340	16	26,7	0,58
В95	Штамповка	115 °C, 8 ч + 180 °C, 8 ч	ДП	461	12,8	51,0	1,1
АК4–1	Профиль пресованный	195 °C, 12 ч	ПД	410	8,0	23	0,21
1420	Полоса пресованная	120 °C, 5 ч	ПД	243	10,5	21,3	0,35

Все дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состояниях [1, 12, 15, 31], хорошо свариваются точечной сваркой и практически не свариваются плавлением из-за высокой склонности к трещинообразованию.

Дуралюмин марки Д1 применяют 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 °С; Д18 – для заклепок; ВД17 – для лопаток компрессора двигателей, работающих при температуре до 250 °С.

Сплавы типа АК4–1 системы Al–Cu–Mg–Fe–Ni. По химическому и фазовому составам эти сплавы весьма близки к дуралюминам, но вместо марганца в качестве легирующих элементов содержат железо и никель. Сплавы хорошо деформируются в горячем состоянии, имеют удовлетворительную коррозионную стойкость. Для защиты от коррозии детали подвергают анодированию, оксидированию и покрывают лакокрасочными материалами. Сплавы удовлетворительно свариваются точечной и шовной сварками, хорошо обрабатываются резанием.

Температура нагрева под закалку сплава АК4–1 составляет 525–535 °С; старение в зависимости от вида полуфабриката проводят по одному из следующих режимов [1, 31]:

Листы плакированные	185–195 °С, 9–12 ч или 24 ч
Плиты горячекатаные	190–200 °С, 7–9 ч или 24 ч
Штамповки, поковки	185–195 °С, 8–12 ч или 195–200 °С, 24 ч

Для уменьшения коробления закалку деталей сложной формы можно проводить в кипящей воде.

Сплавы этой системы отличаются высокой износостойкостью (низким коэффициентом трения).

Сплав АК4–1 используют для изготовления деталей реактивных двигателей (крыльчатые насосы, колеса, компрессоры, заборники, диски, лопатки).

Сплавы АД31, АД33, АВ системы Al–Mg–Si. Эти сплавы имеют высокую пластичность и коррозионную стойкость, упрочняются по единому режиму: температура нагрева под закалку 520–530 °С, температура искусственного старения 160–170 °С, время выдержки 10–12 ч. Для высоконагруженных деталей, работающих в условиях переменных нагрузок, старение осуществляют при 150–160 °С. Для достижения максимальной прочности старение полуфабрикатов следует проводить не позднее чем через 1 ч после заковки, иначе наблюдается снижение σ_s и $\sigma_{0,2}$ на 30–50 МПа.

Коррозионная стойкость сплавов высокая; они не склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением независимо от состояния материала. Наиболее прочный сплав АВ по коррозионной стойкости уступает сплавам АД31, АД33.

Сплавы этой системы удовлетворительно соединяются точечной, шовной и аргонодуговой сваркой. Обрабатываемость резанием в отожженном состоянии неудовлетворительная, в закаленном и состаренном – удовлетворительная.

Сплав АД31 применяют для деталей невысокой прочности, работающих в интервале температур –70...50 °С, от которых требуется высокая коррозионная стойкость и хороший декоративный вид. Сплав применяют для отделки кабин самолетов и вертолетов с различными цветовыми покрытиями; используют в строительстве для дверных рам, оконных переплетов, эскалаторов, а также в автомобильной, легкой и мебельной отраслях промышленности. Сплав АД33 применяют для деталей средней прочности, работающих в интервале температур –70...50 °С и обладающих коррозионной стойкостью во влажной атмосфере и морской воде (лопасти вертолетов, барабаны колес гидросамолетов), а также в судостроении и строительстве. Из сплава АВ

делают детали, от которых при изготовлении требуется высокая пластичность в холодном и горячем состоянии (лопасти вертолетов, штампованные и кованные детали сложной конфигурации).

Сплавы АК6, АК8 системы Al–Mg–Si–Cu. Это ковочные сплавы, обладающие хорошей пластичностью и стойкостью к образованию трещин при горячей пластической деформации; по химическому составу они близки к дуралюминам, отличаясь более высоким содержанием кремния. Режимы термической обработки сплавов АК6 и АК8 приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10. Режимы термической обработки сплавов АК6 и АК8 [1, 31]

Сплав	Вид полуфабриката	Режим ТО	
		Закалка	Старение
АК6	Все виды	505–525 °С	20 °С, ≥ 96 ч
		505–525 °С	160–165 °С, 10–15 ч
АК8	Поковки, штамповки	495–505 °С	20 °С, ≥ 96 ч
		495–505 °С	150–165 °С, 10–15 ч
		495–505 °С	195–205 °С, 11–13 ч
	Прессованные полуфабрикаты	495–505 °С	20 °С, ≥ 96 ч
		495–505 °С	165–175 °С, 10–12 ч

Эти сплавы склонны к коррозии под напряжением, поэтому детали из них следует анодировать или защищать лакокрасочными покрытиями. Сплав АК6 удовлетворительно соединяется точечной и шовной сварками, а сплав АК8 – аргодуговой. Прочность сварного шва составляет 0,6–0,7 σ_b основного материала. Сплавы хорошо обрабатываются резанием.

Из сплава АК6 изготавливают сложные штамповки (крыльчатки вентилятора для компрессоров реактивных двигателей, корпусные агрегатные детали, крепежные детали и др.), а из АК8 – высоконагруженные детали самолетов, выполненные ковкой и штамповкой (рамы, фитинги, пояса лонжеронов и др.). Сплав АК8 можно использовать для деталей, работающих в условиях криогенных температур [15, 42].

Сплавы В95, В93, В96Ц1 системы Al–Zn–Mg–Cu. Высокопрочные сплавы этой группы отличаются высоким временным сопротивлением (600–700 МПа) и близким к нему по значениям пределом текучести. Они не являются теплопрочными, и при длительной эксплуатации их можно использовать до температур не выше 100–120 °С.

Режим Т1, соответствующий фазовой стадии старения, не обеспечивает достаточное сопротивление расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию. Сплавы, обработанные по такому режиму, имеют низкие характеристики пластичности и вязкости разрушения [5, 10, 42]. Режимы коагуляционного ступенчатого старения Т2 и Т3, а также использование сплавов повышенной и особой чистоты позволяют повысить пластичность, трещиностойкость и сопротивление расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию. По коррозионной стойкости сплавы В95пч, В95оч и В93пч в состоянии Т2 и Т3 значительно превосходят дуралюмины (табл. 5.11–5.13).

Таблица 5.11. Режимы термической обработки сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu

Марка сплава	Вид полуфабриката	Обозначение	Режим ТО	
			Закалка	Старение
В95пч, В95оч	Листы	T1	465-475 °C	115-125 °C, 23-25 ч
		T2	475 °C	110-120 °C, 5-10 ч + + 160-170 °C, 14-18 ч
		T3	465-475 °C	110-120 °C, 5-10 ч + + 160-170 °C, 25-35 ч
	Плиты	T2	465-475 °C	110-120 °C, 5-10 ч + + 160-170 °C, 10-20 ч
		T3	465-475 °C	110-120 °C, 5-10 ч + + 160-170 °C, 15-25 ч
		T1	465-475 °C	135-145 °C, 15-17 ч
	Панели прессованные	T2	465-475 °C	135-145 °C, 15-17 ч
		T3	465-475 °C	110-120 °C, 5-10 ч + + 160-170 °C, 10-14 ч
		T1	465-475 °C	110-120 °C, 5-10 ч + + 175-185 °C, 8-13 ч
	Штамповки, поковки	T2	465-475 °C	110-120 °C, 5-10 ч + + 175-185 °C, 4-10 ч
		T3	465-475 °C	110-120 °C, 5-10 ч + + 175-185 °C, 8-18 ч
		T1	450-465 °C	115-125 °C, 3-10 ч + + 60-170 °C, 4-18 ч
В93пч	То же	T2	450-465 °C	115-125 °C, 3-10 ч + + 170-180 °C, 6-12 ч
		T3	450-465 °C	115-125 °C, 3-10 ч + + 180-190 °C, 3-10 ч
		T1	465-475 °C	135-145 °C, 15-17 ч
В96Ц1	Профили прессованные	T2	465-475 °C	110-120 °C, 3-10 ч + + 170-180 °C, 3-20 ч

Таблица 5.12. Влияние режима старения на свойства полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu [1, 12, 31, 42]

Марка сплава	Вид полуфабриката	Режим ТО	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	$K_{1c}, \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	Расплаивающая коррозия, баллы
			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).

Таблица 5.13. Вязкость разрушения пресованных панелей из сплавов В95, В95пч и В95оч [1, 12, 15]

Марка сплава	Режим ТО	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	Марка сплава	Режим ТО	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}
В95	T1	24,8–28,0	В95оч	T1	31,0–34,2
В95пч	T1	30,3–32,3		T2	41,8–45,0
	T2	37,2–40,4		T3	46,8–49,6
	T3	42,0–43,5			

Сплавы применяют для высоконагруженных конструкций, работающих в основном в условиях напряжений сжатия (детали обшивки, стрингеры, шпангоуты, лонжероны самолетов и др.).

Наиболее эффективный путь повышения удельной прочности и удельного модуля упругости – легирование алюминия литием и магнием.

Сплав 1420 системы Al–Mg–Li. От Д16 сплав 420 отличается меньшей (на 11 %) плотностью и более высоким (на 4 %) модулем упругости.

Термическую обработку сплава 1420 проводят по режиму: закалка от 450 °С на воздухе и старение при 170 °С, 8–24 ч (обеспечивает максимальные прочностные свойства) + 120 °С, 12–48 ч (повышает пластичность).

Коррозионная стойкость полуфабрикатов из сплава 1420, термообработанных по режиму T1, такая же, как у сплава АМг6М. Закалка на воздухе и в горячих средах повышает стойкость к коррозии под напряжением.

Применение сплава 1420 в конструкциях вместо сплава Д16 позволяет снизить массу на 10–15 % [31, 42]. Сварные соединения из сплава 1420 отличаются высокой коррозионной стойкостью.

5.1.2. Литейные алюминиевые сплавы

Для изготовления фасонных деталей применяют литейные алюминиевые сплавы, которые имеют низкую плотность и высокую удельную прочность. Прочность большинства литейных алюминиевых сплавов можно повысить термической обработкой. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов зависят не только от содержания легирующих элементов, но и от количества примесей. Важное значение в технологии приготовления и в повышении свойств литейных сплавов на основе системы Al–Si имеет процесс модифицирования, вызывающий повышение прочности и особенно пластичности сплавов.

Способы литья и виды термической обработки литейных алюминиевых сплавов обозначают следующим образом:

способы 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; режимы ТО: T1 – старение; T2 – отжиг; T4 – закалка; T5 – закалка и частичное старение; T6 – закалка и полное старение; T7 – закалка и стабилизирующий отпуск; T8 – закалка и смягчающий отпуск.

При определении механических свойств на образцах, вырезанных из отливок, допускается снижение временного сопротивления на 25 % и относительного удлинения до 50 %.

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 образованию горячих трещин и др.

Химический состав, физические и механические свойства литейных алюминиевых сплавов представлены в табл. 5.14–5.18.

Таблица 5.14. Химический состав литейных сплавов (основа — Al, % (мас.)) (ГОСТ 1583—93)

Марка сплава	Mg	Si	Mn	Cu	Ti	Другие	Примеси, не более						Fe*, не более		
							Mg	Mn	Cu	Be	Zn	Прочие	3, В	К	Д
AK12 (AJ2)	—	10,0—13,0	—	—	—	—	0,10	0,50	0,60	—	0,30	0,10 Zr	0,70	1,00	1,50
AK9ч (AJ4)	0,17—0,3	8,0—10,5	0,2—0,5	—	—	—	—	—	0,30	0,10	0,30	0,15 Ti+Zr; 0,10 Ni	0,60	0,90	1,00
AK7ч (AJ9)	0,2—0,4	6,0—8,0	—	—	—	—	—	—	0,50	0,20	0,30	0,15 Ti+Zr; 0,05 Pb	0,60	1,00	1,50
AK7лч (AJ9-1)	0,25—0,4	7,0—8,0	—	—	0,15	—	—	—	0,10	0,10	0,20	0,15 Zr; 0,10 B; 0,03 Pb; 0,005 Sn	0,30	0,40	0,50
AK8л (AJ34)	0,35—0,55	6,5—8,5	—	—	0,30	0,15—0,4 Be	—	—	0,10	0,30	0,30	0,10 B; 0,20 Zr	0,60	0,60	—
AK8M (AJ32)	0,3—0,5	7,5—9,0	0,3—0,5	1,0—1,5	0,1—0,3	—	—	—	—	—	0,30	0,10 Zr	0,70	0,80	0,90
AK8M3ч (BAJ8)	0,2—0,45	7,0—8,5	—	2,5—3,5	0,1—0,25	0,5—1,0 Zn; 0,005—0,1 B; 0,05—0,25 Be	—	—	—	—	—	0,15 Cd; 0,15 Zr	0,40	0,40	0,40
AK5M (AJ15)	0,35—0,60	4,5—5,5	—	1,0—1,5	—	—	—	—	0,50	—	0,30	0,01 Sn; 0,15 Ti + Zr	0,60	1,00	1,50
AK5Mч (AJ15-1)	0,4—0,55	4,5—5,5	—	1,0—1,5	0,08—0,15	—	—	—	0,10	—	0,30	0,15 Zr; 0,10 B; 0,01 Sn	0,30	0,40	0,50
AM5 (AJ19)	—	—	0,6—1,0	4,5—5,3	0,15—0,35	—	0,05	—	—	—	—	0,10 Ni; 0,20 Zr; 0,30 Si	0,20	0,30	—
AMr10 (AJ17)	9,5—10,5	—	—	—	0,05—0,15	0,05—0,20 Zr; 0,05—0,15 Be	—	—	0,10	0,15	0,10	0,20 Si	0,2	0,2	0,2
AMr10ч (AJ17-1)	9,5—10,5	—	—	—	0,05—0,15	0,05—0,20 Zr; 0,05—0,15 Be	—	—	—	—	—	0,05 Si	0,05	0,05	0,05
AMr11 (AJ22)	10,5—13,0	0,8—1,2	—	—	0,05—0,15	0,03—0,07 Be; 0,20 Zr	—	—	—	—	0,19	—	0,50	1,00	1,20
Al4Mг (AJ24)	1,5—2,0	—	0,2—0,5	—	0,10—0,20	3,5—4,5 Zn	—	—	—	0,20	0,10	0,10 Zr; 0,30 Si	0,50	—	—

Примечание. В скобках даны старые обозначения марок литейных сплавов.

* В зависимости от способа литья.

Таблица 5.15. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов при 20 °С [15, 37]

Марка сплава	Характеристика образца	Способ литья	Режим ТО	E	G	σ _в	σ _{0,2}		δ, %	HB	KCU, 2 МДж/м	σ ₋₁ , МПа, при N=10 циклов												
							ГПа	МПа																
AK12	Литой диаметром 12 мм	ЗМ Д ЗМ	Без ТО То же Т2	70	-	170 190 160	80 120 90	-	6 1,8 5	55	-	42												
													AK9ч	Литой диаметром 12 мм Плоский толщиной 3 мм Литой диаметром 6 мм	ЗМ Д ВМ	Т6 Без ТО Т6	70 70 -	-	260 290 260	200 160 -	4 2 4	70 -	0,5 -	75 -
AK7лч	То же	3, О, В 3, О, В ЗМ, ОМ, ВМ К, КМ ЗМ, ОМ, ВМ К, КМ Д	Т4 Т5 Т5 Т5 Т6 Т6 Без ТО	-	220 260 280 300 300 320 210	-	5 5 6 6 3 5 2	55 70 70 70 75 75 55	-	-	-													
												AK8М	Выточенный диаметр 10 мм	3	Без ТО Т1	71 71	-	180 200	120 180	1,5 1	60 70	0,2 0,15	-	
																								AK8л

Марка сплава	Характеристика образца	Способ литья	Режим ТО	E		G	σ_b	$\sigma_{0,2}$		$\delta, \%$	НВ	KCU, ² МДж/м	σ_{-1} , МПа, при N=10 циклов	
				ГПа	МПа			МПа	МПа					
АК8Л	Литой диаметром 12 мм	К	Т6	73	-	-	280	220	2,0	100	-	-		
				71	-	-	240	190	3,0	75	-	-		
				71	-	-	200	130	3,0	70	0,3	-	-	
				71	-	-	220	170	2,0	80	0,2	-	-	
				71	-	-	300	260	2,5	110	-	-	-	
				73	-	-	260	240	2,5	100	-	-	-	
				-	-	-	270	160	3,0	74	-	-	-	-
АМГ10	Литой диаметром 12 мм	Д	Т1	-	-	-	290	200	1,0	90	-	-	-	
				-	-	-	360	-	18,0	75	0,15	70	-	
				70	-	-	250	180	1,0	75	0,2	-	-	
				-	-	-	310	-	1,9	-	-	-	-	
				-	-	-	190	-	1,0	70	-	-	-	-
				70	-	-	300	200	1,0	75	-	-	-	-
				-	-	-	320	220	2,0	75	-	-	-	-
АК5Мч	Литой диаметром 12 мм	3, О, В, К	Т7	-	-	-	220	-	2,0	70	-	-	-	
				-	-	-	190	-	1,0	70	-	-	-	
				-	-	-	300	200	1,0	75	-	-	-	
				-	-	-	320	220	2,0	75	-	-	-	
				-	-	-	220	-	2,0	70	-	-	-	
				70	25	25	320	200	10,0	80	1,0	70	-	
				-	-	-	300	200	3,0	90	-	-	-	
АМ5	Литой	К	Т4	-	-	-	320	220	12,0	90	-	-	-	
				-	-	-	240	180	3,0	95	0,2	-	-	
				69	-	-	240	150	4,0	75	0,2	65	-	
				-	-	-	240	-	3,0	70	-	-	-	
				-	-	-	310	-	3,0	90	-	-	-	
				72	-	-	382	-	7,0	90	-	-	-	
				72	-	-	400	340	4,0	100	-	-	110	-
АЦ4МГ	Литой диаметром 12 мм	К	Т4	-	-	-	410	-	6,0	-	-	-	-	
				-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	
				-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	
АК8М3	Диаметром 5 мм	К	Т4	72	-	-	382	-	7,0	90	-	-	-	
				72	-	-	400	340	4,0	100	-	-	110	-
				-	-	-	410	-	6,0	-	-	-	-	

Таблица 5.16. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов при повышенных температурах [15, 31, 37]

Марка сплава	Характеристика образца	Способ литья	Режим ТО	t, °С	σ _с	σ _{0,2}	δ, %	σ ₁₀₀ , МПа	
					МПа				
AK9	Литой диаметром 10 мм	ЗМ	T6	300	—	—	—	—	
AK7ч	То же	З	T4	20	200	110	5	—	
		З	T4	150	160	—	18	—	
		З	T4	250	150	—	23	—	
		ЗМ	T4	150	170	—	17	—	
		ЗМ	T4	250	130	—	36	—	
AK8М	Выточенный диаметром 10 мм	З	Без ТО	200	150	100	2	—	
		З	T1	200	170	140	1	—	
		З	T5	200	210	160	4	130	
		З	T5	250	150	130	4	55	
		З	T6	200	210	180	4	130	
		З	T6	250	140	120	4	55	
		З	T7	200	170	150	3	130	
		З	T7	250	130	110	4	55	
		К	Без ТО	200	220	140	4	—	
		К	T1	200	210	150	5	—	
	К	T5	200	230	210	4	—		
	К	T5	250	200	190	4	—		
	То же	Литой толщиной 3 мм	Д	T6	200	250	220	1,5	—
			Д	T7	200	220	190	3	—
			Д	Без ТО	200	230	—	4	—
Д			Без ТО	300	170	—	3	—	
Д			T1	200	250	—	2,5	—	
AM5	Литой диаметром 12 мм	З	T4	20	300	200	8	—	
		З	T4	200	270	180	3	150	
		З	T4	300	140	70	5	60	
		З	T4	350	80	50	8	35	
		З	T5	20	340	260	4	—	
		З	T5	200	280	220	3	155	
AK8л	Литой диаметром 10 мм	З	T5	20	330	270	2,5	—	
		З	T5	100	280	—	4	—	
		З	T5	200	230	—	5	120	
		З	T5	300	110	—	5,5	20	
AK5М	Литой диаметром 12 мм	З	T5	20	250	180	0,8	—	
		З	T5	200	220	—	1,5	90	
		З	T5	300	130	—	4	35	
		К	T7	20	240	180	1,5	—	
		К	T7	200	180	140	2,5	—	
		К	T7	300	100	80	6	—	
AK5Мч	То же	З	T5	100	290	—	1	—	
		З	T5	200	240	—	1,5	140	
		З	T5	250	180	—	1,5	70	
AK8МЗч	Литой диаметром 10 мм	К	T5	150	340	—	8	—	
		К	T5	200	300	—	9	140	
		К	T5	250	220	210	10	60	
		К	T5	300	130	—	11	35	

Таблица 5.17. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов при низких температурах [15, 31, 37]

Марка сплава	Характеристика образца	Способ литья	Состояние	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{ МДж/м}^2$
					МПа		%		
AK12	Литой диаметром 10 мм	ЗМ, ОМ	Без ТО	-70	220	-	4	-	0,5
AK7ч	То же	ЗМ	T5	-70	180	130	3,5	-	-
		ЗМ	T5	-196	220	150	2,5	-	-
		ЗМ	T6	-70	230	210	1,5	-	-
		ЗМ	T6	-196	250	230	1,0	-	-
AK7пч	»	З	T6	-70	300	250	2	-	-
		З	T6	-196	340	280	2	-	-
AK8л	»	З	T5	-70	340	290	2	-	-
		З	T5	-196	390	330	2	-	-
AM5	Литой диаметром 12 мм	З	T4	-70	340	-	8,5	-	-
		З	T5	-70	400	-	4,0	-	-
AK5M	То же	З	T1	-70	270	-	0,5	-	-
		З	T1	-196	295	-	0,8	-	-
AK8M3ч	Литой диаметром 10 мм	К	T5	-70	430	-	4,0	-	-
		К	T5	-196	480	-	3,5	-	-

Таблица 5.18. Физические свойства литейных алюминиевых сплавов [1, 15, 31]

Марка сплава	$\gamma, \text{ т/м}^3$	$\rho \cdot 10^3, \text{ Ом} \cdot \text{м}, \text{ при } 20^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}, \text{ при } t, ^\circ\text{C}$		$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}, \text{ при } t, ^\circ\text{C}$		$c, \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}, \text{ при } t, ^\circ\text{C}$	
			20-100	20-300	100	400	100	400
			K12	2,65	5,48	21,1	23,3	168
AK9ч	2,65	4,68	21,7	23,5	155	155	0,755	0,922
AK7ч	2,66	4,57	21,8	23,8	155	168	0,880	1,05 ^{*3}
AK8л	2,63	4,62	20,7	24,4	155	163	0,840	-
AK8M	2,65	-	20,4	23,3	-	-	-	-
AM5	2,78	5,95	19,5	22,3 ^{*1}	130	158	0,838	1,13
AK5M	2,68	4,62	23,1	23,9	163	176 ^{*2}	0,838	1,13
AK5Mч	2,68	4,62	23,1	23,9	163	176 ^{*2}	0,838	1,13
AMr11	2,50	10,30	24,5	27,3	88	105	0,880	1,0
АЦ4Mг	2,74	6,70	23,2	25,2	-	117 ^{*1}	-	-
AMr10	2,55	-	24,5	-	89	113	1,050	1,13
AK8M3ч	2,73	-	22,9	-	130	-	0,920	-

*¹ При 20-400 °С. *² При 300 °С. *³ При 350 °С.

Конструкционные герметичные сплавы. Сплавы АК12, АК9ч, АК7ч, АК8л на основе систем Al–Si и Al–Si–Mg (силумины) отличаются высокими литейными свойствами и герметичностью изготовленных из них отливок. Двойные сплавы Al–Si (АК12) не упрочняются термической обработкой; единственным способом повышения их механических свойств является модифицирование. Легированные силумины (АК7ч, АК9ч) подвергают термической обработке по режимам, приведенным в табл. 5.19 [15].

Таблица 5.19. Режимы термической обработки конструкционных герметичных алюминиевых сплавов [12, 15]

Марка сплава	Режим ТО	Закалка	Старение
АК9ч	T1	–	175±5 °С, 5–17 ч
	T6	535±5 °С, 2–6 ч	175±5 °С, 10–15 ч
АК7ч	T2	–	300±10 °С, 2–4 ч
	T5	535±5 °С, 2–6 ч	150±5 °С, 1–3 ч
	T6*	535±5 °С, 2–6 ч	200±5 °С, 2–5 ч
	T7*	535±5 °С, 2–6 ч	225±5 °С, 3–5 ч
	T8*	535±5 °С, 2–6 ч	250±5 °С, 3–5 ч
АК12	T2	–	300±10 °С, 2–4 ч

* Закалка в горячей воде (80–100 °С).

У силуминов удовлетворительная коррозионная стойкость. Детали защищают анодированием и лакокрасочными покрытиями. Обрабатываемость резанием в отожженном состоянии неудовлетворительная, в термически обработанном состоянии – удовлетворительная. Ответственные детали следует отливать с использованием ультразвуковой обработки, что позволяет повысить уровень гарантируемых механических свойств на 30 %.

Сплав АК12 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 АК7ч, АК9ч применяют для средних и крупных литых деталей ответственного назначения: корпусов компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания, турбинных колес турбохолодильников, вентиляторов и др.

Сплав АК7пч отличается от сплава АК7ч наличием титана и пониженным содержанием примеси железа (до 0,3 %). Сплав АК7пч обладает более высокими механическими свойствами (σ_b больше на 25–35 %, а δ выше более чем в 2 раза) и лучшей коррозионной стойкостью. Он предназначен для изготовления сложных по конфигурации деталей агрегатов и приборов, испытывающих средние нагрузки и работающих при температурах до 200 °С.

Сплав АК8л, относящийся, как и сплавы АК9ч и АК7ч, к системе Al–Si–Mg, превосходит их по прочности на 25–50 %, имеет хорошие литейные свойства, отличается высокой герметичностью, имеет удовлетворительную коррозионную стойкость. Его недостатки – сравнительно плохая обрабатываемость резанием и низкая жаропрочность (рабочие температуры ниже 200 °С). Режим термической обработки сплава АК8л: закалка с 535 ± 5 °С, 10–16 ч + старение при 75 ± 5 °С, 6 ч (T5). Сплав АК8л предназначен для

литья крупных корпусных деталей, сложных по конфигурации и работающих под большим внутренним давлением газа или жидкости.

Сплав АК8М предназначен для литья под давлением; обладает хорошими литейными свойствами, обрабатываемостью резанием, свариваемостью и коррозионной стойкостью; герметичность сплава близка к герметичности сплава АК12. Марганец и титан, а также большая скорость кристаллизации при литье под давлением способствуют получению метастабильной структуры. Это дает возможность упрочнять отливки путем искусственного старения без предварительной закалки (табл. 5.20). Применяют сплав АК8М для нагруженных деталей, например блоков цилиндров, головок блоков и других деталей автомобильных двигателей.

Таблица 5.20. Режимы термической обработки сплава АК8М [31, 37]

Способ литья	Режим ТО	Закалка	Старение
Д	T1	—	180±5 °С, 5–8 ч
	T2–1	—	245±5 °С, 5–8 ч
	T2	—	280±10 °С, 5–8 ч
З	T1	—	200±10 °С, 5–8 ч
К	T6	515±5 °С, 4–8 ч	175±5 °С, 8–16 ч
	T5	505±5 + 515±5 °С, 4–6 ч	150±5 °С, 10–15 ч
	T7	515±5 °С, 4–8 ч	230±5 °С, 3–5 ч

Сплав АК8МЗч имеет хорошие литейные свойства и является одним из наиболее прочных и герметичных сплавов, что достигается многокомпонентным макро (медь, цинк)- и микролегированием (Cu, Zn и Ti, Be соответственно). Сплав хорошо обрабатывается резанием, его коррозионные свойства и свариваемость аналогичны соответствующим характеристикам у сплава АК8М. Режимы термической обработки сплава АК8МЗч следующие [15, 31, 37]:

T4	Закалка 450 °С, 4 ч + 500 °С, 4 ч + 510 °С, 6 ч
T5	Закалка по режиму T4 + старение 160 °С, 6–8 ч
T6	То же + старение 160 °С, 10–12 ч
T7	То же + старение 200 °С, 4 ч

Сплав АК8МЗч рекомендован для производства силовых и герметичных деталей с рабочими температурами до 250 °С, изготавливаемых литьем под давлением и методами точного литья.

Конструкционные высокопрочные и жаропрочные сплавы. Сплав АМ5 относится к системе Al–Cu–Mn с добавлением до 0,35 % Ti. Сплав характеризуется высокими механическими свойствами при 20 °С и хорошей жаропрочностью, которая может быть повышена одновременным легированием церием (0,2 %) и цирконием (0,2 %). Сплав АМ5 обладает высокими механическими свойствами при низких температурах, хорошей обрабатываемостью резанием и свариваемостью.

Отливки из сплава АМ5 применяют в термически обработанном состоянии: закаленном по режиму T4 (если требуется повышенная пластичность) или закаленном и искусственно состаренном по режимам T5, T7 в случае обработки на максимальную прочность.

Режимы термической обработки сплава АМ5 приведены ниже:

- T4 Закалка 530 ± 5 °С, 5–9 ч + 545 ± 3 °С, 5–9 ч с охлаждением в воде (20–100 °С)
T5 Закалка по режиму T4 + старение 175 ± 5 °С, 3–6 ч
T7 То же + старение 250 ± 10 °С, 3–10 ч

Примечание. Двухступенчатый нагрев под закалку применяют, чтобы исключить возможность пережога отливок. В печах, обеспечивающих перепад температур не более ± 3 °С, можно применять одноступенчатый нагрев под закалку: 545 ± 3 °С, 10–12 ч с охлаждением в воде (20–100 °С).

Коррозионная стойкость сплава АМ5 пониженная [31, 37].

Сплав АМ5 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 и повышенных до 300 °С температурах.

Сплав АК5М системы Al–Si–Cu–Mg отличается повышенной жаропрочностью. Детали, выполненные из этого сплава, могут работать длительно при температурах до 250–270 °С. Коррозионная стойкость у него пониженная, поэтому детали следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями.

Режимы термической обработки сплава АК5М приведены ниже:

- T1 Старение при 180 ± 5 °С, 5–10 ч
T5 Закалка 515 ± 5 °С, 3–5 ч + 525 ± 5 °С, 1–3 ч
и старение при 175 ± 5 °С, 5–10 ч
T6 То же и старение при 200 ± 5 °С, 3–5 ч
T7 То же и старение при 230 ± 5 °С, 3–5 ч

Примечание. При использовании режимов T5, T6, T7 для деталей, не имеющих массивных участков, можно применять одноступенчатый нагрев до 525 ± 5 °С, 3–5 ч [31].

Сплав АК5М используют для головок цилиндров двигателей воздушного охлаждения, деталей агрегатов и приборов, работающих при температуре не выше 250 °С.

Конструкционные коррозионно-стойкие сплавы. Применение алюминия и его сплавов как конструкционных материалов во многих случаях обусловлено их стойкостью к коррозии. Высокая коррозионная стойкость алюминия объясняется наличием прочной окисной пленки, имеющей хорошее сцепление с металлом.

Высокой коррозионной стойкостью отличаются алюминиево-магниевые сплавы. Их коррозионная стойкость значительно превышает стойкость литейных сплавов других систем на основе алюминия (Al–Si, Al–Co, Al–Zn). Недостатком сплавов Al–Mg с высоким содержанием магния является их чувствительность к межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением после закалки и естественного старения. Это связано с тем, что в результате такой обработки по границам зерен в виде сетки выделяется β -фаза (Al_3Mg_2), которая является анодом по отношению к твердому раствору. Склонность к коррозии под напряжением увеличивается с повышением содержания магния.

Сплавы, содержащие больше 10 % Mg, склонны к длительному естественному старению. Из-за отсутствия эвтектики (в отличие от сплавов Al–Si) алюминиево-магниевые сплавы обладают невысокими литейными свойствами, пониженной герметичностью

и повышенной чувствительностью к примесям железа и кремния, которые образуют в этих сплавах нерастворимые фазы, снижающие пластичность сплавов.

Сплавы АМg10, АМg10ч и АМg11 на основе системы Al–Mg обладают малой плотностью, а также 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 [15].

Сплавы системы Al–Mg хорошо обрабатываются резанием и полируются, их литейные свойства невысокие; кроме того, они отличаются повышенной чувствительностью к примесям железа и кремния. Легирование сплавов бериллием, титаном и цирконием 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 вследствие неравномерного распада пересыщенного твердого раствора по объему зерна, поэтому эти сплавы упрочняют только закалкой без последующего старения. Так, режим закалки сплава АМg10 следующий: нагрев до 435 ± 5 °С, 10 ч и охлаждение в масле при 50–60 °С.

Недостатком сплава АМg10 является его низкая жаропрочность – уровень рабочих температур не должен превышать 80 °С. Сплав удовлетворительно сваривается аргонодуговой сваркой. Прочность сварных соединений составляет 80–90 % от прочности основного материала.

Сплав АМg10 применяют для изготовления силовых деталей, работающих при температурах от –60 до 60 °С; в ряде случаев их используют 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 проводить в нагретом до 50–60 °С масле.

Весьма перспективной для получения коррозионно-стойких сплавов с высокими и стабильными с течением времени механическими свойствами является система Al–Mg–Zn. Сплав АЦ4Mg этой системы обладает способностью самозакаливания, может подвергаться старению – естественному или искусственному при 200 °С без предшествующей закалки. Сплавы системы Al–Mg–Zn могут работать при температурах до 150 °С. Для достижения наиболее высоких прочностных характеристик отливки из сплава АЦ4Mg закалывают с температуры 540–560 °С в кипящей воде или на воздухе и подвергают старению при 160–170 °С, 20–24 ч. Сплав АЦ4Mg обладает коррозионной стойкостью, высокой прочностью, хорошей свариваемостью и удовлетворительными литейными свойствами, лучшими, чем у сплавов системы Al–Mg.

5.2. Магниевые сплавы

5.2.1. Общая характеристика магния и его сплавов

Магний относится ко II группе Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Он не имеет полиморфных превращений, обладает ГП решеткой с периодами $a = 0,3202$ нм, $c = 0,5199$ нм ($c/a = 1,6209$); его атомный номер 2; атомная масса 24,32; плотность $1,74$ т/м³;

температура плавления 651 °С, кипения 1107 °С; модуль нормальной упругости 45 ГПа; модуль сдвига 17 ГПа; удельное электросопротивление при 20 °С $\rho=4,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; коэффициент линейного расширения в интервале 20–100 °С составляет $26,1 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹; удельная теплоемкость при 20 °С равна 1047 Дж/(кг·°С); теплопроводность 167 Вт/(м·°С); коэффициент Пуассона 0,35.

В зависимости от содержания примесей установлены следующие марки технического магния (ГОСТ 804–93): Мг96 (99,96 % Mg), Мг95 (99,95 % Mg) и Мг90 (99,9 % Mg). В настоящее время освоено производство магния высокой чистоты (99,9999 % Mg), а также гранулированного магния.

Химический состав технического магния по ГОСТ 804–93 приведен в табл. 5.21.

Таблица 5.21. Химический состав технического магния (ГОСТ 804–93), % (мас.)

Марка	Mg, не менее	Примеси, не более							Сумма регламентированных примесей
		Fe	Si	Ni	Cu	Al	Mn	Cl	
Мг96	99,96	0,004	0,005	0,002	0,002	0,006	0,004	0,003	0,030
Мг95	99,95	0,004	0,005	0,007	0,003	0,007	0,010	0,005	0,035
Мг90	99,90	0,040	0,010	0,001	0,005	0,020	0,040	0,005	0,100

Примечания: 1. Содержание примесей, не вошедших в сумму регламентируемых предприятием-изготовителем, должно быть не более: 0,01 % Na в магнии всех марок; 0,005 % K в магнии всех марок; 0,014 % Ti в магнии марки Мг95. 2. С согласия потребителей в магнии марки Мг90 допускается не более 0,05 % Fe и не более 0,002 % Ni.

Примеси железа, кремния, никеля и меди понижают и без того низкие пластичность и коррозионную стойкость магния и сплавов на его основе.

При нагреве магний активно окисляется и при 623 °С на воздухе воспламеняется. Это затрудняет плавку и разливку магния и его сплавов. Порошок, тонкая лента, мелкая стружка магния представляют большую опасность, так как самовозгораются на воздухе, горят с выделением большого количества теплоты и излучением ослепительно яркого света.

Механические свойства магния представлены в табл. 5.22.

Таблица 5.22. Механические свойства технического магния [2, 15]

Состояние	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_{cp}	σ_{-1} при $N=5 \cdot 10^8$ циклов	δ , %	НВ
	МПа					
Литое	85	21	–	–	3–6	30
Деформированное	250	189	–	–	8–10	50
Отожженное*	180	98	120	63	15–17	40

* Отжиг при 330–350 °С для снятия наклепа.

При низких температурах прессованные прутки из магния марки Мг90 имеют следующие механические свойства [2, 15]:

t , °С	17	–196	–253
σ_b , МПа	120	160	210
δ , %	5	5	5
ψ , %	10	5	8

Вследствие низких механических свойств чистый магний в качестве конструкционного материала практически не используют. Его применяют в пиротехнике; в химической промышленности для синтеза органических соединений; в металлургии различных металлов и сплавов в качестве раскислителя (например, при плавке чугуна), восстановителя (например, для восстановления титана из его четыреххлористого соединения, циркония, бериллия и других металлов), легирующего элемента (например, для легирования алюминиевых сплавов) и, наконец, в качестве основы магниевых сплавов.

Достоинством магниевых сплавов является низкая плотность (менее 2 т/м^3) и высокая удельная прочность. По удельным прочности и жесткости эти сплавы приближаются к алюминиевым. Как и чистый магний, сплавы на его основе обладают способностью воспринимать ударные и гасить вибрационные нагрузки. Удельная вибрационная прочность магниевых сплавов с учетом демпфирующей способности почти в 100 раз больше, чем у дуралюминов, и в 20 раз выше, чем у легированных сталей. Теплопроводность магния в 1,5, а электрическая проводимость в 2 раза меньше, чем алюминия.

Магниевые сплавы, как и магний, обладают хорошей обрабатываемостью резанием (лучше, чем стали, алюминиевые и медные сплавы), легко шлифуются и полируются. Высокие скорости резания и небольшой расход энергии способствуют снижению стоимости обработки резанием деталей из магниевых сплавов. Эти сплавы удовлетворительно свариваются контактной роликовой и дуговой сварками. Дуговую сварку рекомендуется проводить в защитной среде из инертных газов. Прочность сварных швов деформируемых сплавов составляет 90 % от прочности основного металла. Обработку давлением (ковка, прокатка и др.) магниевых сплавов проводят при $350\text{--}450^\circ\text{C}$, т. е. в состоянии наилучшей пластичности.

Основными легирующими элементами магниевых сплавов являются алюминий, цинк и марганец. Для дополнительного легирования используют цирконий, кадмий, церий, неодим и другие элементы. Механические свойства сплавов магния при $20\text{--}25^\circ\text{C}$ повышают легированием алюминием, цинком и цирконием, а при высоких температурах (до 300°C) — добавлением редкоземельных металлов. Цирконий и церий оказывают мо-

дифицирующее действие на структуру магниевых сплавов; цирконий и марганец способствуют устраниению или значительному уменьшению вредного влияния на свойства сплавов примесей железа и никеля. Они образуют между собой интерметаллидные соединения высокой плотности, которые при кристаллизации выпадают на дно тигля, очищая сплавы от вредных примесей.

Большинство легирующих элементов образуют с магнием твердые растворы переменной растворимости (рис. 5.1), что позволяет упрочнить магниевые сплавы с помощью закалки и искусственного старения. Особенность термической обработки магниевых сплавов — большие выдержки при температуре закалки (16–30 ч) вследствие малой скорости диффузии легирующих элементов при растворении вторичных фаз в твердом растворе. Это

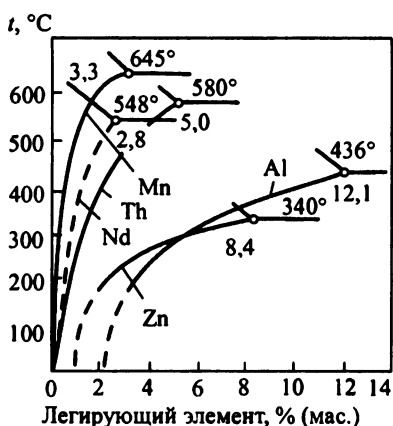


Рис. 5.1. Растворимость легирующих элементов в магнии

дает возможность закаливать сплавы при охлаждении на воздухе. При искусственном старении по той же причине необходимы высокие температуры (около 200 °С) и большие выдержки (до 16–24 ч).

Временное сопротивление и особенно предел текучести магниевых сплавов повышают с помощью термомеханической обработки: высокотемпературной (ВТМО), низкотемпературной (НТМО) и комбинированной (КТМО). ВТМО магниевых сплавов состоит в пластическом деформировании сплавов при температуре закалки и последующем старении, НТМО – в холодном или теплом деформировании (ниже температуры рекристаллизации) на 10–15 %, КТМО проводят по схеме: нагрев до температуры закалки (490–530 °С), подстуживание до 300–350 °С, деформирование при этой температуре на 50–90 %, охлаждение на воздухе и холодная деформация на 5–10 %, искусственное старение при 175 °С. Приобретенная в этом случае прочность сохраняется до 250–300 °С.

Из других видов термической обработки к магниевым сплавам применимы различные виды отжига: гомогенизационный, рекристаллизационный и отжиг для снятия остаточных напряжений. Для деформируемых сплавов диффузионный отжиг совмещают с нагревом при горячей обработке давлением. Температура рекристаллизации магниевых сплавов находится в интервале 150–300 °С, рекристаллизационного отжига – в интервале 250–350 °С. Отжиг для снятия остаточных напряжений проводят при температурах ниже температуры рекристаллизации.

К недостаткам магниевых сплавов помимо низкой коррозионной стойкости и малого модуля упругости можно отнести плохие литейные свойства, а также склонность к газонасыщению, окислению и воспламенению при их приготовлении. Небольшие добавки бериллия (0,02–0,05 %) уменьшают склонность к окислению, кальция (до 0,2 %) – к образованию пор в отливках. Плавку и разливку магниевых сплавов ведут под специальными флюсами.

Для защиты от коррозии изделия из магниевых сплавов подвергают оксидированию с последующим нанесением лакокрасочных покрытий. Хорошие результаты получены при использовании эпоксидных пленок, перхлорвиниловых и силиконовых эмалей.

По технологии изготовления магниевые сплавы подразделяют на деформируемые (МА), литейные (МЛ) и порошковые, по свойствам – на сплавы невысокой и средней прочности, высокопрочные и жаропрочные, сплавы со специальными физическими и химическими свойствами, а также сверхлегкие; по способности упрочняться с помощью термической обработки – на упрочняемые и неупрочняемые. Для повышения пластичности магниевых сплавов в них понижают содержание вредных примесей (Fe, Ni, Cu, Si).

К марке сплава повышенной чистоты добавляют строчные буквы «пч», например МА2пч, МЛ5пч, или «вч» (высокой чистоты), например МА2вч.

5.2.2. Деформируемые магниевые сплавы

Химический состав, физические и механические свойства деформируемых магниевых сплавов приведены в табл. 5.23–5.26; режимы отжига, закалки и старения – в табл. 5.27; механические свойства после термической (Т5, Т6) и термомеханической обработки – в табл. 5.28, а технологические свойства – в табл. 5.29–5.32.

Таблица 5.23. Химический состав деформируемых магниевых сплавов (ГОСТ 14957-76), % (мас.) [15, 18]

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Mg)							Примеси, не более				
	Al	Mn	Zn	Другие	Si	Fe	Cu	Ni	Прочие			
MA1	-	1,3-2,5	-	-	0,15	0,05	0,05	0,01	0,2			
MA2	3,0-4,0	0,15-0,5	0,2-0,8	-	0,1	0,05	0,05	0,005	0,3			
MA2-1	3,8-5,0	0,2-0,6	0,6-1,5	-	0,15	0,05	0,05	0,005	0,3			
MA3	5,5-7,0	0,15-0,5	0,5-1,5	-	0,3	0,05	0,05	0,005	0,3			
MA5	7,8-9,2	0,15-0,5	0,2-0,8	-	0,15	0,05	0,05	0,005	0,3			
MA8	-	1,3-2,2	0,15-0,35	0,15-0,35 Ce	0,15	0,05	0,05	0,01	0,3			
MA11	-	1,5-2,5	-	2,5-3,5 Nd; 0,13-0,25 Ni	0,15	0,05	0,05	0,01	0,3			
MA12	-	-	-	2,5-3,5 Nd; 0,3-0,8 Zr	0,15	0,05	0,05	0,01	0,3			
MA9	0,4-0,8	1,0-1,8	-	0,08-0,3 Ca	0,15	0,05	0,05	0,01	0,3			
MA14	-	-	5,0-6,0	0,3-0,9 Zr	0,15	0,03	0,03	0,005	0,3			
MA15	-	-	2,5-3,5	0,45-0,9 Zr; 0,7-1,0 La; 1,2-2,0 Cd	0,15	0,03	0,03	0,005	0,3			
MA18*	0,5-1,0	0,1-0,4	2,0-2,5	10-11,5 Li; 0,15-0,35 Ce	0,03	0,01	0,03	0,005	0,3			
MA19	-	-	5,5-7,0	0,5-0,9 Zr; 1,4-2,0 Nd	0,03	0,01	0,03	0,005	0,3			
MA21*	4,0-6,0	0,1-0,5	0,8-2,0	7,0-10 Li; 3,0-5,0 Cd	0,03	0,01	0,03	0,005	0,3			

* Сверхлегкие сплавы.

Таблица 5.24. Физические свойства деформируемых магневых сплавов [19]

Марка сплава	γ , т/м ³	$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ , при t , °С			λ , Вт/(м·°С)	c , Дж/(кг·°С)	$\rho \cdot 10^3$, Ом·м
		20–100	20–200	200–300			
MA1	1,76	26	26,5	—	125,6	1004,8	6,1
MA2	1,78	26	26	—	96,3	1130,4	12,0
MA2-1	1,79	26	26,3	—	96,3	1088,5	12,0
MA5	1,80	26	26,0	—	75,3	1130,4	13,0
MA8	1,78	23,7	24,9	27,3	133,9	1046,7	5,1
MA11	1,80	25,7	27,5	—	108,8	—	6,2
MA12	1,83	—	—	—	—	—	—
MA14	1,80	20,9	26,0	28,3	117,2	1046,7	5,6
MA15	1,83	25,9	26,8	—	113,0	1004,8	6,5
MA19	1,88	26,2	—	—	—	—	6,1

Примечание. Модуль упругости $E = 41 \dots 43$ ГПа.

Таблица 5.25. Механические свойства деформируемых магневых сплавов [15, 18]

Марка сплава	Вид полуфабриката	Предельная рабочая температура, °С		σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ , %	HB	KCU _{1,2} кДж/м ²
		длительная	кратковременная					
MA1	Все виды	180	200	190–220	120–140	5–10	40	—
MA2	То же	150	200	260–280	160–180	15–5	45	120
MA2-1	»	150	200	270–310	160–230	8–12	42	70
MA5	Поковки, штамповки прессованные	150	200	300–330	220–240	8–14	55	—
MA8	Все виды	200	250	220–250	140–160	7–12	40	50
MA11	То же	250	300	260–280	130–160	5–14	50	35
MA12	Прутки, штамповки, листы	250	300	230–280	130–180	9–12	40	130
MA14	Прутки, листы, плиты, профили	150	200	320–340	220–290	6–14	60	60
MA15	То же	150	200	300–320	250–260	5–14	60	100
MA18	Прессованные поковки, штамповки	25*	—	185	150–220	15–40	60	280
MA19	То же	150	200	380–400	330–360	5–8	80	50
MA21	»	100	—	240	190–200	18,5	75	70

* Используется и при криогенных температурах.

Таблица 5.26. Свойства деформируемых горячепрессованных магниевых сплавов при повышенных и низких температурах [15, 18]

Марка сплава	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	$\delta, \%$
		МПа				
MA1	100	18	15	—	—	15
	150	14	11	—	2,5	18
	200	13	8	—	1,5	25
	250	9	5	—	—	60
	300	—	—	—	—	—
MA2	-196	40	—	—	—	2,5
	-70	31	—	—	—	13
	100	21	11,5	10	—	30
	150	16,5	—	5	—	45
	200	11,5	—	2	—	60
	250	7,5	—	—	—	75
MA2-1	-196	38	31,5	—	—	2,6
	-70	29	—	—	—	9
	100	22,5	11,5	13	7	19
	150	19	9,5	8,5	2	30
	200	13	7,5	3,5	—	35
	250	9	4,5	—	—	45
	300	7	4	—	—	50
MA5	100	22	13	—	—	22
	150	17	10	—	—	30
	200	12,5	7	—	—	38
	250	8,5	5,5	—	—	45
	300	7	3,5	—	—	85
MA8	-70	26	—	—	—	8,5
	100	18	10	14	6	26
	150	15	7	12	6	30
	200	13,2	6	7,5	3	32
	250	11	5	3,5	—	34
	300	7	—	—	—	62
MA11	200	21	11	15	8	13
	250	18	9	9	3,5	15
	300	14	8	1,5	—	19
	350	10	6	3,5	—	47
MA12	200	17	12	11	7	10
	250	14	10	—	—	16
	300	10	8	—	—	20
	350	6,5	6	—	—	30
MA14	-196	47	—	—	—	2,5
	-70	41	—	—	—	8
	100	26	17	—	—	20

Марка сплава	$t, ^\circ\text{C}$	σ_s	$\sigma_{0,2}$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	$\delta, \%$
		МПа				
МА14	150	21	14	4	2	28
	200	15	—	2,5	—	50
	250	10,5	—	—	—	58
	300	7	—	—	—	62
МА15	-70	40	35	—	—	5
	100	21	15	—	—	16
	150	19	14	10	3	25
	200	16	9	—	—	30
	250	11	5	—	—	45
МА19	-70	40	—	—	—	4
	150	28	22	10	5	15
	200	22	15	6	—	35
	250	13	9	3,5	—	50

Таблица 5.27. Режимы термической обработки деформируемых магниевых сплавов [15, 17, 19]

Марка сплава	Вид ТО	Закалка			Старение		Отжиг	
		$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$	Среда	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$
МА1	М	—	—	—	—	—	320–350	0,5
МА1	Н	—	—	—	—	—	260–290	0,5
МА2-1	М	—	—	—	—	—	250–280	0,5
МА2-1	Н	—	—	—	—	—	150–200	1,0
МА5	Т4	410–425	6–2	Воздух	—	12–24	—	—
МА5	Т5	—	—	—	175–200	16–8	—	—
МА5	Т6	410–425	6–2	Воздух	175–200	16–2	—	—
МА8	М	—	—	—	—	—	320–350	0,5
МА11	Т6	480–500	4	Струя холод-	175±5	24	—	—
МА11	Т4*	480–500	4	ного воздуха	175±5	24	—	—
МА11	Т6	530	1	Вода	200	16	—	—
МА14	Т5	—	—	—	170±5	10–24	—	—
МА15	М	—	—	—	—	—	260±20	0,5–10

Примечание. Условные обозначения видов ТО: М – отжиг после деформации; Н – полнагартованное состояние (низкотемпературный отжиг после деформации); Т4 – закалка после деформации; Т5 – искусственное старение после деформации; Т6 – закалка и искусственное старение после деформации.

* Между закалкой и старением холодная деформация 3–10 %.

Таблица 5.28. Механические свойства сплавов после различных обработок [15, 19]

Вид ТО	t, °C	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{-0,2}$	σ_{100}	$\delta, \%$	KCU, кДж/м ²
		МПа					
<i>Сплав МА11</i>							
Т6	20	260	130	120	—	9,5	52
	200	20,5	11,5	—	10,0	18,5	—
	300	14,0	10,0	—	—	27,0	—
НТМО	20	320	290	183	—	8,5	—
	200	25,0	21,5	—	12,0	9,0	—
	300	16,5	15,0	—	—	20,0	—
ВТМО	20	330	300	245	—	10,0	47
	200	22,0	16,0	—	8,0	21,5	—
	300	16,0	13,5	—	—	20,5	—
КТМО	20	350	330	—	—	7,0	—
	200	25,0	22,0	—	8,0	18,0	—
<i>Сплав МА12</i>							
Т6	20	280	150	140	—	14,0	58
	200	19,0	13,0	—	6,5	19,0	—
	300	12,0	11,0	—	—	29,0	—
НТМО	20	285	250	—	—	7,0	—
	200	19,5	19,0	—	8,0	11,0	—
	300	14,0	13,5	—	—	27,0	—
ВТМО	20	300	280	235	—	13,0	40
	200	18,0	15,0	—	5,5	22,0	—
	300	9,5	8,0	—	—	40,5	—
КТМО	20	330	300	—	—	6,0	—
	200	19,0	16,5	—	5,0	17,0	—
<i>Сплав МА14</i>							
Т5	20	340	300	245	—	13,5	70
	150	200	175	—	—	27,5	—
НТМО	20	360	325	—	—	10,5	70
	150	200	190	—	—	31,5	—
ВТМО	20	380	350	280	—	11,5	55
	150	190	165	—	—	36,0	—
ВТМО+старение	20	380	365	280	—	12,0	51
	150	205	190	—	—	34,0	—
<i>Сплав МА5</i>							
Т5	20	335	245	240	—	9,5	22
НТМО	20	410	325	—	—	10,5	—
ВТМО	20	405	320	290	—	11,5	21
ВТМО+старение	20	335	245	240	—	9,5	22

Таблица 5.29. Литейные свойства деформируемых магниевых сплавов [15, 19]

Свойство	МА1, МА8	МА2	МА2-1	МА5	МА14	МА15
Температура, °С:						
ликвидуса	650	630	620	605	635	640
солидуса	646	565	545	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

Таблица 5.30. Режимы обработки давлением магниевых сплавов [15, 19]

Марка сплава	Температура, °С, при обработке			
	прессованием	прокаткой (листов)	ковкой и горячей штамповкой	листовой штамповкой
МА1	320–380	360–400	350–440	250–350
МА2	320–360	–	440–320	420–320
МА2-1	320–360	360–400	390–350	250–320
МА8	380–420	400–450	420–350	230–350
МА11	410–430	390–440	460–350	350–400
МА14	300–360	–	420–300	200–250 (профили)
МА15	330–380	300–350	380–250	200–300

Таблица 5.31. Режимы вытяжки и гибки магниевых сплавов [15, 19]

Марка сплава	t, °С	Вытяжка, %		Давление при- жима, МПа	Минимально допустимый радиус изгиба, мм	
		первая	вторая		без нагрева	с нагревом
МА1	250–350	2,2–2,4	1,5–1,6	35–45	6–8	1,5–2,5
МА8-М	250–350	2,3–2,6	1,7–1,8	40–55	4,5–6	1,5–2,5
МА8-Н	230–280	1,8–2,0	–	70–80	–	–
МА2-1	250–320	2,2–2,4	1,6–1,7	50–65	5–7	1,5–2,5
МА11	250–420	2,0–2,1	1,5–1,7	50–80	5,5–6	2–3
МА15	200–300	2,1–2,15	1,6–1,7	40–60	6–8	2–3

Таблица 5.32. Характеристики свариваемости деформируемых магниевых сплавов (аргодуговая сварка) [15, 19]

Марка сплава	Присадка	Коэффициент прочности сварного соединения	Угол загиба шва, град	Коэффициент трещинообразования	Коррозионная стойкость сварного соединения	Характеристика свариваемости
МА1	Основной материал	0,86	70	≤ 15	Удовлетворительная	Хорошая, сплав не склонен к образованию микрорыхлот при сварке
МА8	Основной материал	0,60	40	≤ 45	То же	Удовлетворительная, сплав склонен к образованию микрорыхлот
	МА2-1	0,75	60	≤ 35	»	
МА2-1	Основной материал	0,80	65	≤ 35	»	То же
МА14	Проволока марки СВ122	—	—	≤ 70	Неудовлетворительная	Плохая, сплав имеет большую склонность к образованию микрорыхлот
МА15	Основной материал	0,82	60	≤ 35	Удовлетворительная	Удовлетворительная, сплав несколько склонен к образованию микрорыхлот
МА11–Т6	Проволока марки СВ27	0,76	—	≤ 60	Неудовлетворительная	Плохая, сплав имеет большую склонность к образованию микрорыхлот

5.2.3. Литейные магниевые сплавы

По химическому составу многие литейные сплавы магния близки к деформируемым. Химический состав и физические свойства литейных магниевых сплавов приведены в табл. 5.33 и 5.34.

Достоинством литейных сплавов является значительная экономия металла при производстве деталей, так как высокая точность размеров и хорошая чистота поверхности фасонных отливок почти исключают их обработку резанием. Вместе с тем из-за грубозернистой литой структуры они имеют более низкие механические свойства, особенно пластичность. Для улучшения механических свойств отливок используют различные способы: разливку с более высоких температур, модифицирование, гомогенизацию, а также применение более чистых шихтовых материалов при приготовлении сплава. Перегрев дает хорошие результаты в сплавах, содержащих алюминий, которые выплавляют в железных тиглях. В результате взаимодействия с алюминием образуются частицы тугоплавкого соединения $FeAl_3$, которые становятся дополнительными центрами кристаллизации. Для модифицирования используют цирконий, магнезит, мел.

Таблица 5.33. Химический состав литейных магниевых сплавов, % (мас.) [15, 18]

Марка сплава	Содержание элементов (основа – Mg)							Примеси, не более			
	Al	Mn	Zn	Zr	Другие	Si	Fe	Ni	Cu	Прочие	
МЛ13	2,5–3,5	0,15–0,5	0,5–1,5	–	–	0,25	0,06	0,01	0,1	0,5	
МЛ14	5,0–7,0	0,15–0,5	2,0–3,5	–	–	0,25	0,06	0,01	0,1	0,5	
МЛ14пч	5,0–7,0	0,15–0,5	2,0–3,5	–	–	0,08	0,007	0,002	0,04	0,13	
МЛ15	7,5–9,0	0,15–0,5	0,2–0,8	–	–	0,25	0,06	0,01	0,1	0,5	
МЛ15пч	7,5–9,0	0,15–0,5	0,2–0,8	–	–	0,08	0,007	0,001	0,04	0,13	
МЛ15он ^{*1}	7,5–9,0	0,15–0,5	0,2–0,8	–	–	0,35	0,08	0,01	0,25	0,7	
МЛ16	9,0–10,2	0,1–0,5	0,6–1,2	–	–	0,25	0,06	0,01	0,1	0,5	
МЛ18	–	–	5,5–6,6	0,7–1,1	0,2–0,8 Cd	0,03	0,01	0,005	0,03	0,2	
МЛ19	–	–	–	0,4–1,0	1,9–2,6 Nd; 0,2–0,8 In	0,03	0,01	0,005	0,03	0,35	
МЛ10	–	–	–	0,4–1,0	2,2–2,8 Nd	0,03	0,02	0,005	0,03	0,2	
МЛ11	–	–	0,2–0,7	0,4–1,0	2,5–4,0 РЗМ ^{*2}	0,03	0,01	0,005	0,03	0,25	
МЛ12	–	–	4,0–5,0	0,6–1,1	–	0,03	0,01	0,005	0,03	0,12	
МЛ15	–	–	4,0–5,0	0,7–1,1	0,6–1,2 La	0,03	0,01	0,005	0,03	0,12	
МЛ19	–	–	0,1–0,6	0,4–1,0	1,6–2,3 Nd, 1,4–2,2 Y	0,03	0,01	0,005	0,03	0,14	
МЛ16	7,5–9,0	0,15–0,5	2,0–3,0	–	–	0,2	0,03	0,01	0,15	–	
МЛ16пч	7,5–9,0	0,15–0,5	2,0–3,0	–	–	0,06	0,005	0,001	0,01	–	
МЛ16вч	7,5–9,0	0,15–0,5	2,0–3,3	–	–	0,04	0,003	0,001	0,003	–	
МЛ4вч	5,0–7,0	0,15–0,5	2,0–3,0	–	–	0,05	0,003	0,001	0,004	–	
МЦ1	–	–	0,1–0,3	–	–	–	0,4–0,7	0,02–0,05	0,4–0,75	–	

Примечания: 1. При одновременном содержании Be и Zr в сплавах марок МЛ4, МЛ4пч, МЛ15, МЛ15пч содержание Be не должно превышать 0,0015 %. 2. В сплаве МЛ15пч допускается не более 0,005 % Ti.

^{*1} Сплав общего назначения. ^{*2} РЗМ – элементы, которые входят в состав цериевого мишметалла, содержащего не менее 45 % Се.

Таблица 5.34. Физические свойства литейных магниевых сплавов [18]

Марка сплава	$\gamma, \text{т/м}^3$	$\alpha \cdot 10^6, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, при 20–200 $^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$	$c, \text{Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$	$\rho \cdot 10^8, \text{Ом} \cdot \text{м}$
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	1,78	28,0	113,0	1046,7	0,084
МЛ11	1,80	–	117,2	1046,7	0,073
МЛ12	1,81	27,3	133,9	962,9	0,066
МЛ15	1,83	26,9	138,1	921,1	0,068
МЛ19	1,79	27,7	87,9	1130,4	0,096

... При гомогенизации происходит растворение грубых интерметаллидных фаз, вызывающих хрупкость сплавов. Технологические свойства литейных магниевых сплавов приведены в табл. 5.35.

Таблица 5.35. Технологические свойства литейных магниевых сплавов [18]

Марка сплава	Интервал кристаллизации, $^\circ\text{C}$	Температура литья, $^\circ\text{C}$	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, МЛ5пч, МЛ5он	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

Таблица 5.36. Режим термической обработки литейных магниевых сплавов [18]

Марка сплава	Вид ТО	Закалка			Старение	
		$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$	Среда	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$
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* ²	3–21–29	»	—	—
МЛ6	T6* ¹	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

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. 2. Температуру нагрева следует выдерживать в пределах $\pm 5^\circ\text{C}$.

*¹ Для получения повышенного удлинения. *² Знак плюс указывает на ступенчатый нагрев.

Режимы термической обработки литейных магниевых сплавов приведены в табл. 5.36.

Механические свойства литейных магниевых сплавов (табл. 5.37) находятся на уровне свойств алюминиевых литейных сплавов, но, обладая меньшей плотностью, магниевые сплавы превосходят их по удельной прочности. Свойства сплавов при повышенных и низких температурах даны в табл. 5.38.

Таблица 5.37. Механические свойства литейных магниевых сплавов после термической обработки [15, 18]

Марка сплава	Вид ТО* ¹	Растяжение				Сжатие			НВ	KCU, ² кДж/м
		σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$		
		МПа		%		МПа				
МЛ3	—	180	55	8,0	11,0	280	—	20	—	—
МЛ4	T4	250	85	9,0	13,0	370	—	16	—	—
	T6	255	115	6,0	8,0	390	—	14	—	—
МЛ5* ²	T4	250	90	9,0	15,0	365	—	16,5	25	50
	T6	255	120	4,0	8,5	340	—	—	—	—

Марка сплава	Вид ТО ^{*1}	Растяжение				Сжатие			НВ	KCU, ^{*2} кДж/м
		σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$		
		МПа		%		МПа				
МЛ5пч	T4	250	95	6,5	16,0	—	—	—	—	
	T6	255	120	5,0	8,5	—	—	—	—	
МЛ6	T4	250	100	5,0	12,0	320	—	—	—	
	T6	260	140	1,0	3,0	380	—	—	150	
МЛ8	T6	290	190	6,0	13,0	430	190	—	—	
МЛ9	T6	250	120	6,0	—	—	120	—	70	
МЛ10	T6	226	137	3,0	—	—	140	—	26	
МЛ11	T4	137	85	3,0	—	315	90	—	—	
	T6	237	98	2,0	—	320	105	—	50	
МЛ12	Без ТО	220	180	7,0	8,0	—	—	—	40	
	T1	250	150	6,0	7,0	360	140	—	40	
МЛ15	T1	220	150	4,0	5,0	380	150	2	28	
МЛ19	T6	220–260	120–170	4,0–7,0	—	—	120	—	28	

Примечание. Статический модуль упругости магниевых сплавов составляет 42–44 ГПа, динамический – 45–45,5 ГПа.

^{*1} Режимы ТО указаны в табл. 5.36. ^{*2} Сплав имеет $\sigma_{0,2/100} = 90$ МПа после обработки по режиму T4 и 120 МПа – по режиму T6.

Таблица 5.38. Свойства литейных магниевых сплавов при повышенных и низких температурах [15, 18]

Марка сплава	Вид ТО	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{100}	$\delta, \%$
			МПа				
МЛ2	—	100	105	45	18	—	4
		150	80	30	16	—	11
		200	70	25	13	—	12,5
		300	60	—	—	—	—
МЛ3	—	100	160	50	39	—	10
		150	145	45	35	—	11
		200	10,5	40	25	—	12
		250	75	40	—	—	11
		300	60	30	—	—	10,5
МЛ4	T4	100	240	80	66	—	7
		150	210	75	29	—	15
		200	150	68	12	—	25
		250	75	—	—	—	26

Марка сплава	Вид ТО	t, °C	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{100}	$\delta, \%$
			МПа				
МЛ5	Т4	-196	290	-	-	-	7
		-70	290	-	-	-	12
		100	230	80	70	-	10
		150	185	60	25	85	12
		200	155	50	8	5	15
		250	120	40	-	25	15
МЛ6	Т4	-70	270	-	-	-	5
		100	220	-	72	-	5
		150	210	85	24	-	18
		200	150	-	7	-	20
		250	110	70	-	-	-
		300	80	-	-	-	-
МЛ9	Т6	-196	320	-	-	-	4,5
		150	250	-	-	-	-
		200	200-220	130-140	95	-	5
		250	160-180	120	45	-	5
		300	120	100	-	18	20
МЛ10	Т6	-196	320	-	-	-	4
		-70	300	-	-	-	5
		200	190	140	110	13	8
		250	165	130	38	70	13
		300	135	110	-	25	17
МЛ11	Т6	200	140	80	65	11,5	6
		250	130	75	30	55	8,5
		300	105	60	-	22	30
МЛ12	Т1	-196	250	-	-	-	2
		-70	250	-	-	-	2
		100	-	-	56	-	-
		150	160	110	40	80	8
		200	140	85	25	5	10
		250	100	60	-	20	12
300	70	45	-	-	12		
МЛ15	Т1	-196	220	-	-	-	1
		-70	210	-	-	-	1
		150	145	105	65	100	5
		200	125	85	40	6,5	13
		250	100	65	20	40	16
		300	75	50	-	40	16

Характеристики свариваемости литейных магниевых сплавов приведены в табл. 5.39, а предельная рабочая температура и область применения – в табл. 5.40.

Таблица 5.39. Характеристики свариваемости литейных магниевых сплавов (аргодуговая сварка) [19]

Марка сплава	Вид ТО	Присадка	Условия заварки дефектов отливок (деталей)
МЛ5	–	Основной материал	Без подогрева и с подогревом в интервале 350–380°С в зависимости от жесткости детали ^{*1}
МЛ5пч	–	То же	То же
МЛ10	–	»	То же в интервале 380–430°С ^{*2}
МЛ11	Т6	»	С подогревом в интервале 380–430°С ^{*3}
МЛ12	Т1	Проволока марки СВ 122 ^{*1}	С подогревом (общий + местный) в интервале 400–430°С
МЛ8	Т6	Основной материал	С созданием теплового барьера в зоне плавки ^{*3}
МЛ12	–	Проволока марки СВ 122 ^{*1}	Без подогрева (сплавы склонны к образованию трещин в шве, зоне сплавления и околшовной зоне ^{*4})
МЛ8	–	То же	
МЛ15	–	»	
МЛ9	–	Основной материал	Без подогрева и с местным подогревом ^{*3} в интервале 380–470°С в зависимости от жесткости детали

^{*1} Для получения более высокого качества мест заварки следует использовать проволоку, полученную прессованием. ^{*2} Сплав сваривается хорошо, не склонен к образованию микрорыхлот. Коррозионная стойкость в местах заварки удовлетворительная. ^{*3} Сплав сваривается удовлетворительно, несколько склонен к образованию микрорыхлот при сварке. Коррозионная стойкость в местах заварки удовлетворительная. ^{*4} Заварка дефектных мест невозможна без трещин, склонен к образованию микрорыхлот. Коррозионная стойкость в местах заварки неудовлетворительная.

Таблица 5.40. Области применения литейных магниевых сплавов [18]

Марка сплава	Вид ТО	Предельная температура при эксплуатации, °С		Область применения
		длительной	кратковременной	
МЛ2	–	150	200	Детали, от которых требуется повышенная коррозионная стойкость и герметичность (горловины, бензобаки, бензомасляная арматура и др.)
МЛ3	–	До 150	До 150	Детали с высокой герметичностью (детали арматуры корпусов насосов и др.)
МЛ4пч	Т4	150	250	Детали двигателей и других агрегатов, работающие в условиях высокой коррозионной стойкости, статических и динамических нагрузок (корпуса приборов и инструментов, штурвалы и др.)

Марка сплава	Вид ТО	Предельная температура при эксплуатации, °С,		Область применения
		длительной	кратковременной	
МЛ15пч	T4	150	250	Сплав общего назначения. Нагруженные детали, работающие в условиях морской атмосферы, а также детали двигателей, приборов (тормозные барабаны, кронштейны, штурвалы и др.)
МЛ6	T6	До 150	—	Высоко- и средненагруженные детали (детали приборов, аппаратуры, корпуса и др.)
МЛ8	T6	150	200	Нагруженные детали (реборды, барабаны колес и другие конструкции)
МЛ9	T6	250–300	350–400	Детали двигателей, приборов и др.
МЛ10	T6	250	350	Нагруженные детали различных конструкций, двигателей, приборов и агрегаты, требующие высокой герметичности и высокой стабильности размеров
МЛ11	T6	250	300	Детали двигателей, приборов и агрегаты, требующие повышенной герметичности и не испытывающие высоких нагрузок при комнатной температуре
МЛ12	T6	200	250	Нагруженные детали (реборды, барабаны колес и другие конструкции)
МЛ15	T1	200	300–350	Нагруженные детали двигателей, приборов агрегатов, требующие герметичности.

Для защиты от коррозии газонефтепроводов и других подземных металлических сооружений применяют сплавы МЛ16, МЛ16пч и МЛ16вч. Протекторный сплав МЛ4вч используют для защиты от коррозии морских судов. Детали, работающие в условиях вибрационных нагрузок, делают из сплава МЦИ ($\sigma_b = 170 \dots 180$ МПа, $\sigma_{0,2} = 60 \dots 70$ МПа, $\delta = 15 \dots 30$ %). Все эти сплавы подвергают термообработке по режиму T1.

5.3. Титановые сплавы

5.3.1. Общая характеристика титана и его сплавов

Титан находится в IV группе Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Он обладает полиморфизмом: низкотемпературная модификация Ti_α имеет ГП решетку с периодами $a = 0,296$ нм, $c = 0,472$ нм, $c/a = 1,587$; высокотемпературная Ti_β – решетку ОЦК, атомный номер титана 22, атомная масса 47,9, плотность при 20 °С 4,505 т/м³; модуль нормальной упругости 112 ГПа; модуль сдвига 39,2 ГПа; температура плавления 1668 °С, кипения 3260 °С; удельная теплоемкость при 20 °С 0,54 кДж/(кг·°С); теплопроводность при 20 °С 18,85 Вт/(м·°С); удельное электросопротивление при 20 °С иодидного титана $42 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, магнетермического титана $55 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; коэффициент линейного расширения при 20–100 °С равен $8,2 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹; коэффициент Пуассона 0,35–0,38.

Отличительными особенностями титана являются высокие механические свойства, небольшая плотность и поэтому высокая удельная прочность при 20–25 °С и криогенных температурах, хорошая коррозионная стойкость.

Промышленный способ производства титана состоит в обогащении и хлорировании титановой руды с последующим восстановлением из четыреххлористого титана металлическим магнием. Полученную при этом титановую губку маркируют по твердости специально выплавленных из нее образцов (табл. 5.41). В результате последовательного дробления губки, прессования, спекания и переплавки брикетов получают технический титан, который маркируют в зависимости от содержания примесей (табл. 5.42).

Таблица 5.41. Промышленные марки, твердость и химический состав титановой губки (основа Тi) (ГОСТ 17746–78)

Марка губки	HV	Примеси, % (мас.), не более						
		Fe	Si	C	Cl	N	O	Ni
ТГ90	90	0,06	0,01	0,02	0,08	0,02	0,04	0,05
ТГ100	100	0,07	0,04	0,03	0,08	0,02	0,04	0,05
ТГ110	110	0,09	0,05	0,03	0,08	0,03	0,05	0,05
ТГ120	120	0,11	0,05	0,04	0,08	0,03	0,065	0,05
ТГ130	130	0,13	0,05	0,04	0,10	0,03	0,08	0,05
ТГ150	150	0,20	0,04	0,05	0,12	0,04	0,10	0,05
ТГ–ТВ	170	2,00	–	0,15	0,3	0,03	–	–

Таблица 5.42. Химический состав технического титана (ГОСТ 19807–91)

Марка титана	Примеси, % (мас.), не более						
	Fe	Si	C	O	N	H	Прочие
ВТ1–00	0,12	0,08	0,05	0,10	0,04	0,008	0,1
ВТ1–0	0,18	0,10	0,07	0,12	0,04	0,010	0,3

Механические свойства титана в большой степени зависят от содержания примесей, особенно водорода, кислорода, азота и углерода, 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. 5.2), снижается коррозионная стойкость, ухудшается свариваемость, способность к пайке и штампуемость. Поэтому содержание каждой из этих примесей ограничивают – не более 0,02–0,06 % (мас.). Аналогично, но в меньшей степени, на свойства влияют железо и кремний. Особо вредная примесь в титане и его однофазных α -сплавах – водород. При наличии водорода по границам зерен выделяются тонкие хрупкие пластины гидридной фазы, вызывая значительную хрупкость (табл. 5.43). Водородная хрупкость наиболее опасна в сварных конструкциях в связи с наличием в них внутренних напряжений. Допустимое содержание водорода в техническом титане и его однофазных сплавах находится в пределах 0,008–0,012 % (мас.) (табл. 5.44).

Таблица 5.43. Влияние водорода на механические свойства технического титана и его сплавов [7]

Марка	Вид ТО	H ₂ , % (мас.)	σ _B	σ _{0,2}	δ, %	KCU	KCT
			МПа			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) в воде + 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
BT22	Закалка (700 °С, 18 мин) в воде + старение 450 °С, 24 ч	0,005	—	—	—	—	0,075
		0,02	—	—	—	—	0,074
		0,05	—	—	—	—	—
BT6	Закалка (900 °С, 18 мин) в воде + 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

Таблица 5.44. Допустимое содержание водорода в титане и его сплавах

Марка титана, сплава	Группа	H ₂ , % (мас.)
BT1-00	α-сплавы	0,008
BT1-0		0,01
BT5-1		0,012
BT5		0,012
OT4	Псевдо-α-сплавы	0,01
OT4-1		0,008
BT20		0,02
BT3-1, BT6, BT8, BT16, BT14	α+β-сплавы	0,03
BT22		0,05
BT15	Псевдо-β-сплавы	0,15

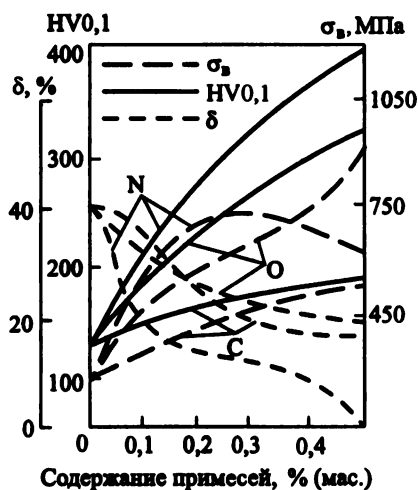


Рис. 5.2. Влияние содержания примесей на механические свойства титана

Наиболее чистый иодидный титан получают методом термической диссоциации из четырехоксидного титана или методом зонной плавки. Механические свойства иодидного и технического титана приведены в табл. 5.45, а отожженных полуфабрикатов из технического титана – в табл. 5.46. Размеры полуфабрикатов из технического титана влияют на механические свойства, особенно на характеристики пластичности.

Таблица 5.45. Механические свойства технического и иодидного титана [15]

Титан	НВ	КСУ, ² МДж/м	ψ	δ	σ _{0,2}	σ _в
			%		МПа	
BT1-00	116–143	1,2–1,5	≥ 60	≥ 30	250–380	300–450
BT-0	131–163	1,0–2,0	≥ 60	≥ 30	300–420	400–550
Иодидный	107	2,5	70–80	50–60	120–170	220–260

Таблица 5.46. Механические свойства отожженных полуфабрикатов из технического титана BT1-00 (числитель) и BT1-0 (знаменатель) [15]

Вид полуфабриката	σ _в	σ ₋₁	δ	ψ	КСУ, ² МДж/м
	МПа		%		
Листы	300–450	160	25	–	–
	400–550	230	25	–	–
Прутки кованые	300–450	–	25	55	1,2
	400–550	–	20	50	1,0
Трубы	300–450	–	20	–	–
	400–550	–	15	–	–

Ниже приведены значения σ_в и δ для листов различной толщины из технического титана марок BT1-00 (числитель) и BT1-0 (знаменатель):

Толщина листа, мм	0,3–0,4	0,5–1,8	2,0–6,0	6,5–10,0
Временное сопротивление σ _в , МПа	$\frac{300-450}{400-500}$	$\frac{300-450}{400-500}$	$\frac{300-450}{400-500}$	$\frac{300-450}{400-500}$
Относительное удлинение δ, %	25/25	30/30	25/25	20/20

Модуль упругости титана почти в два раза меньше, чем у железа и никеля, что затрудняет изготовление жестких конструкций.

Несмотря на высокую температуру плавления, чистый титан не обладает жаропрочностью (рис. 5.3). Он склонен к ползучести даже при 20–25 °С. Кислород, азот, а также пластическая деформация повышают сопротивление ползучести.

Титан обладает высокими прочностью и удельной прочностью в условиях глубокого холода (табл. 5.47).

Пластическая деформация значительно повышает прочность титана (рис. 5.4). Для снятия наклепа проводят рекристаллизационный отжиг. Температура рекристаллизации титана понижается с 600 до 500 °С при увеличении степени предшествующей деформации с 10 до 60 %, после чего не меняется. Наилучшее сочетание механических свойств титан имеет после отжига при 650–750 °С.

Таблица 5.47. Механические свойства технического титана марки ВТ1-00 при низких и высоких температурах [15]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$
	МПа		%		
-269	1210	870	35	58	—
-253	120	110	10	35	0,6
-196	970	750	20	48	0,8
20	500	380	30	55	1,0
100	420	—	30	55	—
150	350	—	30	55	—
200	300	—	30	55	—
250	280	—	30	55	—

При повышении температуры титан активно поглощает газы: водород – начиная с 50–70 °С, кислород – с 400–500 °С и азот, СО и СО₂ – с 600–700 °С. Высокая химическая активность расплавленного титана вызывает необходимость применения при плавке и дуговой сварке вакуума или атмосферы инертных газов. Вместе с тем благодаря способности к газопоглощению титан нашел применение в радио- и электронной промышленности в качестве геттерного материала.

Технический титан хорошо обрабатывается давлением при 20–25 °С и повышенных температурах. Из него изготавливают все виды прессованного и катаного полуфабриката (листы, трубы, проволоку, поковки и др.). Ковку проводят при 1000–750 °С, горячую

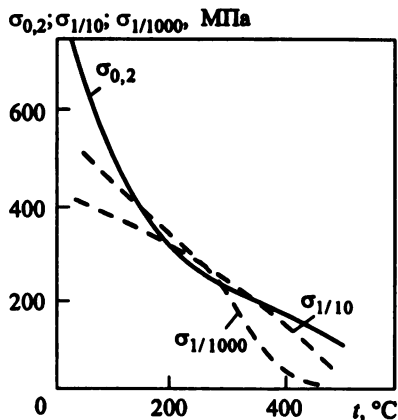


Рис. 5.3. Изменения пределов текучести и ползучести технического титана в зависимости от температуры испытания

Технический титан хорошо обрабатывается давлением при 20–25 °С и повышенных температурах. Из него изготавливают все виды прессованного и катаного полуфабриката (листы, трубы, проволоку, поковки и др.). Ковку проводят при 1000–750 °С, горячую

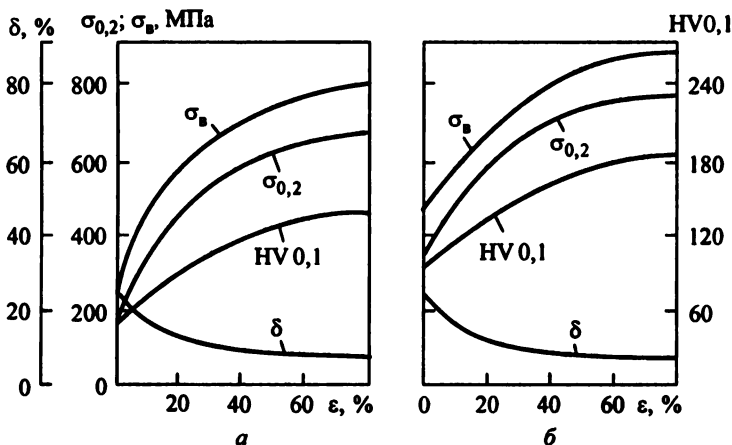


Рис. 5.4. Влияние холодной пластической деформации на механические свойства иодидного (а) и технического (б) титана

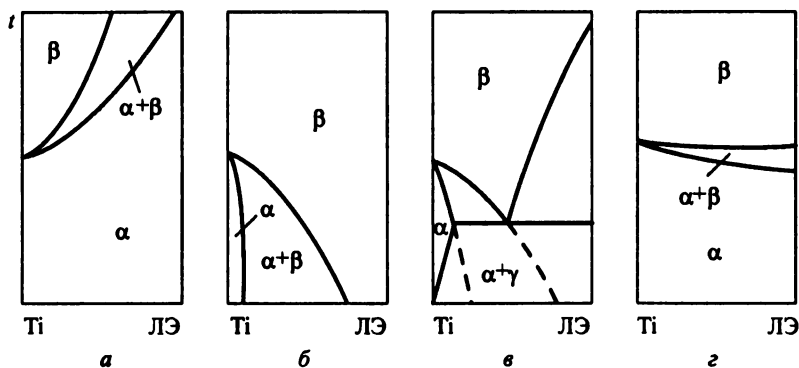


Рис. 5.5. Диаграммы состояния Ti – легирующий элемент (ЛЭ):
 а – Ti – α -стабилизаторы; б – Ti – аморфные β -стабилизаторы; в – Ti – эвтектоидообразующие β -стабилизаторы; з – Ti – нейтральные элементы

прокатку – на 100°C ниже температурыковки. Горячей прокаткой получают листы толщиной более 6 мм, листы меньшей толщины изготовляют холодной прокаткой или с нагревом до $650\text{--}700^\circ\text{C}$. Температура прессования составляет $950\text{--}1000^\circ\text{C}$. Титан хорошо сваривается аргонодуговой и всеми видами контактной сварки. Сварной шов обладает хорошим сочетанием прочности и пластичности.

Прочность шва составляет 90 % от прочности основного металла.

Титан плохо обрабатывается резанием, налипает на инструмент, что приводит к его быстрому износу. Для обработки титана требуется инструмент из быстрорежущей стали и твердых сплавов, малые скорости резания при большой подаче и глубине резания, интенсивное охлаждение. Недостатком титана является также низкая антифрикционность.

По влиянию на полиморфизм титана все легирующие элементы подразделяют на три группы: α -стабилизаторы, β -стабилизаторы и нейтральные элементы.

Повышая температуру полиморфного превращения титана, α -стабилизаторы (Al, O, N) расширяют область твердых растворов на основе Ti_α (рис. 5.5, а). Практическое значение для легирования титана имеет только алюминий, так как остальные вызывают снижение пластичности и вязкости титановых сплавов. Алюминий уменьшает плотность и склонность к водородной хрупкости, повышает прочность (рис. 5.6), жаропрочность, модуль упругости титановых сплавов.

Снижая температуру полиморфного превращения, β -стабилизаторы расширяют область твердых растворов на основе Ti_β (рис. 5.5, б); с титаном они образуют диаграммы состояния двух типов. Изоморфные β -стабилизаторы (Mo, V, Ta, Nb), имеющие, как и Ti_β , кристаллическую решетку ОЦК, неограниченно растворяются в Ti_β (см. рис. 5.5, б). Другие, например Cr, Mn, Fe, Ni, W, Cu, образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектоидным распадом β -фазы (рис. 5.5, в). В некоторых титановых сплавах, например с марганцем, хромом, железом, при охлаждении в неравновесных условиях эвтектоидного распада не происходит, а превращение идет по штриховой линии (см. рис. 5.5, в).

Большинство β -стабилизаторов, особенно V, Mo, Mn, Cr, повышают прочность при $20\text{--}25^\circ\text{C}$ (см. рис. 5.6) и отрицательных температурах (рис. 5.7), а также жаропрочность и термическую стабильность титановых сплавов, несколько снижая их пластичность.

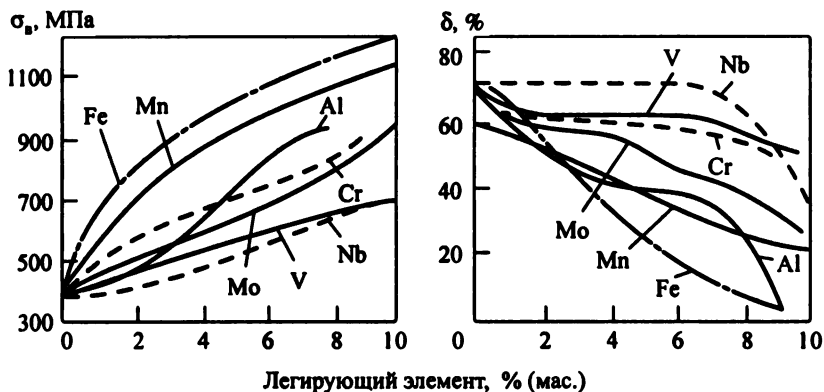


Рис. 5.6. Влияние легирующих элементов на механические свойства титана при 20–25 °С [12]

Нейтральные элементы (Sn, Zr, Hf) мало влияют на температуру полиморфного превращения (рис. 5.5, з). 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 подразделяют 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 неупрочняемые термической обработкой; по структуре в отожженном состоянии они классифицируются на α -, псевдо- α , $\alpha + \beta$, псевдо- β и β -сплавы.

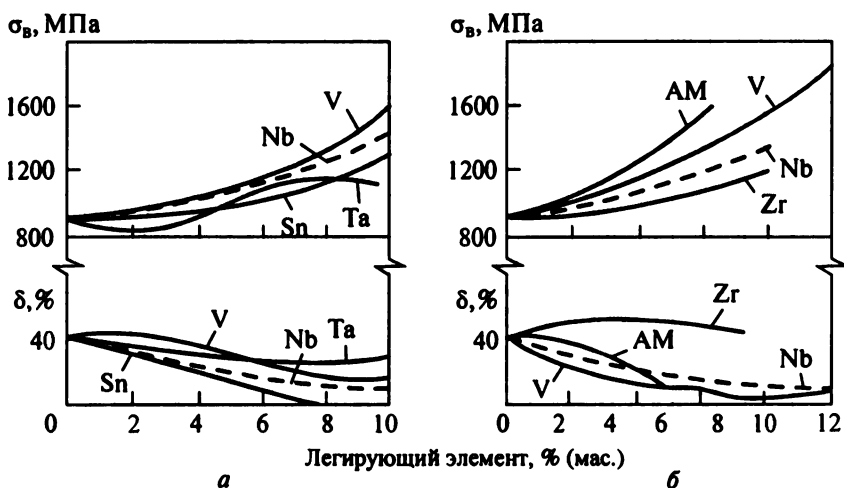


Рис. 5.7. Влияние легирующих элементов на механические свойства титана при -196 °С (а) и -253 °С (б) [13]

Таблица 5.48. Химический состав промышленных деформируемых титановых сплавов (ГОСТ 19807-91), % (мас.)

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Ti)										Примеси, не более				
	Al	Mn	Mo	V	Zr	Другие	C	Fe	Si	Zr	O	N	H	Сумма прочих	
BT5	4,3-6,2	-	0,8	1,2	-	-	0,10	0,30	0,15	0,30	0,20	0,05	0,015	0,30	
	4,3-6,0	-	-	1,0	-	2,0-3,0 Sn	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30	
<i>α-сплавы</i>															
<i>Псевдо-α-сплавы</i>															
OT4-0	0,2-1,4	0,2-1,3	-	-	-	-	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,012	0,30	
OT4-1	1,0-2,5	0,7-2,0	-	-	-	-	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,012	0,30	
OT4	3,5-5,0	0,8-2,0	-	-	-	-	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,012	0,30	
BT20	5,5-7,0	-	0,5-2,0	0,8-2,5	1,5-2,5	-	0,10	0,30	0,15	-	0,15	0,05	0,012	0,30	
ПТ7М	1,8-2,5	-	-	-	2,0-3,0	-	0,10	0,25	0,12	-	0,15	0,04	0,006	0,30	
ПТЗВ	3,5-5,0	-	-	1,2-2,5	-	-	0,10	0,25	0,12	0,30	0,15	0,04	0,008	0,30	
<i>α+β-сплавы</i>															
BT3-1	5,5-7,0	-	2,0-3,0	-	-	0,8-2,3 Cr, 0,15-0,4 Si, 0,2-0,7 Fe	0,10	-	-	0,50	0,18	0,05	0,015	0,30	
BT6	5,3-6,8	-	-	3,5-5,3	-	-	0,10	0,3	0,15	0,30	0,20	0,05	0,015	0,30	
BT9	5,8-7,0	-	2,8-3,0	-	0,8-2,0	-	0,10	0,25	-	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30	
BT14	3,5-6,3	-	2,5-3,8	0,9-1,9	-	-	0,10	0,3	0,15	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30	
BT16	1,8-3,8	-	4,5-6,5	4,0-5,5	-	-	0,10	0,25	0,15	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30	
BT22	4,4-5,9	-	4,0-5,5	4,0-5,5	-	0,5-2,0 Cr, 0,5-1,5 Fe	0,10	-	0,15	0,30	0,20	0,05	0,015	0,30	

Примечания: 1. В сплаве BT6, предназначенном для изготовления работающих под давлением баллонов, содержится, %: 5,3-6,5 Al; 3,5-4,5 V; ≤ 0,15 O; ≤ 0,25 Fe. Сплав такого состава маркируется дополнительно буквой С (BT6C). 2. 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. 3. Во всех сплавах, содержащих Mo, допускается его замена W в количестве ≤ 0,3 %. 4. Во всех сплавах, не содержащих Cr и Mn, последние допускаются как примеси в количестве ≤ 0,15 (в сумме). 5. Дополнительное ужесточение содержания примесей, а также сужение пределов содержания легирующих элементов применяются для конкретных видов полуфабрикатов.

5.3.2. Деформируемые титановые сплавы

Химический состав деформируемых титановых сплавов приведен в табл. 5.48. По сравнению с титаном титановые сплавы имеют более высокие прочность и жаропрочность при достаточно хорошей пластичности, высокой коррозионной стойкости и малой плотности.

Сплавы с α - и псевдо- α -структурой. Физические свойства этих сплавов приведены в табл. 5.49, механические – в табл. 5.50. К этой группе 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. 5.51, 5.52). Сплавы имеют высокую термическую стабильность свойств и обладают отличной свариваемостью. Их сваривают аргодуговой, всеми видами контактной и электронно-лучевой сварки. При этом прочность сварного шва составляет 90 % от прочности основного сплава. Обрабатываемость резанием α -сплавов удовлетворительная.

Таблица 5.49. Физические свойства титановых α - и псевдо- α -сплавов [15, 20]

Свойство	BT5	BT5-1	ПТ7М	OT4-1	BT20
γ , т/м ³	4,4	4,46	4,49	4,65	4,45
c , кДж/(кг·°С), при t , °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 t , °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
$\rho \cdot 10^8$, Ом·м, при t , °С:					
20	108	1,38	1,08	1,01	1,11
200	115	–	1,27	–	–
300	118	–	1,40	–	–
500	120	–	1,52	–	–
600	123	–	–	–	–
$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ , при t , °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

Таблица 5.50. Механические свойства титановых α - и псевдо- α -сплавов в отожженном состоянии [15]

Марка сплава	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_{-1}	δ	ψ	$E, ГПа$	KCU	KCT	НВ
	МПа			%			МДж/м ²		
BT5	750–950	700–800	450	10–14	25–40	105	0,3–0,5	–	229–321
BT5–1	800–1000	700–850	420	10–15	25–40	105	0,45	–	241–321
	750–950	750	400	10	–	115	–	0,35	–
OT4–0	500–650	400	320	15	35	115	0,8	–	156–207
	500–650	500	–	25	30	–	1	0,7	200
OT4–1	600–750	500–600	340–360	20	30	110	0,5	–	197–255
	600–750	570	360	30	–	–	–	0,05	–
OT4	700–900	600–650	380–420	10–12	25	120	0,5	–	207–205
	700–900	550–660	440	15–25	–	110	–	0,6	–
BT20	950–1150	840	410	10	25	105–110	0,4–0,5	0,15	255–341
	950–1150	–	420	12	–	120	–	0,35	–
ПТ7М	480–680	380–550	–	15–25	30–50	112	0,8–1,0	–	–
	500–650	450–600	260	30	–	–	0,8–1,2	0,8	–
ПТЗВ	700–900	600	400	11	–	117–119	0,6–0,7	–	–
	700–900	–	–	11	–	–	0,7	–	–

Примечание. В числителе приведены значения свойств для поковок, штамповок, прутков, в знаменателе – для листов (1–2 мм).

Таблица 5.51. Пределы длительной прочности, выносливости и ползучести титановых сплавов [15, 35]

Марка сплава	$t, ^\circ C$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1} при $N=10^7$	Марка сплава	$t, ^\circ C$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1} при $N=10^7$
		МПа					МПа		
BT5	300	470	–	–	BT20	350	750	550	380
	350	440	230	–		450	630	20	–
	400	260	120	–		500	490	150	300
	450	370	–	–		550	200	–	–
	500	255	118	–		ПТ7М	350	290	240
BT5–1	300	560	–	–	400		230	180	–
	350	540	380	350	BT6	300	620	490	–
	400	460	180	–		350	610	540	430
	450	–	19	–		400	590	360	420
	500	200	78	–		450	420	140	390
OT4	300	–	440	–		500	250	53	–
	350	490	330	340	BT3–1* ¹	300	800(1020)	635(785)	–
	400	470	200	260		400	600(930)	500(588)	(390)
	450	325	50	–		450	550(600)	–(250)	–
	500	245	–	–		500	360(–)	75(–)	–
OT4–1	300	440	230	300		BT16	300	1000	490
	350	340	260	260	350		600	–	460
	400	290	190	200	400		470	–	–

Марка сплава	$t, ^\circ\text{C}$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1} при $N=10^7$	Марка сплава	$t, ^\circ\text{C}$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1} при $N=10^7$
		МПа					МПа		
BT14*2	350	630	480	370	BT9	400	780	—	—
	400	680	350	—		BT22	300	820	780
	450	—	—	—	350		800	410	—
BT9	350	790	590	—	400	710	320	—	

*1 В скобках приведены свойства после закалки и старения. *2 Свойства приведены после закалки и старения.

Таблица 5.52. Механические свойства титановых сплавов при низких температурах [15, 20, 35]

Марка сплава	$t, ^\circ\text{C}$	σ_s	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	$KCU, \text{МДж/м}^2$
		МПа			
BT5-1	-70	950	—	—	0,6
	-196	1350	1180	15	0,4
	-253	1350-1600	1370	10	0,3
	-269	1700	—	9	—
BT5	-70	880	685	—	—
	-196	1225	980	—	—
OT4-0	-70	775	660	—	—
	-196	1050	920	—	—
OT4-1	-70	804	755	—	—
	-196	1128	1030	19	0,5
	-253	—	—	17,5	0,4
OT4	-70	853	755	—	—
	-196	1128	1033	13	—
	-253	—	—	16	—
BT3-1	-70	1180	103	—	—
	-196	1610	1470	6,5	0,3-0,4
	-253	2050	—	7,5	—
	-269	206	—	3	—
BT6	-70	—	—	—	—
	-196	1510	1470	17,8	0,4
	-253	1860	1910	3,5	0,4
BT14	-70	—	1079	—	—
	-196	1650	—	10	0,2-0,25
BT20	-70	1270	—	—	—
	-196	1410	1310	—	—
	-253	1470	—	—	—
BT22	-70	1270	1080	—	—
	-269	1080	—	—	—
BT9	-70	1410	1220	—	—
	-196	1810	1570	—	—
	-253	1225	—	—	—
	-269	1570	—	—	—

Сплавы с α - и псевдо- α -структурой не упрочняют термической обработкой и применяют в отожженном состоянии. Режимы отжига представлены в табл. 5.53.

Таблица 5.53. Температуры полного (числитель) и неполного (знаменатель) отжига титана и деформируемых титановых α - и псевдо- α -сплавов [13, 15], °C

Марка сплава	Прутки, поковки, штамповки, трубы, профили и изделия из них	Листы и детали из них
BT1-00	670-690/445-485	520-540/-
BT1-0	670-690/445-485	520-540/-
BT5	800-850/550-600	-
BT5-1	800-850/550-600	700-750/-
OT4-0	690-710/480-520	590-610/-
OT4-1	740-760/520-560	640-660/-
OT4	740-760/545-585	660-680/-
BT20	700-850/600-650	700-800*/-
ПТ7М	700-750/-	650-700/-

* Допускается отжиг листовых деталей при 650-750 °C.

Сплавы с цирконием наиболее технологичны, но это самые дорогие из α -сплавов. В горячем состоянии сплавы кууют, прокатывают и штампуют. Из сплава ПТ7М изготавливают горяче- и холоднокатаные трубы. Сплавы поставляют в виде прутков сортового проката, поковок, труб, проволоки. Они предназначены для изготовления деталей, работающих в широком диапазоне температур: от криогенных до 500 °C (табл. 5.54).

Таблица 5.54. Кратковременная прочность отожженных деформируемых сплавов и предельные температуры их эксплуатации [15, 20, 44, 46]

Марка сплава	Предельная температура при эксплуатации, °C		Кратковременная прочность, МПа, при t , °C						
	длительной	кратковременной	200	300	400	500	600	700	800
BT5	400	750	680	580	520	480	460	330	200
BT5-1	500	800-850	680	590	530	500	350* ³	-	-
BT20	500	800	780	730	700	650	470	-	-
OT4	350	500	530	510	490	430	370* ⁴	-	-
ПТ7М	350	400	360	320* ²	300	-	-	-	-
BT3-1* ¹	400	500	870	800	780	650	430	-	-
	(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	150-180	-
BT14	400	-	-	940-1070	900-1050	-	-	-	-
BT22	400	800	1280	1200	1150	1000	600	-	-
BT6	450	-	750	680	630	535	-	-	-

*¹ В скобках приведены свойства после закалки и старения. *² При 350 °C. *³ При 650 °C.

*⁴ При 550 °C.

Псевдо- α -сплавы содержат преимущественно α -фазу и вследствие дополнительного легирования β -стабилизаторами (Mn, V, Nb, Mo) также 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 %) обрабатывают давлением в холодном состоянии и только при изготовлении деталей сложной формы подогревают до 500–700 °С (ОТ4, ОТ4–1). 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 растворимых в α -фазе. Поэтому псевдо- α -сплавы с повышенным содержанием алюминия (7–8 %), легированные цирконием, ванадием, молибденом, ниобием и кремнием, 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. 5.43). Допустимое содержание водорода находится в пределах 0,01–0,005 % (см. табл. 5.44).

А.А. Ильиным [8] предложена термоводородная обработка (ТВО) титановых сплавов, представляющая собой сочетание обратимого легирования водородом с термическим воздействием на наводороженный сплав. В основе ТВО лежит особенность взаимодействия водорода с фазами, составляющими структуру титановых сплавов при термической обработке, его влияние на механизм и кинетику фазовых превращений и в соответствии с этим возможность получения различных структур и разнообразных свойств, обеспечивающих длительную и надежную работу сплава.

Водород легко поглощается титановыми сплавами при относительно низких температурах (на 50 °С ниже ($\alpha + \beta$) \rightleftharpoons β превращения). В зависимости от содержания других β -стабилизаторов концентрация водорода после насыщения колеблется от сотых до 0,9 %.

Для удаления водорода до безопасных концентраций (0,006–0,009 %) после соответствующих превращений и получения желаемой структуры и свойств сплавы подвергают вакуумному отжигу. Таким образом, водород является как бы «временным» легирующим элементом. Температура и продолжительность вакуумного отжига для разных сплавов различны. Вместе с тем с увеличением температуры продолжительность вакуумного отжига (ВО) уменьшается. Например, обезводороживание сплава ВТ5Л при 800 °С происходит за 3,5 ч, при 750 °С – за 4 ч, при 700 °С – за 4,5 ч и при 650 °С – за 5 ч.

Влияние концентрации водорода на механические свойства сплава ВТ6Л приведены в табл. 5.55. Механические свойства лопаток газотурбинного двигателя из сплава ВТ18У после различных режимов ТВО представлены в табл. 5.56, а зависимость механических свойств листов из сплава ВТ18У от режима ТВО, концентрации водорода и температуры испытания – в табл. 5.57.

Таблица 5.55. Влияние концентрации водорода x_H на механические свойства образцов из сплава ВТ6Л после ТВО [8]

Режим обработки	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, МДж/м ²	$N_p \cdot 10^{-4}$ при $\sigma = 550$ МПа
	МПа		%			
До обработки	940	870	8,8	18,0	0,46	4,9
ТВО, $x_H = 0,9\%$	1130	1080	6,0	16,0	0,42	9,8
ТВО, $x_H = 0,6\%$	1090	1030	12,8	20,0	0,45	9,7

Примечание. Усталостные испытания проведены на гладких цилиндрических образцах по схеме чистого изгиба с вращением, $f = 100$ Гц, $R = -1$; N_p – средняя логарифмическая долговечность.

Таблица 5.56. Механические свойства лопаток газотурбинных двигателей из сплава ВТ18У после ТВО по различным режимам [8]

Режим обработки	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ , %	σ_{-1} , МПа, при $N = 10^6$
	МПа			
Стандартная обработка (ВО 800 °С, 3ч + 930 °С, 1 ч)	1080	883	13,5	390
ТВО (ВО 700 °С, 5 ч)	1267	1200	4,5	460
ТВО (ВО 800 °С, 3 ч)	1160	1110	10,5	440
ТВО (ВО 900 °С, 2 ч + 750 °С, 4 ч)	1240	1170	9,5	455

Примечание. Усталостные испытания проводили по схеме консольного изгиба.

Таблица 5.57. Механические свойства листов из сплава ВТ18У при комнатной и повышенных температурах (кратковременные испытания в вакууме) [8]

Режим обработки	σ_b , МПа, при t , °С			$\sigma_{0,2}$, МПа, при t , °С			δ , %, при t , °С		
	20	700	800	20	700	800	20	700	800
До обработки	1050	540	290	970	470	210	6,5	21,0	32,3
ВО 900 °С, 1 ч	1020	560	300	960	480	210	8,3	20,9	30,4
ТВО, $x_H = 0,8\%$	1170	690	400	1090	610	320	3,3	17,4	30,4
ТВО, $x_H = 0,6\%$	1150	670	370	1080	590	300	3,9	20,1	30,7

Легирование водородом адекватно повышению концентрации β -стабилизаторов.

Наибольший эффект повышения конструкционной прочности наблюдается после ТВО α - и псевдо- α -сплавов. Известно, что α -сплавы вообще не подвергают стандартной упрочняющей термической обработке. Для псевдо- α -сплавов стандартная упрочняющая термическая обработка в принципе возможна, но из-за малого количества в них β -фазы (< 5 %) она малоэффективна, а вследствие высоких критических скоростей охлаждения не технологична. Легирование водородом переводит эти сплавы в двухфазную область мартенситного и даже переходного классов. Крупнозернистая структура α -фазы сплавов ВТ5 и ВТ5-1 преобразуется в мелкозернистую, причем макрозерно не меняется, но внутри него образуется множество мелких зерен α -фазы с высокоугловыми границами.

После низкотемпературного вакуумного отжига при 550–600 °С можно получить структуру, состоящую из двух фаз с различной концентрацией алюминия (6,85 и 3,63 %) при среднем его содержании в сплаве 5 %. Такая структура стабильна до 600 °С. Легированные водородом α -сплавы имеют после закалки структуру $\alpha + \beta$.

ТВО можно использовать в качестве высокоэффективной технологической операции для изменения структуры титана (измельчения зерна, уменьшения пористости), улучшения свойств фасонных отливок (табл. 5.58) и сварных соединений (табл. 5.59), для подготовки структуры к обработке давлением (водородному пластифицированию). В сочетании с горячим изостатическим прессованием прочностные характеристики при этом увеличиваются на 15–20 %, долговечность при малоцикловой усталости повышается в 2 раза, предел усталости – на 65–80 %.

Таблица 5.58. Механические свойства и пористость образцов из сплавов ВТ20Л и ВТ23Л, обработанных по различным режимам

Режим обработки	Пористость, %	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, МДж/м ²	σ_{-1} , МПа, при $N=10^7$
		МПа		%			
<i>Сплав ВТ20Л</i>							
Исходное состояние (литое)	2,8	860	820	8,0	20,0	0,6	290
Литье+ГО (1000 °С, 1 ч)	2,8	890	850	9,0	22,0	0,7	280
То же+ГИП (950 °С)	1,7	990	930	7,5	14,5	0,61	320
Литье+НО (800–850 °С до $x_H=0,25$ %) + ГИП (900 °С, 2 ч, $p=150$ МПа)	0,9	1020	980	8,2	14,8	0,55	470
Литье+ГИП (950 °С, 2 ч, $p=150$ МПа) + НО (130–850 °С до $x_H=0,8$ % + ВО (750–800 °С)	1,0	1080	990	8,9	18,0	0,5	540

Режим обработки	Пористость, %	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, МДж/м ²	σ_{-1} , МПа, при N=10 ⁷
		МПа		%			
<i>Сплав ВТ23Л</i>							
Исходное состояние (литое)	3,7	1000	960	7,2	14,0	0,37	320
Литье+ГО (930 °С, 1 ч)	3,7	950	900	8,0	16,9	0,52	300
То же+ГИП (900 °С)	2,3	930	880	12,0	20,5	0,6	280
Литье+ГО+НО (800 °С до $x_H=0,25\%$)+ +ГИП (850 °С, 2 ч, $p=150$ МПа)+ВО (750 °С)	1,4	1070	1040	9,3	19,0	0,59	500
Литье+ГИП (900 °С, 2 ч, $p=150$ МПа)+ +ТВО (при 750–800 °С до $x_H=0,5\%$)+ +ВО (750 °С)	1,8	1190	1120	8,5	18,6	0,5	570

Примечания: 1. В таблице приняты следующие условные обозначения: ГО – гомогенизирующий отжиг; ГИП – газостатическое изотермическое прессование; НО – наводороживающий отжиг; ВО – вакуумный отжиг. 2. Усталостные испытания проводили по схеме чистого изгиба с вращением, $f=100$ Гц, $R=-1$.

Таблица 5.59. Механические свойства сварных соединений, выполненных автоматической аргодуговой сваркой из листов ВТ20 и ВТ23, после различных режимов термической и термоводородной обработок

Режим обработки	σ_b , МПа	$\alpha_{св}$, град	КСУ, МДж/м ²
<i>Сплав ВТ20</i>			
Исходное состояние (после сварки)	975 (1140)	33 (32)	0,45 (0,3)
ВО 650 °С, 1 ч	960 (1120)	35 (36)	0,5 (0,36)
ТВО (ВО 750 °С)	1100 (1140)	32 (36)	0,40 (0,48)
ТВО (ВО 650 °С)	1190 (1240)	20 (21)	0,15 (0,21)
<i>Сплав ВТ23</i>			
Состояние после сварки	1280 (1110)	8 (40)	0,005 (0,62)
ВО 750 °С, 0,5 ч	1070 (1120)	37 (42)	0,38 (0,58)
Закалка 780 °С, 1 ч, воздух+старение 550 °С, 10 ч	1150 (1240)	25 (32)	0,25 (0,30)
ТВО (ВО 800 °С)	1170 (1150)	24 (28)	0,30 (0,32)
ТВО (ВО 700 °С)	1250 (1260)	18 (22)	0,20 (0,22)

Примечание. В скобках приведены свойства основного металла.

* Угол загиба.

Двухфазные ($\alpha+\beta$)-сплавы. Физические свойства этих сплавов приведены в табл. 5.60, механические – в табл. 5.61 и на рис. 5.8–5.11. 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 α + β -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 (Fe, Cr, Mn) и изоморфными (Mo, V, Nb) β -стабилизаторами. Ванадий и ниобий упрочняют сплавы слабее других, но и меньше снижают пластичность.

Таблица 5.60. Физические свойства титановых (α + β)-сплавов [15, 20]

Свойство	BT6	BT14	BT3-1	BT8	BT22
γ , т/м ³	4,43	4,52	4,5	4,48	4,6
c , кДж/(кг·°С), при t , °С:					
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·°С), при t , °С:					
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	10,50
300	11,70	11,72	11,30	11,30	11,70
400	12,56	12,92	12,92	12,56	13,40
500	13,82	13,82	14,24	14,24	14,60
600	15,49	–	15,49	15,49	15,90
$\rho \cdot 10^8$, Ом·м, при t , °С:					
20	160	–	1,36	1,61	1,53
200	182	–	–	–	–
300	202	–	–	–	–
500	212	–	–	–	–
600	214	–	–	–	–
$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ , при t , °С:					
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	–

Таблица 5.61. Механические свойства полуфабрикатов из титановых ($\alpha+\beta$)-сплавов после отжига (числитель) и после закалки и старения (знаменатель) [15, 44]

Марка сплава	Вид полуфабриката	σ_s		σ_{-1}	HB	δ	ψ	KCU	KCT	$K_{1\sigma}^{1/2}$ МПа·м
		МПа								
BT3-1	Штамповка	1040-1118	400-500	-	269-363	14-20	45-60	0,3-0,4	0,75	-
		1150-1200	-			10-12	32-48	-	0,1	
BT6	Пруток	1000-1250	-	-	-	12	32-35	0,3	0,35	55-67
		950-1100	300			10-13	-	-	0,25	-
BT6	Штамповка	950-1100	-	-	255-341	10-13	35-60	0,4-0,8	0,2	-
		900-1100	400			8-20	20-45	0,4	0,35-0,4	
BT9	Пруток	1100-1250	-	-	293-361	6	20	0,3	0,25	80,5-90,0
		1100-1300	540			8-14	2,5-4,5	0,2-0,5	0,15	
BT9	Пруток	1050-1250	-	-	-	12	28-30	0,3	-	80,0-81,5
		1200	400			6	20	0,3-0,5	-	
BT14	Штамповка	850-900	400	-	255-341	10-15	35-60	0,5-0,9	0,20	-
		1250-1300	-			6-15	20-40	0,5	0,20	
BT14	Лист, 1-2 мм	900-1070	-	-	-	8-10	-	-	-	-
		1200-1400	-			-	-	-	-	
BT16	Лист, 1-2 мм	840-1250	-	-	-	12-22	-	-	-	-
		1300-1400	-			5-6	-	0,4-0,6	-	
BT22	Пруток	1100	530	-	285	10	20	0,4	0,3	69,5
		1400	-			-	-	-	-	

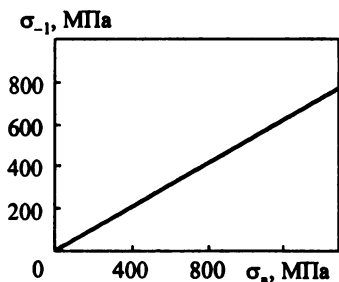


Рис. 5.8. Зависимость предела выносливости от временного сопротивления титановых сплавов

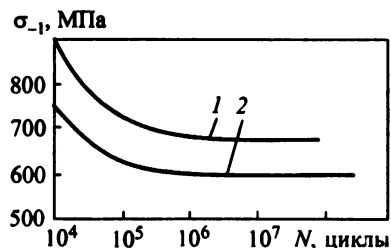


Рис. 5.9. Выносливость сплава ВТ6 в закаленном (1) и отожженном (2) состоянии [15]

Двухфазные сплавы упрочняют с помощью термической обработки – закалки и старения. В отожженном и закаленном состояниях они имеют хорошую пластичность, а после старения – высокую прочность и жаропрочность. Режимы отжига этих сплавов приведены в табл. 5.62, а режимы закалки и старения – в табл. 5.63. Влияние температуры деформирования на свойства двухфазных сплавов после термической обработки показано в табл. 5.64, а механические свойства этих сплавов после различных видов термической обработки представлены в табл. 5.65. 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.

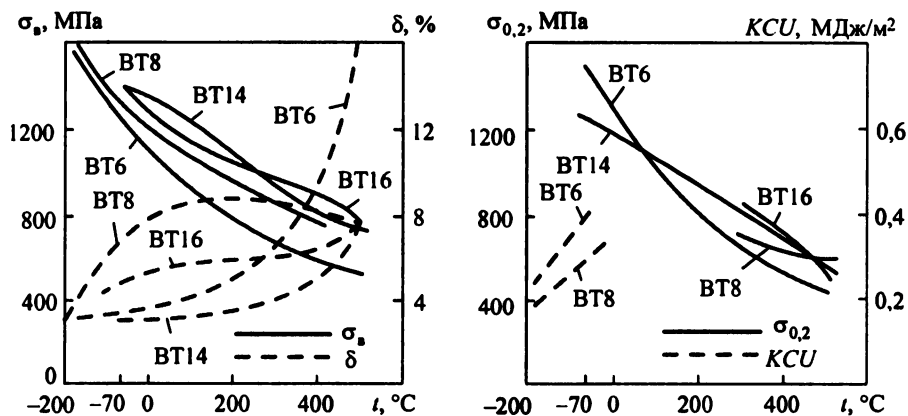


Рис. 5.10. Зависимость механических свойств титановых сплавов после закалки и старения от температуры испытания

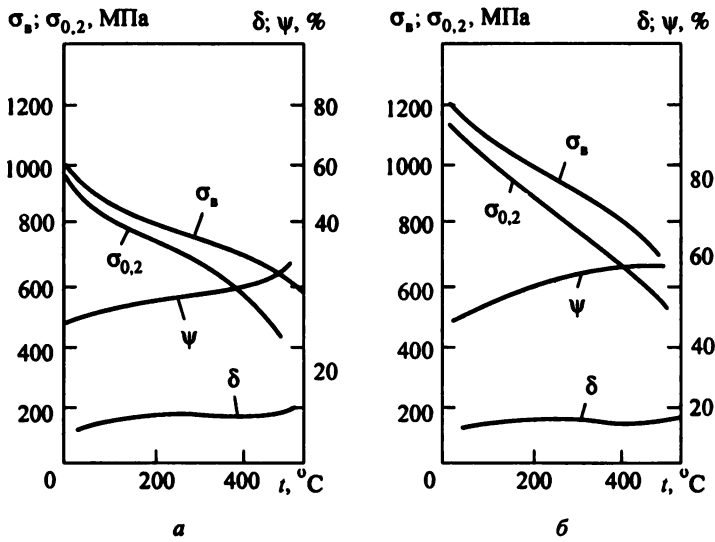


Рис. 5.11. Механические свойства сплава ВТ6 после различных режимов термической обработки в зависимости от температуры испытания:

a – отжиг 700 °С, охлаждение на воздухе; *б* – закалка 950 °С, вода + старение при 500 °С, 8 ч [15]

Таблица 5.62. Режимы отжига полуфабрикатов из титановых ($\alpha + \beta$)-сплавов [13, 15]

Марка сплава	Температура отжига, °С				
	полного	неполного	изотермического		
			t_1	t_2	τ , ч, при t_2
ВТ6	<u>750–800</u>	<u>600–650</u>	<u>800–850</u>	<u>750 или 500</u>	<u>0,5</u>
	750–800	600–650	–	–	–
ВТ9	<u>950–980</u>	<u>530–620</u>	<u>950–980</u>	<u>530–580</u>	<u>6</u>
	–	–	–	–	–
ВТ3–1	<u>800–850</u>	<u>530–620</u>	<u>870–920</u>	<u>600–650^{*1}</u>	<u>2</u>
	–	–	–	–	–
ВТ14	<u>740–760</u>	<u>550–650</u>	<u>790–810</u>	<u>640–660</u>	<u>0,5</u>
	740–760	550–650	–	–	–
ВТ16	<u>770–790</u>	<u>550–650</u>	<u>770–790</u>	<u>500^{*2}</u>	–
	730–770	550–650	–	–	–
ВТ22	<u>720–780</u>	<u>550–650</u>	<u>650–750</u>	<u>350^{*3}</u>	–
	740–760	550–650	–	–	–

Примечание. В числителе – прутков, поковок, штамповок, профилей, труб и изделий из них, в знаменателе – листов.

^{*1} Охлаждение на воздухе. ^{*2} То же с t_1 до t_2 со скоростью 2–4 °С/мин, далее на воздухе. ^{*3} То же с t_1 до t_2 с печью, далее на воздухе.

Таблица 5.63. Режимы упрочняющей термической обработки полуфабрикатов* из титановых ($\alpha + \beta$)-сплавов [13]

Марка сплава	Режим ТО		Марка сплава	Режим ТО	
	Закалка	Старение		Закалка	Старение
BT3-1	860–900 °C	500–620 °C, 1–6 ч	BT14	870–910 °C	480–560 °C, 8–16 ч
BT6	900–950 °C	450–550 °C, 2–4 ч	BT16	810–830 °C	560–580 °C, 8–10 ч
BT9	920–940 °C	500–600 °C, 1–6 ч	BT22	690–750 °C	480–540 °C, 8–16 ч

* Прутки, поковки, штамповки, трубы, профили и изделия из них.

Таблица 5.64. Влияние температуры деформирования $t_{\text{деф}}$ на механические свойства титановых сплавов BT3-1 и BT22 [7]

Термическая обработка после деформирования	$t_{\text{деф}}, ^\circ\text{C}$	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCT (КСУ), МДж/м ²
		МПа		%		
<i>Сплав BT3-1</i>						
900 °C, 1 ч, охлаждение с печью до 630 °C, 1 ч, воздух	980	1100	1060	14	29	0,235
	1030	1080	1050	13	26	0,324
900 °C, 1 ч, воздух + старение 550 °C, 5 ч	980	1140	1100	14	31	–
	1030	1190	1160	10	19	0,33
850 °C, 1 ч, вода + старение 550 °C, 5 ч	980	1310	1240	5	12	0,108
	1030	1250	1210	5	11	0,137
<i>Сплав BT22</i>						
750 °C, 1 ч, 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)

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. 5.66). 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 свариваются. После сварки требуется отжиг для повышения пластичности сварного шва.

Таблица 5.65. Анизотропия механических свойств титановых сплавов [7]

Марка сплава	Режим ТО	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	КСТ, МДж/м ²
		МПа			
OT4	Отжиг 550 °С, 1 ч, воздух	$\frac{760}{785}$	$\frac{726}{652}$	$\frac{15}{16,5}$	$\frac{0,88}{0,45}$
		$\frac{1070}{1120}$	$\frac{1000}{1095}$	$\frac{15}{11,8}$	$\frac{0,363}{0,412}$
BT3-1	Отжиг 800 °С, 20 мин	$\frac{1095}{1140}$	$\frac{608}{680}$	$\frac{13,7}{12,8}$	$\frac{0,177}{0,167}$
		$\frac{1440}{1510}$	—	$\frac{4,4}{3,1}$	$\frac{0,039}{0,031}$
BT14	Отжиг 850 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 650 °С, воздух	$\frac{950}{870}$	—	$\frac{11}{13}$	$\frac{0,50}{0,33}$
		$\frac{824}{873}$	$\frac{735}{873}$	$\frac{14}{7}$	$\frac{0,47}{0,882}$
BT14	Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух	$\frac{1275}{1375}$	$\frac{1170}{1280}$	$\frac{2,2}{4,9}$	$\frac{0,108}{0,137}$
		$\frac{940}{1080}$	$\frac{883}{1060}$	$\frac{16,0}{17,6}$	$\frac{0,1350}{0,1510}$
BT22	Отжиг 730 °С, 30 мин, вакуум	$\frac{1010}{1060}$	—	$\frac{12,6}{8,1}$	$\frac{0,236}{0,167}$
		$\frac{1000}{1070}$	—	$\frac{13}{11}$	$\frac{0,235}{0,167}$
BT22	Отжиг 800 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 350 °С, воздух	$\frac{1360}{1480}$	—	$\frac{7,5}{3,7}$	$\frac{0,098}{0,049}$
		$\frac{1290}{1345}$	—	$\frac{12,6}{8,1}$	$\frac{0,137}{0,088}$
BT22	Отжиг 800 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 650 °С, воздух	$\frac{874}{868}$	$\frac{810}{820}$	$\frac{20}{12,6}$	$\frac{0,902}{1,45}$
		$\frac{825}{815}$	$\frac{745}{760}$	$\frac{22,3}{18,5}$	$\frac{0,981}{1,52}$
BT5-1	Отжиг 750 °С, 20 мин, воздух	$\frac{912}{804}$	$\frac{755}{755}$	$\frac{17}{19,3}$	$\frac{0,91}{1,45}$
		—	—	—	—
BT5-1	Отжиг 750 °С, 1 ч, вакуум	—	—	—	—
		—	—	—	—
BT5-1	Закалка 950 °С, 20 мин, вода	—	—	—	—
		—	—	—	—

Примечание. В числителе приведены значения параметров для продольных образцов, в знаменателе — для поперечных.

Таблица 5.66. Влияние термической обработки на механические свойства титановых сплавов [7]

Марка сплава	Режим ТО	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	KCT, МДж/м ²
		МПа			
BT14	Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух	1080	1040	–	0,255
	Закалка 880 °С, 30 мин, вода + старение 480 °С, 16 ч	1370	1275	5	0,137
	Закалка 880 °С, 30 мин, вода + старение 510 °С, 16 ч	1060	1010	12,5	–
BT3–1	Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух	880	800	8	0,88
	Отжиг 800 °С, 20 мин, воздух	1120	1095	11,8	0,412
	Закалка 920 °С, 20 мин, вода	1140	680	12,8	0,167
	Закалка 920 °С, 20 мин, вода + старение 520 °С, 10 ч	1510	–	3,1	0,31
BT22	Отжиг 750 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 350 °С, воздух	1080	1000	–	0,147
	Отжиг 800 °С, 15 мин, охлаждение с печью до 350 °С, воздух	1060	–	8,1	0,167
	Закалка 750 °С, 15 мин, вода + старение 500 °С, 16 ч	1480	–	5,3	0,88
	Закалка 750 °С, 15 мин, вода + старение 550 °С, 16 ч	1345	–	3,7	0,049

Эти сплавы менее склонны к водородной хрупкости, чем α - и псевдо- α -сплавы, так как водород обладает большей растворимостью в β -фазе (см. табл. 5.44). Двухфазные сплавы куются, штампуются и прокатываются легче, чем α -сплавы. Их поставляют в виде поковок, штамповок, прутков, листов, лент. Технологические свойства и области применения двухфазных сплавов представлены в табл. 5.67.

Таблица 5.67. Технологические свойства и область применения титановых сплавов [15, 30, 46]

Класс прочности	Технологические свойства			Коррозионная стойкость	Область применения
	Пластичность	Свариваемость	Обработка резанием		
Малопрочные высокопластичные: BT1–00 BT1–0 OT4–0	<i>Неупрочняемые ТО</i>				
	Высокая	Хорошая	Удовлетворительная	–	Слабонагруженные детали сложной конфигурации, работающие от –253 °С до 150 °С
	»	»	»	Отличная	То же
	»	»	»	Хорошая	Детали сложной конфигурации, длительно работающие при 300–350 °С и кратковременно до 500–600 °С

Класс прочности	Технологические свойства			Коррозионная стойкость	Область применения
	Пластичность	Свариваемость	Обработка резанием		
<i>Неупрочняемые ТО</i>					
Малопрочные высокопластичные: ОТ4-1	Высокая	Хорошая	Удовлетворительная	Хорошая	Тонкостенные детали сложной формы, работающие длительно до 300 °С (3000 ч) и до 350 °С (2000 ч)
Среднепрочные: ОТ4	Хорошая в горячем состоянии, удовлетворительная в холодном	»	Хорошая	»	Детали, длительно работающие до 350–400 °С
ВТ5	Хорошая в горячем состоянии	»	Удовлетворительная	»	Сварные детали, работающие при температуре от –253 до 400 °С
ВТ5-1	То же	»	–	»	Штампованные детали и узлы, работающие до 450 °С
ВТ20	»	»	Удовлетворительная	»	Детали, длительно работающие до 500 °С
ПТ7М	Хорошая	»	–	»	Трубы и другие тонкостенные сварные детали
<i>Упрочняемые ТО</i>					
Высокопрочные: ВТ3-1	Хорошая в горячем состоянии	Удовлетворительная	Хорошая	–	Кованые и штампованные детали, работающие до 400 °С (6000 ч) и до 450 °С (2000 ч)
ВТ6	То же	Хорошая	–	–	Штампованные детали, длительно работающие до 400–450 °С
ВТ14	»	–	–	–	Детали, длительно работающие до 400 °С
ВТ16	Хорошая	Хорошая	–	–	Крепежные и резьбовые детали диаметром 40 мм, работающие до 350 °С
ВТ22	–	–	–	–	Детали, длительно работающие при 350 °С (2000 ч)
ВТ9	Удовлетворительная в горячем состоянии	Хорошая	Хорошая	–	Детали, работающие до 500 °С

Однофазные β -сплавы. Эти 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 металлов.

Псевдо- β -сплавы. Это высоколегированные в основном β -стабилизаторами сплавы. Суммарное количество легирующих элементов в них, как правило, превышает 20 %. Наиболее часто их легируют молибденом, вольфрамом, хромом, реже железом, цирконием, оловом. Алюминий присутствует почти во всех сплавах в небольшом количестве (~ 3 %).

В равновесном состоянии эти сплавы имеют в основном β -структуру и небольшое количество α -фазы, после закалки – структуру переохлажденной метастабильной β' -фазы, обеспечивающей высокую пластичность ($\delta = 12 \dots 40$ %, $\psi = 30 \dots 60$ %) и хорошую обрабатываемость давлением ($\sigma_s \cong 650 \dots 1000$ 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 т/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 сплавов низкая.

Наибольшее распространение в промышленности получил сплав BT15 (~3 % Al, ~8 % Mo и 11 % Cr), который выпускают в виде полос, листов, прутков, поковок и рекомендуются для длительной работы при температурах до 350 °С.

5.3.3. Литейные титановые сплавы

Небольшой температурный интервал кристаллизации обеспечивает высокую жидкотекучесть и плотность отливок из титановых сплавов. Они отличаются малой склонностью к образованию горячих трещин; их линейная усадка составляет 1 %, объемная – 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 изготавливают 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. Упрочняющую термическую обработку к ним не применяют, так как резко снижается пластичность сплавов.

Химический состав и механические свойства литейных титановых сплавов приведены в табл. 5.68 и 5.69.

Таблица 5.68. Химический состав литейных титановых сплавов [15], % (мас.)

Марка сплава	Легированный элемент										Примеси, не более				
	Al	Mo	V	Zr	Cr	Si	Fe	C	W	O	N	H	Прочие		
BT1Л*1	-	-	-	-	-	0,15	0,3	0,15	0,2	0,20	0,05	0,015	0,3		
BT5Л*2	4,1-6,2	-	-	0,80	-	0,20	0,35	0,20	0,2	0,20	0,05	0,015	0,3		
BT6Л	5,0-6,5	-	3,5-4,5	0,30	-	0,15	0,3	0,10	0,2	0,15	0,05	0,015	0,3		
BT3-1Л	5,3-7,0	2,0-3,0	-	0,50	0,8-2,3	0,15-0,40	0,2-0,7	0,15	0,2	0,18	0,05	0,015	0,3		
BT9Л	5,6-7,0	2,8-3,8	-	0,8-2,0	-	0,20-0,35	0,3	0,15	0,2	0,15	0,05	0,015	0,3		
BT14Л*3	4,3-6,3	2,5-3,8	0,9-1,9	0,30	-	0,15	0,6	0,12	0,2	0,15	0,05	0,015	0,3		

Примечание. Во всех сплавах, содержащих в качестве легирующего элемента Mo, допускается частичная замена его W в количестве не более 0,3 %.

*1 Допускается не более 0,7 Al. *2 Допускается не более 0,8 % Mo и не более 1,2 % V. *3 Допускается до 0,6 % Cr.

Таблица 5.69. Механические свойства литейных титановых сплавов [15]

Марка сплава	t, °C	E, ГПа	σ _в , МПа	δ, %	KCU, 2 МДж/м ²	σ ₋₁ , МПа, при N=2·10 ⁷	Марка сплава	t, °C	E, ГПа	σ _в , МПа	δ, %	KCU, 2 МДж/м ²	σ ₋₁ , МПа, при N=2·10 ⁷
BT5Л	-70	-	850	10	0,15	-	BT3-1Л	400	-	730	9	-	-
	20	118	800	6	0,3	280		450	92	680	10	-	-
	300	105	400	8	-	-		500	88	630	10	-	-
	400	93	350	10	-	-		20	103	1030	4	0,25	180
BT6Л	20	115	880	4	0,3	200	BT9Л	300	90	710	4	-	-
	200	-	600	4	-	-		400	88	650	7	-	-
	300	95	550	5	-	-		500	82	570	8	-	-
	400	91	500	5	-	-		-70	-	1100	5	-	-
BT14Л	20	113	950	7	0,35	270	BT20Л	20	108	980	8	0,3	200
	300	97	630	8	-	-		300	-	670	10	-	-
	400	95	550	8	-	-		350	93	630	10	-	-
BT3-1Л	-70	-	1100	3	-	-	BT9Л	400	-	610	10	-	-
	20	114	990	4	0,3	220		500	81	560	12	-	-

5.3.4. 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 дуговой плавкой с вращающимся анодом и неподвижным вольфрамовым катодом, электроплазменной плавкой либо распылением в вакууме и других позволяет исключить загрязнение. Повышение качества полуфабрикатов и готовых деталей сложных форм 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), ухудшающие качество изделий из порошковых сплавов на основе титана, преимущество порошковой технологии, особенно ее новых направлений, очевидно.

Применение порошковых титановых сплавов следующее:

в авиастроении, ракетостроении – 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, змеевики, 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, наружные и внутренние протезы, внутрикостные фиксаторы, зажимы и др.

Для изготовления деталей методами порошковой технологии используют сплавы ВТ5, ВТ5-1, ОТ4, ВТ3-1 и др. Свойства порошковых сплавов приведены в табл. 5.70, 5.71.

Таблица 5.70. Химический состав и механические свойства некоторых зарубежных порошковых титановых сплавов [29]

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Ti), % (мас.)						Режим ТО	σ_s МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ		K_{1c} , МПа·м ^{1/2}
	Al	V	Sn	Zr	Mo	Другие				%	ψ	
Ti-6Al-4V	5,5-6,75	3,5-4,5	-	-	-	-	Отжиг	950	880	10	23	93
Ti662	5,5-5,6	5,7-5,9	2,25	-	-	0,6 Cu; 0,65 Fe	Отжиг Закалка + старение	1045	967	20	33	-
Ti6246	6	-	2	4	6	-	Ковка + отжиг	1100	1020	17	26	-
Корона-5	4,5	-	-	-	5	1,5 Cr	Отжиг	1200	1075	8	9	52
								999	940	13	-	75

Примечание. Метод получения сплавов – горячее изостатическое прессование.

Таблица 5.71. Механические свойства порошковых сплавов на основе титана [2]

Марка сплава	Спекание		σ_s , МПа	δ , %
	t , °C	τ , ч		
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
BT-1	1300	3	450-710	0
	1300	4	620-720	0
OT4	1400	3	400-680	0
	1400	4	630-700	0
BT6	1300	4	700-720	8-12
	1300	4	740	4,4

Таблица 5.72. Механические свойства спеченного, а также спеченного и ковального технического титана (числитель) и сплава Ti-6Al-4V (знаменатель) [29]

Способ получения	σ_s МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ		ψ
			%	%	
Спекание (плотность 94 %)	430/830	340/740	15/5	23/8	23/8
Спекание и ковка (плотность 100 %)	455/920	365/840	23/11	30/24,7	30/24,7

Примечание. В техническом титане и в сплаве Ti-6Al-4V содержится 0,12 и 0,2 % O₂ соответственно.

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. 5.70.

Механические свойства порошковых материалов зависят от их плотности (табл. 5.72). Кратковременная прочность литого (числитель) и порошкового (знаменатель) сплава ВТЗ-1 приведена ниже [2]:

$t, ^\circ\text{C}$	200	350	400	450	500
$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	880/970	810/960	790/900	740/890	-/700
$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	720/810	650/800	620/780	590/750	-/630

5.3.5. Сплавы на основе интерметаллидов

В соответствии с функциональными свойствами сплавы на основе интерметаллидов титана подразделяют на две группы: жаропрочные и сплавы с эффектом памяти формы.

Жаропрочные сплавы относятся к системе Ti-Al. Их основу составляют $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ и $\gamma(\text{TiAl})$ фазы (рис. 5.12). При малой плотности ($3,5 \text{ т/м}^3$) они по жаропрочности превосходят все титановые сплавы и многие жаропрочные стали, приближаясь по свойствам к сплавам на основе никеля (см. § 6.4).

Эффект памяти формы свойствен сплавам, обладающим прямым и обратным мартенситными превращениями, а также обратимой деформацией, наибольшая величина которой определяется деформацией решетки при мартенситных превращениях. Эффект памяти формы – это способность сплава устранять в процессе обратного мартенситного превращения деформацию, данную сплаву после прямого мартенситного превращения, т. е. в мартенситном состоянии.

В основе сплавов с эффектом памяти формы лежит никелид титана TiNi, имеющий температуру плавления $1250-1310^\circ\text{C}$, плотность $6,44 \text{ т/м}^3$, модуль нормальной упругости $E = 66,7 \dots 72,6 \text{ ГПа}$, модуль сдвига $G = 22,5 \dots 24,5 \text{ ГПа}$, временное сопротивление $\sigma_{\text{в}} = 735 \dots 970 \text{ МПа}$, предел текучести $\sigma_{0,2} = 127 \dots 333 \text{ МПа}$, относительное удлинение $\delta = 7 \dots 27 \%$. Эффект памяти формы никелида титана возникает в узком интервале температур. Он максимален при стехиометрическом составе, отклонение от которого вызывает резкое изменение температур начала и конца прямого и обратного мартенситных превращений (табл. 5.73).

Характеристики восстановления формы промышленных титановых сплавов ВТ16, ВТ23 и ВТ22 в сравнении с никелидом титана TiNi (50% Ni, 50% Ti) приведены в табл. 5.74.

При прямом мартенситном превращении ($M_{\text{н}} \sim 60^\circ\text{C}$) никелид титана изменяет сложную упорядоченную кристаллическую решетку типа CsCl на триклинную решетку мартенсита. Приданная в этом состоянии новая форма образца (детали) из TiNi исчезает при нагреве немного выше температуры обратного мартенситного превращения ($100-120^\circ\text{C}$).

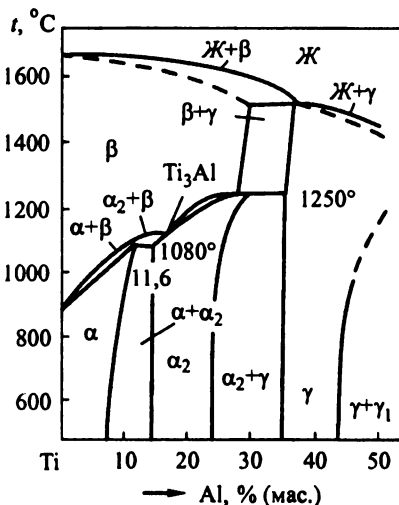


Рис. 5.12. Диаграмма состояния системы Ti-Al

Таблица 5.73. Температура начала и конца прямого и обратного мартенситных превращений сплавов с эффектом памяти формы

Сплав	Содержание второго компонента, % (мас.)	Температура, °C					
		M_n	M_k	A_n	A_k	$M_n - M_k$	$A_n - A_k$
TiNi	Ni 50,0	65	40	95	105	25	30
	50,5	20	-5	25	55	25	5
	51,0	-65	-95	-30	-10	30	35
TiAu	Au 52,6	630	585	630	690	45	0
	50,0	620	575	615	650	45	5
	47,4	605	535	560	630	70	45
	45,0	575	520	535	585	55	40
TiPd	Pd 45,0	450	410	430	470	40	20
	47,5	460	420	455	495	40	5
	49,0	485	455	495	525	30	10
	50,0	510	480	520	550	30	10
	51,0	485	470	520	540	15	35
TiPt	Pt 45,0	1035	995	1025	1070	40	10
	47,5	1060	1005	1035	1080	55	25
	50,0	1070	1020	1040	1085	50	30
	52,5	1000	980	955	1020	20	5

Примечание. M_n, M_k – температуры начала и конца прямого мартенситного превращения; A_n, A_k – то же обратного мартенситного превращения.

Таблица 5.74. Характеристики восстановления формы промышленных титановых сплавов и никелида титана ТН1

Сплав	$\gamma, \text{т/м}^2$	$\epsilon, \%$	$\epsilon_s, \%$	$\sigma_p, \text{МПа}$	$a_s, \text{МДж/м}^3$
BT16	4,65	5,9	3,4	230	0,5
BT23	4,57	4,2	3,0	280	0,55
BT22	4,58	4,1	3,5	240	0,45
ТН1	6,4	7,0	6,0	290	2,4

Примечание. Приведены максимально возможные значения $\epsilon_s, \sigma_p, a_s$, полученные при оптимальной технологии (ϵ_s – упругая составляющая деформации; σ_p – реактивное напряжение, развиваемое при восстановлении формы; a_s – удельная работа, совершаемая при восстановлении формы с учетом упругого возврата).

Сплавы с эффектом памяти формы целесообразно применять в различных областях техники, где материалы, не обладающие этим эффектом, использовать невозможно. Например, в космической технике для самораскрывающихся антенн, предварительно получивших компактную форму для облегчения доставки на космический корабль; при установке саморасклепывающихся заклепок в труднодоступных местах конструкций; для самосрабатывающих соединительных муфт трубопроводов; для дистанционного ремонта обсадных труб нефтяных и газовых скважин, а также в качестве материала изделий, многократно изменяющих свою форму при нагреве и охлаждении (клапаны, рычаги и др.).

5.4. Бериллиевые сплавы

5.4.1. Общая характеристика бериллия

Бериллий – элемент II группы Периодической системы Д.И. Менделеева. Бериллий обладает полиморфизмом: низкотемпературная модификация Be_α ($< 1250^\circ\text{C}$) имеет решетку ГП с периодами $a = 0,2286$ нм, $c = 0,3584$ нм, высокотемпературная – Be_β (1250 – 1284°C) – решетку ОЦК; его атомный номер 4; атомная масса 9,0122; плотность при 20°C $1,845$ т/м³; температура плавления 1284°C , кипения 2450°C ; модуль нормальной упругости 309 ГПа, модуль сдвига 140 ГПа (E мало изменяется при увеличении температуры до 450°C); удельное электросопротивление $3,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная теплоемкость при 20°C $2,129$ кДж/(кг·°C); удельная теплопроводность при 20°C $188,6$ Вт/(м·°C); скорость распространения звука 12600 м/с; отражательная способность (для белого света) 55 %; коэффициент линейного расширения в интервале 20 – 100°C $\alpha = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$.

По важнейшей характеристике современных конструкционных материалов удельной жесткости ($E/(\gamma g) = 16,6 \cdot 10^3$ км) бериллий превосходит высокопрочные стали, сплавы на основе алюминия, титана, магния ($E/(\gamma g) = 2,3 \dots 2,6 \cdot 10^3$ км), а также тугоплавкие высокомодульные металлы – осмий, иридий, рений, вольфрам (табл. 5.75, рис. 5.13). В сочетании с высокой удельной прочностью ($\sigma_{\text{в}}/(\gamma g) \sim 37$ км) бериллий дает возможность снизить массу конструкции и увеличить жесткость ее силовых элементов, что особенно важно для авиакосмической техники. Поэтому бериллий успешно применяют в консолях крыльев, элеронах, тягах управления и других деталях сверхзвуковых самолетов;

Таблица 5.75. Модуль упругости бериллия и других материалов [15]

Металл или сплав	$\gamma, \text{ т/м}^3$	$E, \text{ ГПа}$	$E/(\gamma g) \cdot 10^{-3}, \text{ км}$
Os	22,5	559	2,53
Ir	22,4	510	2,34
Re	21,0	460	2,25
W	19,3	460	2,13
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	2,50
Стали	7,85	200	2,65
BT16	4,52	102	2,33
B95	2,85	69	2,56
D16	2,78	69	2,56
1420	2,47	73	3,12
АБМ (30 % Be)	2,35	132	5,70
АБМ (40 % Be)	2,25	156	7,04
АБМ (70 % Be)	2,05	215	10,5

Примечание. АБМ – сплавы системы Al–Be–Mg

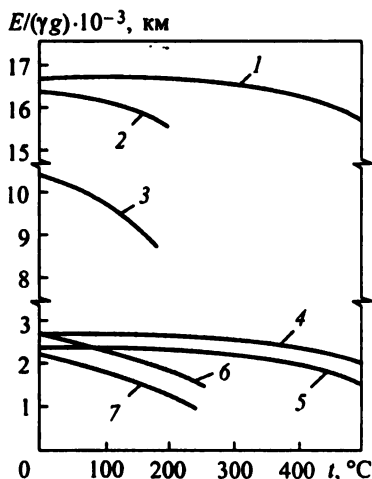


Рис. 5.13. Зависимость удельной жесткости различных материалов от температуры:

1 – бериллий; 2 – КМ эпоксидная матрица – углеродное волокно; 3 – КМ эпоксидная матрица – волокно бора; 4 – сталь; 5 – титановые сплавы; 6 – алюминиевые сплавы; 7 – магниевые сплавы

в ракетной технике из него изготавливают панели обшивки, промежуточные отсеки, соединительные элементы, приборные стойки и т. д. Высокие удельная жесткость и особенно прочность бериллиевой проволоки диаметром десятки микрометров ($\sigma_{\text{в}} \geq 1300$ МПа) открывают еще одну область применения – армирование композиционных материалов на основе легких металлов (Al, Mg, Ti и др.), которые широко используют в ракетной и космической технике.

Бериллий обладает большой теплотой плавления и очень высокой теплотой испарения. По удельной теплоемкости он в 2,5 раза превосходит алюминий, в 4 раза – титан и в 8 раз – сталь; в теплопроводности уступает алюминию только ~ 12 %. Все эти свойства способствуют успешному применению бериллия в качестве теплозащитного материала в ракетной и особенно космической технике: головные части ракет, передние кромки крыльев сверхзвуковых самолетов, оболочки кабин космонавтов.

Высокие удельные прочность и жесткость, теплопроводность в сочетании с размерной стабильностью во времени и термической стабильностью, низким коэффициентом термического расширения и хорошей отражательной способностью делают бериллий незаменимым материалом для зеркал оптических приборов, в том числе и космического назначения, деталей высокоточных приборов. Его используют в инерциальных системах навигации для ракет, самолетов, подводных лодок; из него изготавливают детали гиросtabilизирующих платформ и гироскопов.

Сопротивление усталостным разрушениям при циклических нагрузках обеспечивает применение бериллия в двигателестроении, а высокая скорость распространения звука (в 2,5 раза выше, чем в стали) – в акустической технике.

Малое эффективное поперечное сечение захвата тепловых нейтронов ($0,009 \text{ б}^0/\text{ат.}$), высокая отражательная способность, а также способность замедлять быстрые нейтроны до уровня тепловых выдвинули бериллий в ряд лучших конструкционных материалов ядерной техники (замедлители быстрых нейтронов, отражатели тепловых нейтронов). Его используют в качестве конструкционного материала для изготовления окон рентгеновских трубок ввиду слабого поглощения рентгеновских лучей (в 17 раз хуже, чем алюминий).

Кроме того, бериллий успешно применяют для легирования сплавов на основе меди, алюминия, никеля.

Недостатками бериллия являются малая распространенность в природе; сложная и дорогая технология извлечения из руд и получения полуфабрикатов (деталей), а поэтому его высокая стоимость; низкая пластичность и анизотропия свойств; токсичность. Соединения бериллия (аэрозоли, дисперсные частицы), попадая в легкие, вызывают тяжелое легочное заболевание – бериллиоз. На коже бериллиевая пыль и мельчайшие частицы вызывают зуд, а попадая в ранки – язвы и опухоли. Поэтому обработку бериллия на металлорежущих станках проводят в специальных помещениях в пылезащитных костюмах и масках. Предельно допустимое содержание бериллия в атмосфере производственных помещений составляет $0,001 \text{ мг/м}^3$. В компактном виде бериллий безвреден.

Металлургия бериллия сложна вследствие его химической инертности. Слитки после вакуумной переплавки обрабатывают давлением для получения полуфабрикатов или перерабатывают в порошок, из которого полуфабрикаты и изделия получают порошковой технологией.

⁰ Барн (б) – внесистемная единица измерения площади ($1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$).

Изделия из бериллиевых блоков изготовляют на металлорежущих станках, однако вследствие плохой обрабатываемости резанием необходимо использовать твердосплавный инструмент. Сваривается бериллий дуговым методом в аргоне, гелии или вакууме. Обработке давлением подвергают лишь малые слитки ($d \leq 200$ мм), поскольку в слитках большого размера вследствие высокого поверхностного натяжения образуются две усадочные раковины, соединенные трещиной.

Фасонные отливки из бериллия производят очень редко. Литой бериллий крупнозернист и хрупок ($\sigma_b = 280$ МПа; $\sigma_{0,2} = 230$ МПа; $\delta = 2...3$ %). Для улучшения пластичности его подвергают обработке давлением. Прокатку проводят при высокой температуре (1000–1050 °С). Поскольку выше 700 °С бериллий «схватывается» с инструментом, прокатку ведут в стальной оболочке, которую затем стравливают. Горячекатаный полуфабрикат, полученный из слитка, имеет такие же низкие механические свойства. Его относительное удлинение вдоль направления прокатки находится на уровне литого материала, а в поперечном направлении близко к нулю.

В настоящее время полуфабрикаты (листы, прутки и др.) из бериллия получают в основном порошковой технологией. Механические свойства горячепрессованных заготовок зависят от содержания примесей, размера зерна. Примеси, как и увеличение размера частиц порошка, снижают механические свойства, особенно пластичность горячепрессованных заготовок (табл. 5.76) и деформированного полуфабриката (табл. 5.77).

Таблица 5.76. Механические свойства горячепрессованных бериллиевых заготовок из магнетермического и электролитического порошка [3]

Тип и размер порошка	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа		
Магнетермический, 500–600 мкм	160	160	0,2–0,4
Электролитический, 50–70 мкм	280	210	2–3

Таблица 5.77. Механические свойства бериллиевых полуфабрикатов, полученных из магнетермического (числитель) и электролитического (знаменатель) порошка [3]

Вид полуфабриката	Режим отжига	σ_b , МПа	$\delta, \%$
Горячепрессованные прутки (вытяжка $\lambda = 6$ %)	850 °С, 1 ч	500–600	2–3
		400–600	7–11
Листы ($\epsilon = 50$ %)	750 °С, 2 ч	280–360	1–3
		450–550	5–10

Исходные порошки, полученные магнетермическим или электролитическим способами, подвергают дополнительной очистке от примесей дистилляцией в вакууме, зонной плавкой и др. Химический состав технического, дистиллированного и очищенного зонной плавкой бериллия приведен в табл. 5.78, содержание примесей в промышленных марках бериллия – в табл. 5.79, а механические свойства различных полуфабрикатов – в табл. 5.80 – 5.83.

Таблица 5.78. Химический состав бериллия, очищенного зонной плавкой и дистилляцией [3]

Бериллий	O	C	Fe	Al	Si	Mn	Na	Ca	Ni	Cu	Cr	Fe+Cl	Be
Стандартный магнетермический	0,5	-	0,88	0,013	0,013	0,008	-	-	0,012	0,006	0,008	-	99,3
Многократно дистиллированный	0,025	0,015	0,0035	0,006	0,012	0,002	0,01	0,0006	0,0003	0,0003	0,0006	0,015	99,9
Зонорафинированный (5 проходов)	0,025	0,018	0,04	0,0001	0,001	-	0,0001	0,0006	0,0046	0,0012	0,0001	0,0002	99,5
Электролитический	0,06	0,06	0,0063	0,06	0,008	-	0,0008	0,003	0,0017	0,0001	0,0004	0,0008	99,8

Пр и м е ч а н и е . Суперрафинированный вакуумоплавленный бериллий, многократно дистиллированный и одновременно зонорафинированный, содержит не более 0,0001 % примесей.

Таблица 5.79. Содержание примесей в промышленном бериллии и его механические свойства [3]

Марки бериллия	Содержание примесей, % (мас.)										Механические свойства*		
	BeO	C	Fe	Al	Mg	Прочие	MPa		δ, %				
							σ _n	σ _{0,2}					
Инструментальные: I-400, НР-40	≥ 4,25	0,25	0,25	0,16	0,08	≤ 0,1 (каждой)	476/511	406/413	1,5/2,7				
Конструкционные: S-200E, НР-20	≤ 2	0,15	0,18	0,16	0,08	≤ 0,4 (каждой)	294/322	196/196	2,7/4,6				
Для ядерной техники: N-50, НР-8	≤ 0,9	0,1	0,075	0,06	0,08	0,0002-0,02 (сумма 13 элементов)	-	-	-				

* В числителе приведены свойства в продольном, а в знаменателе – в поперечном направлении.

Таблица 5.80. Механические свойства бериллиевых полуфабрикатов [3]

Вид полуфабриката	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа		
Листы толщиной 1–6,3 мм из бериллия: порошкового обычной чистоты литого обычной чистоты	531	372	16
	362	172	7
Выдавленные порошковые заготовки из бериллия: обычной чистоты высокой чистоты	655–690	345–518	8–13
	655–828	345–518	8–13
Поковки из бериллия обычной чистоты	483–600	435–600	0–4,5

Таблица 5.81. Механические свойства проволоки диаметром 0,125 мм из бериллия, полученного разными способами [3]

Вид заготовки	BeO, % (мас.)	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
		МПа		
Слиток	0,02	980	860	6,2
Электрорафинированный горячепрессованный пруток	0,97	1010	875	9,8
	0,81	1380	1010	2,8
Магнетермический горяче- прессованный пруток	0,86	1120	935	5,2
	1,52	1210	985	2,1

Таблица 5.82. Механические свойства и работа разрушения K поковок из бериллия [3]

Направление вырезки образцов	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	K^* , Дж, при испытаниях	
	МПа		%		динамических	баллистических
Осевое	468	587	4,3	4,3	-/8,4	0,92/0,98
Тангенциальное	505	568	3,6	4,0	-/5,7	0,46/0,58
Радиальное	450	568	3,6	3,7	-/4,7	0,87/0,92

* В числителе дроби – без разрушения образца, в знаменателе – при разрушении образца.

Таблица 5.83. Механические свойства полуфабрикатов из бериллия [15]

Вид полуфабриката	Направление вырезки образца	σ_b , МПа	$\delta, \%$
Пруток, прессованная труба	Продольное	539–637 (1470–1666)*	4–8
Лист	Продольное, поперечное	392–539	2–4
Штамповка	То же	392	≥ 2
Полоса	Продольное	≥ 490	≥ 3

Вид полуфабриката	Направление вырезки образца	σ_b , МПа	δ , %
Проволока диаметром, мм: 0,05–0,1	То же	1 176–931	–
		1 568–1 421	–
0,1–0,3	»	931–833	–
		1 421–1 274	–
0,3–1,0	»	833–686	–
		1 274–882	–
1,0–5,8	»	686–392	–
		882–539	–

Примечание. Для проволоки в числителе приведены значения σ_b в отожженном, а в знаменателе – в нагартованном состоянии.

* При сжатии.

Свойства бериллия значительно зависят от концентраторов напряжений на поверхности и ее общего состояния. Ниже приведены значения σ_b при испытании образцов с надрезом (σ_b^H) и без него (σ_b) из прокатанного бериллия при коэффициенте концентрации напряжений $K_t=4,4$ в зависимости от способа обработки поверхности, МПа [3]:

	σ_b^H	σ_b	σ_b^H/σ_b
Шлифование	298/268	387/387	0,77/0,69
Фрезерование	225/217	383/392	0,59/0,55
Травление	461/228	454/436	1,02/0,52

Примечание. В числителе – при продольном, а в знаменателе – при поперечном направлении вырезки образца.

Чувствительность бериллия к концентраторам напряжений характеризуют следующие данные [15]:

σ_b^H , МПа	–	470 ($K_t=2,2$)	166 ($K_t=4,0$)
σ_b , МПа	588	–	–
σ_b^H/σ_b	–	0,8	0,28

Влияние концентраторов напряжений на механические свойства уменьшается после травления (табл. 5.84) и отжига (табл. 5.85).

Таблица 5.84. Изменение механических свойств бериллия после травления различными реактивами [3]

Обработка поверхности	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %
	МПа		
Механическая	389	–	0
То же и травление на глубину 0,1 мм: NH ₄ Fe ₂ (15 %), 20 г/л Be	573	410	18
HNO ₃ (20 %) + HF (1 %), 10 г/л Be	547	399	16
HNO ₃ (20 %) + HF (1 %), 20 г/л Be	578	410	18

Таблица 5.85. Влияние отжига и травления на механические свойства горячесоуженного бериллиевого листа [3]

Обработка поверхности	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа		
Шлифование слоя толщиной 0,13 мм	462	290	8,6
Шлифование и отжиг	496	272	13,0
Шлифование, отжиг и травление	505	272	18,3

При повышении температуры происходит существенное снижение кратковременной и длительной прочности бериллия, предела ползучести и повышение его пластичности (табл. 5.86). Поэтому в качестве жаропрочного материала бериллий практически не используют.

Таблица 5.86. Механические свойства отожженного прессованного бериллиевого прутка при высоких температурах [15]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	$\delta, \%$	$E, \text{ГПа}$
	МПа				
100	509–539	411	205	13–20	264,7
200	–	294	–	–	–
300	382–431	225	147	29–36	235,3
400	–	156	–	–	–
500	254–294	98	49	22–29	147

При отрицательных температурах механические свойства бериллия понижаются. Так, при уменьшении температуры от 20°C до -70°C временное сопротивление снижается с 539–637 МПа до 490–539 МПа, а относительное удлинение с 4–8 % до 1–1,5 %.

Бериллий, полученный порошковой технологией, имеет мелкозернистую структуру и высокие механические свойства, в том числе и пластичность. С уменьшением размера зерна возрастают временное сопротивление, предел текучести и пластичность при 20°C (табл. 5.87), а также кратковременная прочность при повышенных температурах (табл. 5.88).

Таблица 5.87. Влияние размера частиц порошка и содержания примесей на свойства прессованного бериллия [3]

Средний размер частиц	Диаметр зерна	Содержание примесей, % (мас.)			σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
		BeO	C	N			
мкм							
11,4	10,1	3,36	0,084	0,023	520	366	2,84
11,3	–	3,87	0,120	0,045	–	–	–
9,8	9,2	3,57	0,093	0,027	556	387	3,45
9,6	–	4,29	0,112	0,034	–	–	–
7,95	7,3	4,57	0,122	0,025	553	394	3,11
7,45	7,0	4,95	0,152	0,040	558	409	–
5,95	6,2	4,57	0,142	0,038	549	461	2,77
5,1	5,7	5,33	0,160	0,037	582	466	2,40

Таблица 5.88. Влияние содержания BeO и температуры испытания на механические свойства листов бериллия толщиной 1,52 мм [28]

$t, ^\circ\text{C}$	Направление вырезки образца	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
		МПа		
20	Продольное	609/517	473/308	21,2/1,30
	Поперечное	577/488	487/311	23,0/18,0
216	Продольное	370/277	313/232	41,7/31,5
	Поперечное	349/288	343/231	25,6/34,0
427	Продольное	311/232	304/202	15,5/30,0
	Поперечное	322/226	318/201	15,0/30,2
549	Продольное	84/62	49/46	22,2/6,0
	Поперечное	58/67	56/52	13,5/5,8

Примечание. В числителе – при содержании BeO, равном 2,25 % (мас.), в знаменателе – при 1,3 % (мас.).

Кроме того, увеличению прочности способствуют дисперсные частицы оксида бериллия, повышающие сопротивление пластической деформации. Рост пластичности, вызванный измельчением зерна, настолько значителен, что перекрывает ее снижение вследствие увеличения содержания оксида при измельчении порошка. Для повышения пластичности порошковых полуфабрикатов размол порошков бериллия целесообразно проводить в безокислительной среде. Чистый спеченный бериллий с чрезвычайно мелкозернистой структурой ($d = 1 \dots 3$ мкм) обладает склонностью к сверхпластичности: при 600–700 °С и малых скоростях деформации относительное удлинение $\delta = 300$ %. Более высокая пластичность спеченных бериллиевых блоков дает возможность подвергать их не только горячей обработке давлением, но и тепловой обработке при 400–500 °С. Эта температура ниже температуры рекристаллизации бериллия ($t_{\text{рекр}} = 700$ °С), что позволяет сохранить наклеп и получить высокую прочность полуфабриката ($\sigma_b = 650 \dots 700$ МПа).

Пластичность полуфабрикатов из порошкового бериллия зависит от технологии горячей обработки давлением. Прутки с текстурой базисной плоскости, полученные методом горячего выдавливания, характеризуются довольно высокой пластичностью ($\delta = 20$ %). На листах, изготовленных поперечной прокаткой этих прутков, сохраняется текстура базисной плоскости, а пластичность повышается до 20–40 % (см. табл. 5.88). При этом базисная плоскость ориентируется вдоль оси прутка или в плоскости листа, поэтому при растяжении касательные напряжения в них равны нулю. Скольжение идет по плоскостям призмы, которых в ГП решетке поликристаллического бериллия значительно больше, чем базисных, что обеспечивает хорошую пластичность. В направлении, перпендикулярном плоскости листа, пластичность уменьшается до нуля.

Механические свойства листов бериллия, прокатанных в различных направлениях, представлены в табл. 5.89.

Таблица 5.89. Механические характеристики листов бериллия после продольно-поперечной прокатки [15]

Направление прокатки	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ , %	r_{min}^1 , см	δ_{max}^1 , %	Угол изгиба ² , град	E	G	Кэффициент Пуассона
	МПа						ГПа		
Вдоль продольной оси	545	382	15,9	16,7	0,72	2	304,5	134–139	0,077
Вдоль поперечной оси	563	393	16,5	18,2	0,75	2	299,3	–	0,076
По толщине листа	206	–	0,051	–	–	–	354,3	–	0,013

¹ При четырехточечном изгибе. ² При трехточечном изгибе.

Более высокие механические свойства имеет бериллий, полученный методом порошковой технологии. До деформации спеченные заготовки имеют $\delta = 1...2\%$ и $\sigma_a = 275...325$ МПа. После деформации, вызывающей разрушение оксидных сеток и дробление частиц оксида, структура становится аналогичной строению дисперсноупрочненного композиционного материала, благодаря чему δ возрастает до 5–15 %, а σ_a до 450–550 МПа. Тем не менее повышение содержания ВеО выше 3–4 % (мас.) вызывает появление хрупкости. Бериллий, упрочненный оксидом ВеО (до 3–4 %), выпускают в виде листов различной толщины, проволоки, профилей.

Благодаря своим уникальным свойствам (см. рис. 5.13, табл. 5.75), бериллий нашел широкое применение в промышленности.

5.4.2. Сплавы систем Ве–Al и Ве–Al–Mg

Главная сложность при легировании бериллия обусловлена его малым атомным радиусом (0,113 нм). Большинство легирующих элементов, растворяясь в бериллии, увеличивает и без того его высокую хрупкость. Поэтому наибольшее распространение получили сплавы бериллия с практически нерастворимым в нем алюминием. Бериллий также практически не растворим в алюминии (рис. 5.14). Поэтому эвтектика, образующаяся при концентрации бериллия 2,5 % (мас.), состоит из почти чистого алюминия с незначительным количеством включений бериллия и характеризуется хорошей пластичностью. Чем больше сплавы системы Ве–Al содержат бериллия, тем выше их прочность и жесткость, ниже пластичность (рис. 5.15); модуль упругости при этом изменяется по закону аддитивности, как у композиционных материалов. Промышленное применение получили сплавы, содержащие 5–80 % (мас.) Ве. По структуре они заэвтектические, однако при неравновесных условиях кристаллизации эвтектический

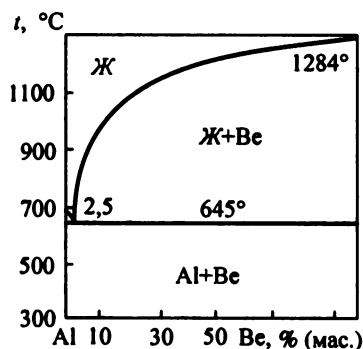


Рис. 5.14. Диаграмма состояния Al – Ве

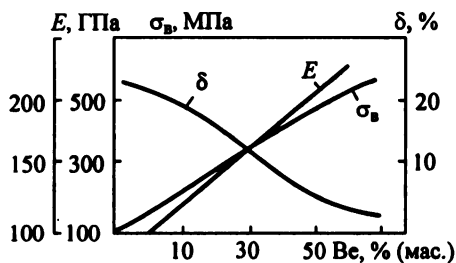


Рис. 5.15. Зависимость механических свойств сплавов Al-Be от содержания бериллия

бериллий формируется на первичных кристаллах бериллия как на готовой подложке. Эвтектика как бы «вырождается», и структура состоит из мягкой пластичной алюминиевой матрицы и включений твердого и хрупкого бериллия.

Легирование двойных сплавов системы Be-Al элементами, растворимыми в бериллиевой фазе, ухудшает свойства этой фазы и сплавов в целом, а элементами, растворимыми в алюминиевой фазе, улучшает свойства сплавов. Наиболее эффективным легирующим элементом является магний при его содержании в пределах растворимости в алюминии.

Более высокая прочность сплавов системы Al-Be-Mg (АБМ) объясняется твердо-растворным упрочнением основы сплава, представляющей собой α-твердый раствор магния в алюминии, а также мелкозернистой структурой этих сплавов и равномерным распределением в них частичек практически чистого бериллия. Все это вызывает более равномерные деформации при нагружении материала и соответственно повышение прочности и пластичности. Однако наибольшее упрочнение в сплавах типа АБМ происходит при содержании бериллия около 70 % (мас.) (рис. 5.16). Значительное снижение пластичности сплавов, содержащих ≥ 70 % Be, сближение относительного удлинения и прочности бериллиевых сплавов с магнием и без него объясняются уменьшением объемного содержания пластичной алюминиевой фазы более чем в 2 раза и повышением роли твердой и хрупкой бериллиевой фазы. Эти сплавы можно рассматривать как бериллий, свойства которого ухудшаются в связи с присутствием пластичной легкоплавкой алюминиевой фазы, особенно при 500–600 °С.

Структура прессованных полуфабрикатов и горячекатаных листов состоит из алюминиевой матрицы и вытянутых в направлении течения металла частиц бериллия линзовидной формы с размером в поперечном сечении 10–50 мкм. Она аналогична структуре композиционных материалов с алюминиевой матрицей, армированной короткими волокнами бериллия [15]. В этом случае нагрузки воспринимают более высокомодульные волокна бериллия, а пластичная алюминиевая матрица служит средой для передачи напряжений. Такие материалы обладают анизотропией свойств. Модули упругости сплавов систем Al-Be и Al-Be-Mg с увеличением содержания бериллия изменяются по закону аддитивности, как у композиционных материалов.

Механические свойства прессованных прутков диаметром 30 мм и листов из них сплава АБМ с 30

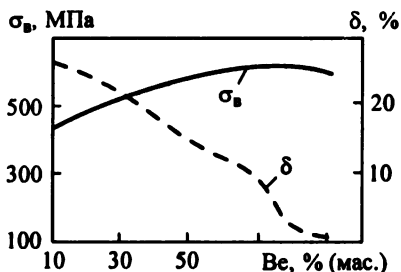


Рис. 5.16. Зависимость механических свойств сплавов Al-Be-Mg (5 %) от содержания бериллия

с 30 % Ве представлены в табл. 5.90, чувствительность к концентрации напряжений – в табл. 5.91.

Таблица 5.90. Механические свойства полуфабрикатов из сплава АБМ с 30 % Ве [15]

Вид полуфабриката	Направление вырезки образца	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta_{10}, \%$
		МПа		
Пруток прессованный диаметром 30 мм, без ТО	Продольное	$\frac{411}{(1185)^*}$	264	16
	Поперечное	$\frac{402-441}{-}$	$\frac{245-294}{-}$	$\frac{15-20}{-}$
Лист толщиной, мм: 0,5–0,8	»	$\frac{441-539}{490-588}$	$\frac{343-372}{411-451}$	$\frac{10-18}{3-10}$
	»	$\frac{392-431}{402-451}$	$\frac{264-284}{264-313}$	$\frac{7-12}{4-10}$

Примечание. В числителе приведены механические свойства листов в отожженном, а в знаменателе – в нагартованном состоянии.

* При сжатии.

Таблица 5.91. Чувствительность к концентрации напряжений сплава АБМ с 30 % Ве [15]

Характеристика образца	σ_b^H	σ_b	σ_b^H/σ_b
	МПа		
Круглый, вырезанный в продольном направлении из прессованного прутка диаметром 30 мм, без ТО	519 ($K_f=2,2$)	480	1,1
Плоский, вырезанный в поперечном направлении из отожженного листа толщиной 1 мм	521 ($K_f=2,5$)	524	0,99

Акустическую выносливость листовых образцов из сплавов АБМ и Д16Т характеризуют следующие данные [15]:

	АБМ (30 % Ве)	Д16Т
Число циклов до разрушения N при σ , МПа:		
69	$3 \cdot 10^6$	$0,35 \cdot 10^6$
44	$6,7 \cdot 10^7$	$0,25 \cdot 10^7$
34	$4,4 \cdot 10^8$	$0,80 \cdot 10^7$

Примечание. При нагружении ($\sigma=30...35$ МПа) по акустической выносливости сплав АБМ превосходит сплав Д16 в 40–50 раз.

Предел выносливости сплава АБМ с 30 % Ве дан в табл. 5.92. При концентрации напряжений $K_f = 2,2$ (кольцевая выточка) временное сопротивление прутка снижается с 510 до 460 МПа.

Таблица 5.92. Предел выносливости полуфабрикатов из сплава АБМ с 30 % Ве [15]

Характеристика образца	Вид испытания	σ_{-1} , МПа, при $N=2 \cdot 10^7$ циклов
Круглый, вырезанный в продольном направлении из прессованного прутка диаметром 30 мм	Изгиб с вращением, $f=50$ Гц	$\frac{176}{64}$
Плоский, вырезанный в поперечном направлении из отожженного листа толщиной 1,5 мм	Чистый изгиб, $f=25$ Гц	$\frac{196}{137}$

Примечание. В числителе – значения σ_{-1} для гладких образцов ($K_f=1$), в знаменателе – для круглого с кольцевой выточкой ($K_f=1,89$) и плоского с отверстием ($K_f=2,2$).

Механические свойства образцов, вырезанных в поперечном направлении из отожженных листов толщиной 0,7 мм из сплава АБМ с 30 % Ве, в зависимости от температуры нагрева ($\tau = 100$ ч) приведены ниже [15]:

$t, ^\circ\text{C}$	20	150	200	250
$\sigma_B, \text{МПа}$	460	470	465	465
$\delta_{10}, \%$	21	24	17,5	15

Аналогичные образцы, но вырезанные из листов толщиной 1,0–1,5 мм, при отрицательных и повышенных температурах имеют следующие механические свойства [15]:

$t, ^\circ\text{C}$	-196	-70	20	200	250	300	350
$\sigma_B, \text{МПа}$	539–608	421	411–460	304	254	186	166
$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	470–490	264–284	264–294	205	176	127	78
$\delta, \%$	1,5–3	14–18	11–18	12	13	16	8

Пределы ползучести и длительной прочности образцов, вырезанных в продольном направлении из прессованного прутка диаметром 30 мм из сплава АБМ с 30 % Ве (без термообработки), приведены ниже, МПа [15]:

	150 °C	250 °C	300 °C	350 °C
σ_3	–	–	68	44
σ_{20}	–	68	–	29
$\sigma_{0,2/5}$	186	34	–	–
$\sigma_{0,2/100}$	107	–	–	–
$\sigma_{0,2/300}$	78	–	–	–

Примечание. Образцы, вырезанные из листов толщиной 1,5 мм в поперечном направлении, имеют при 200 °C $\sigma_{20} = 156$ МПа и $\sigma_{0,2/20} = 88$ МПа.

Теплофизические свойства сплавов АБМ с 30 % и 70 % Ве представлены в табл. 5.93, 5.94.

Таблица 5.93. Теплофизические свойства прессованного прутка из сплава АБМ с 30 % Ве в отожженном состоянии [15]

Свойство	Температура испытания, °С			
	20	100	200	300
λ , Вт/(м·°С)	138	134	130	126
c , кДж/(кг·°С)	1,13	1,15	1,19	1,21
$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	—	19,2	19,7	20

Примечание. Значения α приведены для интервала от 20 °С до температуры испытания.

Таблица 5.94. Теплофизические свойства прессованного прутка из сплава АБМ с 70 % Ве в нетермообработанном состоянии [15]

Свойство	Температура испытания, °С				
	100	200	300	400	500
λ , Вт/(м·°С)	167	151	142	130	125
c , кДж/(кг·°С)	1,76	1,92	2,01	2,18	2,3
$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	15	16	16,7	17,2	—

Примечания: 1. Значения α приведены для интервала от 20 °С до температуры испытания. 2. Сплав АБМ с 70 % Ве имеет $\gamma = 2,01 \dots 2,06$ т/м³, $E = 196 \dots 225$ ГПа.

Механические свойства прессованного нетермообработанного прутка из сплава АБМ с 70 % Ве в зависимости от температуры испытания приведены ниже [15]:

t , °С	20	200	300	400	500
σ_b , МПа	509–549	362–411	294–313	166–215	137–147
$\sigma_{0,2}$, МПа	353–402	304–343	264–284	137–186	117–127
δ , %	7–12	10–12	10–17	8–11	2–3

Примечание. Направление вырезки образца продольное.

Таким образом, предварительные длительные нагревы до 500 °С мало влияют на прочность сплавов АБМ при повышенных температурах. Испытания показывают одновременное снижение прочности и относительного удлинения.

В отличие от двойных Al–Ве сплавов, из которых полуфабрикаты изготавливают спеканием и прессованием из порошков, сплавы АБМ получают также литьем, а слитки подвергают обработке давлением. Поставляют их в виде деформированных и отожженных полуфабрикатов ($t_{отж} = 350 \dots 400$ °С). Эти сплавы хорошо свариваются, и поэтому рекомендуются для сварных конструкций.

Легирование бериллия элементами, расширяющими температурную область пластичной высокотемпературной модификации Ве_β, увеличивает диапазон горячей обработки давлением. Эти элементы (Ni, Co, Cu и др.) повышают прочность (табл. 5.95) и снижают пластичность при 20 °С бериллиевых сплавов.

Таблица 5.95. Влияние легирующих элементов на прочность бериллиевых сплавов, полученных горячим прессованием

Легирующий элемент	Содержание, % (мас.)	σ_b , МПа
—	—	170–250
Co	3,2	410
	5	435
Fe	2	400
	3	415
Ni	2	280
	5	300
	10	360
Cu	1	270
	5	330
	10	370
Mo	2	295
W	2	260

5.4.3. Бериллиды тантала, ниобия, циркония

Хорошей стабильностью прочностных характеристик обладают материалы, представляющие собой интерметаллидные соединения бериллия с переходными металлами (Ta, Nb, Zr и др.), так называемые бериллиды. Они имеют высокую температуру плавления (~ 2000 °С), высокую твердость (500–1000 HV), жесткость ($E = 300\text{--}350$ ГПа) при относительно низкой плотности (2,7–5 т/м³). Состав и свойства бериллидов циркония, ниобия и тантала представлены в табл. 5.96.

Таблица 5.96. Состав и свойства бериллидов циркония, ниобия и тантала [20]

Свойство	ZrBe ₁₇ (45,6 % Be)	ZrBe ₁₂ (56,3 % Be)	Nb ₂ Be ₁₇ (45,3 % Be)	NbBe ₁₂ (54,0 % Be)	Ta ₂ Be ₁₇ (29,7 % Be)	TaBe ₁₂ (37,6 % Be)
Тип кристаллической решетки	Ромбодрическая	ГЦК	Ромбодрическая	Тетрагональная	Ромбодрическая	Тетрагональная
Параметры решетки, нм:						
<i>a</i>	0,7548	1,0067	0,5559	0,7376	0,7388	0,7334
<i>c</i>	1,0997	–	$\alpha = 82^\circ 84'$	0,4258	1,074	0,4267
<i>c/a</i>	1,457	–	–	0,57	1,458	0,582
Плотность γ , т/м ³	3,08	2,72	3,28	2,88	5,05	4,18
Температура плавления, °С	1980	1927	1750	1650	1988	1850
Твердость HV0,1	1300	1000	1000	500	1120	720
σ при изгибе, МПа, при <i>t</i> , °С:						
20	175	175	217	134	210	217
1370	280	260	264	134	393	302
1510	246	175	115	143	246	182
δ при изгибе, %, при <i>t</i> , °С:						
20	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1
1370	0,3	0,25	2,0	1,0	2,6	1,1
1510	1,1	0,6	7,0	2,2	5,0	2,6
σ_c при сжатии, МПа, при <i>t</i> , °С:						
20	–	1330	–	1400	–	1050
871	–	1050	–	910	–	1330
1370	–	490	–	560	–	–
<i>E</i> , ГПа, при <i>t</i> , °С:						
20	335	330	331	330	350	189
1370	140	140	175	175	140	238
1510	70	70	–	–	70	70

Недостатком бериллидов является высокая хрупкость. Из них изготавливают методом порошковой технологии мелкие несложные по форме детали для гироскопов и систем управления.

5.5. Композиционные материалы

Композиционные материалы (КМ) – это материалы, состоящие из двух или более компонентов (отдельных волокон или других наполнителей и связующей их матрицы) и обладающие специфическими свойствами, отличными от свойств составляющих их компонентов. Компоненты не должны растворяться друг в друге или образовывать химические соединения на границе раздела наполнитель – матрица, т. е. должны быть совместимы при изготовлении и эксплуатации КМ. Свойства КМ нельзя определить только по свойствам компонентов, без учета их взаимодействия. Из КМ можно создавать элементы конструкций с заранее заданными свойствами.

Классифицируют КМ по следующим основным признакам: материалу матрицы и армирующих элементов, геометрическим размерам компонентов, структуре и расположению компонентов, методу изготовления. Иногда КМ разделяют по назначению, но, так как одни и те же КМ могут иметь различное назначение, этот принцип классификации используют редко.

5.5.1. Полимерные композиционные материалы

Полимерными композиционными материалами (ПКМ) называются КМ, матрицей которых является полимер или связующее на его основе. Для большинства ПКМ 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, нижняя – появлением хрупкости. Свойства полимеров зависят от их химического строения, физического состояния и условий эксплуатации.

По сравнению с традиционными материалами ПКМ имеют ряд преимуществ, позволяющих значительно снизить массу, повысить прочность, жесткость, теплостойкость конструкций.

В табл. 5.97 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 и износостойкостью; он менее подвержен растрескиванию под действием агрессивных сред. Температура перехода в хрупкое состояние полиэтилена находится в интервале $-75\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -220\text{ }^{\circ}\text{C}$, полипропилена $-7\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Политетрафторэтилен (фторопласт) обладает низким коэффициентом трения; он наиболее химически стоек из всех полимеров, имеет повышенную термостойкость, хладостоек.

Общие недостатки полимеров данной группы: невысокая теплостойкость, ползучесть под действием нагрузки и зависимость механических свойств от температуры, длительности нагружения и скорости деформирования.

Еще одну группу образуют полимеры, успешно конкурирующие с металлами при изготовлении деталей конструкций повышенной жесткости и коррозионной стойкости (см. табл. 5.97).

Таблица 5.97. Механические свойства полимеров [8, 15, 47]

Полимер	$\gamma, \text{т/м}^3$	E, ГПа	$\sigma, \text{МПа, при}$		HB	$\delta, \%$
			растяжения	сжатия		
<i>Высокопластичные полимеры</i>						
Полиэтилен:						
высокого давления	0,900–0,939	0,14–0,25	10–17	12	1,4–2,5	400–600
низкого давления	0,948–0,959	0,60–0,85	20–45	20–33	4,5–6,0	300–800
среднего давления	0,950–0,976	0,80–1,25	18–40	–	6,0–8,0	200–1300
Полипропилен	0,90–0,91	0,67–1,23	25–40	50–70	4,0–7,0	200–800
Политетрафторэтилен:						
фторопласт-3	2,09–2,16	1,16–1,50* ¹	35–45	56–60	1,0–1,3	–
фторопласт-4	2,15–2,22	0,47–0,85* ¹	14–35	10–12	3,0–4,0	250–500
фторопласт-4Д	2,21–2,26	0,45–0,85* ¹	12–23	12	3,0–4,0	100–330
фторопласт-4М	2,14–2,16	0,55–0,60* ¹	16–31	20	3,0–4,0	250–400
фторопласт-40	1,65–1,70	0,8–1,0* ¹	27–50	–	5,8–6,3	150–400
фторопласт-42	1,91–2,00	0,4–0,8* ¹	25–50	–	–	250–500
фторопласт-4НА	2,0–2,1	0,4* ¹	15–30	–	3,0–3,5	200–450
<i>Полимеры повышенной жесткости</i>						
Полистирол	1,05–1,10	3,0	35–45	80–100	14–16	1,5–3,0
Полиметиленаксид:						
гомополимер	1,43	0,29	68–71	110–130	15–18	–
сополимер	1,39–1,41	2,2–3,0	65–70	105–145	10–13	15–20
Полифениленаксид:						
арилкокс-100	1,06	–	60	40	16,5	3
РРО (США)	1,06	2,5	74	106	–	20–40
норил (США)	1,06	2,3	61	113	–	20–30

Полимер	γ , г/м ³	E, ГПа	σ _в , МПа, при			НВ	δ, %
			растяжении	сжатии	изгибе		
Полиэтилентерефталат	1,34-1,41	3,0	60-70	80-100	80-150	9-12	4-20
Поликарбонат	1,20	2,4-2,8	57-70	80-90	90-100	11-16	50-100
Полиакрилат U-1060 (Япония)	1,11-1,21	1,88	75	96	-	20-25	62
Полиоксибензоат:							
эксел I-2000 (США)	1,40-1,45	2,55	99	127	120	-	8
эксел С-1000 (США)	1,40-1,45	1,33	70	140	106	-	7-9
эконол Р-300 (США)	1,40-1,45	7,2	-	-	75	-	-
<i>Высокопрочные и высокоэластичные полимеры</i>							
Полиимид:	1,33-1,41	3,0-3,6 ^{*2}	120-140	200-230	180-240	18-28	9-20
ПМ-67		-	95-125	210-240	180-230	20-27	4-7
ПМ-69		3,2	120	-	-	-	20-30
ДФО		1,32	120	210	202	-	10
2080 (США)		3,2-3,4	51	-	70-80	-	1,4
Р13N (США)		3,77	106	-	-	-	9,0
NR-150 (США)							
Полиамид алифатический:	1,09-1,14						
найлон-6		1,2-1,5	55-77	77-85	85-100	10-12	100-150
найлон-6Л литевой		1,5-1,7	50-60	70-90	45-70	10-15	100-150
П-12Л литевой		1,6-1,8	40-55	60-63	55-65	7,5	200-280
капролон В		2,0-2,3	90-95	100-110	120-150	13-15	6-20
Полиамид ароматический:	1,35						
фенилон П		3,0-3,2 ^{*2}	90	320	120	18-22	4
фенилон С1		3,0-3,2 ^{*2}	100	220	150	18	5
фенилон С2		3,0-3,2 ^{*2}	120	220	200	22	6

*1 При изгибе. *2 При сжатии.

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 нетоксичный материал с высоким сопротивлением усталости при динамических знакопеременных нагрузках; обладает высокой износостойкостью и низкой ползучестью. Полиэтилентерефталат (лавсан) отличается низкой гигроскопичностью, низким коэффициентом трения, стабильностью свойств. Он устойчив к действию слабых кислот, эфиров, масел и жиров; не стоек в концентрированных кислотах и щелочах. Поликарбонат имеет стабильные механические свойства в интервале $-150\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, обладает низкой гигроскопичностью, стабильностью размеров и малой склонностью к ползучести под нагрузкой. Полиакрилат огнестоек, устойчив к длительному действию разбавленных кислот, износостоек при температурах до $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перспективен конструкционный полимер – полиоксibenзоат, обладающий термостойкостью до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, низким влагопоглощением, высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Высоким временным сопротивлением ($120\text{--}140\text{ МПа}$), высокими пластичностью и сопротивлением усталости, низкой ползучестью под нагрузкой обладают полиимид и полиамид (см. табл. 5.97). Полиимид в зависимости от строения главной полимерной цепи может быть линейным или трехмерным, а по строению мономерного звена – алифатическим, алициклическим или ароматическим. Наибольшее применение получил ароматический линейный полиимид.

Полиимидные пресс-порошки ПМ–67, ПМ–69 (Россия); 2080, P13N, NR–150 (США); кайнол (Франция) перерабатывают в изделия методом прямого или горячего прессования, литьем под давлением. Изделия из полиимида отличаются высокой стабильностью размеров, термостойкостью до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, низким коэффициентом трения и низкой ползучестью под нагрузкой.

Полиамид, как и полиимид, может быть алифатическим (капролон, найлон–6) и ароматическим [фенилон П, фенилон С1, фенилон С2 (Россия); номекс (США) и др.]. Для алифатического полиамида характерны высокое сопротивление усталости, истиранию и ударным нагрузкам, низкая гигроскопичность. Ароматический полиамид, имея резко выраженную температуру плавления, обладает стабильностью свойств при повышенных температурах. Он устойчив к действию органических растворителей, но растворяется в концентрированных кислотах и спиртах.

5.5.2. 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 $0,1\text{ мкм}$ в количестве $0,1\text{--}15\text{ \%}$ (об.). 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 формования и спекания проводят горячую пластическую деформацию с целью получения плотного, беспористого полуфабриката (лент, полос, профилей и т. д.).

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе алюминия. Наиболее распространенными соединениями, применяемыми в качестве упрочняющей фазы в дисперсно-упрочненных композиционных материалах (ДКМ) на основе алюминия и его сплавов, являются оксиды. Наибольшее распространение получили три марки ДКМ на основе алюминия: САП-1, САП-2 и САП-3, отличающиеся концентрацией оксидов (6–9, 9–13 и 13–17 % Al_2O_3). Зарубежными аналогами САП-1, САП-2 и САП-3 являются ISML-930, ISML-895 и ISML-865 соответственно.

Наряду с материалами типа САП разработаны ДКМ на основе системы Al–C, упрочняющей фазой в которых служит карбид алюминия Al_4C_3 [14]. Увеличение содержания Al_2O_3 и Al_4C_3 в этих материалах приводит к повышению прочности и снижению пластичности ДКМ.

Пределы длительной прочности ДКМ Al+3 % C при различных температурах приведены ниже, МПа:

$t, ^\circ C$	200	300	400	500
σ_1	230	140	110	70
σ_{10}	210	130	95	65
σ_{100}	190	120	80	60

При температурах 300–500 °С ДКМ на основе алюминия превосходят по прочности все промышленные алюминиевые сплавы (табл. 5.98) и отличаются высокими характеристиками длительной прочности и ползучести (табл. 5.99).

Таблица 5.98. Механические свойства ДКМ на основе алюминия

ДКМ	$t, ^\circ C$	$\sigma_{0,2}$	σ_b	$\delta, \%$	ДКМ	$t, ^\circ C$	$\sigma_{0,2}$	σ_b	$\delta, \%$
		МПа					МПа		
САП-1	20	200	290–310	7–9	ISML-895	20	215	310	10,5
	250	–	180–190	4–6		300	120	150	5,5
	350	–	140–150	3–4		400	100	110	2,5
	500	–	100	2,0		500	85	90	–
САП-2	20	230	320	4,0	ISML-865	20	265	380	7,0
	250	–	190	3,0		300	155	175	3,5
	350	–	150	2,0		400	120	130	2,0
	500	–	100	1,0		500	105	105	–
САП-3	20	340	400	3,0	Al + 1 % C	20	–	260	7,5
					400	–	110–120	7,0	
	250	–	240	1,5	Al + 2 % C	20	–	360	3,5
					400	–	145–160	4,5	
350	–	190	1,0	Al + 3 % C	20	430	450	4,2	
					400	–	145–160	4,5	
ISML-930	20	175	250	14,5	Al + 4 % C	20	–	470	3,5
						400	–	150–175	4,0
	300	95	110	8,5	Al + 5 % C	20	–	520	3,5
						400	–	180–200	2,0
400	75	85	4,5		20	–	520	3,5	
					400	–	180–200	2,0	
500	65	70	–		20	–	520	3,5	
					400	–	180–200	2,0	

Таблица 5.99. Пределы длительной прочности и ползучести ДКМ на основе алюминия, МПа

Марка ДКМ	$t, ^\circ\text{C}$	σ_{100}	σ_{1000}	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,5/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$	$\sigma_{100/1000}$
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	—

Поставляют ДКМ 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 ВеО и карбид Ве₂С. Временное сопротивление ДКМ на основе бериллия повышается с увеличением содержания ВеО; при этом эффективность упрочнения растет с увеличением температуры (табл. 5.100).

Таблица 5.100. Механические свойства ДКМ на основе бериллия

ВеО, % (об.)	$t, ^\circ\text{C}$	σ , МПа		$\delta, \%$	ВеО, % (об.)	$t, ^\circ\text{C}$	σ , МПа		$\delta, \%$	ВеО, % (об.)	$t, ^\circ\text{C}$	σ , МПа		$\delta, \%$
		$\sigma_{0,2}$	σ_s				$\sigma_{0,2}$	σ_s				$\sigma_{0,2}$	σ_s	
0,8	25	195	275	2	1,8	25	240	310	2	3,0	25	245	325	1
	400	145	245	14		400	175	240	4		400	210	325	7
	600	115	200	15		600	140	185	6,5		600	175	285	14,5

Сопротивление ползучести и длительная прочность ДКМ, упрочненных оксидом ВеО, при повышенных температурах сравнительно невелики. Применение карбида бериллия Ве₂С в качестве упрочняющей фазы позволяет повысить 100-часовую прочность бериллия при 650 °С в 3 раза, а при 730 °С – более чем в 5 раз [29]. Ниже приведены пределы длительной прочности бериллия (числитель) и ДКМ Ве + 2,5 % (об.) Ве₂С (знаменатель), МПа:

	650°С	730°С
σ_1	46/70	14/45
σ_{10}	30/55	9/35
σ_{100}	14/40	4/25

Благодаря высокому коэффициенту рассеяния нейтронов, высокому модулю упругости и низкой плотности ДКМ на основе бериллия является перспективным материалом в реакторостроении, 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 % (об.). Дальнейшее повышение содержания MgO практически не меняет временное сопротивление ДКМ, но существенно снижает его пластичность (табл. 5.101).

Таблица 5.101. Механические свойства ДКМ на основе магния

MgO, % (об.)	t, °C	$\sigma_{0,2}$	σ_b	$\delta, \%$	MgO, % (об.)	t, °C	$\sigma_{0,2}$	σ_b	$\delta, \%$
		МПа					МПа		
0,3	20	—	270	—	1,0	450	16–18	25–30	9
1,0	20	250–260	285–300	8	1,0	500	—	15–20	10–12
1,0	400	—	50–60	9	2,0	20	—	270	—

ДКМ на основе магния обладают низкой плотностью, высокой длительной прочностью и высоким сопротивлением ползучести при нагреве. Ниже приведены предел длительной прочности и скорость ползучести v_n ДКМ Mg + 1 % (об.) MgO при 450 °C и 500 °C:

	450 °C	500 °C
$\sigma_{100}, \text{МПа}$	—	10
$v_n, \%$ /ч	0,9/60	8/300

* В числителе – при $\sigma=5$ МПа, в знаменателе – при $\sigma=10$ МПа.

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 используют оксиды ThO₂ и HfO₂. Оксид тория ThO₂ в количестве до 2 % (об.) наиболее эффективен для упрочнения никеля и нихрома (ДКМ ВДУ–1, ТД-никель, DS-никель, TD-нихром). Из-за токсичности ThO₂ его часто заменяют оксидом гафния HfO₂ в ДКМ ВДУ–2 (Ni + 2 % (об.) HfO₂), что приводит к существенному снижению жаропрочности.

ДКМ на основе никеля предназначены в основном для работы при температурах выше 1000 °C. Характеристики длительной прочности (табл. 5.102) при этих температурах выше у ДКМ с матрицей из нелегированного никеля, однако до 800 °C более высоким временным сопротивлением обладают ДКМ на основе никелевых сплавов типа TD-нихром (Ni + 20 % Cr, упрочненный 2 % (об.) ThO₂) (табл. 5.103).

Таблица 5.102. Пределы длительной прочности ДКМ на основе никеля, МПа

t, °C	σ_{10}		σ_{100}		σ_{1000}	
	ВДУ-1	ВДУ-2	ВДУ-1	ВДУ-2	ВДУ-1	ВДУ-2
900	—	—	115/150	95/105	105/140	85/95
1000	—	78/95	95/125	75/90	85/120	65/80
1100	78/108	62/75	75/105	55/70	65/100	45/65
1200	67/88	42/60	50/75	35/55	50/65	25/40

Примечание. В числителе – для листов, в знаменателе – для прутков.

Таблица 5.103. Механические свойства ДКМ на основе никеля и его сплавов

ДКМ	t, °C	$\sigma_{0,2}$	σ_s	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
ТД-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

ДКМ на основе никеля и его сплавов применяют 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 упрочняют оксидом тория ThO_2 , содержание которого находится в пределах 2–4 % (об.).

При температурах ниже температуры полиморфного превращения (470 °C) 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, временное сопротивление и предел длительной прочности (табл. 5.104, 5.105). При легировании хромом и никелем существенно возрастает жаростойкость кобальта, что позволяет использовать ДКМ на его основе при температурах до 1100 °C.

Таблица 5.104. Механические свойства ДКМ на основе кобальта

Химический состав матрицы, % (мас.)	ThO_2 , % (об.)	t, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Химический состав матрицы, % (мас.)	ThO_2 , % (об.)	t, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
100 Со	2	25	960	8	99,8 Со; 0,2 Zr	2	25	1020	13
	2	780	170	16		2	780	250	24
	2	1090	85	9		2	1090	140	13

Химический состав матрицы, % (мас.)	ThO ₂ , % (об.)	t, °C	σ _р , МПа	δ, %	Химический состав матрицы, % (мас.)	ThO ₂ , % (об.)	t, °C	σ _р , МПа	δ, %
62 Co; 20 Ni; 18 Cr	2	25	1037	13	75 Co; 15 Ni; 10 Mo	4	780	580	—
	2	1090	158	14		4	1090	154	—
	4	1090	191	—	70 Co; 15 Ni; 15 Mo	4	780	731	—
58 Co; 20 Ni; 22 Cr	4	780	465	—	60 Co; 10 Ni; 20 Cr; 10 W	4	1090	128	—
	4	1090	163	—		4	780	698	—
50 Co; 20 Ni; 30 Cr	4	780	585	—		4	1090	137	—
	4	1090	138	—					

ДКМ на основе кобальта и его сплавов применяют 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 используют оксид магния MgO или оксид тория ThO₂. ДКМ на основе сплава Cr + 0,5 Ti, упрочненный 6 % (об.) MgO, называется хром-30; на основе сплава Cr + 2,5 V + 0,5 Si, упрочненный 3 % (об.) MgO – хром-90, а на основе Cr + 2,5 V + 1 Si + 0,5 Ti + 2 Ta + 0,5 C, упрочненный 3 % (об.) MgO – хром-90 S.

Основное назначение ДКМ на основе хрома – конструкционный материал для деталей, работающих при высоких температурах в окислительной среде (табл. 5.106).

Таблица 5.105. Предел длительной прочности ДКМ на основе кобальта

Химический состав матрицы, % (мас.)	ThO ₂ , % (об.)	t, °C	σ ₁₀₀ , МПа
99,8 Co; 0,2 Zr	2	1090	100–110
61,8 Co; 20 Ni; 18 Cr; 0,2 Zr	2	780	200
	2	1090	70–80
	4	1090	80–90

Таблица 5.106. Механические свойства ДКМ хром-30

t, °C	σ _р , МПа	δ, %
20	340	15–20
300	265	—
650	245	—
980	125	30–40
1370	33	—

Высокая эрозийная стойкость этих ДКМ под действием мощных тепловых потоков делает их перспективными материалами для сопел плазмотронов.

Пределы длительной прочности трех ДКМ на основе хрома приведены ниже, МПа:

	930°С	980°С	1090°С
Хром-30	35	25	17,5
Хром-90	56	17,5	—
Хром-90S	195	56	—

5.5.3. Эвтектические композиционные материалы

Эвтектическими композиционными материалами (ЭКМ) называются сплавы эвтектического или близкого к нему 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 ЭКМ, создаваемая естественным путем, а не в результате искусственного введения армирующей фазы в матрицу, обладает высокой прочностью, термической стабильностью до температур, близких к температуре плавления эвтектики, и лишена многих недостатков, связанных с химической совместимостью между матрицей и упрочняющей фазой искусственных композиционных материалов. Изделия из ЭКМ получают за одну операцию, исключая трудоемкие процессы изготовления армирующих волокон, введение и ориентацию их в матрице.

К недостаткам ЭКМ можно отнести повышенные требования к чистоте исходных материалов, зависимость свойств от скорости процесса направленной кристаллизации и ограниченную возможность изменения объемного содержания армирующей фазы, которое определяется в основном диаграммой состояния системы.

Выбор ЭКМ заключается в подборе матричной основы, которая удовлетворяет заданной плотности, температуре эксплуатации, коррозионной стойкости и другим свойствам эвтектики, обеспечивающей необходимую прочность.

Эвтектические композиционные материалы на основе алюминия. ЭКМ на основе алюминия получают в основном методом направленной кристаллизации (методом Бриджмена).

Прочность ЭКМ зависит от скорости кристаллизации $v_{кр}$ (табл. 5.107) и ориентации армирующей фазы по отношению к направлению приложения нагрузки.

Влияние угла ориентации волокнистой фазы на механические свойства ЭКМ Al–Al₃Ni характеризуют следующие данные [15]:

θ , град	0	25	45	90
σ_B , МПа	335	100	75	40
δ , %	2,3	16,5	48	14

Таблица 5.107. Механические свойства ЭКМ на основе алюминия [14]

ЭКМ	$v_{кр}$, 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*	4–20

* После закалки.

Угол ориентации пластинчатой фазы также влияет на прочность при изгибе ЭКМ Al-CuAl₂ [15]:

θ , град	0	30°	45°	75	90
$\sigma_{\text{в}}^{\text{изг}}$, МПа	330	230	195	145	140
$f_{\text{пр}}$, мм	0,4	1,5	1,5	0,2	0,15

* Образец не разрушился.

Таким образом наибольшая прочность и минимальное удлинение наблюдаются при растяжении образцов ЭКМ Al-Al₃Ni вдоль волокон ($\theta = 0^\circ$), а минимальная прочность и максимальное удлинение – под углом 45°. В ЭКМ Al-CuAl₂ с пластинчатой формой армирующей фазы CuAl₂ максимальный прогиб $f_{\text{пр}}$ при ориентации пластинок под углом 30–45°.

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 227 °С, у ЭКМ Al-CuAl₂ многократно возрастает относительное удлинение. Механические свойства ЭКМ Al-Al₃Ni (числитель) и Al-CuAl₂ (знаменатель) при повышенных температурах приведены ниже [15]:

t , °С	20	100	200	300	400	500
$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\frac{375}{270}$	$\frac{295}{270}$	$\frac{240}{220}$	$\frac{180}{120}$	$\frac{120}{70}$	$\frac{75}{30}$
δ , %	$\frac{2,3}{0,7}$	$\frac{-}{3-6}$	$\frac{-}{6-8}$	$\frac{-}{50}$	$\frac{-}{110}$	$\frac{-}{185}$

Кроме того, ЭКМ Al-Al₃Ni и Al-CuAl₂ обладают высокой стабильностью структуры при повышенных температурах. Волокна Al₃Ni не укорачиваются и не подвергаются сфероидизации при нагреве до 611 °С.

ЭКМ на основе алюминия обрабатываются холодной пластической деформацией и хорошо свариваются методом диффузионной сварки. Их применяют 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. Никелевые и кобальтовые ЭКМ получают методом направленной кристаллизации или методом зонной плавки. Они являются жаропрочными материалами. В зависимости от поведения при растяжении их делят на две группы: хрупкие и пластичные. Хрупкими, например, являются никелевые пластинчатые ЭКМ с количеством упрочнителя более 33–35 % (об.). К пластичным относятся волокнистые ЭКМ с содержанием упрочнителя 3–15 % (об.). Это, например, сплавы никеля и кобальта, упрочненные монокарбидами тантала, ниобия, гафния.

Физико-механические свойства никелевых и кобальтовых ЭКМ представлены в табл. 5.108 [40].

Таблица 5.108. Свойства никелевых и кобальтовых ЭКМ

Матрица	Упрочнитель, % (об.)	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{т/м}^3$	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_p, \text{МПа}$	$\delta, \%$
Ni	38–40 NiBe	1157	–	215	918	9,0
	26 Ni Nb	1270	8,8	–	745	12,4
	23 Cr	1345	8,0	–	718	29,8
	50 NiMo	1315	9,5	–	1250	1
	29 Ni ₃ Ti	1300	8,2	–	–	1
	6 W	1500	–	–	830	45
	5,5 TiC	1307	–	–	–	–
	15–28 HfC	1260	–	–	–	–
	11 NbC	1328	8,8	–	890	9,5
	~ 10 TaC	–	–	–	–	–
	Ni–Cr	11 NbC	1320	–	–	–
30 (Cr, Ni) ₇ C ₃		1305	–	200–290	685–960	2–11
Ni–Co–Cr–Al	~ 9 TaC	–	8,8	–	1650	5
Ni ₃ –Al	44 Ni ₃ Nb	1280	8,44	242	1240	0,8
	32 Ni ₃ Nb	1280	–	–	1230	2,0
	~ 65 Ni ₃ Ta	1360	10,8	–	930	1
	42 Ni ₇ Zr ₂	1192	–	–	–	–
	26 Mo	1306	8,18	138	1120	21
	34 Cr	1450–1455	6,4	182	1240	1
Ni–Ni ₃ Al	Ni ₃ Nb	1270	–	–	1140	2,3
	Ni ₃ Ta	1360	–	–	1060	5
Co	35 CoAl	1400	–	172	500–585	6
	23 CoBe	1120	–	–	–	–
	~ 50 Co ₃ Nb	1235	–	–	–	–
	35 Co ₂ Ta	1276	–	–	–	–
	23 Co ₇ W ₆	1480	–	–	750	<1
	16TiC	1360	–	–	–	–
	15 HfC	–	–	–	–	–
	20 VC	–	–	–	–	–
	12 NbC	1365	8,8	–	1030	2
	16 TaC	1402	9,1	222	1035	11,8
Co–Cr	12 NbC	1340	–	–	1280	2
	~ 9 TaC	1360	9,0	210	1035–1160	16–20
	30 (Cr, Co) ₇ C ₃	1304	8,0	296	1280–1380	1,5
	40 (Cr, Co) ₂₃ C ₆	1340	7,91	276	1200	0,96
Co–Cr–Al	28 (Cr, Co) ₇ C ₃	1295	7,8	283	1730–2011	2,5–1,0

Высокие механические свойства волокнистых ЭКМ на основе никеля и кобальта, упрочненных карбидами, объясняются композиционной структурой, при которой пластичная матрица армирована высокопрочными ориентированными кристаллами. Допол-

нительное увеличение прочности этих ЭКМ достигается легированием твердого раствора матрицы или ее дисперсным упрочнением.

Пластинчатые ЭКМ, по сравнению с волокнистыми, 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. 5.109, 5.110) [40].

Таблица 5.109. Временное сопротивление волокнистых никелевых и кобальтовых ЭКМ в зависимости от температуры [40]

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$
<i>Ni-NbC</i>		<i>(Ni-Co-Cr-Al)-TaC</i>		<i>(Co-Cr)-TaC</i>		<i>(Co-Cr)-(Cr, Co)₇C₃</i>	
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				
<i>NiAl-Cr</i>		<i>Ni₃Al-Ni₃Ta</i>		<i>(Co-Cr-Ni)-TaC</i>		<i>(Co-Cr-Al)-(Cr, Co)₇C₃</i>	
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

Таблица 5.110. Временное сопротивление пластинчатых никелевых ЭКМ в зависимости от температуры [40]

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$
<i>Ni-NiMo</i>		<i>Ni-Ni₃Nb</i>		<i>Ni₃Al-Ni₃Nb</i>		<i>Ni-Ni₃Ti</i>	
20	1250	20	840	200	1100	20	940
200	1190	200	780	400	1030	800	540
400	1140	400	700	600	1000	900	320
600	1090	600	630	800	950	1000	130
800	1000	800	470	900	900		
900	800	900	350			<i>(Ni₃Al-Ni₃Ti)-Ni₃TiAl₂</i>	
1000	550	1000	250	1000	810	1100	270
1100	320	<i>Ni₃Al-Ni₃Nb</i>		1100	650	<i>Ni₃Al-Ni₇Zr₂</i>	
1200	140	20	1130	1200	300	1100	430

Пределы длительной прочности ряда ЭКМ на основе никеля и кобальта превышают пределы длительной прочности современных жаропрочных сплавов, особенно при температурах выше 900 °С (табл. 5.111) [14].

Таблица 5.111. Жаропрочность ЭКМ на основе никеля и кобальта [14]

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\tau, \text{ч}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\tau, \text{ч}$
<i>Ni₃Al–Ni₃Nb</i>			<i>(Co–Cr–Ni)–TaC</i>		
900	520	100	800	300	4000
1000	300	100	1070	120	1300
1100	140–150	100	1100	100	1200
<i>(Ni–Ni₃Al)–Ni₃Nb</i>			1150	100	100
800	670	100	<i>(Co–Cr)–(Cr,Co)₇C₃</i>		
900	450	100	1000 150–160 100		
1000	200	100			
1100	135	100	1100 70–80 100		
<i>(Ni–Co–Cr–Al–W–Re–V)–TaC</i>					
871	520	156	<i>(Co–Cr)–TaC</i>		
871	550	154	649	375	1000
982	310	125	760	350	1000
982	275	300	871	300	1000
1093	140	171	982	225	1000
1093	120	300	1050	160	403
<i>(Co–Cr)–TaC</i>			1093	140	1000
800	300	710	1250	55	100
1072	120	170			
1100	105	618			

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. На основе тантала и ниобия ЭКМ получают методом направленной кристаллизации. Если армирующая фаза в 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. 5.112) [15].

Таблица 5.112. Временное сопротивление ЭКМ Ta–Ta₂C и Nb–Nb₂C в зависимости от температуры [15]

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$
<i>Ta–Ta₂C</i>		1500	230	400	955	1300	470
20	1050	1600	180	600	870	1400	385
1100	390	1640	165	800	795	1500	290
1200	365	<i>Nb–Nb₂C</i>		1000	685	1600	170
1300	325	20	1070	1093	632	1649	128
1400	270	200	1025	1200	565		

Временное сопротивление ЭКМ Nb–Nb₂C при комнатной температуре в 5 раз выше, чем у ниобия, и благодаря термической стабильности сохраняется высоким при повышении температуры.

ЭКМ на основе тантала и ниобия используют для изготовления деталей самолетов и ракет, работающих при повышенных температурах (лопатки двигателей, защитные кромки).

5.5.4. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей

КМ с металлической матрицей имеют высокие значения прочностных характеристик, модулей упругости, ударной вязкости; эти материалы сохраняют стабильность своих характеристик в более широких температурных интервалах, чем полимерные КМ; они обладают также высокими тепло- и электропроводностью; им свойственна высокая технологичность. Прочность и жесткость металлических КМ определяется главным образом свойствами наполнителей, а также их видом (волокна или пластины; непрерывные или дискретные), объемным содержанием и ориентацией в матрице.

Роль матрицы в КМ заключается в придании ему необходимой формы и создании монолитного материала. Металлическая матрица обычно перераспределяет напряжения, возникающие между наполнителями, поглощает энергию удара благодаря пластической деформации, а также служит защитным покрытием, предохраняющим наполнитель от механических повреждений и окисления. Кроме того, тепло- и электропроводность металлических КМ зависят в основном от проводимости матрицы.

В соответствии с классификацией по методам изготовления, КМ с металлической матрицей подразделяют на материалы, полученные твердо- и жидкофазными методами, методами осаждения-напыления и комбинированными методами. К твердофазным методам относят горячее прессование, прокатку, волочение, ковку, штамповку, экструзию, сварку взрывом, диффузионную сварку и др. Для КМ, полученных твердофазными методами, характерно использование матрицы в виде порошка, листов, фольги, прутков и трубчатых заготовок. К жидкофазным методам относят пропитку арматуры расплавленными металлами, непрерывное литье, вакуумное всасывание. Металлические матрицы обладают высоким сопротивлением деформированию в твердофазном состоянии и хорошей реакционной способностью в жидкофазном, поэтому для компонентов этого типа весьма серьезны проблемы механической и химической совместимости. Для их решения требуются комплексные подходы, тщательная научная и практическая проработка процессов изготовления и эксплуатации.

При изготовлении КМ методами осаждения-напыления матрицу наносят на наполнитель осаждением (электролитическим или из парогазовой фазы) либо плазменным напылением. Комбинированные методы заключаются в последовательном применении нескольких методов. Например, плазменное напыление используют как предварительную операцию, а в качестве окончательной применяют прокатку.

Композиционные материалы на основе алюминия. КМ на основе алюминия и его сплавов предназначены главным образом для авиационной и космической техники, где высокая стоимость первоначальных разработок может окупаться за счет выигрыша в эксплуатационных характеристиках [14]. Изделия из КМ на основе алюминия могут работать при температурах до 450 °С (табл. 5.113, 5.114). В первую очередь это касается конструкций из Al-B/W, Al-(SiC/B)/W, Al-SiC/W, Al-SiO₂. Например, однонаправленный КМ, содержащий 50 % (об.) волокон бора, имеет предел длительной прочности $\sigma_{100}^{400} \approx 600 \dots 700$ МПа.

Таблица 5.113. Механические свойства КМ сплав 6061-B при повышенных температурах [14]

$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$
20	210–257/141	1100–1300/83–155
100	190–253/135	1000–1200/85–130
200	248/131	900–1150/83–112
300	189–240/126	850–1050/40–74
400	176–232/–	750–1000/–
500	225/–	650–950/–

Таблица 5.114. Прочностные свойства КМ Al-SiO₂, полученного горячим прессованием [14], МПа

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	σ_{-1} при $N=10^6$
20	770–840	127
100	820	127
200	780	127
300	730	98
400	470	98
500	390	98

Примечания: 1. Содержание волокон 50 % (об.). 2. В числителе приведены свойства при растяжении в направлении, параллельном оси волокна, в знаменателе – в перпендикулярном.

Примечание. Содержание волокон 50 % (об.).

Из КМ Al-B, Al-борсик (бор, покрытый SiC) изготавливают следующие детали самолетов: лопатки вентилятора и компрессора авиационных двигателей, обшивку, лонжероны, шпангоуты крыла, фюзеляжа и киля, стрингеры. Фирма «Мак-Доннэл Дуглас» (США) предлагает применять КМ Al-B в ребрах жесткости главного кессона крыла и деталях фюзеляжа орбитального летательного аппарата, а фирма «Норт Америкэн Роквелл» (США) – в герметичных кабинах экипажа и элементах жесткости панелей с солнечными батареями космического летательного аппарата, а также между ступенями баллистических ракет [2, 36, 45].

КМ сплав алюминия – стальная проволока наиболее перспективны для работы при низких температурах, поэтому их используют, например, при изготовлении баков для хранения жидкого кислорода. Технологические процессы производства полуфабрикатов приведены в табл. 5.115. Наряду с перечисленными в табл. 5.115, выпускают полуфабрикаты из КМ с алюминиевой матрицей, армированной вольфрамовой и молибденовой проволокой, для производства которых можно применять практически все известные твердо- и жидкофазные методы изготовления (чаще используют диффузионную сварку взрывом). При этом на границе волокно–матрица возможно образование интерметаллидов WAl_{12} , WAl_5 , WAl_4 и MoAl_5 , MoAl_3 , MoAl_2 . Свойства КМ на основе алюминия и его сплавов представлены в табл. 5.116–5.121.

Таблица 5.1/5. Технологические процессы производства полуфабрикатов из КМ с алюминиевой¹ матрицей, армированной волокнами [2, 14]

Материал волокна	Диаметр волокна, мм (содержание волокон, % (об.))	Вид матрицы	Метод изготовления	Режим изготовления				Технологическая среда	Получаемый полуфабрикат	Особенности процесса
				t, °C	P, МПа (Δ ² , %)	τ, мин				
Коррозионно-стойкая (12Х18Н10Т) или мартенситно-старящая (09Х13Н13М2) сталь (проволока)	100–150 (≤ 50)	Фольга, лента, лист, порошок	Горячее прессование	400–540	100	20–60 (выдержка)	Вакуум или контролируемая атмосфера	Листы, плиты, прутки, трубы, профили	Для производства прутков, труб и профилей применяют изостатическое прессование в газостате или автоклаве	
	50–300 (≤ 60)	То же	Динамическое горячее прессование	400–580	–	8–10 (нагрев)	Вакуум или воздух	Листы, плиты	–	
	50–500 (≤ 50)	»	Профильная прокатка	400–450	(40–60)	–	–	Фольги, ленты, листы, профили	Процесс заключается в сборке пакета, состоящего из чередующихся слоев матрицы и волокон, его герметизации, нагреве и деформировании при прокатке	
	50–500 (≤ 30)	»	Поперечная прокатка	380–450	(70–81)	–	–	Фольги, ленты, листы	Обычно в КМ содержится 5–15 % (об.)	
	≥ 100 (≤ 50)	Фольга, лист, плита, труба, порошок	Сварка взрывом	–	–	–	–	Листы, плиты, трубы, оболочки	–	

Материал волокна	Диаметр волокна, мкм (содержание волокна, % (об.))	Вид матрицы	Метод изготовления	Режим изготовления			Технологическая среда	Получаемый полуфабрикат	Особенности процесса
				t, °C	P, МПа (Δ, %)	τ, мин			
Коррозионно-стойкая (12X18H10T) или мартенситно-старенная (09X13H13M2) сталь (проволока)	≥ 100 (≤ 50)	Расплав	Пропитка волокон	≈ 700	-	-	Вакуум или кон-тролируе-мая атмос-фера	-	На границе раздела волокну -- матрица обра-зуются интерметаллиды типа Fe ₂ Al ₃ , FeAl ₃ со-ответственно. Для пре-дотвращения взаимо-действия стальных про-волокон с расплавом алю-миния на них наносят покрытие
Высокоуглероди-стая (У8А) или низколегирован-ная (50ХГ) сталь (проволока)	50-300 (≤ 60)	Фольга, лента, лист, порошок	Динами-ческое го-рячее прес-сование	400-580	-	8-10 (нагрев)	Вакуум или воздух	Листы, плиты	-
	≥ 100 (≤ 50)	Фольга, лист, плита, труба, порошок	Сварка взрывом	-	-	-	-	Листы, плиты, трубы, оболочки	-
Бериллий (проволока)	-	-	Диффузи-онная сварка	507-536	50-70	5-90	Вакуум или кон-тролируе-мая атмос-фера	Листы, плиты, профили (например, уголки)	Аналогичные полу-фабрикаты получают при сварке взрывом, σ _в км = 231 МПа

Материал волокна	Диаметр волокна, мкм (содержание волокон, % (об.))	Вид матрицы	Метод изготовления	Режим изготовления			Технологическая среда	Получаемый полуфабрикат	Особенности процесса
				t, °C	P, МПа (Δ, %)	τ, мин			
Бор, борсик	92–98 для В/В (СНГ) и 104–107 для (SiC/B)/W (США) (≤ 60)	Фольга, лист, порошок	Горячее прессование	480–560	–	–	–	Монослои, листы, стержни	Использование волокон борсика и волокон бора, покрытых нитридом бора, позволяет значительно повысить температуру прессования и сократить время процесса, а также обеспечивает получение беспористого материала с высокой прочностью связи
				600–650	–	–	–	Монослои, листы, балки	При поперечной прокатке в получаемых КМ объемное содержание волокон ≤ 25 %
	92–98 для В/В (СНГ) и 104–107 для (SiC/B)/W (США) (≤ 60)	Фольга, порошок или про-волока (если матрицу наноразмерным напылением)	Диффузионная сварка, осуществляемая в две стадии	450–500	35–50	30–60	Вакуум до $6 \cdot 10^{-3}$ МПа, контролируемая атмосфера или воздух	Монослои (обычно односторонне-армированные), листы, плиты, трубы, профили (например, уголки)	До сварки проводят уплотнение пакета-заготовки в пресс-форме, камере с контролируемой атмосферой, газостате или автоклаве

Материал волокна	Диаметр волокна, мкм (содержание волокон, % (об.))	Вид матрицы	Метод изготовления	Режим изготовления			Технологическая среда	Получаемый полуфабрикат	Особенности процесса							
				t, °C	P, МПа (Δ, %)	τ, мин										
Бор, бор-бор-сик	92-98 для В/В (СНГ) и 104-107 для (SiC/B)/W (США) (≤ 60)	Расплав	Пропитка	≈ 700	-	-	Вакуум	Прутки, стержни	При t > 560 °C на границе раздела Al-B/W ³ образуется слой AlB ₂ , поэтому при изготовлении КМ применяют волокна (SiC/B)/W, (BN/B)/W. После плазменного напыления часто проводят уплотнение полуфабриката в результате горячего или горячего изостатического прессования							
										»	Неравное литье	-	-	-	Монослон, прутки, трубы, уголки	
	Проволока, порошок	Плазменное пыление	-	-	Аргон	Монослон										
							92-98 для В/В (СНГ) и 104-107 для (SiC/B)/W (США) (≤ 60)									
Углерод	(≤ 60)	Фольга, лист, порошок	Горячее прессование	550	60	30	-	Монослон, листы, про- филь (на- пример, уголки)	На границе волокно - матрица можно образование карбидной фазы Al ₄ C ₃ . В целях предотвращения взаимодействия матрицы с углеродными волокнами проводят никелирование, меднение или серебрение последних. Скорость электроосаждения ≤ 0,04 мкм/с. Покрывает толщиной 0,1-0,5 мкм наносят за 3-5 мин, а толщиной до 3 мкм - за 9-12 мин							
										То же	Прокатка	Температура соли- дуса мат- рицы	-	-	-	Фольги, ленты, листы, плиты

Материал волокна	Диаметр волокна, мкм (содержание волокон, % (об.))	Вид матрицы	Метод изготовления	Режим изготовления			Технологическая среда	Получаемый полуфабрикат	Особенности процесса
				t, °C	P, МПа (Δ, %)	τ, мин			
Углерод	(≤ 60)	Расплав	Электrolитическое осаждение	20	-	-	Электrolит (плотность тока 10 А/м ²)	Однонаправленно-армированные монослои (монослои уплотняют горячим прессованием)	После металлизации прочность и жесткость волокон не изменяются
				350-520	5-20	45-90			
Диоксид кремния	(≤ 60)	Порошок	Горячее прессование	700-720	-	0,5-1	-	Прутки, трубки	При производстве полуфабрикатов используют также протягивание волокон через расплав алюминия (метод непрерывного литья) с последующим горячим прессованием
				452-580	0,5-0,7	-	Листы, стержни, профили	-	
Нитридные кристаллы оксида алюминия (Al ₂ O ₃) и карбида кремния (SiC)	0,51-11,0 (США)	Порошок	Горячее прессование	377-482	-	-	-	То же	Проводят после горячего прессования
				≈20	-	-	-	Прутки, трубки	Добавляют пластификатор
				550-580	40-65	30-60	-	-	Проводят после экструзии
				> 700	-	-	Вакуум	Прутки, трубки	Основной метод изготовления

*¹ Алюминий или его сплавы. *² Степень обжигания. *³ Волокна получены осаждением из газовой фазы бора и карбида кремния на вольфрамовую проволоку диаметром 12,5 мкм.

Таблица 5.116. Временное сопротивление КМ сплав алюминия – сталь (12Х18Н9Т или 12Х18Н10Т) при 20 °С [14]

Матрица (марка сплава)	Содержание стальной проволоки, % (об.)	σ_b , МПа	Особенности КМ
АМгб Д16 В95	10	459	КМ получены прокаткой; использовали проволоку 12Х18Н9Т ($\sigma_b = 2000$ МПа)
	20	628	
	20	530	
	20	537	
В95 САП-1	20	690	КМ получены сваркой взрывом; применяли проволоку 12Х18Н10Т ($\sigma_b = 1750$ МПа)
	10	440	
	20	600	

Таблица 5.117. Временное сопротивление КМ сплав 6061 – В, полученного двухстадийной диффузионной сваркой [14]

Содержание волокон бора, % (об.)	Низкотемпературный режим сварки			σ_b , МПа
	t , °С	p , МПа	τ , мин	
22	454	50	60	670
	477	35	40	600
	500	50	30	490
40–42	454	50	60	1040
	477	35	40	1100
	500	50	30	–

Таблица 5.118. Механические свойства КМ сплав 6061 – бор с различной укладкой волокон [14]

Угол приложения нагрузки, град	Соотношение волокон по направлениям укладки, %	Содержание волокон бора, % (об.)	E , ГПа	σ_p , МПа, при		δ , %
				растяжении	сжатии	
<i>Укладка волокон однонаправленная</i>						
0	100/0	25	165	–	860	–
45	100/0	25	138	–	240	–
90	100/0	25	103	–	140	–
0	100/0	50	176–250	–	1160–1850	–
45	100/0	50	117	–	270	–
90	100/0	50	100–131	–	170–340	–
<i>Укладка волокон 0°/90°</i>						
0	100/0	50	182–211	1100–1140	–	0,6
0	80/20	50	147–196	680–1040	–	0,6–0,7
0	60/40	50	126–183	740–790	–	0,7
0	50/50	50	132–176	–	600–1000	–
0	40/60	50	–	330–380	–	0,5
0	20/80	50	49–154	77–340	–	0,1–0,6
0	0/100	50	98	84–105	–	0,1
45	50/50	50	160	–	520	–
<i>Укладка волокон +45°/-45°</i>						
0	50/50	50	106	–	210	–

Примечание. Диаметр волокон бора 110 мкм.

Таблица 5.119. Предел выносливости КМ сплавов 6061 – В [14]

Содержание волокон бора, % (об.)	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{-1}, \text{МПа}$, при N циклов		
		10^5	10^6	10^7
25	20	480	430	–
47	20	690	620	550
47	250	600	400	240

Таблица 5.120. Механические свойства КМ Al – НК* [14]

НК	Содержание НК, % (об.)	Метод изготовления КМ	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$, при $t, ^\circ\text{C}$	
				20	500
Al ₂ O ₃	20	Вакуумная пропитка	126	420	210
	20	Горячее прессование с последующей прокаткой	122	380	–
SiC	23	Вакуумная пропитка	–	800	–
	23	Горячее прессование	–	380–440	200

* Нитевидный кристалл.

Таблица 5.121. Физические свойства КМ сплав АД1–сталь 12Х18Н10Т [14]

Содержание стальной проволоки, % (об.)	$\gamma, \text{т/м}^3$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$, в интервале температур, $^\circ\text{C}$				
		20–100	20–200	20–300	20–400	20–500
10	3,22	16,9–21,4	17,1–21,8	15,1–22,2	15,5–21,6	16,0–21,4
20	3,73	17,0–20,5	17,1–21,0	16,3–21,2	16,4–20,8	16,9–20,5
30	4,24	17,0–19,7	17,1–20,1	16,5–20,3	16,9–20,2	17,3–20,0
40	4,75	17,0–19,0	17,1–19,4	16,6–19,4	17,2–19,5	17,7–19,3
50	5,26	17,0–18,5	17,1–19,0	16,7–18,6	17,4–19,0	18,0–18,8

Примечание. КМ Al–В при содержании волокон бора 30 и 45 % (об.) имеет γ соответственно 2,67 и 2,66 т/м³ и α в интервале от 20 до 100 $^\circ\text{C}$ соответственно $10,2 \cdot 10^{-6}$ и $4,7 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$.

Композиционные материалы на основе магния, титана, никеля и меди. Особенностью КМ на основе магния является высокая термическая стабильность структуры и свойств вплоть до начала размягчения. Для армирования магния и сплавов на его основе в основном применяют волокна бора, карбида кремния, углеродные волокна, стальные, титановые и танталовые проволоки, с которыми магний и его сплавы практически не реагируют. Основными методами получения КМ на основе магния являются пропитка, непрерывное литье и диффузионная сварка (табл. 5.122). Свойства КМ на основе магния даны в табл. 5.123–5.126.

Таблица 5.122. Технологические процессы производства полуфабрикатов из КМ с магниевой матрицей, армированной волокнами [14]

Материал волокна	Диаметр волокна, мм (со- держание во- локна, % (об.))	Вид матри- цы	Метод изготовления	Режим изготовления			Техно- логиче- ская среда	Получаемый полуфабри- кат	Особенности процесса
				t, °C	p, МПа	t, мин			
Коррозионно-стой- кая (07Х2117АН5) или углеродистая (У8А) сталь (прово- лок)	-	Рас- плав	Про- питка	700	-	3,5	Ваку- ум	-	В системе Mg-Fe взаимная растворимость отсутствует. Монослой КМ Mg - сталь полу- чают методом плазменного напыления по- рошка магния на стальные волокна. КМ Mg- сталь изготавливают также сваркой взрывом
		Моно- слой	Горячее прессо- вание	550-580	70-100	30-60	-	Пакеты из монослоев	
Сплав титана (про- волок)	100	Рас- плав	Пропит- ка, про- водимая в цен- трифуге	630-650	-	1	-	-	Взаимодействие в системе Mg-Ti не обна- ружено
Тантал (провооло- ка)	-	»	Пропит- ка	-	-	5	Ар- гон	-	Взаимодействие в системе Mg-Ta не обна- ружено
Бор	92-144 (10-75)	»	Пропит- ка	700-750	-	5	Ваку- ум	-	Магний практически не взаимодействует с бором в жидком состоянии, что позволяет получать КМ Mg-V/W методами пропит- ка и непрерывного литья
			Непре- рывное литье	-	-	-	-	Прутки, тру- бы, листы	
	92-144	Фоль- га	Горячее прессо- вание	525	70	60	Ар- гон	Монослой, пакеты из монослоев	-
	92-144 (20-50)	Моно- слой	Диффу- зионная сварка	350-600	35-150	-	-	Монослой, пакеты из монослоев	Монослой КМ Mg-V/W получают методом плазменного напыления порошка магния на борные волокна

Материал волокна	Диаметр волокна, мкм (содержание волокон, % (об.))	Вид матрицы	Метод изготовления	Режим изготовления			Технологическая среда	Получаемый полуфабрикат	Особенности процесса
				t, °C	P, МПа	τ, мин			
Карбид кремния	0,3–3 (90)	Расплавы	Пропитка	750	–	15–120	–	–	Взаимодействие в системе Mg–SiC не обнаружено. До пропитки хаотично ориентированных нитевидных кристаллов SiC подвергают дегазации в вакууме при 760–870 °C, 12 ч. Монослой KM Mg–SiC/W производит методом плазменного напыления порошка магния на непрерывные волокна SiC. KM Mg–нитевидные кристаллы SiC изготавливают методами непрерывного литья и горячего прессования
	100 (20–50)	Монослой	Диффузионная сварка	550–580	30–60	30–60	–	Монослой, пакеты из монослоев	
Углерод	(20–70)	Расплавы	Пропитка	–	0,5–1	Несколько минут	Инертный газ	–	Взаимодействие в системе Mg–C не обнаружено. Для улучшения смачиваемости расплавом углеродные волокна покрывают титаном (плазменным напылением) или никелем (электролитически). При горячем прессовании углеродные волокна покрывают слоем титана толщиной 2 мкм
	(10–11)	Порошок	Горячее прессование в присутствии жидкой фазы	670	275	10	Аргон	–	

* Магний и сплавы на его основе.

Таблица 5.123. Свойства КМ Mg–сталь и (Mg+Li) – сталь [14]

Состав матрицы, % (мас.)	Упрочнитель	Содержание проволоки в КМ, % (об.)	Метод получения КМ	E, ГПа	σ_b , МПа, при t , °C		δ , %	γ , т/м ³
					20	400		
Mg (100 %)	07X21Г7АН5	33	Горячее прессование	91	1045	618	1,8	3,70
Mg (100 %)	07X2117АН5	48	То же	126	1433	998	1,4	4,10
Mg+8Li	У8А	16	Сварка взрывом	64	600	–	5,0	2,40

Примечание. Интервал рабочих температур КМ с матрицей из сплава Mg+8Li составляет от –70 до 200 °C.

Таблица 5.124. Механические свойства КМ Mg–Ta, полученного методом пропитки [14]

Содержание танталовой проволоки, % (об.)	E, ГПа	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %
		МПа		
10	–	110	63	7,70
17	70	170	99	11,50
28	81	208	148	14,00
32	90	221	184	13,50
40	91	257	199	15,70

Таблица 5.125. Механические свойства КМ Mg–B, полученного методом пропитки [14]

Содержание волокон бора, % (об.)	E, ГПа	σ_b , МПа	δ , %
10	59	155	0,43
14	83	213	–
19	110	312	0,42
28	119	545	0,30
30	200	950	–
50	215	1250	–
69	–	1400	–

Таблица 5.126. Свойства КМ Mg–B, полученного методом диффузионной сварки [14]

Содержание волокон бора, % (об.)	E, ГПа	σ_b , МПа, при t , °C		δ , %	γ , т/м ³
		20	400		
30	–	960	770	0,60	–
45*	220	1200–1300	800	0,50	2,20
48	219	1200	820	0,60	2,10

* КМ имеет $\sigma_{100}^{400} = 700$ МПа и $\sigma_{-1} = 600$ МПа при $N = 10$ циклов.

Механические свойства КМ Mg–B, полученного методом непрерывного литья, приведены ниже:

Содержание волокон бора, % (об.)	30	75
E, ГПа	220	330–340
σ_b , МПа	960	1300

Изделия из КМ на основе магния используют в аэрокосмической технике, ядерных реакторах [14, 36].

КМ на основе титана предназначены главным образом для изготовления лопаток вентилятора и створок регулируемого сопла газотурбинного двигателя [4, 36]. В качестве матрицы чаще всего используют сплав титана с алюминием и ванадием (Ti+6 % Al+4 % V). Для армирования в основном применяют волокна бора, борсика, карбида кремния, оксида алюминия, бериллиевую и молибденовую проволоки. Наиболее часто используют волокна борсика. Механические свойства КМ (Ti + 6 % Al + 4 % V)–борсик даны в табл. 5.127, 5.128.

Таблица 5.127. Влияние температуры процесса горячего прессования на механические свойства КМ (Ti + 6 % Al + 4 % V) – борсик [14]

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b^*, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b^*, \text{МПа}$	$\delta, \%$
760	1300/420	0,57	845	1240/460	0,55
790	1330/420	0,60	870	1050/420	0,45
815	1260/460	0,55	900	1000/420	0,43

Примечания: 1. Содержание волокон борсика 45... 50 % (об.). 2. Прессование проводили в оболочке из коррозионно-стойкой стали при $p = 84 \dots 170 \text{ МПа}$ в течение 15... 30 мин.

* В числителе – в направлении, параллельном оси волокон, а в знаменателе – в перпендикулярном.

Таблица 5.128. Механические свойства КМ (Ti + 6 % Al + 4 % V) – борсик [1]

Содержание волокон борсика в КМ, % (об.)	Диаметр волокна, мкм	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta, \%$
11	–	131	970	0,72
21	–	145–166	990–1240	0,64–0,73
27	–	179–193	1270	0,61
50	106	266	1150	0,50
50	145	266	1365	0,60

Предел выносливости однонаправленного КМ (Ti + 6 % Al + 4 % V)–борсик в зависимости от угла α между направлениями прилагаемой нагрузки и укладки волокон изменяется следующим образом:

$\alpha, \text{град}$	0	90
$\sigma_{-1}, \text{МПа, при числе циклов } N:$		
10^4	1090	380
10^7	415	210

КМ производят, комбинируя методы плазменного напыления, диффузионной сварки, прессования, экструзии, прокатки,ковки. Для решения проблемы совместимости волокон с матрицей применяют высокоскоростные методы (например, высокоскоростную сварку), обеспечивающие минимальную толщину реакционной зоны, или низкотемпературные процессы производства КМ на основе титана и его сплавов [4, 14].

КМ на основе никеля и его сплавов предназначены главным образом для изготовления тяжело нагруженных деталей газотурбинных двигателей: сопловых (статорных) и

рабочих (роторных) лопаток [4, 36, 45]. Армирование сплавов на основе никеля высокопрочными проволоками тугоплавких металлов и сплавов, керамическими и углеродными волокнами делает их более жаропрочными, чем суперсплавы. В основном КМ получают методами литья, вакуумного всасывания, горячего прессования, прокатки, диффузионной сварки, сварки взрывом.

Ударная вязкость КМ ХН78Т-В, полученного методом диффузионной сварки при 1180–1200°C в вакууме и содержащего 24 % (об.) вольфрамовой проволоки диаметром 500 мкм, в зависимости от режима ТО и температуры изменяется следующим образом, кДж/м²:

	20°C	1000°C
Без отжига	640	1110
После отжига при 1100°C в течение:		
50 ч	690	1130
500 ч	540	825

Примечание. Плотность КМ $\gamma_{\text{КМ}} = 11 \text{ т/м}^3$.

Ниже приведена зависимость прочностных свойств КМ Ni-Ториел-50, полученного методом изостатического прессования ($t = 1125^\circ\text{C}$, $p = 24,5 \text{ МПа}$, $\tau = 3 \dots 5 \text{ мин}$) покрытых никелем углеродных волокон, от температуры испытания [14]:

$t, ^\circ\text{C}$	20	539	660	1093	1204
$\sigma_b, \text{ МПа}$	670	536	397	265	106
$\sigma_b/(\rho g), \text{ км}$	12,65	10,10	7,49	5,00	2,00

Примечания: 1. Содержание углеродных волокон в КМ 50 % (об.).
2. Плотность КМ $\gamma_{\text{КМ}} = 5,3 \text{ т/м}^3$.

Механические свойства КМ ЖС6К-В приведены в табл. 5.129, а изменение коэффициента линейного расширения КМ ХН60ВТ-В – в табл. 5.130.

Таблица 5.129. Механические свойства КМ ЖС6К – В, полученного методом вакуумного всасывания [14]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_b/(\rho g), \text{ км}$	δ	ψ
	МПа			%	
20	580	–	4,60	0,80	6,50
1100	538	500	4,30	3,40	11,50
1200	385	365	3,10	7,40	26,00
1300	290	–	2,30	3,20	4,50

Примечания: 1. Содержание вольфрамовой проволоки 45 % (об.). 2. Плотность КМ $\gamma_{\text{КМ}} = 12,6 \text{ т/м}^3$.

**Таблица 5.130. Температурный коэффициент линейного расширения
КМ ХН60ВТ-В, полученного методом динамического
горячего прессования при 1000–2000 °С в вакууме [14]**

Содержание вольфрамовой проволоки, % (об.)	$\alpha \cdot 10^6, \text{C}^{-1}$, в интервале температур, °С									
	20–100	20–200	20–300	20–400	20–500	20–600	20–700	20–800	20–900	20–1000
18	7,90	8,61	9,52	9,91	10,01	10,50	11,0	10,70	9,88	8,90
25	5,33	7,68	8,34	8,88	8,97	9,43	9,64	9,18	8,43	7,78

Примечание. Плотность КМ $\gamma_{\text{КМ}}$ 12,4 т/м³.

При производстве и эксплуатации КМ на основе никеля и его сплавов должна быть решена проблема совместимости волокон с матрицей. Например, наиболее аффективно повышают структурную стабильность. КМ Ni–С диффузионные барьерные покрытия (ZrC, ZrN – 0,2...0,3 мкм; TiC – 0,1 мкм) на углеродных волокнах [14].

КМ на основе меди используют в электротехнике как заменители медных сплавов. Матрицу чаще всего армируют проволокой из тугоплавких металлов, стальной проволокой и углеродными волокнами. КМ получают методами пропитки, прессования, диффузионной сварки, сварки взрывом [14].

Механические свойства КМ на основе меди даны в табл. 5.131 и 5.132.

**Таблица 5.131. Механические свойства КМ Cu–W, полученного методом
динамического горячего прессования при 950–1000 °С [14]**

Содержание вольфрамовой проволоки, % (об.)	E , ГПа	σ_b , МПа	δ , %
8	107	280	15,40
14	122	360	–
25	151	410	12,30
33	–	400	12,90

Примечание. При 400 °С и 800 °С КМ имеет $\sigma_b=347$ МПа, $\delta=14,1$ % и $\sigma_b=162$ МПа, $\delta=18,3$ % соответственно.

**Таблица 5.132. Механические свойства КМ Cu–Ta, полученного методом
пропитки в вакууме при 1150 °С в течение 5 мин [14]**

Содержание танталовой проволоки, % (об.)	E , ГПа	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %
		МПа		
3,20	–	163	61	32,10
6,40	97	181	82	23,50
12,30	103	206	100	29,00
24,00	114	280	180	13,80
37,80	124	345	235	19,70

Список литературы

1. *Алюминиевые сплавы*/Под ред. В.И. Елагина, В.А. Ливанова. М.: Металлургия, 1984.
2. *Анциферов В.Н., Устинов В.С., Олесов Ю.Г.* Спеченные сплавы на основе титана. М.: Металлургия, 1984.
3. *Бериллий*. Наука и технология. М.: Металлургия, 1984.
4. *Волокнистые композиционные материалы*/Под ред. Дж. Уитона. Э. Скала; Пер. с англ. М.: Металлургия, 1988.
5. *Герчикова Н.С.* Тонкая структура и коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1982.
6. *Дриц М.Е., Рохлин Л.Л.* Магниево-титановые сплавы с особыми акустическими свойствами. М.: Металлургия, 1983.
7. *Дроздовский Б.А., Проходцева Л.В., Новосельцев Н.И.* Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983.
8. *Ильин А.А.* Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. М.: Наука, 1994.
9. *Кишкин С.Т., Строганов Г.Б., Лозунов А.В.* Структурная стабильность и ее влияние на механические свойства//Доклады АН СССР. 1983. Т. 268. № 4.
10. *Кишкина С.И.* Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1981.
11. *Колачев Б.А., Мальков А.В.* Физические основы разрушения титана. М.: Металлургия, 1983.
12. *Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981.
13. *Колачев Б.А., Габидулин Р.М., Пигусов Ю.В.* Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980.
14. *Композиционные материалы: Справочник*/Под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985.
15. *Конструкционные материалы: Справочник*/Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990.
16. *Легкие сплавы, содержащие литий*/М.Е. Дриц, Е.М. Падежнова, Л.Л. Рохлин и др. М.: Наука, 1982.
17. *Магниево-литиевые сплавы*/М.Е. Дриц, Ф.М. Елкин, И.Н. Гурьев, Б.И. Бондарев и др. М.: Металлургия, 1980.
18. *Магниево-титановые сплавы: Справочник*/Под ред. М.Б. Альтмана, М.Е. Дрица, М.А. Тимоновой, М.В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. Ч. 1.
19. *Магниево-алюминиевые сплавы: Справочник*/Под ред. И.И. Гурьева, М.В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. Ч. 2.
20. *Мальцев М.В.* Металлография тугоплавких, редких и радиоактивных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1971.
21. *Материаловедение*/Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.

22. *Металлография титана*/Е.А. Борисова, Г.А. Бочвар, М.Я. Брун, С.Г. Глазунов и др. М.: Металлургия, 1980.
23. *Моисеев В.Н., Поваров И.А., Каплин Ю.И.* Структура и свойства титановых сплавов после изотермического деформирования с малыми скоростями//МИТОМ. 1984. № 5.
24. *Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов*/С.Т. Кишкин, Г.Б. Строганов, А.В. Логунов и др.//Литейное производство. 1984. № 4.
25. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986.
26. *Папиров И.И.* Структура и свойства сплавов бериллия: Справочник. М.: Энергоиздат, 1981.
27. *Перспективные конструкционные материалы*//Техническая информация ЦАГИ. 1985. № 12.
28. *Полькин И.С.* Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. М.: Металлургия, 1984.
29. *Порошковая металлургия титановых сплавов*/Под ред. Ф. Фроуса, Д. Смучерекки. М.: Металлургия, 1985.
30. *Прогрессивные методы производства конструкционно-прочных отливок*. М.: МДНТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1987.
31. *Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник*/Под ред. Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1984.
32. *Рачев Х., Стефанов С.* Справочник по коррозии. М.: Мир, 1982.
33. *Рохлин Л.Л.* Магниеые сплавы, содержащие РЗМ. М.: Наука, 1980.
34. *Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В.* Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1974.
35. *Солонина О.П., Глазунов С.Г.* Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976.
36. *Стейнберг М.* Материалы для аэрокосмической техники//В мире науки. 1986. № 12.
37. *Строганов Г.Б.* Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1985.
38. *Структура и свойства композиционных материалов*/К.И. Портной, С.Е. Салибеков, И.А. Светлов, В.М. Чубаров. М.: Машиностроение, 1979.
39. *Титановые сплавы. Производство фасонных отливок из титановых сплавов*/Е.Л. Бибииков, С.Г. Глазунов, А.А. Неуструев и др. М.: Металлургия, 1983.
40. *Томсон Е.Р., Лемке Ф.Д.* Композиционные материалы с металлической матрицей/Под ред. К. Крейдера. М.: Машиностроение, 1978. Т. 4.
41. *Фавстов Ю.К., Шульга Ю.Н., Рахштадт А.Г.* Металловедение высокодемпфирующих сплавов. М.: Металлургия, 1980.
42. *Фридляндер И.Н.* Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1979.
43. *Фридляндер И.Н.* Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1980.
44. *Цвиккер У.* Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979.
45. *Цоу Ц., Мак-Каллоф Р., Пайнс Р.* Композиционные материалы//В мире науки. 1986. № 12.

46. Чечулин Б.Б., Утков С.С. Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1979.

47. Энциклопедия полимеров/Под ред. В.А. Каргина, В.А. Кабанова. М.: Советская энциклопедия, 1972–1977. Т. 1–3.

48. Banas R.P., Grousni E.R., Larsen W.T. Processing aspects of the Space Shuttle Orbiter's ceramic reusable surface insulation//Ceramic Eng. and Sci. Proc. 1983. V. 34. N 7–8.

49. 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. V. 34. N 7–8.

50. 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. V. 34. N 7–8.

6. МАТЕРИАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВНЕШНЕЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

Жаропрочные стали и сплавы используют во многих отраслях промышленности. Достижения в металлведении жаропрочных материалов в значительной степени определяет уровень развития энергомашиностроения, авиационной и ракетно-космической техники.

К жаропрочным относят стали аустенитного класса на хромоникелевой и хромоникельмарганцевой основах, способные работать при температурах выше 600 °С. Условно эти стали подразделяют на три подгруппы: гомогенные (однофазные) аустенитные стали, стали с карбидным и интерметаллидным упрочнением. В зависимости от металла основы различают жаропрочные сплавы на основе железа ($Fe < 50 \%$), никеля и кобальта. Особое место занимают сплавы на основе тугоплавких металлов.

Жаропрочные материалы работают при различных схемах нагружения, поэтому для них применяют разнообразные виды испытаний на жаропрочность. Основное место занимают испытания на кратковременную и длительную прочность. Для ряда сплавов важное значение имеют характеристики релаксационной стойкости, усталости и выносливости при различных схемах нагружения. Использование жаропрочных сплавов сдерживает их недостаточная пластичность, низкие технологические свойства. В этой связи важными являются также показатели пластичности, технологичность и трещиностойкость.

6.1. Коррозионно-стойкие материалы

Коррозионно-стойкие материалы подразделяют на две основные группы: металлические сплавы и неметаллические материалы.

6.1.1. Металлические сплавы

Металлические сплавы представляют собой двух- или многокомпонентные системы, обладающие стойкостью против общей или локальных видов коррозии, в том числе межкристаллитной, точечной, коррозионного растрескивания и др. (ГОСТ 9.908–85). Основой промышленных коррозионно-стойких сплавов являются железо (стали), титан, никель, медь, алюминий; в отдельных случаях применяют тугоплавкие и благородные металлы.

Коррозионно-стойкие стали. Это так называемые атмосферокоррозионно-стойкие низколегированные стали и собственно коррозионно-стойкие стали, применяемые для изготовления оборудования, работающего в контакте с агрессивными средами в химической промышленности и других отраслях техники.

Атмосферокоррозионно-стойкие представляют собой низколегированные стали (10ХНДП, 10ХДП, 10ХСНД, 15ХСНД и др.), содержащие медь, фосфор, хром, иногда мышьяк (табл. 6.1.). Толщина металлоконструкций из этих сталей за 20–30 лет работы снижается 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 – накоплением на поверхности благородного металла – меди. Для атмосферокоррозионно-стойких сталей характерна хорошая адгезия лакокрасочных покрытий, что в свою очередь продляет в 1,5–2,0 раза срок службы искусственных покрытий.

Таблица 6.1. Химический состав, толщина проката и свойства атмосферокоррозионно-стойких сталей

Марка стали	Содержание элементов, % (мас.)						Толщина проката, мм	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ , %	КСУ, МДж/м ²
	С	Мп	Si	Cr	Ni	Cu					
15ХСНД	0,12–0,18	0,4–0,7	0,4–0,7	0,6–0,9	0,3–0,6	0,2–0,4	4–32	520	350	18	0,30
10ХСНД	<0,12	0,5–0,8	0,8–1,1	0,6–0,9	0,5–0,8	0,4–0,65	4–32	540	400	16	0,30

Применение сталей 10ХДП и 10ХНДП без окраски рекомендовано в несущих и ограждающих металлических конструкциях, эксплуатируемых на открытом воздухе в сельской и промышленной атмосферах слабой агрессивности. Стали производят и поставляют в соответствии с ГОСТ 19281–89 и ГОСТ 6713–91.

Коррозионно-стойкие стали представляют собой большую группу высоколегированных материалов, включающих шесть структурных классов (табл. 6.2): аустенитный, ферритный, аустенитно-ферритный, мартенситный, аустенитно-мартенситный, ферритно-мартенситный (ГОСТ 5632–72); при этом независимо от класса стали содержат не менее 12 % Cr. При достижении данной концентрации хрома в сплавах на основе железа скачкообразно возрастает электрохимический потенциал и сталь переходит в категорию коррозионно-стойких. Важнейшим свойством КС сталей является наличие области пассивного состояния в определенном диапазоне потенциалов. Пассивация определяется как резкое уменьшение скорости коррозии вследствие торможения анодной реакции ионизации металла при образовании на его поверхности фазовых или адсорбционных слоев.

Причиной пассивности коррозионно-стойких сталей является образование на их поверхности химически стойкой пленки гидратированного оксида хрома и оксида хрома шпинельного типа.

Стали аустенитного класса по масштабам использования – наиболее важный класс коррозионно-стойких сталей. Их преимущества кроме коррозионной стойкости – высокая пластичность и вязкость. Эти стали имеют хорошую свариваемость и литейные свойства. Оптимальной термической обработкой для всех аустенитных сталей является закалка с 1050–1150 °С, после которой механические свойства характеризуются максимальной пластичностью и вязкостью, невысокими прочностью и твердостью. При холодной пластической деформации аустенитные стали интенсивно наклепываются. После деформирования на 70 % σ_s увеличивается в 2–3 раза, $\sigma_{0,2}$ – в 5–6 раз, а пластичность сохраняется на уровне $\delta = 8 \dots 12$ %. Недостатком аустенитных сталей является склонность к межкристаллитной коррозии, коррозионному растрескиванию и точечной коррозии.

Таблица 6.2. Механические свойства тонколистового (ГОСТ 5582-75) и сортового проката (5949-75) из коррозионно-стойких сталей

Марка стали	Вид полуфабриката	Режим обработки		Толщина, мм	$\sigma_{0,2}$	σ_s	δ , %	КСУ, МДж/м ²
		Операция	t, °C					
<i>Аустенитный класс</i>								
08X18H10	Лист тонкий	Закалка	1050-1080	Вода или воздух	0,7-3,9	205	45	-
		Закалка + нагартовка	1050-1080	То же	-	-	>930	10
08X18H10T	Сортовой прокат	Закалка	1020-1100	Воздух, масло или вода	До 60	196	40	-
		»	1050-1080	Вода или воздух	0,7-3,9	-	530	40
12X18H10T	Сортовой прокат	»	1020-1100	Воздух, масло или вода	До 60	196	40	-
		»	1050-1080	Вода или воздух	0,7-3,9	-	530	40
10X17H13M2T	Лист тонкий	»	1020-1100	Воздух, масло или вода	До 60	196	40	-
		»	1050-1080	Вода или воздух	0,7-3,9	225	530	38
10X14Г14Н4Г	Сортовой прокат	»	1050-1100	Воздух, масло или вода	До 60	215	40	-
		»	1050-1080	Вода или воздух	0,7-3,9	293	690	35
06XН28МДТ	Лист тонкий	»	1000-1080	Воздух, масло или вода	До 60	245	35	-
		»	1050-1080	Вода или воздух	0,7-3,9	-	540	35
<i>Ферритный класс</i>								
08X13	Лист тонкий	Отжиг или отпуск	740-780	-	0,7-3,9	-	21	-
		Закалка; отпуск	1000-1050; 700-800	Масло	До 60	410	590	20
08X17T	Сортовой прокат	Отжиг или отпуск	740-780	Воздух	0,7-3,9	-	20	-
		Отжиг	760-780	Воздух или вода	До 60	245	390	20
15X25T	Лист тонкий	Отжиг или отпуск	740-780	Вода	0,7-3,9	-	17	-
		Отжиг или без ТО	730-770	Воздух или вода	До 60	295	440	20

Марка стали	Вид полуфабриката	Режимы обработки		Толщина, мм	$\sigma_{0,2}$	σ_s		δ , %	КСУ, 2 МДж/м ²
		Операция	t , °С			Среды	МПа		
<i>Аустенитно-ферритный класс</i>									
08Х22Н6Т	Лист тонкий	Закалка	1050–1080	Вода или воздух	–	640	20	–	–
	Сортовой прокат	*	950–1050	Воздух или вода	345	590	20	–	–
08Х21Н6М2Т	Лист тонкий	*	1050–1080	Вода или воздух	–	590	22	–	–
	Сортовой прокат	*	950–1050	Воздух	345	590	25	–	–
<i>Мартенситный класс</i>									
20Х13	Лист тонкий	Отжиг или отпуск	740–800	–	–	490	20	–	–
	Сортовой прокат	Закалка; отпуск	1000–1050; 660–770	Воздух или масло; воздух, масло или вода	440	650	16	0,78	–
15Х11МФ	То же	Закалка; отпуск	1030–1060; 700–740	Масло	490	690	15	–	–
<i>Ферритно-мартенситный класс</i>									
12Х13	Лист тонкий	Отжиг или отпуск	740–780	–	–	440	21	–	–
	Сортовой прокат	Закалка; отпуск	1000–1050; 700–790	Воздух или масло; воздух	410	590	20	0,88	–
14Х17Н2	Лист тонкий	Закалка; отпуск	950–975; 275–350	Масло; воздух	–	1080	10	–	–
	Сортовой прокат	Закалка; отпуск	975–1040 275–350	Масло; воздух	835	1080	10	0,49	–
<i>Аустенитно-мартенситный класс</i>									
06Х12Н3А	Поковки, лист*	Закалка	950–970	*	До 300	690	12	0,59	–
13Х15Н4АМ3	Образцы	Закалка, обработка холодом (–70 °С); отпуск	1070	*	–	1500–1520	21	0,90	–

* По ТУ 108.1412–86.

Для уменьшения склонности к межкристаллитной коррозии аустенитные стали дополнительно легируют титаном и ниобием или уменьшают в них содержание углерода ниже 0,1 %. Коррозионное растрескивание появляется в результате одновременного действия активной среды и растягивающих напряжений. Аустенитные стали, содержащие более 30–40 % Ni, стойки к этому виду коррозии. Стойкость против питтинговой коррозии повышают дополнительным легированием 2–3 % Mo, уменьшением шероховатости поверхности, повышением структурной и химической однородности. Особую группу образуют безникелевые аустенитные стали 05X18A120, 05X21A120, 05X24A120, содержащие 18–24 % Cr и 1,0–1,3 % N. По уровню предела текучести эти стали в 3–4 раза превосходят закаленную хромоникелевую сталь 08X18H10.

Стали ферритного класса 08X13, 12X17, 08X17T, 15X25T, 15X28 содержат 0,08–0,15 % C и 15–30 % Cr. Они уступают аустенитным сталям по всему комплексу механических свойств за исключением сопротивления коррозионному растрескиванию. После нагрева выше 1000–1100 °C эти стали охрупчиваются, что затрудняет сварку. Для частичного уменьшения хрупкости сварные соединения необходимо подвергать отжигу при 750–800 °C с ускоренным охлаждением, чтобы не допустить охрупчивание. После высокотемпературного нагрева ферритные стали подвержены межкристаллитной коррозии. Существенного улучшения стойкости ферритных сталей к местным видам коррозии добиваются путем применения современных методов очистки от атомов внедрения и серы.

Стали мартенситного класса 20X13, 30X13, 40X13, 20X17H2, 95X18 в отожженном состоянии имеют удовлетворительную стойкость против коррозии, но их прочность невысока. Прочность увеличивается после закалки и отпуска. Закалку проводят с 1050–1100 °C для растворения карбида хрома. Максимальное сопротивление коррозии стали имеют после низкого отпуска (200–400 °C), пониженное, но тем не менее достаточно высокое – после высокого отпуска (400–600 °C).

Мартенситные стали используют для деталей и инструментов, подвергающихся воздействию слабоагрессивных сред: воды, влажного воздуха, разбавленных растворов кислот и солей. Азотсодержащие мартенситные стали типа 05X16H4AB упрочняют закалкой с 1000 °C. Отпуск при 400 °C вызывает дисперсионное твердение вследствие выделения мелких и равномерно распределенных нитридов. В отличие от карбидов они выводят из раствора меньше хрома, поэтому сталь 05X16H4AB при высокой прочности ($\sigma_s = 1500$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1365$ МПа) и пластичности ($\delta = 20$ %) обладает высокой коррозионной стойкостью.

Стали аустенитно-ферритного класса 08X22H6T, 08X21H6M6T, 08X18Г8H2T имеют практически равное содержание аустенита и феррита, которое обеспечивается закалкой с 1000–1100 °C. Они дешевле аустенитных, прочнее их в 1,5–2 раза, менее склонны к коррозионному растрескиванию.

Стали аустенитно-мартенситного класса 07X16H16, 09X15H9Ю, 08X17H5M3 по сравнению со сталями аустенитного класса имеют более высокую прочность, которая достигается сложной термической обработкой, включающей закалку для получения аустенита, обработку холодом при –70 °C для превращения аустенита в мартенсит и старения мартенсита при 350–500 °C. Обработка холодом может быть заменена пластическим деформированием, во время которого значительная часть аустенита превращается в мартенсит.

Таблица 6.3. Десятибалльная шкала коррозионной стойкости металлов

Группа стабильности	Скорость коррозии, мм/год	Балл
Совершенно стойкие	< 0,001	1
Весьма стойкие	0,001–0,005	2
	0,005–0,010	3
Стойкие	0,01–0,05	4
	0,05–0,10	5
Пониженно стойкие	0,1–0,5	6
	0,5–1,0	7
Малостойкие	1,0–5,0	8
	5,0–10	9
Нестойкие	> 10,0	10

К сталям КС примыкают сплавы на железоникелевой основе 06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ, 06ХН28МТ (ГОСТ 5 632–72), отличающиеся высокой стойкостью в серной и фосфорной кислотах, а также в ряде других агрессивных сред.

Мартенситно-старееющие стали 08Х15Н5Д2Т, 03Х12Н10Д2ТБ, 03Х11Н10М2Т и др. сочетают коррозионную стойкость с высоким уровнем механических и технологических свойств [3].

Коррозионную стойкость сталей и сплавов обычно оценивают по десятибалльной шкале (табл. 6.3). В табл. 6.4 и 6.5 указано назначение наиболее распространенных сталей этого типа и их коррозионная стойкость в некоторых агрессивных средах.

Таблица 6.4. Область применения коррозионно-стойких сталей (ГОСТ 5632–72)

Структурный класс	Марка стали	Область применения
Ферритный	08Х13, 08Х17Т	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 окислительных средах
Аустенитный	08Х18Н10Т	Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах типа азотной кислоты
	08Х17Н13М2Т	Сварная аппаратура, работающая в кипящей фосфорной, серной, 10 %-ной уксусной кислоте и серноокислых средах
	10Х14Г14Н4Т	Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах слабой агрессивности, а также до –253 °С
	03Х21Н21М4ГБ	Сварная аппаратура по производству фосфорных удобрений
Аустенитно-ферритный	08Х22Н6Т	Сварная аппаратура для химической, пищевой и других отраслей промышленности. Сталь является заменителем стали типа 12Х18Н10Т при температуре до 300 °С
	08Х21Н6М2Т	Заменитель стали 10Х17Н13М2Т
Мартенситный	20Х13, 30Х13, 40Х13	Режущий, измерительный и хирургический инструмент; упругие элементы; предметы домашнего обихода
Аустенитно-мартенситный	06Х12Н3А	Корпуса насосов АЭС; лопасти гидротурбин, паровых турбин, дымососов
	08Х17Н5М3, 07Х16Н6, 13Х15Н4АМ3	Нагруженные детали, работающие в атмосферных условиях, а также слабоагрессивных восстановительных средах
Ферритно-мартенситный	12Х13	Предметы домашнего обихода; изделия, работающие в слабоокислительных средах
	14Х17Н2	Нагруженные детали, работающие в слабоагрессивных окислительных средах в авиационной и химической промышленности

Таблица 6.5. Коррозионная стойкость (в баллах) сталей [68]

Среда	$t, ^\circ\text{C}$	08X13, 12X13	08X17T	15X25T	08X21H5T	08X21H6M2T	08X18H10T	08X17H13M2T
Азотная кислота:								
5 %-ная	20	5	4	3	—	—	3	3
	85	7	5	5	—	—	4	4
	$t_{\text{кип}}$	8	7	5	—	—	—	—
10 %-ная	20	5	4	4	—	3	3	—
	85	7	5	4	5	5	5	5
	$t_{\text{кип}}$	8	7	6	5	5-6	5-6	5-6
50 %-ная	20	6	6	5	—	—	3	3
	80	8	7	6	4	5	5	4-5
	$t_{\text{кип}}$	9	8	7	6	6	6	6-7
65 %-ная	20	6	5	5	—	—	4	4
	85	9	8	7	5	5	5	5
	$t_{\text{кип}}$	10	9	8	7-8	—	8	8
Серная кислота:								
10 %-ная	20	10	10	10	5	4	5	4
	75	10	10	10	7	6	7	7
	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	10	10	10	10
40 %-ная	20	10	10	10	7-8	6-7	7-8	6-7
	50	10	10	10	8	7	8	7
	100	10	10	10	10	10	10	10
60 %-ная	20	9	8	8	4	4	4	3-4
	70	10	10	10	10	9	10	9
	100	10	10	10	10	10	10	10
98 %-ная	20	6	6	6	4	3	4	3
	100	8	8	7	10	9	10	9
100 %-ная	20	5	4	4	4	3	5	3
	70	—	—	—	—	7	9	8
150 %-ная	10	10	10	—	10	10	10	10
Смесь HNO_3 и H_2SO_4 :								
1 %-ная + + 50 %-ная	50	—	—	—	4	4	5	4
3 %-ная + + 30 %-ная	50	—	—	—	4	4	5	5
	$t_{\text{кип}}$	—	10	10	—	—	7	—
5 %-ная + + 15 %-ная	$t_{\text{кип}}$	—	—	—	5	5	5	5
5 %-ная + + 50 %-ная	50	—	—	—	5	5	5	5

Среда	$t, ^\circ\text{C}$	08X13, 12X13	08X17T	15X25T	08X21H5T	08X21H6M2T	08X18H10T	08X17H13M2T
Смесь HNO_3 и H_2SO_4 :								
5 %-ная + + 65 %-ная	100	—	—	—	9	9	10	9
15 %-ная + + 80 %-ная	60	7	6	6	—	—	6	—
25 %-ная + + 75 %-ная	60	8	7	5	5	5	5	5
36 %-ная + + 5 %-ная	85	—	—	—	5	—	5	5
Соляная кислота:								
0,5 %-ная	20	8	6	6	—	5	5	4
	50	8	7	7	—	6	6	5
	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	10	9	9	8
5 %-ная	20	9	8	8	7	6	6	5
	60	10	10	10	10	9	9	8
10 %-ная	20	10	10	10	10	7	6	6
	60	10	10	10	10	9	9	9
20 %-ная	20	10	10	10	9	8	8	7
	60	10	10	10	10	8	8	8
30 %-ная	20	10	10	9	8	8	7	6
	60	10	10	10	9	9	8	7
37 %-ная	20	10	10	10	10	9	9	7
Уксусная кислота:								
1 %-ная	90	5	5	5	4	3	4	3
	$t_{\text{кип}}$	—	—	—	5	4	5	4
5 %-ная	20	6	5	4	1	1	1	1
	75	8	6	6	4	3	4	3
	$t_{\text{кип}}$	10	8	7	6	5	6	5
15 %-ная	20	7	6	6	1	1	1	1
	80	8	7	7	4	3	5	3
	$t_{\text{кип}}$	10	9	8	—	5	8	5
50 %-ная	20	7	7	6	1	1	3	1
	60	—	—	—	4	3	4	3
	100	10	9	8	—	5	8	5
80 %-ная	20	6	5	5	1	1	2	2
	80	9	8	—	—	4	5	5
	$t_{\text{кип}}$	10	9	8	8	6	8	6
98 %-ная	$t_{\text{кип}}$	—	—	—	6	5	7	5

Среда	$t, ^\circ\text{C}$	08X13, 12X13	08X17T	15X25T	08X21H5T	08X21H6M2T	08X18H10T	08X17H13M2T
Уксусная кислота:								
100 %-ная	20	6	5	—	—	4	5	4
	90	9	—	—	6	5	6	5
	$t_{\text{кип}}$	10	10	—	—	7	8	6
Фосфорная кислота:								
5 %-ная	20	4	3	3	1	1	1	1
	50	5	4	3	2	2	2	2
10 %-ная	$t_{\text{кип}}$	9	8	—	4	4	4	4
50 %-ная	20	8	7	5	2	2	3	3
	85	—	8	6	5	4	5	4
	$t_{\text{кип}}$	10	9	8	2	2	—	5
85 %-ная	20	4	4	3	4	3	4	3
	85	9	8	8	7	6	6	4
	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	5	5	8	7
90 %-ная	110	10	10	10	—	—	10	10
Фтористо-водородная кислота:								
5 %-ная	20	—	—	—	10	10	10	7
10 %-ная	20	—	—	—	—	—	7	7
40 %-ная	20	10	10	10	10	8	10	8
Щавелевая кислота:								
5 %-ная	20	8	7	6	—	—	5	4
	85	8	7	7	—	6	7	5
10 %-ная	20	8	7	6	5	5	5	5
	75	8	8	8	—	—	7	6
	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	8	7	10	8
25 %-ная	85	9	9	8	9	7	9	8
	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	—	9	10	8
Гидроксид калия:								
25 %-ный	$t_{\text{кип}}$	4	4	4	3	3	4	3
50 %-ный	20	2	2	2	2	2	2	2
	$t_{\text{кип}}$	7	7	7	5	5	7	6
расплав	300	10	10	10	10	10	10	10

Среда	$t, ^\circ\text{C}$	08X13, 12X13	08X17T	15X25T	08X21H5T	08X21H6M2T	08X18H10T	08X17H13M2T
Гидроксид натрия:								
10 %-ный	90	5	5	—	5	4	5	4
20 %-ный	50	4	4	—	4	3	4	3
	$t_{\text{кип}}$	8	5	—	5	5	5	5
60 %-ный	90	8	7	7	5	5	5	5
	160	—	—	—	9	8	9	8
90 %-ный	300	9	9	9	—	—	8	8
расплав	318	10	10	10	9	9	10	10

Более подробно с основными свойствами, термической обработкой, применением и коррозионной стойкостью сталей можно ознакомиться в работах [37, 38], а с выпускаемым сортаментом – в ГОСТ 5949–75 (сортовая и калиброванная сталь), ГОСТ 7350–77 (толстый лист), ГОСТ 5582–75 (тонкий лист), ГОСТ 9940–81 (горячедеформированные трубы) и ГОСТ 9941–81 (холодно- и теплодеформированные трубы).

Наилучшие литейные свойства среди сплавов на основе железа имеют чугуны. Чугуны, содержащие свыше 15 % Si (ЧС15, ЧС17), стойки в азотной, серной, фосфорной и уксусной кислотах. Для повышения стойкости в соляной кислоте чугуны легируют до 4 % Mo (ЧС15М4, ЧС17М3). Эти чугуны известны под названием антихлор. В условиях воздействия щелочей используют обычно чугуны, легированные никелем, а также нери-зисты типа ЧН15Д7Х2. Наиболее износостойкими коррозионно-стойкими чугунами являются высокохромистые чугуны (12–35 % Cr). Эти чугуны стойки в азотной кислоте, нестойки – в серной, соляной кислотах и щелочах.

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: царской водке, азотной кислоте, многих органических кислотах, влажном хлоре и др. Титан является перспективным материалом для изготовления костных имплантатов и других изделий, к которым предъявляют 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 меди, вольфрама, молибдена, никеля, рения, рутения, платины, палладия, 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. 6.6 и 6.7 (см. также § 5.3).

Таблица 6.6. Промышленные коррозионно-стойкие сплавы титана [34]

Марка сплава	Структура	Техническая характеристика
BT1-0	α	Деформируемый и свариваемый материал, коррозионно-стойкий в природных условиях, окислительных и органических средах
OT4-0 OT4-1	$\alpha + \alpha'$ $\alpha + \alpha'$	Имеют более высокую прочность по сравнению с титаном технической чистоты ($\sigma_{0,2} = 390 \dots 490$ МПа), деформируются, свариваются
OT4	$\alpha + \beta$	Прочнее титана технической чистоты ($\sigma_{0,2} = 580$ МПа), деформируется, сваривается
BT6	$\alpha + \beta$	$\sigma_{0,2} = 730$ МПа; по коррозионной стойкости близок к технически чистому титану, хорошо деформируется в горячем состоянии, удовлетворительно сваривается
4200	α	Имеет высокую коррозионную стойкость в соляной, муравьиной, лимонной, хромовой кислотах и хлорном железе; деформируется, сваривается
4201	α'^*	Обладает высокой коррозионной стойкостью в соляной и серной кислотах; применение ограничено в связи со сложной технологией изготовления полуфабрикатов

* Мартенситоподобная структура после закалки из β -области.

Таблица 6.7. Коррозионная стойкость (в баллах) титана и его сплавов [33]

Среда	$t, ^\circ\text{C}$	BT1-0	Среда	$t, ^\circ\text{C}$	BT1-0					
Азотная кислота:	32 %-ная	3	Уксусная кислота:	165	1					
						5 %-ная				
			55 %-ная	4	25 %-ная	165	1			
	70 %-ная	3	Муравьиная кислота:		140	1				
	30 %-ная			5 %-ная						
	50 %-ная	1	3; 7 ^{*1}	100	140	5				
							25 %-ная			
							50 %-ная			
	86 %-ная	1	8	200	165	5				
							70 %-ная			
99 %-ная										
60 %-ная	200	-	Раствор CaCl ₂ :	90	3 ^{*2}					
						30 %-ный				
						50,6 %-ный				
85 %-ная	200	-	60 %-ный	$t_{\text{кип}}$	3 ^{*3}					
						Раствор FeCl ₃ :				
						1-5 %-ный				
Соляная кислота:	95	2 ^{*1}	10 %-ный	30-100	3 ^{*3}					
						5-10 %-ная	3 ^{*1}	10-15 %-ный	35	3
						4-8 ^{*1}	95	1 ^{*1}		

^{*1} Для OT4. ^{*2} Для 4200. ^{*3} Для 4201.

Полуфабрикаты из титана и его сплавов поставляются согласно следующей нормативно-технической документации: ГОСТ 22178–76 (лист), ГОСТ 22755–79 (плиты), ГОСТ 26492–85 (прутки), ТУ 183–42–80 (профили), СТ 192051 (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, слабокислых, слабощелочных водных растворах ($\text{pH} = 4,5 \dots 8,5$) алюминий обладает способностью к самопассивации. Поверхность алюминия в пассивном состоянии покрыта защитной пленкой толщиной 5–100 нм, состоящей из байерита $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

Коррозионная стойкость алюминия зависит от чистоты по ряду элементов (медь, железо, никель); алюминий чувствителен к присутствию в среде галоидных 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.

Легирование алюминия осуществляют с целью повышения прочности при комнатной и повышенных температурах, жаростойкости, что в зависимости от вида и степени легирования, как правило, приводит к снижению коррозионной стойкости. Например, распространенные деформируемые термически упрочняемые алюминиевые сплавы – дуралюмины (3,5–5,5 % Cu и небольшие добавки Mg и Mn) Д16, Д19, Д20, имея низкую стойкость к общей коррозии, склонны к расслаивающей и межкристаллитной коррозии. Поэтому в авиационной промышленности листы из них плакируют алюминием А5, А6 или коррозионно-стойким алюминиевым сплавом АД35. Другим эффективным методом повышения стойкости дисперсионно-упрочняющихся алюминиевых сплавов к межкристаллитной и расслаивающей коррозии является ступенчатое старение, после которого состав твердого раствора у границ и внутри зерен незначительно отличается.

Среди деформируемых сплавов алюминия, приближающихся по коррозионной стойкости к чистому алюминию, можно назвать сплавы, содержащие 1–2 % Mn (АМц) и 1–3 % Mg (АМг2), которые имеют $\sigma_{0,2} = 90 \dots 250$ МПа и хорошо свариваются, а также сплавы АД31, АД33 системы Al–Mg–Si.

К литейным сплавам алюминия, обладающим достаточно высокой коррозионной стойкостью, относятся силумины (до 14 % Si) и магналии (до 10 % Mg). Силумины успешно применяют в виде литых изделий, работающих в атмосферных условиях и морской воде; еще более высокой стойкостью в морской воде обладает магналий АМг, содержащий 10 % Mg.

При конструировании металлоизделий с использованием деталей из алюминия и его сплавов необходимо учитывать их склонность к питтингу, коррозионному растрескиванию, контактной коррозии. Для обеспечения высокого сопротивления коррозионному растрескиванию внутризеренные выделения должны быть достаточно крупными, а их поверхностная доля высокой; распределение элементов в приграничных зонах и внутри зерна должно быть однородным. Для сплавов систем Al–Cu, Al–Cu–Mg и Al–Cu–Mg–Si

такое состояние, достигаемое при искусственном старении, одновременно характеризуется и максимумом прочности; для сплавов систем Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–Cu – пониженной (в сравнении с максимальной), а для сплавов системы Al–Mg – низкой прочностью. Для сплавов трех последних систем такое состояние называется перестаренным и достигается старением по двухступенчатому режиму [32].

Сплавы алюминия применяют в качестве расходующихся анодов для катодной защиты морских сооружений и судов. Для этих целей используют 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 расходующихся анодных покрытий и широко используются для защиты стационарных морских конструкций и судов.

Состав, марки, техническая характеристика и режимы термической обработки, повышающей коррозионные свойства алюминиевых сплавов, приведены в 5.1.

Металлопродукцию из алюминия поставляют по ГОСТ 11069–74 (марки первичного алюминия), ГОСТ 4784–97 (марки деформируемых сплавов), ГОСТ 1583–93 (литейные сплавы), ГОСТ 6132–79 (проволока), ГОСТ 21631–76 (лист), ГОСТ 17232–99 (плиты), ГОСТ 21488–97 (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 ее высокой термодинамической стабильностью, в то время как способность к пассивации у меди 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 HNO_3 , горячей концентрированной H_2SO_4 , растворах KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ – медь неустойчива.

Для латуней характерны два вида коррозионного повреждения – обесцинкование и коррозионное растрескивание. Склонность к обоим видам повреждений 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 (SO_2 , H_2S).

Бронзы можно рассматривать как коррозионно-стойкие материалы. Оловянная бронза (8–10 % Sn) обладает хорошей стойкостью в разбавленных неокислительных, а

также в 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 используют для изготовления подшипников скольжения, деталей насосов и арматуры для подачи агрессивных жидкостей. Составы, марки и технические характеристики медных сплавов приведены в § 2.2.

Металлопродукцию из меди и медных сплавов поставляют по ГОСТ 859–78 (марки меди), ГОСТ 15527–70 (марки деформируемых латуней), ГОСТ 931–90 (листы и полосы латунные), ГОСТ 1535–91 (прутки бронзовые), ГОСТ 2060–90 (прутки латунные), ГОСТ 494–90 (трубы латунные), ГОСТ 1208–90 (трубы бронзовые), ГОСТ 5063–73 (полосы из медно-никелевых сплавов).

Никель и его сплавы. Чистый никель относительно редко применяют в качестве коррозионно-стойкого конструкционного материала, несмотря на то, что он 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 материала.

Промышленные коррозионно-стойкие сплавы в основном относятся к следующим системам: Ni–Mo, Ni–Cr–Mo, Ni–Cu [4].

Сплавы системы Ni–Mo обычно содержат 17–32 % Mo и обладают высокой коррозионной стойкостью во всех неокислительных минеральных и органических кислотах (соляной, серной, фосфорной, уксусной, муравьиной и др.) всех концентраций до 70 °С. Эти сплавы имеют высокую коррозионную стойкость в щелочах и морской воде. Типичным представителем сплавов этой системы является сплав Н70МФВ–ВИ, имеющий после оптимальной термической обработки (закалка с 1070 °С в воде) структуру α -твердого раствора (ГЦК решетка) и частиц карбида типа $Me_{12}C$. Сварные соединения сплава Н70МФВ–ВИ стойки против межкристаллитной и ножевой коррозии.

Сплавы бинарной системы Ni–Cr содержат 15–50 % Cr. Их применяют в основном как жаростойкие, жаропрочные, реже как кислотостойкие сплавы. Сплавы Х15Н20, Х20Н20 в связи с присутствием в них значительного количества хрома по поведению в окислительных средах аналогичны коррозионно-стойким сталям, например стойки в азотной кислоте. По сравнению со сплавами системы Ni–Mo они имеют несколько меньшую стойкость в неокислительных кислотах.

Типичным представителем является отечественный свариваемый сплав ХН58В (39–41 % Cr; 0,5–1,5 % W; $\leq 0,03$ % C). Термическая обработка ХН58В состоит в закалке с 1070 °С в воде, после чего он имеет структуру γ -твердого раствора с отдельными выделениями карбонитридов хрома в объеме зерен. Сплав применяют в химической промышленности для изготовления сварной аппаратуры, а также травильных ванн с азотно-фторидными растворами. Для ХН58В характерна высокая стойкость в смеси азотной и плавиковой кислот, в концентрированных растворах кипящей азотной кислоты, в 30–70 %-ной уксусной кислоте при температуре кипения.

Промышленные сплавы системы Ni–Cr–Mo чаще всего представлены сплавами на основе Ni–15 % Cr–15 % Mo, например отечественный свариваемый сплав ХН65МВУ

(14,5–16,5 % Cr; 15–17 % Mo; 3,0–4,5 % W; $\leq 0,02$ % C). Сплав после закалки с 1070 °С в воде имеет структуру γ -твердого раствора на основе никеля с выделением первичных карбидов типа Me_6C .

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 фосфорной, серной и соляной кислот, солей, органических кислот; для теплообменной аппаратуры, работающей в контакте с морской водой.

Металлопродукцию из никелевых сплавов поставляют по ГОСТ 24982–81 (лист холоднокатаный), ГОСТ 24982–81 (лист горячекатаный), ГОСТ 25054–81 (поковки), ТУ 14-1-1 671–76 (прутки горячекатаные, кованые), ГОСТ 14 162–79 (трубы капиллярные).

Тугоплавкие металлы. В качестве коррозионно-стойких материалов эти металлы имеют ограниченное применение, за исключением тантала. Тантал стоек в большинстве минеральных и органических кислот (например, скорость его коррозии в 85–98 % -ной H_2SO_4 при 210 °С не превышает 0,05 мм/год), устойчив в H_3PO_4 и HNO_3 кислотах при всех концентрациях до 190 °С, в HCl до 30 %-ной концентрации до 190 °С. Тантал применяют для изготовления химической аппаратуры.

Благородные металлы. Серебро, золото, платина, палладий 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 неокисляющихся электроконтактов, химической посуды (лабораторной), фильтров для производства искусственного волокна, в ювелирном деле и т. д.

Разнородные материалы. Машины и приборы часто изготавливают из сплавов, принимающих в рабочей среде различные значения стационарных потенциалов. По мере увеличения значения стационарного электродного потенциала металлы и сплавы можно условно разбить на следующие группы: 1) сплавы магния; 2) сплавы на основе цинка и алюминия, кадмий; 3) свинец, олово, стали перлитного класса; 4) сплавы на основе меди, никеля, хрома; 5) титановые сплавы, коррозионно-стойкие стали. Контакт металлов, отнесенных к различным группам, приводит к коррозионному разрушению металла с меньшим потенциалом. Опасны контакты магниевых сплавов практически со всеми сплавами за исключением кадмия, сплавов алюминия с коррозионно-стойкими сталями, алюминиевых сплавов с медью, перлитных сталей с коррозионно-стойкими. Сведения о допустимых и недопустимых контактах приведены в ГОСТ В9005–72 и монографии [3]. Меры борьбы с контактной коррозией следующие: разделение разнородных материалов диэлектриками или пластинами из металлов с более низкими потенциалами, применение покрытий. Общие требования к выбору металлических и неметаллических неорганических покрытий деталей и сборочных единиц, наносимых химическим и электрохимическим способами, установлены ГОСТ 9.303–84.

Металлы, отнесенные к различным группам, следует применять лишь в тех случаях, когда это продиктовано функциональными требованиями конструкции. Даже при

отсутствии контакта между разнородными металлами коррозия одного из металлов может развиваться ускоренно. Так, в конструкциях, выполненных из сталей, медных, и алюминиевых сплавов, при наличии общей токопроводящей среды, возможно ускоренное коррозионное разрушение алюминиевых элементов под воздействием растворенных ионов железа и меди.

6.1.2. Неметаллические материалы

К неметаллическим относятся полимерные и минеральные материалы, а также резины и эбониты.

Полимерные материалы. 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.6.8). Полиэтилен устойчив в щелочах, растворах солей, воде, сложных эфирах, кислотах. Полиэтилен является коррозионно-стойким конструкционным материалом в химической промышленности и строительстве. Его используют в виде листов, плит, пленки.

Таблица 6.8. Химическая стойкость полимерных материалов [43]

Среда	Концентрация	t, °С	Винипласт	Полиэтилен		Полипропилен	Пентапласт	Фторопласт	
				НД-ВП	ВД-НП			Ф-3	Ф-4
Кислота: азотная	≤ 70	20	с	с	с	с	с	с	с
	≤ 90	60	с	с	с	с	с	с	с
	0,5	20	н	н	н	н	н	н	н
серная	≤ 40	100	—	—	—	—	—	—	—
	40–75	20	с	с	с	с	с	с	с
	40–75	60	с	с	с	с	с	с	с
	75–98	20	с	с	с	с	с	с	с
	75–98	60	о	н	н	с	с	с	с
соляная	≤ 5	20	с	с	с	с	с	с	с
	10–35	60	с	с	с	с	с	с	с
	10–35	20	с	с	с	с	с	с	с
	Любая	60	о	о	о	о	о	о	с
фосфорная	10–90	130	—	—	—	—	—	—	—
	10–90	20	с	с	с	с	с	с	с
	85	60	о	с	о	с	с	с	с
фтористоводородная	Любая	20	с	с	с	с	с	с	с
уксусная	≤ 80	60	о	о	н	с	с	с	с
		20	с	с	с	с	с	с	с
кремнефтористоводородная	≤ 35	60	о	с	с	с	с	с	с
		20	о	с	с	с	—	с	с
Гидроксид натрия	≤ 52	60	с	с	с	с	—	с	с
Хлористое железо	≤ 48	20	с	с	с	с	с	с	с

Среда	Концентрация	t, °C	Винипласт	Полиэтилен		Полипропилен	Пентапласт	Фторопласт	
				НД-ВП	ВД-НП			Ф-3	Ф-4
Ацетон	—	60	о	с	с	с	с	с	с
		20	н	о	о	с	с	с	с
Спирт (метиловый, этиловый)	—	60	н	н	н	о	о	с	с
		20	с	с	с	с	с	с	с
Бензин	—	20	с	с	о	о	с	с	с
		60	с	о	н	н	с	с	с
Бензол	—	20	с	о	о	о	с	с	с

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: с – стоек; о – относительно стоек; н – не стоек.

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 и минеральных солей. Для полистирола характерно низкое водопоглощение.

Выпускают блочный и суспензионный полистирол для изготовления изделий методом прессования, литья под давлением, экструзией.

Поливинилхлорид получают полимеризацией хлористого винила; этот полимер является одним из наиболее стойких материалов (в минеральных (неокислительных) кислотах до 60 °C в 20–100 %-ной H₂SO₄ и 35 %-ной HCl, ряде органических кислот).

Винипласт получают из поливинилхлорида с добавлением стеарина, трансформаторного масла и меламина. При комнатной и повышенных температурах винипласт проявляет высокую стойкость в 37 %-ной HCl, 90 %-ной H₂SO₄, 50 %-ной HNO₃, 80 %-ной CH₃COOH, растворах едких щелочей, карбонатов щелочных металлов, растворах аммиака, бензина, спиртов и других средах. Винипласт относится к свариваемым полимерам.

Тефлон (фторированный этилен) – пропиленовый полимер, обладающий высокой стойкостью. Тефлон используют в качестве термо- и коррозионно-стойкого материала в сочетании с титаном, танталом и бериллием ввиду почти одинаковой коррозионной стойкости. Выпускают его в виде труб, прутков, шлангов, пленки и других полуфабрикатов для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах.

Промышленно производят полимерные коррозионно-стойкие материалы других наименований, которые применяют в качестве конструкционных материалов, покрытий, замазок в различных отраслях техники [11, 43].

Минеральные материалы. Природные каменные 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.

К искусственным минеральным материалам относят: кислотоупорный кирпич (ГОСТ 474–90), 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 [43].

Для изготовления тонкой химической аппаратуры, в том числе промышленной, контактирующей с высокоагрессивными 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. Они имеют высокую коррозионную стойкость в серной, соляной, азотной, фосфорной, уксусной кислотах [43]. Эти материалы чаще всего применяют в виде футеровочных плиток, которые крепят к поверхности конструкций растворами на силикатных и полимерных вяжущих наполнителях.

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; можно также использовать 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 между собой 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 кислой реакцией.

К кислотоупорным принадлежат также полимерсиликатбетон и полимербетон. Полимерсиликатбетон имеет тот же состав, что и кислотоупорный бетон, но только с введением в смесь добавки фурилового спирта в количестве 3 % от массы жидкого стекла. Добавка фурилового спирта делает его более пластичным, прочным и водостойким. Полимербетон получают при отверждении смеси, состоящей из связующего (эпоксидные, полиэфирные, акриловые, фурановые, карбоамидные смолы), отвердителя и заполнителя. Он имеет высокую прочность и стойкость против серной, соляной, азотной, фосфорной,

уксусной, щавелевой и молочной кислот, едкого натра, водного раствора аммиака, минеральных солей [11]. При использовании этих материалов элементы технологического оборудования, зданий, сооружений должны работать 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. Например, углеродистые плитки АТМ-1 химически стойки до 20 °С в 5 %-ной HNO₃ и уксусной кислоте любой концентрации; до 100 °С в щавелевой кислоте любой концентрации; до 130 °С в 60 %-ной H₂SO₄ и до $t_{\text{кип}}$ в HCl любой концентрации, 80 %-ной H₃PO₄ и 48 %-ной HF, а также в Al₂(SO₄)₃, AlCl₃, NH₄Cl, FeCl₃, Fe₂(SO₄)₃, этиловом спирте, бензоле, толуоле, ацетоне и бензине [11].

Углеродистые изделия получают методом прессования и последующего отжига массы, состоящей из измельченного и прокаленного антрацита и нефтяного или каменноугольного пека. Различают изделия, отожженные при 1 300 °С (угольные) и при 2 300 °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 – блоков, пластин, фасонных изделий (ТУ 48-12-6-7), ТУ 48-12-11-77.

Резины и эбониты. Изготавливают их 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 мягкие, средней и повышенной твердости резины, эбониты и полужониты. Кроме серы резиновые смеси содержат наполнители, ускорители и активаторы вулканизации, а также 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): кислотощелочестойкую, теплостойкую, морозостойкую, маслостойкую, пищевую. Для защиты от коррозии проводят гуммирование резервуаров, арматуры, насосов, гальванических ванн, прокладок и т. д. Рекомендуемые марки резин и эбонитов для службы в агрессивных средах приведены в табл. 6.9.

Все большее распространение в технике находят полиуретановые каучуки, проявляющие до 60 °С стойкость в воде, растворах нитрата и сульфата аммония, хлорида натрия. Полиуретан стоек в органических средах – бензине, глицерине, растительном масле, пропане, этиловом спирте, тетраэтилсвинце. Исполнение, категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования всех видов машин, приборов и других технических изделий в части воздействия климатических факторов внешней среды устанавливает ГОСТ 15 150-69.

Таблица 6.9. Рекомендуемые марки резины и эбонитов [11] для службы в агрессивных средах

Среда	Концентрация, %	t, °C	Резины		Эбониты и полуэбониты	
			мягкие и средней твердости	повышенной твердости		
Кислоты: азотная	5	20	60-340, 60-341, ИРП-1390	ИРП-1391	51-1626, 51-1629	
	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, 60-341, ИРП-1390	—	51-1574
	соляная	70	85	—	ИРП-1394	51-1626, 51-1627
10		70	—	—	51-1629	
10		80	—	—	51-1626, 51-1627	
20		90	51-1639	—	51-1626	
Любая »		20	60-340	—	—	51-1629
		—	60-341, ИРП-1394	—	—	60-343, 60-344
уксусная	Любая	70	60-340, 60-341, ИРП-1390	ИРП-1391	51-1626, 51-1627, 60-343, 60-344, 51-1574	
фосфорная	»	100	51-1639	51-1632, ИРП-1394	51-1626, 51-1627,	
	Любая »	110	—	—	51-1629	
		20	—	ИРП-1391	—	
фтористоводородная	10	100	—	51-1632	—	
Основания: гидроксид калия	Любая »	70	60-340, 60-341, ИРП-1390	ИРП-1391	51-1574, 60-343, 60-344	
		110	51-1639	ИРП-1394, 51-1632	51-1626, 51-1627, 51-1629	
Растворы солей: дихромат натрия	10	70	ИРП-1390	—	51-1574	
	дихромат калия	10	100	51-1639	ИРП-1394	51-1626, 51-1627, 51-1629
		Любая	70	60-340, 60-341, ИРП-1390	ИРП-1391	51-1574
	30		100	51-1639	ИРП-1394	51-1626, 51-1627, 51-1629, 60-344
Ацетон	Любая	56	51-1639	—	51-1626, 51-1627	
Спирты (C ₂ –C ₅)	Любая	70	51-1639	—	—	
Хлорная известь	Любая	65	60-340, 60-341, ИРП-1390	—	60-343	
Хлор (сухой и влажный)	98	80	—	ИРП-1391	60-343, 60-344	

6.2. Теплостойкие материалы

Теплостойкими называют материалы, способные работать в нагруженном состоянии при температурах до 600 °С 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 температурах 500–750 °С; при температурах ниже 450 °С целесообразно использовать обычные конструкционные стали.

Для изготовления деталей, работающих в нагруженном состоянии при температурах до 600 °С в течение длительного времени, применяют главным образом стали на основе α -Fe (перлитные, мартенситные и др.) и их классифицируют как теплостойкие (теплоустойчивые) стали. При температурах выше 600 °С в основном используют жаропрочные аустенитные стали.

Теплостойкие стали подразделяют на низколегированные и среднелегированные перлитного и мартенситного класса (ГОСТ 20072–74), а также высоколегированные хромистые стали (ГОСТ 5632–72). Марки теплостойких сталей и рекомендации по их применению приведены в табл. 6.10, а механические свойства при комнатной и повышенных температурах – в табл. 6.11.

Таблица 6.10. Низко- и среднелегированные теплостойкие стали (ГОСТ 20072–74)

Марка стали	Температура, °С		Применение
	эксплуатации (рекомендуемая)	интенсивного окисления	
	<i>Стали перлитного класса</i>		
12МХ 12Х1МФ	510 570–585	570 600	Трубы пароперегревателей, трубопроводов, коллекторных установок высокого давления, поковки для котлов и паропроводов. Детали цилиндров газовых турбин
20Х1М1Ф1ТР 20Х1М1Ф1БР	500–580	–	Крепежные детали турбин и фланцевых соединений паропроводов и аппаратуры
25Х1МФ, 25Х2М1Ф	510 520–550	600	Болты, плоские пружины, шпильки и другие крепежные детали
18Х3МВ	450–500	600	Трубы для гидрогенизационных установок
20Х3МВФ	500–560	600	Роторы, диски, поковки, болты. Трубы высокого давления для химической аппаратуры и гидрогенизационных установок
12Х2МВ8ФБ*	650	–	Энергетическое машиностроение

Марка стали	Температура, °С		Применение
	эксплуатации (рекомендуемая)	интенсивного окисления	
	<i>Стали мартенситного класса</i>		
15X5	600	650	Трубы, детали насосов, лопатки турбомашин, подвески котлов
15X5М, 15X5ВФ	600	650	Корпуса и внутренние элементы аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов и крекинг-овые трубы, детали насосов, крепеж
12X8ВФ	500	650	Трубы печей, аппаратов и коммуникаций нефтезаводов

* По ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1154-64.

Таблица 6.11. Механические свойства низко- и среднелегированных теплостойких сталей при комнатной и повышенных температурах [17, 25], не менее

Марка стали	σ_b	σ_T	δ	ψ	KCU , МДж/м ²	$t_{исп}$, °С	σ_{10000}	σ_{100000}	$\sigma_{1/10000}$	$\sigma_{1/100000}$
	МПа		%				МПа			
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.

Перлитные стали предназначены для длительной эксплуатации при 450–580 °С. Применяют их 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 % (мас.), за исключением хрома, содержание которого для повышения жаростойкости доводят до 2,5–3,0 % (мас.). Это низкоуглеродистые стали (0,08–0,15 %, иногда до 0,2–0,3 % С).

Перлитные стали пластичны в холодном состоянии (см. табл. 6.11), 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 охрупчиваться), которая характеризует надежность работы конструкции в условиях возможного образования внутренних и внешних дефектов.

Наиболее широкое применение при 550–600 °С нашла сталь 12Х1МФ, которую применяют на всех мощных электростанциях для изготовления пароперегревателей, коллекторов, паропроводов и т. п. Стали 25Х2М1Ф и 20Х3МВФ отличаются повышенной жаропрочностью в интервале 500–550 °С. Сталь 12Х2МВ8ФБ имеет наиболее высокие показатели жаропрочности при 600–650 °С, приближающие ее к высоколегированным аустенитным сталям. В отличие от последних 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. Они 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 -Fe подразделяют на три группы: мартенситные (5–10 % Cr), мартенситно-ферритные (10–13 % Cr) и ферритные (> 13 % Cr). Наиболее высокую жаропрочность имеют стали, содержащие 10–13 % Cr, самую низкую – стали, в которых > 13 % Cr (их применяют в основном как жаростойкие).

Марки мартенситных сталей, содержащих до 8 % Cr, и рекомендации по их применению приведены в табл. 6.10, а механические свойства – в табл. 6.11. 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 (горячекатаные круглые), ГОСТ 2591–71 (горячекатаные квадратные), ГОСТ 103–76, 4405–75 (горячекатаные полосовые), ГОСТ 1133–71 (кованные круглые и квадратные), ГОСТ 7417–75 (калиброванные, круглые), ГОСТ 8559–75 (квадратные), ГОСТ 8560–78 (шестигранные).

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. Марки высоколегированных сталей и рекомендации по их применению приведены в табл. 6.12, а жаропрочные свойства после соответствующей термической обработки – в табл. 6.13.

Таблица 6.12. Высоколегированные теплостойкие стали

Марка стали	Температура, °C		Применение
	эксплуатации	интенсивного окисления	
<i>Стали мартенситного класса</i>			
40X9C2, 40X10C2M	650	850	Клапаны моторов, крепежные детали
15X11MФ	560–580	750	Рабочие и направляющие лопатки паровых турбин, поковки, бандаж и т. п.
18X11MНФБ, 20X12ВНМФ	600	760	Высоконагруженные детали, лопатки паровых турбин, детали клапанов, поковки дисков, роторов паровых и газовых турбин, крепежные детали
11X11Н2В2МФ, 13X11Н2В2МФ, 16X11Н2В2МФ	600	750	Диски компрессора, лопатки и другие нагруженные детали
20X13	500	750	Лопатки паровых турбин, уплотнительные втулки, клапаны, болты, гайки, трубы, арматура крекингу-установок
13X14Н3В2ФР	550	700	Высоконагруженные детали (диски, валы, болты, лопатки и т. п.), работающие в условиях повышенной влажности
<i>Стали мартенситно-ферритного класса</i>			
18X12ВМБФР	500	750	Поковки, турбинные лопатки, трубы паровых котлов и паропроводов, крепеж
12X13	500	750	Лопатки паровых турбин, клапаны гидравлических прессов, болты, гайки, трубы, бандаж, арматура крекингу-установок
14X17Н2	400	800	Рабочие лопатки, диски, валы, втулки
<i>Стали аустенитного класса</i>			
08X16Н13М2Б	600	850	Поковки для дисков и роторов, лопатки, болты
09X16Н15М3Б	350	850	Трубы пароперегревателей и трубопроводов высокого давления
12X18Н9Т, 12X18Н10Т, 12X18Н12Т	600	850	Детали выхлопных систем, газовых турбин, турбокомпрессоров; трубы; листовые и сортовые детали
31X19Н9МВБТ	600	800	Роторы, диски, болты, поковки, лопатки и т. п.
55X20Г9АН4	600	750	Клапаны моторов

Таблица 6.13. Механические свойства высоколегированных теплостойких сталей при повышенных температурах [17], не менее

Марка стали	Режим термической обработки	$t_{исп},$ °C	σ_{-1}^{*1} при $N =$ $= 10^7$ циклов	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{100\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$
			МПа				
40X10C2M	Закалка 1 100 °C, масло + отпуск 800 °C, вода	550	–	130	95	100	40
		600	–	–	–	46	22
15X11MФ	Нормализация 1 050 °C + отпуск 680 – 700 °C	550	$250^{*2}/170^{*2}$	200	170	180	90
		600	–	–	–	90	40
18X11MНФБ	Нормализация 1 100 – 1 140 °C + + отпуск 750 °C	550	–	170	–	120	–
20X13	Закалка 1 000 – 1 050 °C, воздух или масло + отпуск 700 – 750 °C	500	240/130	195	160	180	48
18X12ВМБФР	Закалка 1 050 °C, масло + отпуск 650 – 700 °C	590	–	210	170	140	100
		620	–	140	110	80	60
12X13	Закалка 1 030 – 1 050 °C, масло + + отпуск 740 – 750 °C	500	–	145	120	100	57
		500	225/107	220	190	–	–
08X16H13M2Б	Закалка 1 100 – 1 130 °C, воздух	550	–	260	210	–	160
		600	–	200	150	140	90
12X18H9Т	Закалка 1 130 – 1 160 °C, воздух или вода + старение 800 °C	600	205/135	130	95	200	75
12X18H12Т	Закалка 1 050 – 1 100 °C, воздух	600	–	170	135	–	75
31X19H9МВБТ	Закалка 1 150 – 1 180 °C, вода + + старение 800 °C	560	–	300	260	240	170
		600	–	240	220	150	110

*¹ В числителе – для гладкого образца, в знаменателе – для образца с надрезом. *² При $N = 10^8$ циклов.

Жаропрочность силъхромов позволяет применять их при температурах не выше 600–650 °C; при более тяжелых условиях эксплуатации клапаны мощных двигателей изготавливают из аустенитных сталей. Силъхромы 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. 6.12). Для повышения сопротивления ползучести в состав сталей дополнительно вводят молибден, вольфрам, ванадий, ниобий, титан. 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 Лавеса Fe_2W [17]. При длительной эксплуатации их можно применять до 600–650 °С. Используют эти стали 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 применяют для лопаток паровых турбин, работающих длительное время при 480–500 °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 используют при комплексном легировании. Максимальная температура для длительной службы этой стали 550–580 °С. Для легирования стали 12X13 также используют 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 даны в табл. 6.13.

К теплостойким сталям можно также отнести некоторые аустенитные стали, для которых максимальная рабочая температура при длительной эксплуатации составляет 600 °С и ниже (см. табл. 6.12, 6.13). 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 и установлены требования по сортаменту, качеству поверхности, макроструктуре, механическим свойствам и термической обработке. Механические свойства различных полуфабрикатов из высоколегированных теплостойких сталей приведены в табл. 6.14, 6.15.

Таблица 6.14. Механические свойства сортовой теплостойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5949–75, не менее

Марка стали	σ_b	σ_T	δ	ψ	KCU , МДж/м ²	Марка стали	σ_b	σ_T	δ	ψ	KCU , МДж/м ²	
	МПа		%				МПа		%			
40X9C2	735	441	15	35		13X11H2B2MФ	882 (1078)	735 (931)	15 (13)	55	0,9	
40X10C2M	931	735	10	35	0,2	18X12ВМБФР	735	490	12	45	0,4	
15X11МФ	686	490	15	35	0,6	12X13	588	412	20	60	0,9	
18X11МНФБ	735	588	15	50	0,6	14X17H2	1078	412	20	30	0,5	
20X12ВНМФ	735	588	15	50	0,6	08X16H13M2Б	539	216	40	50	1,2	
11X11H2B2MФ	980	833	10	50	–	12X18H9T	539	196	40	55	–	
16X11H2B2MФ	По согласованию						12X18H10T	510	196	40	55	–
20X13	645 (833)	441 (637)	16 (10)	55 (50)	0,8 (0,6)	12X18H12T	539	196	40	55	–	
13X14H3B2ФР	931 (1127)	735 (882)	14 (12)	55 (50)	0,9 (0,7)	31X19H9MBBT	588	294	30	40	–	

Примечание. Значения в скобках относятся к стали, термообработанной при более низкой температуре отпуска.

Таблица 6.15. Механические свойства термообработанной листовой теплостойкой стали, не менее

Марка стали	σ_b	σ_T	δ^* , %	Марка стали	σ_b	σ_T	δ , %
	МПа				МПа		
<i>Тонколистовая сталь (ГОСТ 5582-75)</i>				<i>Толстолистовая сталь (ГОСТ 7350-70)</i>			
11X11H2B2MФ	830	—	22	20X13	509	372	20
16XНН2В2МФ	830	—	—	12X13	490	340	21
20X13	490	—	20	14X17H2	По согласованию		
13X13	392	—	21	12X18H9T	530	216	38
14X17H2	По согласованию		—	12X18H10T	530	236	38
12X18H10T	529	196	40	12X18H12T	830	236	38

* Для тонколистовой стали приведены значения δ_5 .

Профили для паровых турбин поставляют 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, поставляют профили горячекатаные и кованные: круглые (до 150 мм), квадратные (до 220 мм) и полосы (толщиной до 80 мм и шириной до 150 мм). Механические свойства их приведены в табл. 6.16.

Таблица 6.16. Механические свойства термообработанных профилей для паровых турбин при испытании механически обработанных образцов

Марка стали	σ_T	σ_b^*	δ	ψ	KCU , МДж/м ² , не менее	НВ
	МПа		%, 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
20X12ВНМФ-Ш	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

* Не менее.

К теплостойким материалам можно также отнести высоколегированные чугуны с шаровидным графитом [17]. Механические свойства некоторых высоколегированных чугунов при комнатной и повышенных температурах приведены в табл. 6.17.

Таблица 6.17. Механические свойства высоколегированных чугунов
ГОСТ 7769–82, не менее

Марка чугуна	σ_b	σ_T	$\delta, \%$	$KCU, \text{МДж/м}^2$	σ_{10}	σ_{1000}	$v_n \cdot 10^4, \%/ч (\sigma = 40 \text{ МПа})$
	МПа				МПа		
	при 20 °С				при 600 °С		
ЧЮ22-Ш	350	–	0,5	0,05	100	–	0,4*
ЧН11Г7-Ш	300	180	10,0	0,2	–	120	1,8
ЧН19Х3-Ш	250	180	2,0	0,2	–	120	1,0; 2,0*

* При 700 °С и $\sigma = 30 \text{ МПа}$.

Жаропрочные цветные сплавы на основе титана, алюминия и магния можно применять как теплостойкие. Указанные материалы, несмотря на более высокую стоимость, используются 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. 6.18. К недостаткам магниевых сплавов можно отнести их низкую технологичность при плавке, литье, обработке давлением и термообработке, а также недостаточную коррозионную стойкость и жаропрочность по сравнению с алюминиевыми сплавами.

Таблица 6.18. Свойства жаропрочных сплавов магния и алюминия [17, 29]

Марка сплава	Температура, °С		σ_b	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$
	эксплуатации (рекомендуемая)	испытания			
<i>Сплавы на основе магния, деформируемые (ГОСТ 14957–76)</i>					
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
<i>То же, литейные (ГОСТ 2856–79)</i>					
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
<i>Сплавы на основе алюминия, деформируемые (ГОСТ 4784–94)</i>					
ВД17	250–300	300	170	55	32
АК4	250–300	300	160	40	35
Д19	250–300	300	180	80	65
<i>То же, литейные (ГОСТ 1583–93)</i>					
АМ5	250–300	300	150	65	40
<i>То же, спеченные</i>					
САП-1	300–500	350	–	70	60
		500	–	40	30

Алюминиевые сплавы более прочные и имеют хорошие технологические свойства. Высокие тепло- и электропроводность позволяют использовать их в качестве проводниковых материалов. Жаропрочные алюминиевые сплавы широко применяют в различных отраслях промышленности, в том числе в авиационной и ракетной технике. Свойства основных алюминиевых жаропрочных сплавов даны в табл. 6.18.

Свойства и область применения жаропрочных сплавов титана приведены в табл. 6.19.

Таблица 6.19. Свойства и область применения жаропрочных титановых сплавов [30, 17]

-1 Марка сплава	Температура, °C		σ_s	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ^{*1} при $N = 10^7$ циклов	Применение
	эксплуатации	испытания					
<i>α-сплавы</i>							
OT4	350–400	400	560	390	200	230–250	Корпусные детали
BT5-1	450–500	500	480	310	150	270	То же
BT20	500–550	500	690	450–480	150–170	360	То же, фасонные отливки
BT18	550–600	500	880	650–700	370	400–430	Лопатки компрессора и другие детали
		600	770	300–330	100–120		
<i>$(\alpha + \beta)$-сплавы</i>							
BT3-1	350–400	400	800/950	780/920	500/250	450–480 ^{*2}	Лопатки, диски, кольца, крепежные и другие детали, фасонные отливки
BT8	450–500	500	750/870	560/580	250	440	Детали авиационных двигателей
BT9	450–500	500	750	600/780	350/450	420 ^{*2}	Детали компрессора и другие детали, фасонные отливки
BT25	500–550	500	850/900	680/750	360	420 ^{*2}	Детали авиационных двигателей

Примечание. В числителе – для сплавов в отожженном, а в знаменателе – в термически упрочненном (после закалки и старения) состоянии.

^{*1} На гладком образце. ^{*2} При $N = 2 \cdot 10^7$ циклов.

6.3. 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 реакторов, двигателей внутреннего сгорания. Велики потери металла от газовой коррозии, при различных технологических операциях (ковке, штамповке), в металлургии и металлообработке (например, при термической обработке).

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. При этом на поверхности металла чаще всего образуется оксидная пленка. От структуры, состава и свойств этой пленки зависит скорость газовой коррозии. Защитные свойства оксидных пленок в значительной степени определяются их сплошностью, которая зависит от отношения удельных объемов оксида и металла. Хорошо защищают металл от дальнейшего окисления только плотные пленки, для которых указанное отношение составляет 1,0–2,5 [17].

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 лучшими 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: $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{NiO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{NiO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 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 устанавливают 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. В руководящих материалах [27] приведены характеристики жаростойкости основных классов металлических конструкционных материалов, применяемых в энергомашиностроении: глубина коррозии, средняя скорость коррозии, предельная допускаемая температура эксплуатации в различных коррозионных средах. Применительно к нагревателям расчетные значения характеристик жаростойкости, используемых 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 [31].

Жаростойкость сплавов магния с марганцем, цинком, алюминием выше, чем нелегированного магния. Улучшает жаростойкость магния бериллий (0,02–0,05 %), 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 бериллием, алюминием, марганцем; немного уступают им сплавы с цинком, оловом, кремнием. 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 [4]). Основные усилия специалистов направлены на разработку защитных покрытий из тугоплавких металлов [17].

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 температурах выше 550 °С и 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 соображениям деформацию, срок службы и режим работы детали, состав окружающей среды. Номенклатура и рекомендации по применению жаростойких сталей и сплавов приведены в табл. 6.20, а характеристики жаростойкости некоторых из них – в табл. 6.21.

Таблица 6.20. Жаростойкие стали и сплавы на основе железа и никеля [17, 25, 39, 44]

Марка стали или сплава (ГОСТ 6632–72)	Температура (на воздухе), °С		Применение	Примечание
	эксплуатации (до 10 000 ч)	интенсивного окисления		
	<i>Стали мартенситного класса</i>			
15X5 (ГОСТ 20072–74)	–	600–650	Трубы	–
40X9C2 ^{*1}	–	850	Клапаны автомобильных, тракторных и дизельных моторов, теплообменники, колосники	Устойчива в серо-содержащих средах
40X10C2M ^{*1}	–	850	Клапаны автомобильных, тракторных и дизельных моторов	То же
30X13N7C2	–	950	То же	»

Марка стали или сплава (ГОСТ 6632-72)	Температура (на воздухе), °С		Применение	Примечание
	эксплуатации (до 10 000 ч)	интенсивно- го окисле- ния		
<i>Стали мартенситно-ферритного класса</i>				
15Х6СЮ		800	Детали котельных установок, трубы	Устойчива в серосодержащих средах
12Х13	—	700	Детали турбин, трубы, детали котлов, детали, работающие в агрессивных средах	—
<i>Стали ферритного класса</i>				
10Х13СЮ	—	950	Клапаны моторов, различные детали	Устойчива в серосодержащих средах
12Х17	850	900	Теплообменники, чехлы, термпары, краны, поддоны, оборудование для кухонь, трубы	Рекомендуется для замены стали 12Х18Н9
08Х17Т, 08Х18Т1	—	900	То же	—
15Х18СЮ	—	1 050	Трубы пиролизных установок, аппаратура, детали	Устойчива в серосодержащих средах
15Х25Т	1 000	1 050	Аппаратура, детали, чехлы термпар, электроды, трубы пиролизных установок, теплообменники	Рекомендуется для замены стали 12Х18Н10Т
15Х28	1 100	1 100–1 150	Аппаратура, детали, трубы пиролизных установок	Рекомендуется для замены стали 20Х23Н18
<i>Стали аустенитно-ферритного класса</i>				
08Х20Н14С2	1 000	1 000–1 050	Трубы	Устойчива в серосодержащих средах
20Х20Н14С2	—	1 000–1 050	Печные конвейеры, ящики для цементации	То же
20Х23Н13	1 000	1 050	Трубы для пиролиза метана, пирометрические трубки, печная арматура, муфели	В интервале температур 600–800 °С охрупчивается
<i>Стали аустенитного класса</i>				
09Х14Н16Б* ²	650	850	Трубы пароперегревателей и трубопроводы установок сверхвысокого давления	—
12Х18Н9	900	850	Трубы, печная арматура, теплообменники, муфели	Неустойчива в серосодержащих средах
08Х18Н10	900	850	То же	—
12Х18Н9Т	900	850	»	Неустойчива в серосодержащих средах
08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т* ¹	900	850	»	То же

Марка стали или сплава (ГОСТ 6632-72)	Температура (на воздухе), °С		Применение	Примечание
	эксплуатации (до 10 000 ч)	интенсивно- го окисления		
<i>Стали аустенитного класса</i>				
12X18H12T ^{*1}	900	850	Трубы	Неустойчива в серо- содержащих средах
36X18H25C2	1 000	1 100	Печные конвейеры и другие нагру- женные детали, головки форсунок, ящики для цементации	Устойчива в наугле- роживающих средах
55X20Г9АН4 ^{*1} , 45X22Н4МЗ ^{*2}	—	950	Клапаны автомобильных моторов	—
10X23H18 ^{*2}	1 000	1 050	Трубы и детали установок для кон- версии метана, пиролиза, листы, печная арматура	В интервале темпера- тур 600–800° С ок- рупчивается
20X23H18 ^{*1}	1 000	1 050	То же	То же
20X25H20C2	1 000	1 050	Подвески и опоры в котлах, трубы электролизных установок, печная арматура, муфели, роторы	»
12X25H16Г7АР ^{*1}	1 050	1 100	Детали газопроводных систем и камер сгорания, диафрагмы, листо- вые детали	Рекомендуется для замены сплавов ни- келя
<i>Сплавы на железоникелевой основе</i>				
ХН38ВТ ^{*1}	1 000	1 050	Детали газовых систем	Рекомендуется для замены стали ХН78Т
ХН28ВМАБ	800–1 000 (до 1 000 ч)	1 100	Листовые детали турбин	—
ХН45Ю ^{*1}	1 250–1 300	—	Детали горелок, чехлы термопар, листы и трубы для деталей печей, муфели колпаковых печей	Рекомендуется для замены стали ХН78Т
<i>Сплавы на никелевой основе</i>				
ХН60ВТ ^{*1}	1 000	1 100	Листовые детали двигателя	—
ХН60Ю ^{*1}	1 200	1 250	То же	—
ХН75МБТЮ ^{*1}	1 050	1 100	Детали газопроводных систем, ап- паратура, детали камер сгорания	—
ХН70Ю ^{*1}	1 200	1 250	Детали газопроводных систем, печ- ная арматура	—
ХН78Т ^{*1}	1 100 (1 200 ^{*2})	1 150	Детали газопроводных систем и камер сгорания	—

^{*1} Марки сталей и сплавов, способных работать в нагруженном состоянии. ^{*2} Кратковременно.

Таблица 6.21. Показатели жаростойкости сталей и сплавов на воздухе [25, 31]

Марка стали или сплава	$t_{исп}$, °C	$v_{кор}$, мм/год	Δm , г/(м ² ·ч)	$h^*_{кор}$, мм
12X13	600	0,02	—	—
	700	0,12	—	—
	800	0,45	—	—
	850	0,83	—	—
12X17	800	0,0034	—	0,004
	850	0,0045	—	0,005
	900	0,0059	—	0,007
15X25T	900	0,0181	—	0,021
	950	0,0276	—	0,032
	1050	0,35	—	—
15X28	1050	0,45	—	—
12X18H9	700	0,06	—	—
	800	0,17	—	—
12X18H9T	750	0,013	—	—
12X18H12T	700	0,0023	—	0,003
36X18H25C2	1000	—	0,42	—
20X23H18	900	—	—	0,018
	950	—	—	0,025
	1000	—	0,2	—
	1100	—	0,35	—
12X25H16Г7АР	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

* Глубина коррозии за 10 000 ч.

Жаростойкость сталей и сплавов на основе железа и никеля повышают 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 FeO-Cr₂O₃ и NiO-Cr₂O₃, которые образуются в высокохромистых сплавах.

Из жаростойких наиболее широкое применение нашли хромистые стали (15X5, 15X6СЮ). Стали, содержащие 5–6 % Cr, обладают достаточно высокой жаростойкостью до 600–650 °C, а стали с 14–15 % Cr – до 800 °C. 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 (08X17T, 15X25T, 08X18T1). Стали без титана применяют для деталей, работающих при высоких температурах в отсутствие больших нагрузок, например для нагревателей.

Дополнительное легирование хромистых сталей алюминием и кремнием повышает их жаростойкость. В качестве жаростойких применяют легированные кремнием хромистые стали – силхромы (40X9C2, 40X10C2M6, 30X13H7C2), которые широко используют в автостроении. Однако содержание алюминия и кремния в отличие от хрома в сталях ограничено, так как эти элементы ухудшают их технологические свойства. Этот недостаток исключается при совместном легировании хромом и алюминием. Химический состав этих сталей и сплавов приведен в ГОСТ 10994–74.

Легирование никелем улучшает технологические и прочностные свойства хромоникелевых аустенитных сталей, но значительно удорожает их. Стали и сплавы с никелем необходимо применять только в тех случаях, когда требуется повышенная жаропрочность и пластичность. Разработаны жаростойкие хромомарганцевые стали, легированные алюминием [17], которые можно использовать как жаростойкие до 900–950 °С; они 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 1350 °С (до 100 ч). Стали ХН35ЮС, 10X18Н18Ю, 10X10Н20ЮС содержат еще меньшее количество никеля, но их можно эксплуатировать до 1200 °С (первую) и 1100 °С (две последние). Сплавы системы Fe–Ni–Co–Cr являются высокожаростойкими, но легирование кобальтом (до 40 %) связано в основном с необходимостью повышения жаропрочности [25].

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, поэтому их используют в качестве материала для нагревателей электропечей, а также для изготовления камер сгорания, газопроводов и деталей газотурбинных установок.

Никелевый сплав, содержащий 20 % Cr – основа большинства жаростойких никелевых сплавов, в которых содержание углерода ограничено 0,1 % (мас.). Марганец уменьшает жаростойкость этих сплавов. Кремний с этой целью также не используют, 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 сплавы на основе железа. Однако в серосодержащих средах никель нестойк к газовой коррозии. Присутствие серы снижает температуру применения никелевых сплавов в окислительных средах 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. 6.22.

Таблица 6.22. Стандарты и технические условия на полуфабрикаты из сталей и сплавов, применяемых в электропечестроении [44]

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
16Х25Т	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 6582–75	–	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. Тонколистовую сталь по ГОСТ 5682–75 (горячекатаную толщиной 1,5–3,9 мм, холоднокатаную толщиной 0,7–3,9 мм) поставляют в термически обработанном и выпрямленном виде; термообработку 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) оговаривают в заказе.

Ниже представлены стандарты на полуфабрикаты, из которых можно изготавливать нагреватели печей сопротивления:

- Проволока холоднокатаная диаметром 0,1–7,5 мм ГОСТ 12766.1–77
- Лента холоднокатаная сечением (0,1 ... 3,2)×(6 ... 250) мм,
длинной 10–40 м ГОСТ 12766.2–77
- Сплав калиброванный диаметром 8–10 мм ГОСТ 12766.3–77
- Прокат сортовой горячекатаный диаметром
6–12 мм в мотках, 13–30 мм в прутках ГОСТ 12766.4–77
- Лента плоская сечением (0,1 ... 1,0)×(0,5 ... 5,0) мм ГОСТ 12766.5–77

В приведенных выше стандартах на сортамент жаростойких сталей определена их номенклатура (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 выпускают 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 снятия напряжений. Механические свойства термически обработанных полуфабрикатов из жаростойких сталей приведены в табл. 6.23, 6.24.

Таблица 6.23. Механические свойства сортовой жаростойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5949–75, не менее

Марка стали	σ_b	σ_T	δ	ψ	Марка стали	σ_b	σ_T	δ	ψ
	МПа		%			МПа		%	
40X9C2	735	441	15	35	20X23H13	490	294	35	50
40X10C2M	931	735	10	35	09X14H16Б	490	196	35	50
30X13H7C2	1176	784	8	25	12X18H9	490	196	45	55
15X6CЮ	441	245	20	40	12X18H9T	539	196	40	55
12X13	558	412	20	60	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	20X25H20C2	558	294	35	50
20X20H14C2	588	294	35	55	12X25H16Г7AP	686	323	40	45

Примечание. Стали 40X10C2M и 30X13H7C2 имеют $KCU = 0,2$ МДж/м², а 12X13 и 08X20H14C2 соответственно 0,9 и 1,0 МДж/м².

Таблица 6.24. Механические свойства термообработанной листовой жаростойкой стали, ГОСТ 7350–77, не менее

Марка стали	σ_b	σ_T	$\delta, \%$	Марка стали	σ_b	σ_T	$\delta, \%$
	МПа				МПа		
<i>Тонколистовая сталь (ГОСТ 5582–75)</i>				<i>Толстолистовая сталь (ГОСТ 7350–77)</i>			
12X13	392	–	21	12X13	490	343	21
12X17	490	–	20	12X17	441	–	18
08X17T	461	–	20	15X25T	441	–	14
08X18T1	461	–	30	20X23H13	568	–	35
15X25T	529	–	17	12X18H9	529	216	38
15X28	529	–	17	12X18H9T	529	216	38
20X20H14C2	588	–	40	04X18H10	490	176	45
20X23H13	539	–	35	08X18H10T	510	206	43
12X18H9	539	–	35	12X18H12T	510	206	43
08X18H10	510	–	45	20X23H18	539	265	35
08X18H10T	510	–	40	12X25H16Г7AP	735	392	50
12X18H10T	629	196	40				
20X23H18	510	–	35				
20X25H20C2	490	–	35				
12X25H16Г7AP	≤ 980	–	35				

Механические свойства нагартованной (числитель) и термообработанной (знаменатель) жаростойких сталей приведены ниже:

	12X13	08X18H10, 12X18H9, 12X18H9T	12X18H10T
d , мм	1,0–6,0	0,2–1,0	1,0–6,0
σ_B , МПа	$\frac{-}{500-750}$	$\frac{1100}{600-900}$	$\frac{1100}{550-900}$
δ , %	16/–	20/–	20/–

Примечание. Термическую обработку проводили в соответствии с рекомендациями ГОСТ 18143–72.

Механические и жаропрочные свойства широко применяемых в электропечестроении жаростойких сталей и сплавов при различных температурах даны в табл. 6.25.

Таблица 6.25. Механические и жаропрочные свойства жаростойких сталей и сплавов, применяемых в электропечестроении [44]

Марка стали	Режим термообработки	t , °С	σ_B	σ_T	δ	ψ	KCU , МДж/м ²	σ_{10000}	σ_{110000}
			МПа		%			МПа	
12X13	Закалка 1030–1050 °С, масло + отпуск 700 °С	20	710–750	580–605	114–22	66–68	1,4–1,7	–	–
		400	585	470–500	13–15	64–67	1,8–2,3	–	–
		500	530–560	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
12X18H10T	Закалка 1050–1100 °С, воздух	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	130–160	100,0
		700	270	120	20	40	2,6	54–70	16,0
800	–	–	–	–	–	15	5,5		
15X25T	Закалка 730–770 °С, вода или воздух	20	450	300	30	45	–	–	–
		800	–	–	–	–	–	5,0	–
		1000	–	–	–	–	–	1,7	0,08
20X23H13	Закалка 1150 °С, воздух	20	667	363	38,5	59,9	2,1	–	–
		800	–	–	–	–	–	1,7	6,8
		1000	–	–	–	–	–	0,42	1,8
20X20H14C2	Закалка 1150 °С, воздух	20	640	350	53	73	–	–	–
		800	230	100	41	42	–	–	–
		900	110	40	58	58	–	–	–
		1000	–	–	–	–	–	–	0,35
20X23H18	Без ТО	800	–	–	–	–	–	–	1,5
		900	–	–	–	–	–	–	0,4
20X23H18	Закалка 1180 °С, вода + старение 800 °С	20	610	300	29–35	47	1,4–1,9	–	–
		800	190	160	19–24	34	1,8	–	–

Марка стали	Режим термо-обработки	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	σ_T	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$	σ_{10000}	$\sigma_{1/10000}$
			МПа		%			МПа	
20Х23Н18	Закалка 1150 °С, воз- дух	800	—	—	—	—	—	20,0	17,5
		900	—	—	—	—	—	12,0	
		1000	—	—	—	—	—	4,5	1,6
20Х25Н20С2	Закалка 1200 °С, воз- дух	20	550	≥ 250	≥ 51,0	73,0	2,5	—	—
		1100	88	—	57,7	67,5	—	—	0,12
ХН45Ю	Закалка 1150 °С, воз- дух	20	710	330	60	58	—	—	—
		1100	34	20	80	55	—	3,3	—
		1200	24	—	100	80	—	1,3	—
ХН70Ю	Закалка 1200 °С, воз- дух	20	650	330–750	50	45	2,5	—	—
		1100	20	—	70	70	0,4	4,5	0,33
		1200	—	—	—	—	—	—	0,17

Сплавы для нагревателей составляют особую группу. Они отличаются сочетанием жаростойкости (табл. 6.26) и высокого омического сопротивления.

Таблица 6.26. Предельные рабочие температуры $t_{\text{пред}}$ и марки сплавов, рекомендуемые к применению в различных средах [31]

Среда	Марка сплава	$t_{\text{пред}}, ^\circ\text{C}$	Среда	Марка сплава	$t_{\text{пред}}, ^\circ\text{C}$	
Воздух	Х15Ю5	1000	Азотсодержащая: N_2 HN_3 (диссоцииро- ванный)	Х32Ю5Т	900	
	ХН20ЮС	1100		Х15Н60-Н	1100	
	Х15Н60-Н	1125		Х20Н80-Н	1200	
	Х23Ю5, Х20Н80-Н, ХН70Ю, ХН60Ю, ХН60Ю3	1200		Х23Ю5	1100	
				Х23Ю5Т	1200	
				ХН70Ю, ХН60Ю3	1200	
				Х23Ю5Т, Х27Ю5Т	1400	
				ХН70Ю, ХН60Ю3, Х15Н60Ю3А	1150	
		0Х24Ю5Т-ВИ		1300	Х23Ю5, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т,	1350
		Х27Ю5Т		1350	0Х24Ю5Т-ВИ	
Пары воды	Х23Ю5Т	1400	Водородная	ХН70Ю, ХН60Ю3	1200	
	Х20Н80-Н	1100		Х23Ю5Т, Х27Ю5Т	1400	
	Х23Ю5Т, Х27Ю5Т	1300		ХН70Ю, ХН60Ю3, Х15Н60Ю3А	1150	
Углерод- и се- росодержащая	Х23Ю5, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т	1150	Вакуум (0,1 ... 0,01 Па)	Х23Ю5, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т,	1350	
				Х20Н80-Н	1200	
				Х23Ю5Т, Х27Ю5Т	1300	
				Х20Н80-Н	300	
			Аргон технической чистоты			
			Пары хлора и брома			

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 даны в табл. 6.27, а механические свойства проволоки из жаростойких сплавов, применяемых для нагревателей, – в табл. 6.28.

Таблица 6.27. Максимальные рабочие температуры нагревательных элементов, работающих на воздухе

Марка сплава (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

Таблица 6.28. Механические свойства термообработанной* проволоки из жаростойких сплавов

Марка сплава (ГОСТ 10994–74)	σ_b	σ_T	δ	ψ	Марка сплава (ГОСТ 10994–74)	σ_b	σ_T	δ	ψ
	МПа		%			МПа		%	
X23Ю5	645	540	23	72	X15Н60-Н	645	2164	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	–

* В соответствии с ГОСТ 12766.1–77.

Широкое применение в промышленности находит жаростойкий чугун как наиболее дешевый и доступный материал (см. гл. 2). Жаростойкость чугуна определяется его сопротивлением окалинообразованию (не более $0,5 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$), увеличению массы и росту (не более 0,2 %) при заданной температуре в течение 150 ч. Для деталей, работающих при температурах до 300°C , можно использовать простые серые чугуны при условии получения мелкого графита. До $450\text{--}500^\circ\text{C}$ удовлетворительными характеристиками обладают отливки из модифицированного и ковкого чугуна. Незначительное легирование хромом (иногда совместно с никелем) позволяет повысить температуру использования чугунов до 700°C . 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 $600\text{--}700^\circ\text{C}$ требуют обязательного использования специальных чугунов [17]. При выборе типа чугуна помимо жаростойкости и ростоустойчивости необходимо принимать во внимание и изменение механических характеристик с температурой, а также учитывать экономическую целесообразность его использования.

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. 6.29, а их механические свойства – в табл. 6.30.

Таблица 6.29. Жаростойкие чугуны [17]

Тип чугуна	Марка	Температура, °С		Δt , г/(м ² ·ч)	Рост, %	Применение	
		предельная	испытания				
Хромистые: низколегированные	ЧХ1	500	500	0,20	0,05	Холодильные плиты доменных печей, колосники, реторты, детали газотурбинных двигателей и компрессоров, горелки, кокили и др.	
		500	600	0,50	0,20		
	ЧХ2	600	600	0,50	8,05		Колосники и балки горна, агломерационных машин; детали химического и нефтехимического оборудования, турбокомпрессоров, термических печей и др.
600		700	0,50	0,20			
ЧХ3*	700	700	0,50	0,10			
высоколегированные	ЧХ16*	700	800	1,50	0,50	Арматура химического машиностроения, печная арматура, детали цементационных печей	
		900	–	–	–		
	ЧХ22С	1000	–	–	–		Детали, не подвергающиеся действию нагрузок; печная арматура и др.
		1100	900	0,20	–		
ЧХ28	1100	1000	0,20	–	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		
Кремнистые низколегированные	ЧС5	700	800	0,20	0,40	Колосники, бронеплиты для печей обжига цементной промышленности, серуглеродные реторты	
		800	800	0,05	0,20		
ЧС5Ш	800	900	0,20	–	Арматура котлов, детали пароперегревателей котлов, газовые сопла, подовые плиты термических печей		
Алюминиевые: низколегированные высоколегированные	ЧЮХШ	700	–	–	–	Пресс-формы для стекловых изделий, детали печного оборудования, ролики листпрокатных станов	
		800	–	–	–		
	ЧЮ6С5*	800	–	–	–	Отливки, работающие при температурах до 800 °С в условиях резких теплосмен	
		800	–	–	–		
	ЧЮ7Х2*	800	–	–	–	Детали печной арматуры	
ЧЮ22Ш*	1100	1100	0,05	–	Детали арматуры и пароперегревателей котлов, обжиговых печей, нагревательных печей; колосники		
ЧЮ30*	1100	–	–	–	Детали печей обжига колчедана		

Примечание. Ш – графит шаровидной формы.

* Жаростойкие чугуны с повышенной износостойкостью.

Таблица 6.30. Механические свойства жаростойких чугунов, не менее

Марка чугуна	σ_b	σ_H	НВ	Марка чугуна	σ_b	σ_H	НВ
	МПа				МПа		
ЧХ1	170	350	203–280	ЧС5	150	290	140–294
ЧХ2	150	310	203–280	ЧС5Ш	290	–	223–294
ЧХ3	150	310	223–356	ЧЮХШ	890	590	183–356
ЧХ16	350	700	390–440	ЧЮ6С5	120	240	236–294
ЧХ22С	290	540	215–333	ЧЮ7Х2	120	170	254–294
ЧХ28	370	560	215–264	ЧЮ22Ш	290	490	235–356
ЧХ32	390	690	245–333	ЧЮ30	200	350	356–536

Наряду с жаростойкими металлами и сплавами широкое применение в промышленности получили керамика и металлокерамика (керметы). Общим недостатком этих материалов (на основе окислов, боридов, карбидов, нитридов и силицидов) является их хрупкость при комнатной температуре.

6.4. Жаропрочные материалы

6.4.1. 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: гомогенные, с карбидным и карбидно-интерметаллидным упрочнением.

К группе гомогенных аустенитных сталей относятся главным образом низкоуглеродистые хромоникелевые стали, дополнительно легированные более тугоплавкими элементами. Гомогенные аустенитные стали используют преимущественно в энергомашиностроении для изготовления труб паронагревателей и паропроводов, арматуры установок сверхвысоких параметров; они рассчитаны на длительную (до 10^5 ч) эксплуатацию 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 повышением содержания никеля (отношение Ni/Cr > 1) при низком содержании углерода (0,06–0,012 %) и повышенном отношении (Ti, Nb)/C (более 10), что исключает возможность образования при эксплуатации карбидных фаз типа $Me_{23}C_6$, охрупчивающих стали. Дополнительное легирование сплавов вольфрамом (до 2–3 %) и молибденом (до 2,5 %) способствует повышению жаропрочности.

Базовым для гомогенных аустенитных сталей является состав стали 10Х18Н9Т, механические свойства которой представлены в табл. 6.31.

Таблица 6.31. Механические свойства стали 10Х18Н9Т при высоких температурах [25]

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$
		%					%		
20	554	63	71	1,25	900	91	36	70	2,36
650	320	16,9	33,2	1,96	1000	55	43	71	2,06
800	185	23,7	51,5	2,59	1100	38	37	70	1,51

Дополнительное легирование молибденом увеличивает жаропрочные свойства стали (табл. 6.32). Бор и редкоземельные элементы положительно влияют на жаропрочные и технологические свойства этих сталей (табл. 6.33).

Таблица 6.32. Пределы длительной прочности сталей 08X18H12M3T [25], МПа

$t, ^\circ\text{C}$	Время, ч							
	1	10	100	300	500	1000	10000	100000
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	—	—

Таблица 6.33. Пределы длительной прочности гомогенных жаропрочных сталей [17]

Марка стали	$t_{\text{зак}}$	$t_{\text{исп}}$	σ_{100}	σ_{10000}	σ_{100000}
	$^\circ\text{C}$		МПа		
10X18H12T	1100–1200	600	—	—	110
		650	—	—	70
		700	—	—	45
08X15H24B4TP	1130	700	260	180	120
		750	170	110	80

Термическая обработка аустенитных гомогенных сталей состоит из закалки (аустенизации) при высоких температурах (1050–1200 $^\circ\text{C}$) или аустенизации и стабилизирующего отпуска (700–750 $^\circ\text{C}$) с целью получения более однородного γ -твердого раствора, заданной величины зерна (3–6 баллов) 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 650–750 $^\circ\text{C}$ и высоких напряжениях. Их используют для изготовления ответственных деталей энергомашиностроения, таких как диски и лопатки турбин, крепежные детали и т. п. 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 °С) твердение сталей протекает крайне медленно, но с образованием большого количества карбидной фазы высокой дисперсности. При длительных выдержках старения существенно снижаются характеристики пластичности сталей. С целью получения наиболее выгодных свойств для этих сталей используют старение при температурах на 100–150 °С выше рабочей температуры или двойное старение (низкотемпературное и 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 40X14N14B2M. Основное ее назначение – выхлопные клапаны авиационных и автомобильных двигателей, крепежные детали. Сталь 31X19N9MBBГ при более низком содержании никеля дополнительно легирована вольфрамом, титаном, ниобием и, кроме того, содержит марганец. С целью повышения пластичности сталь переплавляют методом электрошлакового переплава. Еще более низкое содержание никеля имеют стали 40X15M7Г7Ф2M и 37X12N8Г8МФБ, которые могут быть использованы до 800 °С.

Длительная прочность и сопротивление усталости сталей в значительной степени зависят от однородности и размера зерна. В этой связи не рекомендуется перегревать стали выше 1160 °С и заканчивать деформацию ниже 1000 °С 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 40X15N7ГФ2МС. Однако вследствие ограниченной жаростойкости при температурах выше 750 °С ее целесообразно алитировать. Сталь 37X12N8Г8МФБ 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 и двойное старение.

В табл. 6.34–6.45 представлены свойства основных аустенитных сталей с карбидным упрочнением.

Таблица 6.34. Механические свойства различных полуфабрикатов из стали 31X19M9MBB при 20 °С [17]

Режим ТО	Вид полуфабриката, направление вырезки образцов	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{ МДж/м}^2$
		МПа		%		
Закалка 1110–1180 °С, вода + старение 750–800 °С, 15 ч, воздух	Сортовой прокат, продольное	600	300	30	40	–
Закалка 1110–1180 °С; вода + старение 800 °С, 15 ч, воздух	Поковки, продольное	700	300	35	40	–
	То же, тангенциальное	700	300	27	30	0,4

Таблица 6.35. Механические свойства стали 31Х19Н9МВБТ при различных температурах (пруток, продольные образцы) [17]

Режим ТО	t, °С	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
		МПа		%		
Закалка 1150–1180 °С, вода + старение 800 °С, 15 ч	20	750	440	31	40	0,95
	560	500	210	26	40	1,0
	600	490	250	20	46	1,1
	650	440	240	24	55	1,1
Закалка 1150–1180 °С; вода + старение 700 °С, 50 ч	20	740	320	32	25	0,4
	300	700	320	32	46	1,5
	400	670	310	28	43	1,4
	500	630	280	26	45	1,4
	600	590	260	26	46	1,0
	650	460	190	15	40	0,5
	700	420	250	21	40	1,0
	750	320	220	25	52	–
	800	240	200	29	64	–

Таблица 6.36. Пределы длительной прочности и ползучести стали 31Х19Н9МВБТ (числитель) и 40Х14Н14В2М (знаменатель) [17], МПа

t, °С	σ_{10000}	σ_{100000}	$\sigma_{1/10000}$	$\sigma_{1/100000}$
560	240/–	170/–	300/–	260/–
600	150/180	110/80	230/180	200/150
650	–/70	80/40	180/130	150/100
700	–/37	40/16	100/26	60/–

Таблица 6.37. Релаксационная стойкость стали 31Х19Н9МВБТ [17]

t, °С	σ_0 , МПа	σ_r , МПа, за время, ч								
		100	500	1000	3000	4000	5000	10000	15000	20000
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	–	–	–	–

Таблица 6.38. Механические свойства стали 40Х14Н14В2М, при 20 °С (продольные образцы) [17]

Вид полуфабриката	Режим ТО	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
		МПа		%		
Прутки, штанги, полосы	Закалка 800 °С, 5 ч, воздух	720	320	20	25	0,5
Детали арматуры	Закалка 1150–1180 °С, вода + старение 750 °С, 5 ч	700	300	–	35	–

Таблица 6.39. Механические свойства прутков из стали 40X14H14B2M (продольные образцы) при различных температурах [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, МДж/м ²
	МПа		%		
550	580	260	22	31	–
600	500	250	15	26	0,65
650	446	240	12	24	0,75
700	340	220	10	22	0,80
750	280	200	8,8	17	0,83

Таблица 6.40. Механические свойства прутков из стали 40X14H14B2M (продольные образцы) при различных температурах после старения в течение 1000 ч [17]

$t_{ст}$	$t_{исп}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, МДж/м ²
$^\circ\text{C}$		МПа		%		
550	20	860	410	–	–	0,8
	550	570	270	23	–	–
	650	550	260	17	–	–
	700	420	250	15	–	–
600	20	820	410	18	36	0,6
	550	820	310	–	28	–
	600	660	320	–	19	–
	700	410	280	15	30	–
700	20	820	430	–	32	0,75
	600	490	260	20	46	–
	650	470	270	19	44	–
	700	400	260	17	39	–

Таблица 6.41. Свойства сварного соединения из стали 40X14H14B2M после отпуска при 750 °С [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, МДж/м ²
	МПа		%		
20	730	470	33	48	0,70
450	580	300	32	43	0,73
650	450	310	45	29	0,75

Таблица 6.42. Механические свойства прутков из стали 40X15H7ГФ2МС (продольные образцы) при различных температурах [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%			МПа		%	
20	1000	600	15	15	700	520	430	8	32
300	810	550	13	26	800	380	280	8	17
400	780	540	12	23	900	250	–	7	18
500	700	490	12	23	1000	160	–	6	21
600	640	500	9	23					

Таблица 6.43. Пределы длительной прочности, ползучести и выносливости стали 40X15H7ГФ2МС [17], МПа

$t, ^\circ\text{C}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1} при $N=10^7$ циклов	$t, ^\circ\text{C}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1} при $N=10^7$ циклов
20	—	—	—	—	510	700	250	180	110	155	340
500	—	—	—	240	—	800	130	84	50	80	240
600	430	320	250	230	380	900	75	—	—	—	—

Таблица 6.44. Релаксационная стойкость стали 40X16H7ГФ2МС [17]

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_0, \text{МПа}$	$\sigma_t, \text{МПа, за время, ч}$					$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_0, \text{МПа}$	$\sigma_t, \text{МПа, за время, ч}$				
		100	1000	2000	5000	10000			100	1000	2000	5000	10000
560	150	130	120	117	106	93	580	150	127	120	112	94	72
560	200	170	160	157	145	123	580	200	174	150	147	120	90
660	250	210	200	196	182	160	580	250	200	180	172	140	100

Таблица 6.45. Механические свойства стали 37X12H8Г8МФБ при различных температурах [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{кДж/м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{кДж/м}^2$
	МПа		%				МПа		%		
20	1000	600	20	25	350	500	680	500	13	37	700
200	770	600	16	37	—	550	660	490	12	37	750
300	740	540	14	36	—	600	600	490	12	38	500
350	730	520	14	37	—	650	560	450	12	42	560
400	730	500	15	36	—	700	500	430	13	37	560
450	720	500	13	38	700	750	420	380	15	44	—

Сталь 37X12H8Г8МФБ устойчива против окисления в воздушной среде при температурах до 700–750 °С. При 700 °С скорость ее составляет 0,06 кг/(м²·ч). Пределы длительной прочности и выносливости этой стали приведены ниже, МПа [17]:

	600 °С	650 °С	700 °С
σ_{100}	450	370	310
σ_{1000}	340	250	230
σ_{5000}	310	220	190
σ_{10000}	300	210	180
σ_{-1}	340	230	130

Аустенитные стали и сплавы с карбидно-интерметаллидным упрочнением имеют ограниченное содержание углерода; большинство их свариваемые стали. Вследствие ограничения по углероду для получения устойчивого γ -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 них характерно отношение Cr/Ni < 1. Стали 09X14H19B2BP, 09X14H19B2BP1 имеют в своем составе значительное количество вольфрама. Основными упрочняющими фазами являются карбонитрид Nb (C, N) и фаза Лавеса Fe₂W. 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 она выделяется в количестве 5 %, причем весьма медленно. Механические свойства этих сплавов при обычных и повышенных температурах представлены в табл. 6.46–6.49.

Таблица 6.46. Механические свойства прутков из стали 08X16H13M2B (продольные образцы) при 20 °С и повышенных температурах [25]

t, °С	σ _s	σ _{0,2}	δ	ψ	σ ₁₀₀₀₀	σ ₁₀₀₀₀₀	σ _{1/10000}	σ _{1/100000}
	МПа		%		МПа			
20	620	230	45	68	—	—	—	—
500	490	175	30	50	—	—	—	—
550	—	—	—	—	260	210	—	160
600	470	175	29	55	200	150	140	90
650	440	175	27	57	130	95	100	90
700	—	—	—	—	60	35	60	22

Таблица 6.47. Физические свойства стали 08X16H13M2B* при различных температурах [17]

t, °С	E, ГПа	λ, Вт/(м·°С)	α [*] ·10 ⁶ , °С ⁻¹	t, °С	E, ГПа	λ, Вт/(м·°С)	α [*] ·10 ⁶ , °С ⁻¹
20	206	—	—	600	158	23,0	17,8
200	191	17,1	—	700	—	24,7	—
400	174	20,1	17,1	800	—	—	18,6
600	167	21,7	—				

* Значения α приведены для интервала температур от 20 °С до указанной в таблице.

Таблица 6.48. Ударная вязкость и твердость стали 09X14H16B при 20 °С после старения при различных температурах [25]

t, °С	τ, ч	KCU, МДж/м ²	НВ	t, °С	τ, ч	KCU, МДж/м ²	НВ
600	500	1,67	145	650	500	1,49	147
	1000	1,74	151		1000	1,55	154
	2500	1,40	154		2500	1,64	143
	5000	1,35	156		5000	1,30	147
				700	1000	1,47	147

**Таблица 6.49. Механические свойства стали 09Х14Н16Б
при 20 °С и повышенных температурах [17]**

t, °С	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м ²	σ_{10000}	σ_{100000}	$\sigma_{1/10000}$	$\sigma_{1/100000}$
	МПа		%			МПа			
20	570	250	51	73	2,1	—	—	—	—
600	400	188	32	61	3,3	170	120	160	100
650	360	160	33	60	—	110	77	100	65
700	330	160	32	51	3,3	65	40	55	37

Релаксационная стойкость прутков из стали 08Х16Н13М2Б (продольные образцы) при 600 °С изменяется следующим образом [17]:

τ , ч	100	500	1000	3000	5000
σ_τ , МПа	$\frac{121}{95}$	$\frac{113}{88}$	$\frac{107}{85}$	$\frac{98}{77}$	$\frac{94}{68}$

Примечание. В числителе – при $\sigma_0 = 200$ МПа, а в знаменателе – при $\sigma_0 = 150$ МПа.

Эффективно повышают жаропрочность и технологические свойства аустенитных сталей легирование элементами для образования интерметаллидов Ni₃Ti, Ni₃Al и Ni₃(Ti, Al). Из сплавов этой группы изготавливают широкий ассортимент полуфабрикатов и изделий. В табл. 6.50, 6.51 представлены некоторые свойства типичного сплава этой группы.

**Таблица 6.50. Механические свойства полуфабрикатов
из стали 10Х11Н20ТЗР при 20 °С [17]**

Вид полуфабриката	Режим ТО	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
		МПа		%		
Листы холоднокатаные	Закалка 1100 °С, воздух	600	—	40	—	—
Лента холоднокатаная	Закалка 1080 °С, воздух	550	—	—	—	—
Пруток	Закалка 1100–1150 °С, воздух + старение 750 °С	900	600	10	15	0,8

**Таблица 6.51. Механические свойства стали 10Х11Н20ТЗР
при 20 °С и при повышенных температурах [17]**

t, °С	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	t, °С	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%			МПа		%	
20	1000	600	25	30	700	680	470	15	18
400	950	600	23	30	750	560	450	15	20
600	800	530	22	30	800	360	250	25	45

Наряду с высокой жаропрочностью сплавы с интерметаллидным упрочнением характеризуются достаточно высокими показателями усталостной прочности. Пределы длительной прочности и выносливости гладких образцов из стали 10X11H20T3P приведены ниже [17]:

$t, ^\circ\text{C}$	500	550	600	650	700	750
$\sigma_{100}, \text{МПа}$	730	650	590	480	400	280
$\sigma_{-1}, \text{МПа}$, при $N=10^7$ циклов	370	—	340	—	280*	—

* Такое же значение σ_{-1} получено и на образцах с надрезом ($r=0,75 \text{ мм}$).

В соответствии с ГОСТ 5632–72 композиция элементов, состоящая из железа, никеля, хрома и некоторых добавок, в которой суммарное содержание никеля и хрома превышает 50 %, относится к категории сплавов, а не сталей.

Механические свойства сталей 09X14H19B2BP и 08X15H24B4TP приведены в табл. 6.52–6.55.

Таблица 6.52. Механические свойства стали 09X14H19B2BP [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$	σ_{10000}	σ_{100000}	$\sigma_{1/10000}$	$\sigma_{1/100000}$
	МПа		%			МПа			
20	570	230	44	70	1,8	—	—	—	—
600	440	140	32	61	2,2	270	200	—	—
650	430	140	33	61	2,1	168	130	110	140
700	410	140	33	69	2,2	125	95	65	85
750	—	—	—	—	—	70	55	—	—

Таблица 6.53. Физические свойства стали 09X14H19B2BP при различных температурах [17]

$t, ^\circ\text{C}$	$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	$\lambda, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	$\lambda, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$
20	2,02	15,4	—	500	1,68	21,3	17,8
100	1,99	16,3	15,2	600	1,60	23,4	18,1
200	1,93	16,3	16,3	700	1,52	25,1	18,6
300	1,86	18,0	16,9	800	—	27,6	18,6
400	1,78	19,2	17,5				

* Значения α приведены для интервала температур от 20 °C до указанной в таблице.

Таблица 6.54. Механические свойства стали 08X15H24B4TP при повышенных температурах [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$	σ_{1000}	σ_{10000}	σ_{100000}	$\sigma_{1/10000}$	$\sigma_{1/100000}$	σ_{-1} при $N=10^8$ циклов
	МПа		%			МПа					
20	750	500	20	30	1,20	—	—	—	—	—	420
600	—	—	—	—	—	500	400	300	—	—	400
650	650	450	18	30	1,01	400	200	230	200	140	340
700	600	400	18	30	1,00	250	180	140	—	—	270
750	500	350	20	40	0,10	180	120	80	80	60	—

Таблица 6.55. Релаксационная стойкость стали 08X15H24B4TP [17]

t, °C	σ ₀ , МПа	σ _t , МПа, за время, ч					
		160	500	1000	2000	5000	10000
550	200	155	154	153	152	–	152
	250	219	218	218	218	216	200
	300	273	273	271	269	265	249
600	200	185	183	182	179	176	166
	250	227	226	224	219	213	198
	300	268	266	266	263	256	243
650	200	177	174	169	162	–	132
	250	204	198	189	186	–	153
	300	248	245	236	228	–	188
700	200	162	143	131	123	108	85
	250	189	174	159	148	134	100
	300	238	210	179	172	156	113

Простейшим жаропрочным сплавом на основе железа является сплав ХН32Т, применяемый для длительной службы при 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 (10000 ч и выше) при 700–800 °С ударная вязкость сплава не опускается ниже 1 МДж/м².

Из дисперсионно-упрочняемых сплавов самым жаропрочным является сплав ХН35ВТЮ. По системе легирования он типичен для ряда других сплавов, описанных в [17]. Сплав подвергают двойной закалке. Цель первого нагрева – вырастить зерно 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, не переходят 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 надрезу.

Если температура эксплуатации 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 штампованную деталь с мелким зерном подвергают 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.

6.4.2. 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. Кроме того, хром играет активную роль в защите сплавов от окисления; молибден, вольфрам, ванадий образуют в сочетании с хромом упрочняющие сплав карбидные фазы Me_7C_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 $(Ni, Co)_3(Al, Ti, Nb, Ta)$; кроме того, карбидообразующие элементы этой группы образуют карбиды типа MeC .

Углерод, бор, цирконий, а также лантан, церий, неодим, 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 .

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 количестве 0,005–0,008 %. После закалки сплав обладает относительно невысокой прочностью, но весьма высокой пластичностью. Высокая пластичность сплава в закаленном 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 ХН77ТЮ. Этот эффект был затем широко использован при создании жаропрочных сплавов на основе никеля.

Последующие разновидности сплава ХН77ТЮР отличаются от него более высоким содержанием титана, алюминия и дополнительным введением ниобия, что повышает количество γ' -фазы, выделяющейся при старении (табл. 6.56).

Таблица 6.56. Свойства сплава ХН70МВТЮБ при различных температурах [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$
	МПа		%				МПа		%		
20	1060	560	16	16	–	800	720	450	9	12	0,6
600	980	550	24	24	–	850	600	400	8	15	0,7
700	930	530	16	16	0,8	900	380	220	12	35	–

Ниже приведены пределы длительной прочности, ползучести и выносливости сплава ХН70МВТЮБ [16], МПа:

$t, ^\circ\text{C}$	20	650	700	800	850
σ_{100}	—	620	480	250	180
σ_{200}	—	600	420	230	230
$\sigma_{0,2/100}$	—	—	300	180	180
σ_{-1}	420	350 ^{*1}	370	350	180 ^{*2}

^{*1} При 600°С. ^{*2} При 900°С.

а также чувствительность к надрезу при испытании на длительную прочность [17]:

$t, ^\circ\text{C}$	650	700	800
σ^* , МПа	600	400	250
Время до разрушения образцов, ч:			
гладких	280	220	100
с надрезом ($r = 0,1$ мм)	12–17	35–130	90–140

^{*} Напряжение при испытании.

С целью упрочнения твердого раствора в сплавы вводят молибден, вольфрам, ниобий (табл. 6.57, 6.58). Чтобы сохранить удовлетворительную пластичность сплавов, в них снижают содержание хрома. Однако уменьшение его количества ниже 15 % влечет за собой снижение сопротивления окислению. Поэтому сплавы с низким содержанием хрома требуют защиты от газовой коррозии.

Таблица 6.57. Механические свойства сплава ХН80ТБЮ при различных температурах [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$
	МПа		%				МПа		%		
29	960	650	18	22	0,7	630	790	600	7	—	—
500	1000	610	26	26	—	650	700	550	7	10	1,0
600	830	600	11	—	—	700	680	500	7	6	1,2

Таблица 6.58. Пределы длительной прочности и выносливости сплава ХН80ТБЮ, МПа [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_{1000}	σ_{5000}	σ_{10000}	σ_{-1} при $\sigma_{\text{стат}} = 180$ МПа на базе циклов			
				10^5	10^6	10^7	10^8
650	450	320	280	340/250	300/190	250/180	200/170
700	280	220	170	—	—	—	—

Примечание. При симметричном цикле нагружения σ_{-1} составляет 420, 390 и 370 МПа при N , равном $10^6, 10^7, 10^8$ циклов соответственно.

^{*} В числителе – для гладких образцов, а в знаменателе – для образцов с надрезом.

При горячей деформации высоколегированных жаропрочных сплавов имеются следующие особенности: 1) малая пластичность при всех температурах; 2) высокое сопротивление деформации, включая и однофазную область твердого раствора; 3) узкий температурный интервал деформации; 4) высокая чувствительность к перегреву (нагрев выше определенной температуры приводит к катастрофическому снижению пластичности). Комплексно-легированный сплав с интерметаллидным упрочнением ХН70ВМТЮ сочетает высокую жаропрочность с достаточной пластичностью и вязкостью (табл. 6.59–6.61).

Таблица 6.59. Механические свойства сплава ХН70ВМТЮ при различных температурах [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$t, ^\circ\text{C}$	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%			МПа		%	
20	1070	700	14	13	800	720	580	4,5	9
600	990	680	16	19	850	590	470	10	14
700	900	650	10	12	900	490	380	14	19
750	770	650	6	10					

Таблица 6.60. Механические свойства сплава ХН70ВМТЮ [17]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$
	МПа		%				МПа		%		
20	1030	670	28	26	0,8	750	710	580	14	28	0,85
500	1020	640	97	23	0,9	800	570	500	17	34	1,05
600	970	600	23	18	0,9	900	300	280	31	70	–
650	990	600	20	23	0,8	950	1140	120	49	74	–
700	890	580	16	27	0,9	1000	80	70	58	76	–

Таблица 6.61. Пределы длительной прочности сплава ХН70ВМТЮ [17], МПа

$t, ^\circ\text{C}$	σ_{1000}	σ_{2000}	σ_{5000}	σ_{10000}	σ_{20000}
600	650/–	600/–	560/370	530/–	500/–
650	480/–	400/–	–	370/–	340/–
700	310/–	270/–	–	–	–
750	220/–	200/200	170/150	160/–	190/–
800	140/–	–	–	–	–

Примечание. В числителе – для гладких образцов, в знаменателе – для образцов с надрезом.

Предел выносливости сплава ХН70ВМТЮ при $N = 10^7$ циклов в зависимости от температуры измеряется следующим образом [17]:

$t, ^\circ\text{C}$	20	600	700	800	850	900
$\sigma_{-1}, \text{МПа}$. . .	$\frac{340}{250}$	$\frac{350}{240}$	$\frac{370}{280}$	$\frac{360}{290}$	$\frac{300}{-}$	$\frac{250}{190}$

* В числителе – для гладких образцов, в знаменателе – для образцов с надрезом.

Пределы длительной прочности и ползучести этого сплава приведены ниже [17], МПа:

$t, ^\circ\text{C}$	650	750	800
σ_{100}	—	360	240
σ_{1000}	550	250	175
σ_{3000}	470	215	145
σ_{5000}	440	200	130
σ_{10000}	400	180	125

Легирование кобальтом позволяет повысить жаропрочные свойства без потери, а иногда и с повышением характеристик пластичности (табл. 6.62, 6.63).

Таблица 6.62. Механические свойства сплава ХН55ВМКЮ

$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$
	МПа		%				МПа		%		
20	1100	750	9	11	0,2	850	750	650	3	5	0,3
700	1080	750	5	7	0,3	900	650	500	3	5	0,4
750	1080	750	5	7	0,3	950	550	400	4	5	0,4
800	1000	700	5	7	0,3	1000	350	250	6	13	0,4

Таблица 6.63. Пределы длительной прочности и выносливости сплава ХН55ВМКЮ, МПа

$t, ^\circ\text{C}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{2000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1} на базе циклов	
					10^7	10^8
800	440	310	290	370	—	—
900	240	130	100	140	320	280
950	140	65	55	—	—	—

Сведения об использовании сплавов этой группы даны в табл. 6.64.

Таблица 6.64. Примерное назначение некоторых жаропрочных сплавов на основе никеля [17]

Марка сплава (ГОСТ 5632–72)	Назначение	Срок службы	Температура, $^\circ\text{C}$	
			эксплуатации	интенсивного окисления
ХН70ВМТ, ХН70ВМТЮ	Лопатки газовых турбин, крепежные детали	Весьма длительный	750	1000
			850	1000
ХН80ТБЮ	То же	То же	700	1000
ХН70МВТЮБ, ХН70Ю, ХН78Т	Листовые детали: газопроводы, работающие при умеренных напряжениях	Ограниченный	850	1200
			1100	1200
			1100	1100
ХН75МБТЮ	Листовые детали турбин	»	850	1050
ХН77ТЮР	Диски, лопатки турбин	»	750	1050
ХН60ВТ	Листовые детали турбин	»	1000	1100
ХН62МВКЮ	Лопатки, диски турбин	Длительный	800	1080

6.4.3. Сплавы на основе тугоплавких металлов

К тугоплавким относят металлы, имеющие температуру плавления выше 2000 °С. По комплексу свойств и доступности для практического применения важное значение имеют вольфрам, молибден, ниобий, тантал. В табл. 6.65 приведены основные физические и механические свойства тугоплавких металлов, которые зависят от способа получения металлов, их чистоты.

Таблица 6.65. Физические и механические свойства (при 20 °С) тугоплавких металлов [17]

Металл	$t_{\text{пл}}$	$t_{\text{жуп}}$	γ , т/м ³	c , Дж/(кг·°С), при 20 °С	λ , Вт/(м·°С)	$\rho \cdot 10^3$, Ом·м, при 20 °С	$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ , при 0–1000 °С	G , ГПа	σ_b , МПа	δ , %
	°С									
Nb	2468	4927	8,57	0,272	0,523	14,5	7,0	6	350	50
Ta	2996	5427	16,6	0,138	0,544	13,1	6,6	7	330	70
W	3400	5900	19,3	0,134	2,0	5,3	4,5	15,14	800–1100	0
Mo	2622	5560	10,2	0,256	1,46	5,3	5,2	12,2	800–900	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, содержащем 0,02 % O₂, температура перехода в хрупкое состояние составляет 300 °С. При уменьшении концентрации кислорода до 0,0001 % молибден оказывается пластичным до –196 °С.

Тантал и ниобий выгодно отличаются от вольфрама и молибдена высокими показателями пластичности, технологичности, низкими температурами перехода в хрупкое состояние. Ниобий вакуумно-дуговой плавки – наиболее распространенного способа получения полуфабриката – имеет температуру перехода в хрупкое состояние –185 °С. Вследствие высокой пластичности ниобий и тантал хорошо обрабатываются давлением и свариваются аргонодуговой или электронно-лучевой сваркой в вакууме. Точечную сварку листов толщиной менее 0,5 мм можно проводить на воздухе.

Тантал и ниобий применяют 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, исключая 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 из тугоплавких металлов и сплавов регламентированы техническими условиями, в соответствии с которыми выпускают полосы, пластины, проволоку, трубы, фольгу и пр.

Наиболее изучены жаропрочные и сравнительно технологичные ниобиевые сплавы, предназначенные для работы при 1100–1300 °С. Жаропрочные танталовые сплавы применяют при 1300–1500 °С, однако они более дефицитны и дороги в связи с повышенной

стоимостью тантала. Из тугоплавких металлов VIA группы наибольшее внимание уделяется молибдену. Металлы этой группы предназначены для работы при 1250–1450 °С. Сплавы на основе вольфрама в качестве жаропрочных конструкционных материалов могут работать выше 1650 °С.

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 % Мо. Механические свойства сплавов – твердых растворов на основе вольфрама представлены в табл. 6.66.

Таблица 6.66. Механические свойства нелегированного вольфрама и сплавов на его основе при различных температурах [17]

Металл (сплав), % (мас.)	Полуфабрикат	σ_b , МПа, при t , °С			δ , %, при t , °С		
		1650	1930	2200	1650	1930	2200
W	Прессованные прутки	110	60	34	55	68	62
W + 5 Мо	То же	200	70	37	28	89	116
W + 25 Мо	Кованые прутки	220	80	31	15	48	–
W + 0,5 Мо	Прессованные прутки	260	90	51	32	55	81
W + 1,6 Та	То же	140	90	50	28	47	44

Молибден существенно измельчает зерно вольфрама уже при содержании его около 2 %. Увеличение содержания молибдена до 25–20 % повышает жаропрочность сплавов при 1500–1700 °С. Заметно возрастают характеристики жаропрочности вольфрама при введении 2–3 % Ni или Та. Высокопрочный деформируемый сплав ВВ-2 системы Nb–W рекомендуется для работы при температурах выше 1700 °С [17]. Предел длительной прочности этого сплава при 1500 °С за 50, 100 и 500 ч испытания составляет соответственно 70, 60 и 50 МПа, а его временное сопротивление при 1650 °С и 1925 °С составляет 350 МПа и 120 МПа соответственно.

Легирование рением наряду с увеличением жаропрочности существенно снижает температуру перехода в хрупкое состояние, повышает технологическую пластичность вольфрама (табл. 6.67).

Таблица 6.67. Временное сопротивление вольфрамовых сплавов в деформированном состоянии при различных температурах испытания [17], МПа

Состав сплава, % (мас.)	Температура, °С		
	20	1500	1800
W + 30 Re	2720 (1400)	341	143
W + 25 Re	2710 (1190)	300	159
W + 50 Re	1780 (950)	152	60
W + 40 Re	1530 (840)	136	62
W + 20 Мо + 40 Re	1850 (1250)	210	118
W + 15 Мо + 29 Re	1290 (980)	260	93
W + 24 Мо + 31 Re	1130 (900)	240	86
W + 34 Мо + 33 Re	1290 (920)	216	93

Примечание. В скобках приведены значения σ_b в отожженном состоянии.

Существенно повышает температуру рекристаллизации вольфрама и его жаропрочные свойства, стабилизирует структуру легирование дисперсными частицами ThO_2 (табл. 6.68).

Таблица 6.68. Временное сопротивление вольфрамовых сплавов, получаемых порошковой технологией [17]

Состав сплава, % (мас.)	Вид полуфабриката	σ_t , МПа, при t , °С			
		1650	1930	2200	2420
W + 50 Mo	Проволока	140	45	35	13
W + 1 ThO ₂	Листы	260	190	90	—
W + 2 ThO ₂	»	200	180	120	70
W + 5 Re + 2 ThO ₂	»	250	—	—	—

Перспективными оказались сплавы вольфрама с добавками циркония, гафния, ниобия, бора и углерода. Временное сопротивление этих сплавов в 3–5 раз превышает временное сопротивление нелегированного вольфрама и достигает 548 МПа при 1699 °С, 148 МПа при 2482 °С и 46 МПа при 2760 °С.

Сплавы на основе молибдена. При разработке жаропрочных сплавов на основе молибдена преследуют в основном две цели: улучшить характеристики жаропрочности и повысить низкотемпературную и технологическую пластичность. В большинстве случаев (за исключением сплавов, легированных рением), увеличение содержания легирующих элементов, повышающих жаропрочность (W, C и др.), приводит к заметному снижению характеристик пластичности.

Механические свойства наиболее распространенных сплавов на основе молибдена представлены в табл. 6.69.

Жаропрочные сплавы на основе молибдена можно разделить на три основные группы.

1. Низкоуглеродистые (0,004–0,05 % C) низколегированные (0,07–0,5 % Ti или Zr) сплавы молибдена. В эту группу могут быть включены сплавы Mo + 0,5Ti, TZM, ЦМ-2А, ВМ-1 и ВМ-2. Эти сплавы характеризуются хорошими технологическими свойствами. Из них изготавливают ленты, полосы и другие полуфабрикаты в соответствии с техническими условиями [17].

2. Низколегированные высокоуглеродистые (до 0,25–0,5 % C) сплавы молибдена. По сравнению со сплавами первой группы они обладают более высокой жаропрочностью, в них несколько увеличено содержание тантала и циркония (до 0,5 %). Упрочнение достигается в основном благодаря процессам карбидообразования. Представителями этой группы являются сплавы TZC и ВМ-3. Применение высокоуглеродистых сплавов осложняется их плохой технологичностью, высокой температурой перехода в хрупкое состояние.

3. Высоколегированные молибденовые сплавы. Эти сплавы имеют высокие жаропрочные свойства и могут длительное время работать при температурах до 2000 °С. Сплавы с 25–50 % W могут работать при температурах 1500–2500 °С. Хорошим сочетанием прочностных и технологических свойств обладает сплав, легированный 47–50 % Re. Этот сплав выпускают по техническим условиям в виде проволоки, ленты, полосы [17]. Порог хрупкости сплава МР-47ВП ниже –247 °С.

Таблица 6.69. Временное сопротивление некоторых отечественных и зарубежных сплавов на основе молибдена [17]

Сплав*	Вид полуфабриката	Деформированное состояние		Отожженное состояние	
		$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_p, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_p, \text{МПа}$
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	–	–
		1649	70	–	–
TZM (0,5 Ti; 0,1–0,08 Zr; 0,02–0,015 C)	Пруток	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	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)	»	20	800	–	–
		800	500	–	–
		1000	420	–	–
		1200	340	–	–
		1500	140	–	–
		1800	100	–	–
BM-1 (до 0,4 Ti; 0,08–0,25 Zr; ≤ 0,01 C; до 0,6 Nb)	Лист/пруток	20	800/820	–	–
		800	500/510	–	–
		1000	420/400	–	–
		1200	340/343	–	–
		1500	140/137	–	–
		1800	100/100	–	–
BM-2 (до 0,2 Ti; 0,25–0,40 Zr; 0,02 C; до 0,2 Nb)	Пруток	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	–	–

Сплав*	Вид полуфабриката	Деформированное состояние		Отожженное состояние	
		$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_s, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_s, \text{МПа}$
ВМ-3 (0,8–1,3 Ti; 0,3–0,6 Zr; 0,25–0,5 C; 1,0–1,5 Nb)	Пруток	–	–	20	800
		–	–	1150	600
		–	–	1300	500
МР-47ВП (47 Re)	»	20	173	20	950
		1500	152	–	–
		1800	60	–	–

* В скобках указан состав сплава в % (мас.) (остальное Mo).

Сплавы на основе ниобия. Чистый ниобий, обладая высокой пластичностью и технологичностью, имеет ограниченную жаропрочность. Предел сточасовой длительной прочности при 1100 и 1200 °С составляет соответственно 50 и 30 МПа [36]. Легирование существенным образом повышает жаропрочные свойства, но при этом снижаются характеристики пластичности и технологичность.

Основами высокожаропрочных сплавов являются системы Nb–Mo, Nb–W–Mo при содержании до 10–20 % W и Mo. Указанные основы дополнительно легируют цирконием или гафнием. Жаропрочные и окалиностойкие сплавы создают на основе системы Nb–W–Ti или Nb–Mo–Ti при содержании до 20 % Mo или W и до 10 % Ti. Еще одна группа сплавов с умеренно жаропрочными и достаточно технологичными свойствами – низколегированные ниобиевые сплавы, содержащие 1–7 % Zr или титан. Основные типы сплавов представлены в табл. 6.70.

Таблица 6.70. Механические свойства некоторых отечественных и зарубежных промышленных ниобиевых сплавов [17, 36]

Марка сплава*	Сортамент	Состояние	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_s, \text{МПа}$	$\delta, \%$
ВН-2 (3,8–5,2 Mo; $\leq 0,05 \text{ C}$)	Пруток	Без ТО	20	750	18–28
	Лист	Деформированное	1000	500	25
	»	»	1100	400–500	35
	»	Отожженное	1100	310–350	20–25
	Пруток	Без ТО	1200	180–200	45–55
	Лист	Деформированное	1500	80–100	35
ВН-2А (3,5–4,7 Mo; 0,5–0,9 Zr; $\leq 0,08 \text{ C}$)	»	»	20	800–900	4–5
	»	»	1100	450	10
	Пруток	Отожженное	1100	260–300	22–26
	Лист	Деформированное	1200	300	12
	Пруток	Отожженное	1200	240–260	26

Марка сплава*	Сортамент	Состояние	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta, \%$
ВН-3 (4–5, 2 Мо; 0,8–2 Zr, 0,08–0,16 С)	Пруток	Деформированное	20	750–800	16–20
			1100	450	21–24
			1200	250–290	26
			1500	125	40–43
ВН-4 (8,5–10,5 Мо; 1–2 Zr; 0,25–0,40 С)	»	Отожженное	20	810	6
			1100	700	–
			1200	550	15
			1500	170	24
РН-6(4,5–6 Мо; 4,5–6 W; 1–1,5 Zr)	»	»	20	890	–
			1200	290	–
			1800	83	–
F-48 (15 W, 5 Мо, 1 Zr, 0,1 С)	Лист	»	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)	»	»	20	609	21
			1093	330	–
			1205	246	–
			1315	190	–
			1315	190	–
D-31 (10 Мо; 10 Ti; 0,1 С)	Пруток	Деформированное	20	700	22
			1100	245	12
			1200	175	14
			1320	140	8
			1420	77	–
F-50 (15 W; 5 Мо; 1 Zr; 5 Ti; 0,05 С)	»	»	24	860	24
			1095	350	28
	»	Отожженное	1205	245	35
			1315	147	35

* В скобках указан состав сплава в % (мас.) (остальное Nb).

Сплавы на основе тантала. Вследствие дефицитности тантала они находят применение в областях, не допускающих применение других материалов. Это прежде всего электронная промышленность, медицина и химическая промышленность. В соответствии с ТУ 48-05-Г-139–71 выпускают сплавы тантала, содержащие 4–21 % W [17].

6.4.4. Жаропрочные медные сплавы

К жаропрочным сплавам на основе меди в зависимости от области применения предъявляют различные, часто трудно совместимые в одном материале требования: высокую жаростойкость, электро- и теплопроводность, износостойкость при высоких температурах. Это, как правило, сплавы меди, легированные небольшими присадками тугоплавких компонентов. Жаропрочные медные сплавы по составу или типу обработки подразделяют на две группы: деформационно-упрочняемые и дисперсионно-твердеющие сплавы. Причем сплавы второй группы существенно превосходят по свойствам сплавы первой группы, особенно когда между закалкой и старением их подвергают холодной деформации. К первой группе относятся сплавы, например, систем Cu-Ag, Cu-Cd, Cu-Mg, ко второй – сплавы на основе систем Cu-Cr, Cu-Zr, Cu-Be.

Режимы обработки, свойства и области применения сплавов приведены в табл. 6.71, 2.72. Большинство жаропрочных медных сплавов – это сплавы на основе системы Cu-Cr. Хромовые бронзы не склонны к коррозии под напряжением. Их жаростойкость в среднем на 15–20 % выше, чем у меди, а коррозионная стойкость в большинстве случаев аналогична коррозионной стойкости меди. Обрабатываемость резанием большинства хромовых бронз составляет в среднем 20 % от обрабатываемости латуни ЛС63-3.

Таблица 6.71. Свойства жаропрочных медных сплавов [2, 5, 17, 28]

t, °C	Cu	БрКд1	БрЦр0,4	БрХ	БрХЦр	БрХВЦр	БрНХК	БрХН6	МКБ	БрМВТ	БрМг0,3
σ_b , МПа											
20	245	412	392	441	490	550	800	–	764	833	490
300	147	304	314	363	382	450	650	–	617	676	–
400	108	216	294	323	343	410	580	–	539	588	–
500	78	137	245	274	294	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	37	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	–

$t, ^\circ\text{C}$	Сu	БрКд1	БрЦр0,4	БрХ	БрХЦр	БрХВЦр	БрНХК	БрХН6	МКБ	БрМВТ	БрМг0,3
$\delta, \%$											
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	—	—	—	—
$\rho \cdot 10^{-6}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$											
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	—
$KCU, \text{ кДж/м}^2$											
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	—
$E, \text{ ГПа}$											
20	129,4	123	134	131	130	132	140	135	—	—	—
300	115,6	—	—	121	118	117	128	122	—	—	—
400	—	—	—	115	109	108	122	113	—	—	—
500	—	—	—	109	100	98	116	105	—	—	—
600	94,0	—	—	98	93	91	108	97	—	—	—
$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$											
20	394	297	343	367	366	368	196	380	197	176	—
300	—	—	—	386	380	382	262	384	—	—	243
400	—	—	—	375	382	369	271	390	—	—	—
500	—	—	—	365	367	361	268	372	—	—	—
600	352	—	—	358	361	357	252	365	—	—	—

Таблица 6.72. Составы, области применения, режимы обработки, физические свойства медных сплавов [17, 28]

Марка сплава	Температура, °С						НВ	$\rho_{\text{м}}/\rho_{\text{Cu}}$, %	γ , $\frac{3}{\text{т/м}}$	$\alpha \cdot 10^6$, $\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$	λ , $\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^{\circ}\text{C})}$	Полуфабрикаты	Область применения
	плав-ления	обработки давлением	отжига	закалки	старения	начала разупрочнения							
БрКд1	1040	680–900	500	–	–	300	784–1078	8,92	17,6	297	Прутки, коллекторные полосы, ленты	Электроды для точечной и шовной сварки легких сплавов; коллекторы электродвигателей; проводов; радиотехника	
БрЦр0,2; БрЦр0,3; БрЦр0,4; БрЦр0,7	965	700–900	700	940–960	440–460	550	980–1323	8,93	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	8,92	17,0	314	Прутки, полосы, коллекторные полосы, трубы	Теплообменники, электроды для контактной сварки углеродистой стали, коллекторы электродвигателей	
БрХЦр	–	700–900	700	940–960	450–470	500	980–1274	8,92	17,5	366	Прутки, полосы, плиты, листы, проволока	Электроды для точечной и шовной сварки углеродистой стали, гребки и ролики сварочных машин, арматура, жала паяльников	
БрНХТ	–	700–950	650–800	–	–	–	–	–	–	–	Прутки, трубы, листы	Присадочные материалы при сварке кристаллизаторов и теплообменников	

Марка сплава	Температура, °С						НВ	$\rho_{\text{м}}/\rho_{\text{св}}$, %	γ, z , т/м	$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	λ , Вт/(м·°С)	Полуфабрикаты	Область применения
	плав-ления	обработки давлением	отжига	закалки	старения	начала разупрочнения							
БрХЦрТ	-	700-950	650-700	-	-	-	-	-	-	-	-	Прутки, трубы, листы, плиты	Кристаллизаторы, теплообменники
БрХН6	-	700-950	650-700	940-1000	420-460	-	92	-	17,1	380	-	Проволока, прутки	Присадочные материалы для сварки, про- вода и кабели
БрНХК	-	750-950	750	980-1000	450-470	500	40	8,85	-	196	-	Плиты, проволока, листы, прутки, лента	Формирующие и электродные кольца трубо- сварочных станков; электроды, губки и ролики сварочных ма- шин; кристаллизато- ры; теплообменники; токопроводящие пру- жины; элементы креп- лений; инструмент
БрХВЦр	-	750-950	700	930-950	450-475	550-600	86	8,83	16,6	368	-	Проволока, прутки	Электроды для сварки
БрНБТ	-	800-950	750	960-980	470-490	500	45	8,83	-	188	-	Плиты, листы, цилин- дрические за- готовки	Детали машин для стьяковой сварки кор- розионно-стойкой ста- ли и жаропрочных сплавов
БрМg0,3; БрМg0,5; БрМg0,8	1076	850-900	600	-	-	300	72	8,91	17,6	243	-	Коллектор- ные полосы, проволока	Контактные кольца, коллекторные пласти- ны, провода, кабели
Cu	1083	800-950	500-700	-	-	180-230	100	8,94	16,8	394	-	-	-

6.5. Радиационно-стойкие материалы

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 14–35 эВ, превышающая пороговую. 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, во-первых, создать материалы (конструкционные, полимерные, полупроводниковые и др.), устойчивые к воздействию ядерных излучений и, во-вторых, придать этим материалам требуемые свойства 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 приводит облучение электрoзаряженными частицами и излучениями низких энергий; к объемным – облучение быстрыми нейтронами.

При взаимодействии быстрого нейтрона¹ с металлическим или керамическим материалом большая часть его энергии передается атомам, смещающимся из узлов кристаллической решетки (пороговая энергия смещения атома составляет около 25 эВ). В результате происходит образование дефектов кристаллов в виде вакансий и междоузлий. Начиная с определенного количества 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 металлических и керамических материалов.

Наибольшую чувствительность к радиации имеют полупроводники. При взаимодействии быстрых нейтронов с полупроводниками снижаются их усиливающие характеристики, в запрещенной зоне возникают разрешенные состояния.

¹ Быстрые нейтроны образуются при реакции деления ядер, их энергия составляет 0,1–10 МэВ.

Изучение поведения различных материалов в потоках быстрых и тепловых¹ нейтронов показало, что существует пороговое значение флюенса нейтронов², ниже которого влияние облучения на материалы незначительно. В табл. 6.73 и 6.74 приведены пороговые значения флюенсов для быстрых, тепловых и надтепловых³ 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.

Таблица 6.73. Пороговое значение флюенса быстрых нейтронов в различных материалах [19]

Пороговое значение флюенса, нейтр./м ²	Материал	Вызываемое изменение свойств
10 ¹⁸	Германиевые, кремниевые полупроводники	Ухудшение усиливающих характеристик
10 ¹⁹	Полиметил, метакрилат, целлюлоза	Потеря прочности
10 ²⁰	Вода и жидкие органические соединения	Газовыделение
10 ²⁰	Натуральный и бутиловый каучук	Потеря эластичности
10 ²¹	Органические жидкости	Газовыделение, повышение вязкости
10 ²¹	Бутиловый каучук	Размягчение
10 ²¹	Полиэтилен	Потеря прочности при растяжении
10 ²²	Фенолполимеры с минеральными наполнителями	Потеря прочности при растяжении
10 ²²	Натуральный каучук	Отвердевание
10 ²³	Углеводородные масла	Повышение вязкости
10 ²³	Полистирол	Потеря прочности при растяжении
10 ²⁴	Металлы	Повышение предела текучести
10 ²⁴	Углеродистые стали	Снижение ударной вязкости
10 ²⁵	Керамика	Снижение теплопроводности, плотности, разрушение кристаллической структуры
10 ²⁵	Сплавы циркония	Снижение пластичности, рост предела текучести
10 ²⁵	Углеродистые стали	Снижение пластичности, рост предела текучести
10 ²⁵	Коррозионно-стойкие стали	Снижение пластичности, рост предела текучести, повышение критической температуры хрупкости
10 ²⁶	Алюминиевые сплавы	Значительное падение пластичности
10 ²⁶	Циркониевые сплавы	Заметное снижение пластичности
10 ²⁶	Никелевые сплавы	Распухание, падение пластичности

¹ Тепловыми называют нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии с ядрами среды и имеющие энергию 0,005–0,2 эВ.

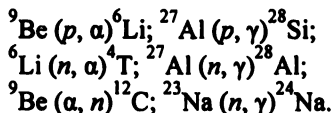
² Флюенс нейтронов – произведение плотности потока нейтронов и времени облучения; плотность потока нейтронов – произведение плотности нейтронов и их средней скорости.

³ Надтепловыми называют нейтроны с энергией 2–10³ эВ.

Таблица 6.74. Пороговое значение флюенса тепловых и надтепловых нейтронов в различных материалах [50]

Пороговое значение флюенса нейтр./м ²	Материалы	Пороговое значение флюенса, нейтр./м ²	Материалы
10 ¹⁸	Германиевые и кремниевые полупроводники, стекло, люцит	10 ²²	Углеводородные масла, полистирол
10 ¹⁹	Вода	10 ²³	Углеродистая сталь, керамические материалы
10 ²⁰	Бутиловый и натуральный каучук, органические жидкости, графит	10 ²⁴	Углеродистые, коррозионно-стойкие стали
10 ²¹	Полиэтилен, фенолополимеры с минеральными наполнителями	10 ²⁵	Алюминиевые, циркониевые и никелевые сплавы

Степень радиационного воздействия на материалы при облучении их нейтронами зависит от состава изотопов в химических компонентах материалов. Например, в результате (*n, α*)-реакции¹ в материалах появляется гелий, влияющий на процессы радиационного распухания, 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, предъявляют следующие требования [17, 19]:

- 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) малое 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; последние – 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, служащих основой и легирующими добавками реакторных металлических материалов.

¹ Реакция захвата нейтрона *n* ядром, сопровождающиеся вылетом α-частицы ((*n, γ*) – то же испусканием γ-кванта; (*p, α*) – реакция захвата протона *p* ядром, сопровождающаяся вылетом α-частицы).

Перечень этих элементов и их ядерно-физические характеристики приведены в табл. 6.75.

Таблица 6.75. Ядерно-физические свойства реакторных металлических материалов [19]

Элемент	Относительная атомная масса	γ , т/м ³	$t_{пл}$, °С	Сечение поглощения тепловых нейтронов		Сечение рассеяния тепловых нейтронов, б [*]
				б [*]	относительные единицы	
Be	9,01	1,85	1283	0,0095	1,0	7,0
Mg	24,31	1,74	640	0,063	6,6	4,0
Zr	91,22	6,50	1845	0,180	19,0	8,0
Al	26,98	2,70	660	0,235	24,7	1,4
Nb	92,91	8,57	2415	1,100	116,0	5,0
Mo	95,94	10,20	2617	2,600	274,0	7,0
Fe	55,85	7,87	1539	2,530	267,0	11,0
Cr	52,00	7,19	1990	3,100	326,0	3,0
Cu	63,54	8,96	1083	3,800	400,0	7,2
Ni	58,71	8,91	1465	4,600	485,0	17,5
V	50,94	6,10	1736	4,900	516,0	5,0
Ti	47,90	4,51	1725	6,100	642,0	4,0
Mn	54,94	7,43	1245	13,300	1400,0	2,3
W	183,85	19,20	3410	19,000	2000,0	5,0
Ta	180,95	16,60	2996	21,000	2210,0	5,0

* Барн – внесистемная единица измерения площади, $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$.

Бериллий и его соединения. Бериллий имеет наименьшее из всех металлов сечение поглощения тепловых нейтронов, большое сечение рассеяния и высокую температуру плавления, поэтому является отличным замедлителем и отражателем¹.

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 [19]

$$\Delta V/V = 0,584 F^{0,93},$$

где $F \cdot 10^{-26}$ – флюенс ($E > 1$ МэВ) нейтронов.

Пластичность облученного бериллия падает практически до нуля уже при относительно невысоких флюенсах нейтронов (1–4) 10^{25} нейтр./м². Это свойство носит название гелиевого охрупчивания бериллия.

¹ Сечения взаимодействия нейтронов с ядрами характеризуют вероятность ядерной реакции (например, поглощения) или изменения энергии нейтронов (рассеяния).

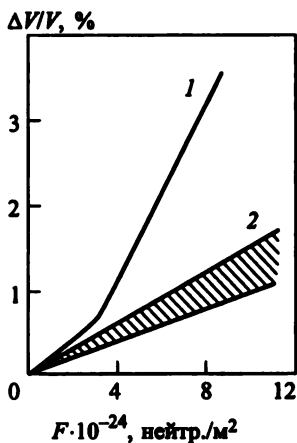


Рис. 6.1. Радиационное набухание $\Delta V/V$ высокоплотного оксида бериллия в зависимости от флюенса нейтронов при температурах 75–110 °C (1) и 500–700 °C (2) [17]

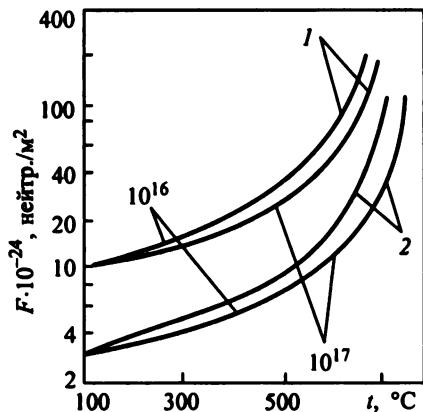


Рис. 6.2. Изменение максимально допустимого флюенса, не вызывающего микрорастрескивания, в зависимости от температуры облучения, размера зерна BeO (1–1...2,5 мкм; 2–10...15 мкм) и плотности потока нейтронов, равной 10^{16} и 10^{17} нейтр./ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [17]

При облучении нейтронным потоком линейные размеры изделий из оксида бериллия увеличиваются, соответственно уменьшается плотность, увеличивается пористость изделий. При низких температурах облучения (75–100 °C) ускорение темпа роста объема оксида бериллия наблюдается при флюенсе быстрых нейтронов около $3 \cdot 10^{24}$ нейтр./ м^2 (рис. 6.1). Увеличение температуры облучения образцов уменьшает рост их объема. Чем выше плотность образцов, тем больше их расширение при одинаковом флюенсе.

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 оксида бериллия согласно зависимости

$$\delta^{-1/2} = 0,167 F \cdot 10^{-24},$$

где δ – размер зерна, мкм (размер зерна определяли при температурах облучения 50–100 °C).

Максимально допустимый флюенс, не вызывающий микрорастрескивания, в зависимости от температуры облучения, плотности потока нейтронов и размера зерна оксида бериллия, приведен на рис. 6.2.

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

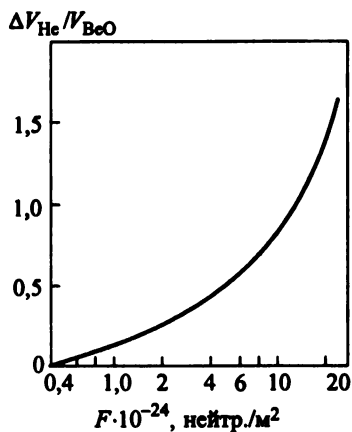


Рис. 6.3. Зависимость объемной доли гелия в облученном оксиде бериллия от флюенса нейтронов [17]

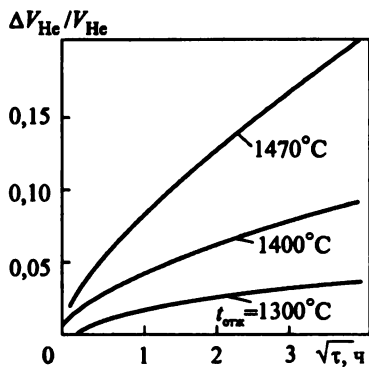


Рис. 6.4. Зависимость объемной доли гелия, выделившегося из облученных образцов BeO ($F=2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м³, 860 °С) при различных температурах отжига, от времени τ [17]

флюенса нейтронов (рис. 6.3). Если температура изделия превышает 1200 °С, становится существенным выделение гелия из образцов оксида бериллия (рис. 6.4), 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 материала (рис. 6.5). С увеличением температуры уменьшение теплопроводности замедляется и при 100 °С достигает насыщения на уровне 40–50 % исходного значения при флюенсе $4 \cdot 10^{25}$ нейтр./м².

Прочность 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 1300 °С полностью восстанавливает прочностные свойства. На рис. 6.6–6.8 приведены зависимости относительной прочности оксида бериллия при сжатии, растяжении и изгибе от флюенса быстрых нейтронов ($E > 1$ МэВ) и температуры. Небольшое увеличение прочностных свойств при малом флюенсе соответствует теоретическим данным.

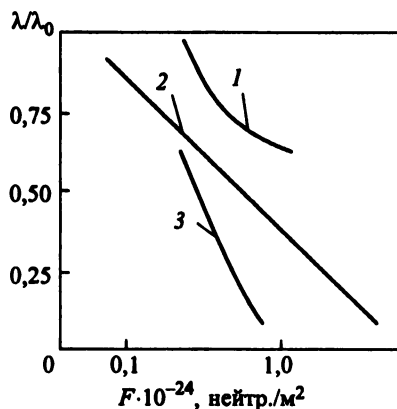


Рис. 6.5. Зависимость относительной теплопроводности (λ_0 – исходная теплопроводность) оксида бериллия от флюенса быстрых нейтронов при плотности образцов 2,7–2,9 (1), 2,8–3,0 (2) и 2,9–3,0 г/см³ (3) и температуре облучения 40–140 °С [17]

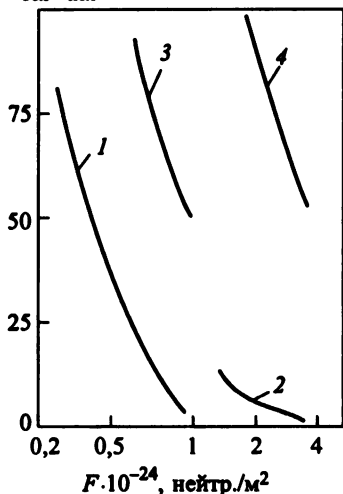
$\sigma_{\text{обл}}/\sigma_{\text{исх}}, \%$ 

Рис. 6.6. Зависимость относительной прочности BeO при сжатии от флюенса нейтронов при плотности образцов 2,99–3,0 (1), 2,5 (2), 3,0 (3) и 2,7–2,8 (4) г/см³: 1, 2 – образцы, облученные при 100 °С; 3, 4 – образцы, облученные и обожженные при 1300 °С в течение 24 ч [17]

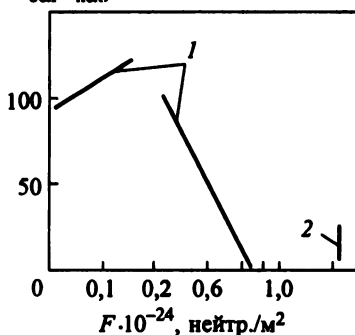
 $\sigma_{\text{обл}}/\sigma_{\text{исх}}, \%$ 

Рис. 6.7. Зависимость относительной прочности BeO при растяжении от флюенса при плотности образцов 2,6–2,85 г/см³ и температуре облучения 100 °С (1) и 350–400 °С (2) [17]

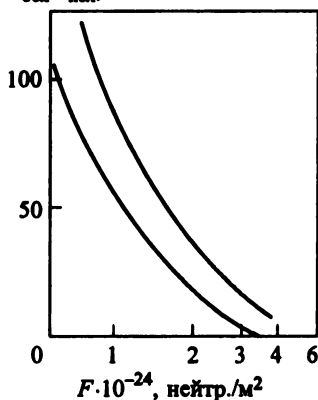
 $\sigma_{\text{обл}}/\sigma_{\text{исх}}, \%$ 

Рис. 6.8. Зависимость относительной прочности BeO при изгибе от флюенса при плотности образцов 2,8–2,9 г/см³ и температуре облучения 100 °С [17]

Облучение приводит к росту скорости ползучести оксида бериллия. Наблюдается релаксация напряжений в образцах, облучаемых при 500–700 °С, что объясняется наступающей в этих условиях ползучестью.

Магний и его сплавы. Сплавы магния являются низкотемпературными (температура плавления магния 650 °С) конструкционными материалами, коррозионно-стойкими на воздухе и в среде углекислого газа (до ~ 400 °С), но имеющими низкое сопротивление коррозии в водной среде, жидкометаллическом натрии и эвтектиках Mg – Na и Mg – K. По ядерным свойствам магний уступает лишь бериллию. Его существенным недостатком является высокое термическое сопротивление. Теплопроводность магния и его сплавов (при 20 °С $\lambda = 63...171$ Вт/(м·°С)) более чем в 100 раз ниже, чем сплавов алюминия.

При температурах ниже 500 °С в среде углекислого газа сплавы магния показали хорошую радиационную стойкость: при флюенсе нейтронов до 10^{25} нейтр./м² никаких существенных радиационных дефектов (распухания, радиационной ползучести, изменения прочности и пластичности) не наблюдалось.

Цирконий и его сплавы. Сплавы циркония получили широкое распространение благодаря своей высокой механической прочности при повышенных температурах, хорошей коррозионной стойкости в воде и паре, технологичности. По ядерным параметрам цирконий является третьим после бериллия и магния элементом. Низкая теплопроводность циркония (при 20 °С $\lambda = 18$ Вт/(м·°С)) компенсируется относительно низким тепловым расширением. Невысокая коррозионная стойкость при высоких температурах и относительная дороговизна сдерживают применение сплавов циркония.

Таблица 6.76. Результаты испытания на ползучесть труб из сплавов циркалой-2 и Н-2,5 [10]

Сплав	Обработка	$t, ^\circ\text{C}$	σ , МПа	$\phi \cdot 10^{-16}$, нейтр./(м ² ·с)	$\tau_{\text{исп}}$, ч	$\nu_n \cdot 10^7, \text{ч}^{-1}$	
						в конце испытаний	без облучения
Циркалой-2	Холодная деформация на 19 % + автоклавирование 400 °С, 72 ч	220	311	9,6	2130	1,5	1
		260	211	9,3	3010	5	0,4
		300	211	9,4	4300	8	0,7
		350	211	9,4	4826	32	0,15
		375	211	9,4	4977	200	80
		400	211	9,4	4985	700	700
Н-2,5	Закалка 870 °С, вода + холодная деформация ($\epsilon = 11$ %) + отжиг 500 °С, 24 ч	260	141	5,3	5300	1,05	0,2
		300	141	5,3	6250	4	0,7
		350	141	5,3	6620	13	14

* Плотность потока быстрых нейтронов.

В потоке быстрых нейтронов наблюдаются 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, содержащего, % (мас.): 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; 0,01 O, остальное Zr, и Н-2,5 (Zr+2,5 % Nb), представлены в табл. 6.76.

Нейтронное облучение увеличивает скорость ползучести холоднодеформированного циркалой-2 при 200–350 °С на порядок и более. Скорость ползучести холоднодеформированного сплава Н-2,5 возрастает в меньшей степени.

При 340–350 °С у циркалой-2 наблюдается резкое увеличение скорости ползучести (рис. 6.9). Образцы были подвергнуты холодной пластической деформации на 15–20 %.

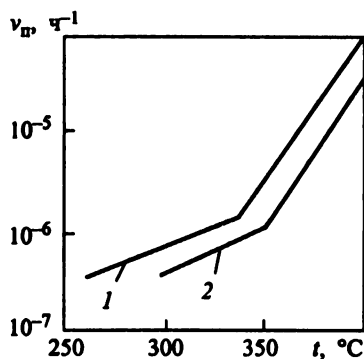


Рис. 6.9. Зависимость скорости ползучести сплава циркалой-2 от температуры при облучении в потоке быстрых нейтронов плотностью $(5-9) \cdot 10^{16}$ нейтр./(м²·с) при σ , равном 210 (1) и 140 МПа (2) [10]

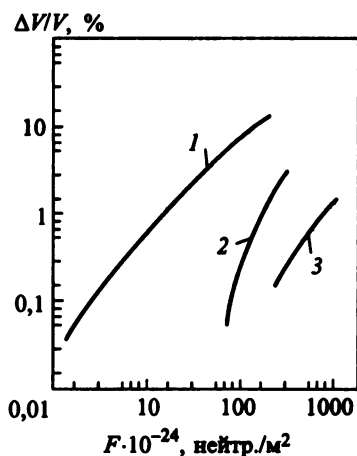


Рис. 6.10. Радиационное распухание алюминия и сплавов в зависимости от флюенса нейтронов при температуре облучения 50–60 °С [19]:

1 – 99,9999 % Al; 2 – сплав 1100 (алюминий промышленной чистоты); 3 – сплав 6061 (Al+0,7 % Mg+0,4 % Si)

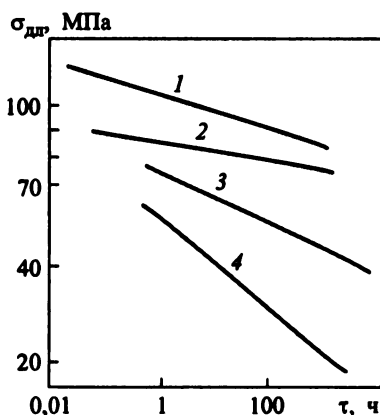


Рис. 6.11. Изменение предела длительной прочности алюминиевого сплава 1100:

1, 2 – после облучения при 100 и 150 °С соответственно; 3, 4 – в исходном состоянии при 100 и 150 °С соответственно [19]

Алюминий и его сплавы. Основными радиационными дефектами для сплавов алюминия являются радиационное распухание и увеличение предела длительной прочности. Радиационное распухание обусловлено реакциями взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами алюминия, при которых образуются кремний, водород и гелий. Влияние флюенса нейтронов с $E > 0,1$ МэВ на относительное изменение объема сплавов алюминия приведено на рис. 6.10. Длительная прочность алюминиевого сплава 1100 после облучения нейтронами с флюенсом $(0,7-11) \cdot 10^{26}$ нейтр./м² возрастает (рис. 6.11), что является следствием радиационного упрочнения материала. Прочностные и пластические свойства сплава 1100 в зависимости от флюенса нейтронов с $E > 1$ МэВ приведены на рис. 6.12. Значительные дозы облучения не приводят к радикальному изменению механических свойств.

Аустенитные коррозионно-стойкие стали и никелевые сплавы. Потoki быстрых нейтронов вызывают в аустенитных коррозионно-стойких сталях и никелевых сплавах изменение механических свойств, радиационное распухание и радиационную ползучесть. На рис. 6.13 приведены данные о влиянии флюенса быстрых нейтронов и температуры облучения на механические свойства аустенитных сталей. Это изменение, особенно заметное при флюенсе более $5 \cdot 10^{25}$ нейтр./м² и температурах выше 500 °С, называется высокотемпературным радиационным охрупчиванием (ВТРО).

Явление ВТРО сопровождается значительным снижением пластичности (полное удлинение при разрыве может достигать лишь 0,1 %) и повышением предела текучести материала. Длительная прочность, сопротивление усталости и сопротивление ползучести при этом также существенно уменьшаются (до половины исходного значения у сталей типа 12Х18Н9).

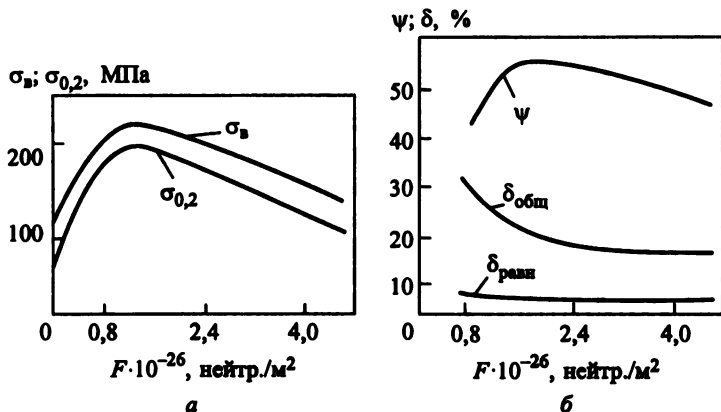


Рис. 6.12. Зависимость показателей прочности (а) и пластичности (б) сплава 1100 от флюенса нейтронов [19]

Объясняется ВТРО радиационным стимулированием изменений свойств на границах зерен, приводящих к образованию трещин. Лучшей сопротивляемостью ВТРО обладают аустенитные стали, легированные молибденом и ниобием, например 0X16H15M3B. Однако это улучшение имеет место при ограниченном флюенсе нейтронов. Так, оболочки ТВЭЛ из стали 0X16H15M3B имеют при 700 °С относительное удлинение всего около 0,8 % при флюенсе $8,5 \cdot 10^{26}$ нейтр./м². Повысить остаточную пластичность и прочность при высоком флюенсе быстрых нейтронов можно легированием аустенитных коррозионно-стойких сталей титаном, бором, кремнием. Малую склонность к ВТРО имеют стали ферритного и мартенситного классов.

Радиационное распухание проявляется при флюенсе более 10^{26} нейтр./м² в интервале температур облучения $0,3-0,55 T_{пл}$ металла, что обычно соответствует рабочему диапазону конструкционного материала. Для аустенитных коррозионно-стойких сталей радиационное распухание может достигать больших значений – (30–40) % при флюенсе

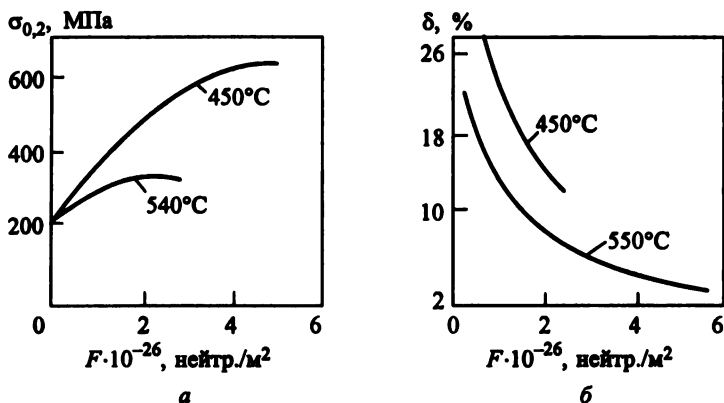


Рис. 6.13. Влияние облучения на предел текучести (а) и относительное удлинение (б) стали 08X18N10 при различных температурах облучения [19]

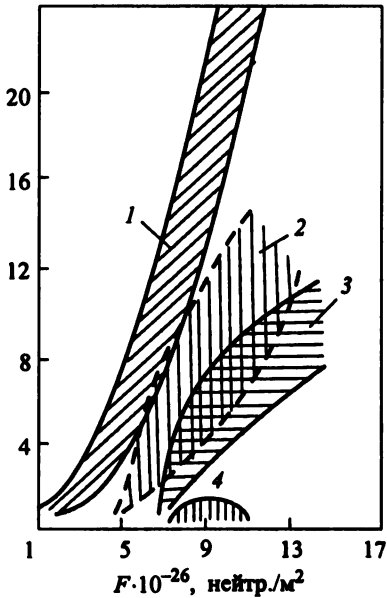
$\Delta V/V, \%$ 

Рис. 6.14. Влияние облучения на радиационное распухание сталей [41]:
1 – 08X18H10T; 2 – 03X16H15M3Б;
3 – 03X16H15M3Б (модифицированная);
4 – 12X13

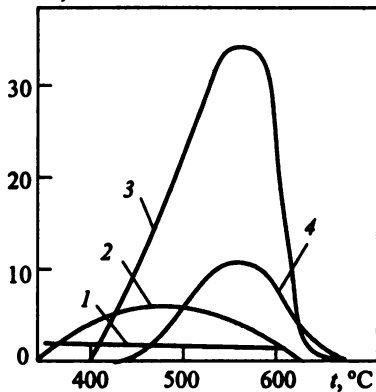
 $\Delta V/V, \%$ 

Рис. 6.15. Влияние температуры на радиационное распухание сталей и сплавов [41]:

1 – ферритная сталь; 2 – высоконикелевые сплавы; 3 – сталь типа 0817H13M2T холоднореформированная (20%); 4 – аустенитная коррозионно-стойкая модифицированная сталь

$(1,5-2,5) \cdot 10^{27}$ нейтр./м². Механизм распухания объясняется накоплением в процессе облучения избыточных вакансий и зарождением в металле вакансионных скоплений, имеющих вид сферических микропор. Центрами зарождения пор являются атомы примесей, атомы гелия, образующегося при взаимодействии нейтронов с никелем, хромом, железом.

На рис. 6.14 и 6.15 приведены зависимости радиационного распухания 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 $(1,2-1,4) \cdot 10^{27}$ нейтр./м² увеличение степени холодной деформации с 20 до 30 % для стали типа 08X17H13M2T приводит к снижению распухания с 15 до 4 % при температурах облучения 550–600 °С. Высоконикелевые сплавы типа нимоник (40–45 % Ni), а также хромистые коррозионно-стойкие стали ферритного и ферритно-мартенситного классов (12–17 % Cr, ≤ 0,5 % Ni) имеют меньшее 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 облучении быстрыми нейтронами при температурах, когда не проявляется термическая ползучесть (300–500 °С). Скорость радиационной ползучести пропорциональна флюенсу и приложенному напряжению:

$$v_{p.n} = B\sigma R,$$

где $v_{p.n}$ – скорость радиационной ползучести, ч⁻¹; σ – напряжение, Па; B – эмпирический коэффициент, равный $2 \cdot 10^{-12}$ для стали 03X16H15M3Б и $0,83 \cdot 10^{-12}$ для стали 08X18H10T; R – скорость накопления радиационных повреждений, смещ./ат·ч.

Число радиационных повреждений зависит от флюенса и спектра нейтронов. Для типичного спектра энергетического реактора на быстрых нейтронах флюенсу, равному $1,67 \cdot 10^{27}$ нейтр./м², соответствует 100 смещ./ат. Материалы с низкой склонностью к радиационному распуханию имеют малую скорость к радиационной ползучести.

Чистые металлы, керамики и керметы. Сравнение зависимостей радиационного распухания от отношения температуры испытания к температуре плавления для некоторых чистых металлов приведено на рис. 6.16. 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 , $Al-Al_2O_3$; B_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; у него отличные теплофизические свойства, хорошая механическая прочность при высоких температурах, относительно легкая обрабатываемость. Применяемый 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 применяют для создания газоплотных конструкций, покрытий.

Получают его методом пропитки под высоким давлением углеродсодержащей жидкостью искусственно полученного графита и последующей графитизации. Газоплотным оказывается и пиролитический углерод, получаемый в виде отложений на нагретой

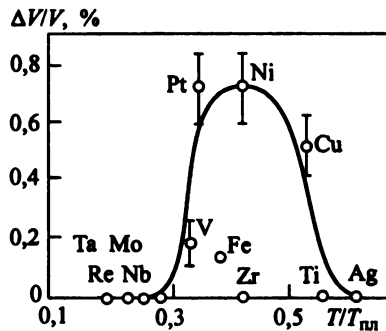


Рис. 6.16. Зависимость радиационного распухания чистых металлов от температуры облучения при флюенсе нейтронов $3 \cdot 10^{25}$ нейтр./м² [19]

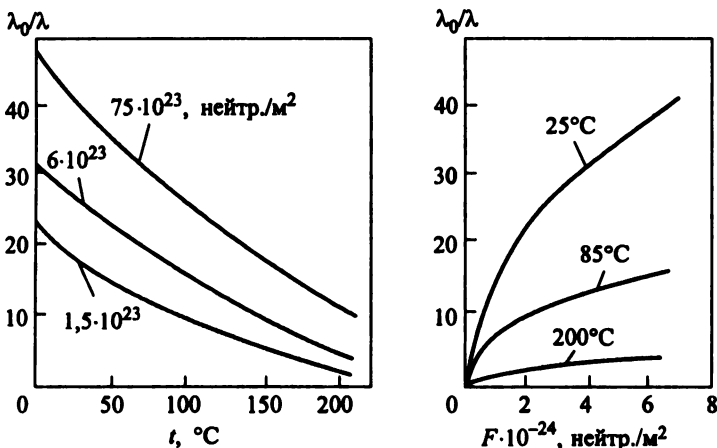


Рис. 6.17. Зависимость относительной теплопроводности графита от температуры облучения и флюенса тепловых нейтронов [19]

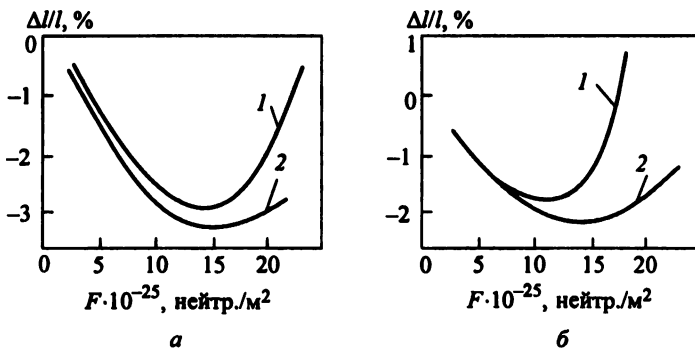


Рис. 6.18. Зависимость изменения размеров образцов продавленного, почти изотропного графита, вырезанных параллельно (а) и перпендикулярно (б) оси продавливания, от флюенса быстрых нейтронов и температуры облучения [19]:

1 – 550–600 °С; 2 – 360–400 °С

поверхности углеводородного газа (метана, бензола). Все искусственные сорта графита обладают высокой анизотропией свойств, связанной с выстраиванием частиц кокса при изготовлении брикетов и 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.

Влияние флюенса наибольшее при невысоких температурах (до 200 °С). При флюенсе нейтронов более 10^{24} нейтр./м² теплопроводность графитовых образцов снижается в 50 раз (рис. 6.17). Уменьшение теплопроводности (электропроводности) связано с возникновением дефектов кристаллической структуры, индуцируемых нейтронным потоком.

Изменение размеров графита зависит от направления (вдоль или поперек оси продавливания), флюенса и температуры. Первоначальное (при умеренном флюенсе) уменьшение размеров сменяется их увеличением. С ростом температуры изменения размеров графита снижаются и при температурах выше 350 °С объем многих образцов сокращается. Изменение размеров анизотропного графита от флюенса быстрых нейтронов при различных температурах в направлении, параллельном и перпендикулярном оси продавливания, показано на рис. 6.18.

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. Выделяющаяся в виде теплоты накопленная энергия приводит к резкому повышению температуры. Зависимость изменения накопленной энергии от флюенса и влияние отжига на ее уменьшение иллюстрирует рис. 6.19.

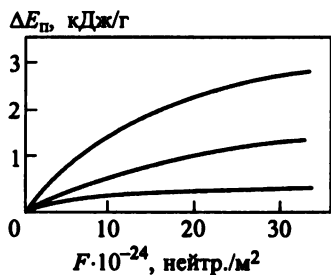


Рис. 6.19. Зависимость изменения полной накопленной энергии ΔE_n в графите от флюенса тепловых нейтронов [19]:

1 – для облучения при 30 °С; 2 – после отжига в течение 5 ч при 1250 °С; 3 – после обжига при 2000 °С

6.6. Материалы с малым газовыделением в вакууме

Конструкционные материалы, применяемые в вакуумных системах помимо конструкционной прочности, технологичности и экономичности должны иметь низкую скорость газовыделения при высокой коррозионной стойкости во влажной атмосфере. 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, 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. Необходимы более дешевые и доступные материалы. Так, углеродистые и низколегированные стали с коррозионно-стойкими покрытиями являются возможными заменителями аустенитных сталей для низкого и среднего вакуума.

Газовыделение – важное свойство для вакуумной техники. Скорость газовыделения материала – характеристика, необходимая для научно-обоснованного расчета вакуумной системы. В вакууме при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже происходит выделение газа, растворенного в кристаллической решетке материала – водорода, а также газов, десорбирующихся с поверхности. Источники наводороживания могут быть различными. В прокате металла таким источником является главным образом электрохимическое наводороживание 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 [17]. Скорости газовыделения Q_i и парциальные давления p_i рассчитывают по экспериментальным масс-спектрам, которые многократно определяют при длительном вакуумировании в высоком вакууме при постоянной температуре:

$$Q_i = \frac{p_i^k - (p_i^\phi + p_i^h)}{F w_i},$$

где p_i^k , p_i^ϕ , p_i^h – парциальное давление i -го газа в камере с образцом, в камере без образца (фон) и в насосе соответственно, Па; F – площадь поверхности образца, м^2 ; w_i – сопротивление диафрагмы для i -го газа, $\text{с}/\text{м}^3$.

Суммарная скорость газовыделения $Q_\Sigma = \sum Q_i$.

Для предварительной оценки газовыделения используют скорость газовыделения $Q_{\text{экв}}$ в азотном эквиваленте, которую рассчитывают по манометрическому давлению в испытательной камере и молекулярной массе азота:

Q , м·Па/с

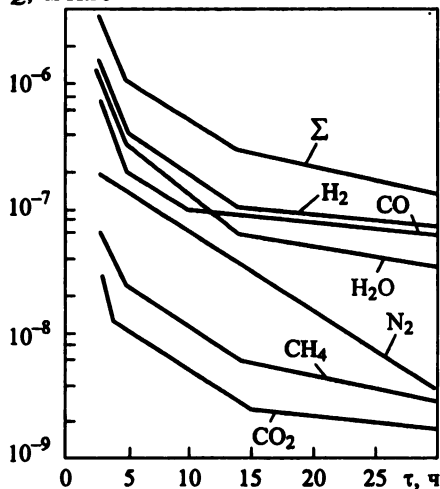


Рис. 6.20. Кинетика изменения скоростей газоотделения коррозионно-стойкой стали 12X18H10T в процессе вакуумирования при 20 °C

содержанием углерода, но в три раза выше коррозионную стойкость во влажной атмосфере. Закалка У10, сопровождающаяся полиморфным превращением, резко увеличивает прочность стали, но при этом растет газотделение [22]. Титан ВТ1, растворяющий водород в больших объемах, имеет очень незначительную скорость выделения водорода при 20 °C, а следовательно, малую суммарную скорость газотделения, значение которой, как и у меди М1, близко к значениям скорости газотделения и коррозии для аустенитных коррозионно-стойких сталей. Однако титан и медь как конструкционный материал уступают сталям по модулю упругости, вследствие чего снижается жесткость конструкции.

Таблица 6.77. Скорости газотделения в вакууме при 20 °C листового проката из сталей, меди и титана, обработанных резанием [17, 20, 22]

Материал	Термическая обработка	$Q \cdot 10^7$, м·Па/с			$Q_{\Sigma} \cdot 10^7$	$Q_{\text{экв}} \cdot 10^7$
		H ₂	H ₂ O	CO+N ₂	м·Па/с	
08	Отжиг	8,0	35	32	75	50
		2,0	2,5	4,5		6,0
10ХСНД	»	–	–	–	–	29 5,0
20, Ст3	»	–	–	–	–	20 3,0
40	»	16	4,0	10	30	18
		1,5	0,2	1,6		2,0

$$Q_{\text{экв}} = \frac{p^k - (p^{\phi} + p^{\text{H}})}{F w_{N_2}}$$

где p – давление, измеренное манометром, Па;
 w_{N_2} – сопротивление диафрагмы для азота, с/м³.

Для металлов суммарная скорость газотделения в 1,5–2 раза больше скорости в азотном эквиваленте.

Кинетика изменения скоростей выделения каждого газа, а также суммарной скорости газотделения для коррозионно-стойкой стали показана на рис. 6.20.

Скорости газотделения (суммарные и в азотном эквиваленте) для отожженных углеродистых сталей (табл. 6.77) уменьшаются с увеличением содержания углерода. Строительная низколегированная сталь 10ХСНД практически имеет ту же скорость газотделения, что и углеродистая сталь с таким же

Материал	Термическая обработка	$Q \cdot 10^7$, м·Па/с			$Q_{\Sigma} \cdot 10^7$	$Q_{\text{экв}} \cdot 10^7$
		H ₂	H ₂ O	CO+N ₂	м·Па/с	
У10	Отжиг	$\frac{2,5}{0,9}$	$\frac{1,3}{0,1}$	$\frac{13}{0,8}$	$\frac{17}{1,8}$	$\frac{5}{0,5}$
	Закалка	$\frac{30}{17}$	$\frac{8,0}{0,2}$	$\frac{32}{3,0}$	$\frac{70}{20}$	$\frac{20}{4,0}$
М1	Отжиг	–	–	–	–	$\frac{15}{3,5}$
ВТ1	»	Ниже фона	$\frac{12}{2,0}$	$\frac{7,0}{1,5}$	$\frac{19}{3,5}$	$\frac{25}{2,9}$

Примечание. В числителе приведены значения Q после 5-, а в знаменателе после 10-часового вакуумирования.

Химическое и термическое окисление листовой коррозионно-стойкой аустенитной стали 12X18H10T (табл. 6.78) создает тонкие оксидные пленки на поверхности, являющиеся барьером для диффузии водорода, уменьшает скорость газовыделения. Особенно эффективно окисление при 600 °С, 3 ч (выдержка попеременно в водороде и в вакууме по 30 мин).

Таблица 6.78. Скорости газовыделения в вакууме при 20 °С листового проката из стали 12X18H10T [17, 22, 24]

Способ очистки	Режим окисления	Время до испытания	$Q \cdot 10^7$, м·Па/с			$Q_{\Sigma} \cdot 10^7$	$Q_{\text{экв}} \cdot 10^7$
			H ₂	H ₂ O	CO+N ₂	м·Па/с	
Травление H ₂ SO ₄	–	13 ч	$\frac{80}{10}$	$\frac{70}{12}$	$\frac{80}{4,0}$	$\frac{230}{26}$	$\frac{110}{12}$
			$\frac{5,0}{1,2}$	$\frac{5,5}{1,0}$	$\frac{4,8}{0,4}$	$\frac{16}{2,7}$	$\frac{9,0}{1,5}$
Пассивирование HNO ₃	–	90 сут	$\frac{1,2}{1,0}$	$\frac{4,5}{1,2}$	$\frac{2,0}{0,6}$	$\frac{8,0}{2,9}$	$\frac{4,0}{1,5}$
			100 °С, 1 ч, воздух	$\frac{4,0}{0,9}$	$\frac{2,2}{0,47}$	$\frac{1,2}{0,26}$	$\frac{7,8}{1,7}$
	100 °С, 50 ч, воздух	$\frac{3,0}{0,2}$	$\frac{3,5}{0,45}$	$\frac{1,7}{0,12}$	$\frac{7,5}{0,77}$	$\frac{5,0}{0,5}$	
	600 °С, 3 ч, вакуум	$\frac{0,3}{0,13}$	$\frac{1,0}{0,1}$	$\frac{0,14}{0,03}$	$\frac{1,8}{0,26}$	$\frac{1,0}{0,15}$	
	То же	132 сут	$\frac{0,6}{0,1}$	$\frac{1,2}{0,25}$	$\frac{0,24}{0,1}$	$\frac{2,5}{0,47}$	$\frac{1,6}{0,25}$
	600 °С, 3 ч, H ₂ /вакуум	13 ч	$\frac{0,3}{0,10}$	$\frac{1,0}{0,03}$	$\frac{0,14}{0,02}$	$\frac{2,0}{0,17}$	$\frac{0,8}{0,08}$

Примечание. В числителе – после 5-, а в знаменателе – после 30-часового вакуумирования.

* Выдержка по 30 мин попеременно в водороде и в вакууме.

Хромистые коррозионно-стойкие стали (табл. 6.79) практически не уступают хромоникелевым аустенитным сталям по уровню газовыделения и коррозионной стойкости. Недостатком их следует считать несколько более низкую ударную вязкость при криогенных температурах.

Таблица 6.79. Скорость газовыделения в вакууме при 20 °С листового проката из коррозионно-стойких сталей [17]

Марка стали	Способ очистки	$Q \cdot 10^7$, м·Па/с			$Q_{\Sigma} \cdot 10^7$	$Q_{\text{экв}} \cdot 10^7$
		H ₂	H ₂ O	CO+N ₂	м·Па/с	
08X13	Травление + пассивирование	$\frac{5,0}{1,3}$	$\frac{6,0}{1,5}$	$\frac{4,3}{0,5}$	$\frac{16}{3,4}$	$\frac{10}{1,4}$
		$\frac{3,5}{0,75}$	$\frac{2,3}{0,45}$	$\frac{2,4}{0,6}$	$\frac{8,3}{1,9}$	$\frac{4,5}{1,0}$
08X17T	То же	$\frac{1,1}{0,18}$	$\frac{0,4}{0,02}$	$\frac{0,6}{0,04}$	$\frac{2,1}{0,25}$	$\frac{1,0}{0,1}$
	Окисление 600 °С, 3 с, H ₂ /вакуум; выдержка 13 ч на воздухе					
12X17	Травление + пассивирование	$\frac{7,0}{1,2}$	$\frac{5,0}{0,6}$	$\frac{5,0}{0,6}$	$\frac{1,75}{2,5}$	$\frac{7,0}{2,0}$
		$\frac{3,5}{0,7}$	$\frac{6,0}{0,1}$	$\frac{7,6}{1,0}$	$\frac{17}{1,9}$	$\frac{12}{1,8}$
15X25T	Шлифование	$\frac{7,0}{3}$	$\frac{10}{1,8}$	$\frac{8,0}{1,3}$	$\frac{27}{6,2}$	$\frac{14}{3,3}$
	Травление + пассивирование	$\frac{1,0}{0,4}$	$\frac{0,9}{0,2}$	$\frac{0,7}{0,3}$	$\frac{2,6}{0,9}$	$\frac{0,5}{0,2}$
	Окисление, 150 °С, 1 ч; воздух	$\frac{4,0}{1,5}$	$\frac{6,0}{1,0}$	$\frac{8,0}{2,1}$	$\frac{18}{4,2}$	$\frac{10}{3,5}$
	Окисление 150 °С, 1 ч, воздух; выдержка 4 сут. на воздухе					

Примечание. В числителе – после 5-, а в знаменателе – после 30-часового вакуумирования.

Способ обработки давлением и способ очистки поверхности влияют на газовыделение листового проката (табл. 6.80 и 6.81).

Таблица 6.80. Скорость газовыделения в вакууме при 20 °С листового проката из стали 12X18H10T в зависимости от способа его получения [23]

Способ получения	Способ очистки	Шероховатость поверхности, мкм	$Q \cdot 10^7$, м·Па/с			$Q_{\Sigma} \cdot 10^7$	$Q_{\text{экв}} \cdot 10^7$
			H ₂	H ₂ O	CO+N ₂	м·Па/с	
Горячая прокатка	Травление + пассивирование	Rz = 50,6	$\frac{3,0}{1,2}$	$\frac{14,0}{2,8}$	$\frac{6,0}{0,7}$	$\frac{23,0}{4,7}$	$\frac{10,0}{2,0}$
			$\frac{5,5}{1,5}$	$\frac{3,0}{0,8}$	$\frac{3,0}{0,3}$	$\frac{11,5}{2,6}$	$\frac{11,0}{1,5}$
Холодная прокатка	Травление + пассивирование	Rz = 10,3	$\frac{4,0}{1,3}$	$\frac{4,5}{1,0}$	$\frac{6,0}{0,7}$	$\frac{16,5}{3,0}$	$\frac{6,5}{1,5}$
			$\frac{4,0}{0,4}$	$\frac{6,0}{0,8}$	$\frac{2,4}{0,3}$	$\frac{13,0}{1,5}$	$\frac{6,5}{0,9}$
То же	Травление + выглаживание валками	Ra = 0,12 ... 0,20					

Примечание. В числителе – после 5-, а в знаменателе – после 30-часового вакуумирования.

Таблица 6.81. Скорость газовыделения в вакууме при 20 °С холоднокатаной листовой стали 12Х18Н10Т после химической очистки поверхности [23]

Механическая обработка	Реагенты	$Q \cdot 10^7, \text{ м} \cdot \text{Па}/\text{с}$			$Q_2 \cdot 10^7$	$Q_{\text{экв}} \cdot 10^7$
		H_2	H_2O	$\text{CO} + \text{N}_2$	м · Па/с	
Шлифование	Бензин + ацетон	$\frac{3,0}{1,0}$	$\frac{4,0}{1,8}$	$\frac{6,5}{0,8}$	$\frac{13,5}{3,6}$	–
		$\frac{5,5}{1,5}$	$\frac{3,0}{0,8}$	$\frac{3,0}{0,3}$	$\frac{11,5}{2,6}$	$\frac{11,0}{1,5}$
Выглаживание валками	Бензин + спирт	$\frac{4,0}{4,0}$	$\frac{6,0}{0,8}$	$\frac{2,4}{0,3}$	$\frac{13,0}{1,5}$	$\frac{6,5}{0,9}$
		$\frac{5,0}{5,0}$	$\frac{4,0}{0,4}$	$\frac{2,0}{0,4}$	$\frac{11,0}{1,3}$	–

Примечание. В числителе – после 5-, а в знаменателе – после 30-часового вакуумирования.

Алюминий и его сплавы являются хорошими конструкционными материалами для вакуумной техники. По скорости газовыделения (табл. 6.82, 6.83) 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 скорость газовыделения. По сравнению с техническим алюминием скорость газовыделения несколько больше у силуминов (АК12) и сплавов типа АМг.

Таблица 6.82. Скорость газовыделения в вакууме при 20 °С алюминия и его сплавов [24]

Марка сплава, способ получения	Способ очистки	$Q \cdot 10^7, \text{ м} \cdot \text{Па}/\text{с}$			$Q_2 \cdot 10^7$	$Q_{\text{экв}} \cdot 10^7$
		H_2	H_2O	$\text{CO} + \text{N}_2$	м · Па/с	
АД1, прокатка	Травление NaOH	$\frac{200}{11}$	$\frac{250}{7,0}$	$\frac{120}{2,0}$	$\frac{570}{2,0}$	$\frac{300}{12}$
		$\frac{9}{2,2}$	$\frac{11}{1,4}$	$\frac{10}{0,8}$	$\frac{30}{4,4}$	$\frac{15}{2,6}$
	Окисление 400 °С 1 ч, воздух	$\frac{0,6}{0,3}$	$\frac{0,7}{0,16}$	Ниже фона	$\frac{1,4}{0,46}$	$\frac{0,7}{0,3}$
		$\frac{7,1}{1,1}$	$\frac{5,9}{0,22}$	$\frac{9,3}{0,87}$	$\frac{23}{2,2}$	$\frac{6,0}{0,9}$
АК12, литье под давлением	Травление + пассивирование	$\frac{43}{18}$	$\frac{33}{10}$	$\frac{52}{4,0}$	$\frac{128}{32}$	$\frac{80}{18}$
АК12, вакуумный переплав	То же	$\frac{38}{12}$	$\frac{33}{8}$	$\frac{6,4}{0,2}$	$\frac{77}{20}$	$\frac{45}{10}$
САП, прокатка	»	$\frac{14}{2,2}$	$\frac{14}{2,2}$	Ниже фона	$\frac{28}{4,4}$	$\frac{19}{3,2}$

Примечание. В числителе – после 5-, а в знаменателе – после 30-часового вакуумирования.

Таблица 6.83. Скорость газовой выделенной после 10-часового вакуумирования при 20 °С окисленных алюминия и его сплавов [17, 24]

Марка сплава	Режим окисления	$Q_{H_2} \cdot 10^4$	$Q_{\Sigma} \cdot 10^4$
		м·Па/с	
АД1	Без окисления	45	85
	200 °С 1 ч, воздух	6,0	24
	300 °С 1 ч, воздух	1,5	5,0
	400 °С 1 ч, воздух	0,9	3,9
АД1	200 °С 2 ч, вакуум 10 Па	3,0	—
АМц	То же	10	—
АМг	»	13	—
АМг3	»	19	—
АМг6	»	30	—

Диффузионное стойкое хромирование низкоуглеродистых сталей уменьшает скорость газовой выделенной (табл. 6.84). Нанесение покрытия проводят при высоких температурах (более 900 °С), что ограничивает его применение для сварных конструкций.

Таблица 6.84. Скорость газовой выделенной в вакууме при 20 °С коррозионно-стойких слоев и покрытий на низкоуглеродистых сталях [17, 21]

Основа (сталь)	Способ нанесения покрытия	Толщина, мкм, и дополнительная обработка	$Q \cdot 10^7$, м·Па/с			$Q_{\Sigma} \cdot 10^7$	$Q_{эж} \cdot 10^7$
			H ₂	H ₂ O	CO+N ₂	м·Па/с	
08	—	—	$\frac{0,8}{2,0}$	$\frac{35}{2,5}$	$\frac{32}{4,5}$	$\frac{75}{9,0}$	$\frac{50}{6,0}$
	Диффузионное хромирование	500	$\frac{4,5}{0,7}$	$\frac{8,5}{0,3}$	$\frac{3,5}{0,5}$	$\frac{12}{1,8}$	$\frac{6,0}{1,0}$
20	—	—	—	—	—	—	$\frac{20}{2,5}$
	Ионное насыщение, 550 °С (хроморганика)	70	$\frac{22}{10}$	$\frac{0,6}{0,2}$	$\frac{8,0}{2,0}$	$\frac{31}{12}$	$\frac{16}{3,3}$
	Ионное азотирование (N ₂ + 3 % H ₂ , 400 °С, 1 ч)	100	$\frac{90}{13,5}$	$\frac{15}{1,5}$	$\frac{1,5}{2,2}$	$\frac{110}{17}$	$\frac{34}{6,0}$
	Ионное насыщение, 180 °С (кремнийорганика)	6	$\frac{520}{42}$	$\frac{80}{28}$	$\frac{90}{13}$	$\frac{690}{83}$	$\frac{350}{40}$
		Окисление, 200 °С, 6 ч, воздух	—	—	—	—	$\frac{50}{6,6}$
	Газопламенное напыление алюминием	400	$\frac{240}{30}$	$\frac{60}{15}$	$\frac{38}{6}$	$\frac{340}{51}$	$\frac{180}{28}$
Окисление 400 °С, 1 ч, воздух + выдержка 2,5 сут. на воздухе		$\frac{10}{1,5}$	$\frac{9,0}{0,3}$	$\frac{4,0}{4,2}$	$\frac{24}{6,0}$	$\frac{9,0}{3,0}$	
Выглаживание валками		$\frac{10}{0,9}$	$\frac{9,7}{2,0}$	$\frac{2,0}{—}$	$\frac{21}{2,9}$	$\frac{11}{1,5}$	

Примечание. В числителе — после 8-, а в знаменателе — после 30-часового вакуумирования.

Ионное насыщение в тлеющем разряде предпочтительнее, так как поверхность металла нагревается до более низких температур. Для оптимальных режимов ионное насыщение хромом из хроморганики (при 550 °С), ионное азотирование (при 600 °С), а также ионное насыщение кремнием из кремнийорганики (при 180 °С) несколько увеличивают скорость газовыделения (в 1,3; 2,5; 2,7 раз соответственно), но создают коррозионно-стойкое во влажной атмосфере покрытие. Эффект повышения коррозионной стойкости наибольший у хромированных покрытий.

Газопламенное напыление алюминием создает на поверхности низкоуглеродистой стали коррозионно-стойкий слой, но для устранения эффекта шероховатости необходимо выглаживание валками или легкое окисление.

Эмали (табл. 6.85), фторопласты, лаки (табл. 6.86) эффективно повышают коррозионную стойкость сталей, но при этом скорость газовыделения возрастает на несколько порядков. Причем в отличие от металлов коррозионная стойкость растет с увеличением толщины покрытия, а на скорость газовыделения влияет не только режим нанесения покрытия, но и условия эксплуатации. С увеличением влажности и длительности выдержки скорость

Таблица 6.85. Скорость газовыделения в вакууме при 20 °С коррозионно-стойких эмалей на низкоуглеродистой листовой стали [8]

Тип эмали	$Q \cdot 10^5, \text{ м} \cdot \text{Па} / \text{с}$			$Q_{\Sigma} \cdot 10^5$	$Q_{\text{экл}} \cdot 10^5$
	H_2	H_2O	$\text{CO} + \text{N}_2$	м · Па/с	
Полиуретановая УР-175:					
красная	$\frac{1,0}{0,7}$	$\frac{1,0}{0,1}$	$\frac{1,0}{0,4}$	$\frac{3,1}{1,2}$	$\frac{2,0}{0,6}$
черная	$\frac{2,4}{0,5}$	$\frac{1,5}{0,2}$	$\frac{1,2}{0,6}$	$\frac{5,5}{1,3}$	$\frac{3,0}{1,0}$
белая	$\frac{4,5}{1,0}$	$\frac{5,0}{0,6}$	$\frac{2,7}{0,7}$	$\frac{12,2}{2,3}$	$\frac{7,0}{1,3}$
желтая	$\frac{18}{3,7}$	$\frac{23}{4,5}$	$\frac{10}{2,6}$	$\frac{52}{11}$	$\frac{28}{8,0}$
Перхлорвиниловая ХВ-16:					
кремовая	$\frac{2,4}{0,5}$	$\frac{3,7}{1,2}$	$\frac{2,4}{1,0}$	$\frac{8,5}{2,7}$	$\frac{9,0}{1,9}$
белая	$\frac{9}{4,4}$	$\frac{30}{5,2}$	$\frac{3}{1,1}$	$\frac{42}{11}$	$\frac{27}{7,2}$
фисташковая	$\frac{-}{2,1}$	$\frac{-}{10}$	$\frac{-}{2,5}$	$\frac{-}{14}$	$\frac{30}{6,4}$

* В числителе – после 5-, а в знаменателе – после 50-часового вакуумирования.

газовыделения в вакууме растет. Кратковременный низкотемпературный нагрев в таких случаях уменьшает эту скорость (см. табл. 6.86).

Таблица 6.86. Скорость газовыделения в вакууме при 20 °С органических покрытий на стали Ст3 после нагрева в течение 1 ч [21]

Покрытие	Толщина, мкм	$t_{нагр}$, °С	Время до испытания	$Q_{экв} \cdot 10^6$, м·Па/с		
				5	30	
Фторопласт 3: без подслоя	50	400	Одна неделя на воздухе	45	5,8	
	70	400	То же	22	6,0	
Поликарбонат без подслоя	45	450	»	18	5,0	
Лак: полиуретановый	3	150	»	11	2,4	
	3	150	Один месяц во влажной комнате + нагрев 120 °С, 5 ч	4,2	0,37	
УР-231 фторлон 32л	5	80	Одна неделя на воздухе	7,5	2,2	
	5	150	То же	15	0,40	
	5	150	Четыре месяца во влажной комнате	30	12	
	15°	150		Одна неделя на воздухе	7,5	1,5
	15°	150		Один месяц во влажной комнате + нагрев 120 °С, 5 ч	11	0,75

* Три слоя.

Скорость газовыделения полимерного материала (каучук, резина, прорезиненная ткань, фторопласт и др.) больше, чем стали, и зависит от толщины материала (табл. 6.87, 6.88).

Таблица 6.87. Скорость газовыделения каучука и резины после вакуумирования при 40 °С, 20 ч

Материал	Толщина, мм	$Q \cdot 10^4$, м·Па/с				$Q_{\Sigma} \cdot 10^4$	$Q_{экв} \cdot 10^4$	
		H ₂	CO+N ₂	CO ₂	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:								
	зеленая	0,7	18	0,5	0,8	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	

Таблица 6.88. Скорость газовыделения резины после вакуумирования в течение 10 (числитель) и 30 ч (знаменатель)

Материал	Цвет	Толщина, мм	t, °C	Q · 10 ⁴ , м·Па/с			Q _Σ · 10 ⁴	Q _{экв} · 10 ⁴
				H ₂	CO+N ₂	H ₂ O	м·Па/с	
Резина	Зеленый	0,7	20	19/6,0	3,0/0,7	0,9/0,1	23/6,8	6,0/2,0
		0,7	40	31/12	1,4/0,5	0,6/0,1	33/13	6,0/2,5
Резина, дублированная тканью	Красный	0,6	20	10/5,0	4,0/0,8	0,2/0,2	14/6,0	7,0/1,6
		0,6	40	32/9,0	5,0/1,0	0,7/0,3	38/10	10/2,7

Скорости газовыделения листовых полимерных материалов приведены в табл. 6.89.

Скорости газовыделения теплоизоляционного и прокладочного вакуумного материала при 20 °C даны в табл. 6.90. У полиэтилентетрафталата проявляется заметное влияние напыления алюминием на газовыделение. При двустороннем напылении скорости газовыделения при длительном 30-часовом вакуумировании имеют те же значения, что и у листового алюминия. Стеклобумага после кратковременного прогрева при 40 °C заметно увеличивает скорости газовыделения из-за углеводородсодержащих газов.

Таблица 6.89. Скорость газовыделения в вакууме при 20 °C полимерных листовых материалов

Материал	Толщина, мм	Q · 10 ⁷ , м·Па/с			Q _Σ · 10 ⁷	Q _{экв} · 10 ⁷
		H ₂	H ₂ O	CO+N ₂	м·Па/с	
Полиэтилентетрафталат	12 мкм	—	—	—	—	1,2
		0,1	0,1	0,02	0,2	0,1
Поливинилхлорид	0,2	—	—	—	—	—
		11	0,2	3,8	15	6,0
Эпоксидная смола	2	—	—	—	—	90
		—	—	—	—	40
Политетрафторэтилен (фторопласт 4Д)	2	6,0	90	290	300	180
		1,8	40	190	200	140
Кремнийорганическая резина	0,7	—	—	—	—	6000
		6000	100	700	6800	2000

Примечание. В числителе – после 10-, а в знаменателе – после 30-часового вакуумирования.

Таблица 6.90. Скорость газовыделения в вакууме при 20 °C теплоизоляционного (ПЭТФ) и прокладочного (СБШ) материала [7, 14]

Материал (толщина)	Q · 10 ⁷ , м·Па/с			Q _Σ · 10 ⁷	Q _{экв} · 10 ⁷
	H ₂	H ₂ O	CO+N ₂	м·Па/с	
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

Материал (толщина)	$Q \cdot 10^7, \text{ м} \cdot \text{Па/с}$			$Q_{\Sigma} \cdot 10^7$	$Q_{\text{экв}} \cdot 10^7$
	H_2	H_2O	$\text{CO} + \text{N}_2$	м · Па/с	
СВШС-Т (плотная стеклобумага):					
без прогрева	$\frac{5,0}{0,5}$	$\frac{14}{0,9}$	–	$\frac{19}{1,4}$	$\frac{6}{0,5}$
после прогрева 40 °С, 2 ч	$\frac{10}{1,4}$	$\frac{4,0}{0,2}$	$\frac{13}{1,4}$	$\frac{27}{3,0}$	$\frac{12}{1,7}$
СБШ-Т (рыхлая стеклобумага) после прогрева 40 °С, 2 ч	$\frac{3,0}{1,4}$	$\frac{1,0}{0,2}$	$\frac{11}{2,4}$	$\frac{15}{4,0}$	$\frac{24}{2,4}$

Пр и м е ч а н и е. В числителе после 6-, а в знаменателе – после 30-часового вакуумирования.

6.7. Коррозионно-стойкие и жаростойкие 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 галоидных средах. Скорость химической коррозии растет с увеличением температуры и 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 используют 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 и ионно-плазменным методами; плакирование прокаткой, газопрессовой сваркой; осаждение покрытий из газовой фазы в порошковых смесях – порошковый способ, и из газового потока прямоточным или циркуляционным методом [1]; осаждение покрытий из паровой фазы в вакууме [26]; погружение деталей в жидкие металлы и сплавы.

Качество и защитные свойства большинства покрытий определяются сплошностью, 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 предъявляют 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 визуальные, химические [17], электрофизические и металлографические методы.

Выбор покрытий следует начинать 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, окунанием 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 [15, 17].

В качестве коррозионно-стойких покрытий наиболее широко используют цинк, кадмий, алюминий, хром, никель, свинец, реже олово, благородные металлы, титан и др. Применяют комплексные и многокомпонентные покрытия на их основе [6].

Цинк сравнительно медленно корродирует в атмосфере со скоростью от 1 до 15–20 мкм в год. Оцинкованная 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 30 мкм в атмосфере промышленных объектов, 7 мкм в сельской местности, 15 мкм в приморских районах и 7–15 мкм в закрытых помещениях.

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, отбелочных 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 активной 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 используют 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 цинком, хромом, алюминием и другими элементами [6]. Диффузионные покрытия могут быть использованы для защиты от коррозии и повышения коррозионной стойкости алюминиевых, медных, титановых и других сплавов [6].

Различные способы, режимы нанесения и защитные свойства коррозионно-стойких покрытий на деталях из стали алюминия и меди приведены в табл. 6.91.

Таблица 6.91. Коррозионно-стойкие покрытия [6, 9, 12, 17, 42]

Способ получения покрытия	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защищаемые детали	Условия и режим получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ОЭГ	<i>Детали из стали и чугуна.</i>			
	Кадмий (3–6)	Посадочные поверхности стальных деталей	В щелочных электролитах CdO, Cd, NaCN при 20–35 °С и $j = 0,015 \dots 0,02$ А/м	Внутри помещений
	Цинк (6–9)	Стальные детали	В щелочных электролитах $Zn(CN)_2$, NaCN, NaOH при 40–50 °С и $j = 0,01 \dots 0,02$ А/м	То же
	Кадмий (21–24)	Стальные штампованные детали	То же	То же, а также в условиях тропического климата
	Кадмий, цинк (3–9)	Стальные резьбовые и крепежные детали с шагом резьбы 0,4–0,8 мм	»	Внутри помещений
	Кадмий, цинк (9–12)	Стальные пружины с диаметром проволоки до 1 мм	–	В атмосферных условиях и внутри помещений
	Кадмий, цинк (12–15)	То же более 1 мм	–	То же
	Цинк, кадмий (6–30)	Стальные детали с неизменной электропроводностью	–	»
	Олово (9–12)	Стальные детали	В кислых или щелочных электролитах	В среде сероуглерода и при контакте с серой
	Свинец (200)	То же	В сульфатных и фторборатных электролитах	При производстве серной кислоты
ДПМ	Титан	Стали 35Л, 45; чугуны СЧ18, ВЧ50	Титанирование при 1000–1200 °С, 4–6 ч в смеси % (мас.): 93 (30 Al ₂ O ₃ + 70 (70 TiO ₂ + 30 Al)), 5 AlF ₃ , 2 NH ₄ Cl	То же

Способ получения покрытия	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защищаемые детали	Условия и режим получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ДПМ	Хром, алюминий	Железо	Хромирование при 1060 °С, 6,5 ч в смеси, % (мас.): 95,8 (37,5 Al ₂ O ₃ +62,5 Cr ₂ O ₃ +38 Al), 4,2 NaF	При производстве серной кислоты
	То же	У8	Хромирование при 1040 °С, 5,5 ч в смеси, % (мас.): 95,8 (37 Al ₂ O ₃ +63 (63 Cr ₂ O ₃ +37 Al)), 4,2 NaF	То же
	Алюминий, кремний	Железо	Алюминирование при 1000 °С, 6 ч в смеси, % (мас.): 97 (50 Al ₂ O ₃ +50 SiO ₂ +35 Al), 3 NaF	»
	То же	У8	То же	»
	Хром, кремний	Железо	Хромирование при 1050 °С, 7 ч в смеси, % (мас.): 98 (40 Al ₂ O ₃ +60 (25 Al+75 (85Cr ₂ O ₃ +15 SiO ₂))), 2 NH ₄ Cl	»
	То же	У8	То же	»
	Титан, алюминий	Железо	Алюминирование при 1080 °С, 7 ч в смеси, % (мас.): 96,6 (36,5 Al ₂ O ₃ +63,5 (41 TiO ₂ +59 Al)), 3,4+AlF ₃	»
	Медь (100–200)	Стальные детали	Распыление пистолетом-металлизатором	В науглероживающей среде
ППП	Алюминий (100–200)	Стальные металлоконструкции	То же	В атмосферных условиях
	Цинк (до 200), кадмий (до 300)	Детали, элементы конструкций мостов, портовых и гидротехнических сооружений, морских и речных судов. Опоры электрических передач	»	То же, а также при воздействии паров пресной и морской воды

Способ получения покрытия	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защищаемые детали	Условия и режим получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ПНП	Сплавы никели и кобальта	Детали из чугуна и инструмент	Нанесение покрытий с помощью плазменной установки Colmouy Fusewelder путем напыления порошка и одновременного его оплавления	Для повышения термостойкости и износостойкости, восстановления изношенных деталей
ДПО, ДП	Хром, азот (80–120)	Детали из стали 12Х18Н9Т, работающие в условиях повышенных температур и эрозийного изнашивания	Хромирование при 1060 °С; 15–18 ч в смеси, % (мас.): 70 Cr, 29 Al ₂ O ₃ , 1 NH ₄ Cl; азотирование при 1060 °С, 3 ч в среде азота особой чистоты	–
ДПО	Хром	Железо	Хромирование при 1200 °С; 6 ч в смеси, % (мас.): 96,2 (21 Al ₂ O ₃ + 79 феррохром), 3,8 NH ₄ Cl	В агрессивных средах
	То же	У8	Хромирование при 1075 °С; 6 ч в смеси, % (мас.): 97,2 (27 Al ₂ O ₃ + 73 феррохром), 2,7 NH ₄ Cl	То же
ХОР	Фосфаты	Стальные пружины, детали сложной формы	В растворах, содержащих препарат МАЖЕФ	Внутри помещений
	Никель (9–24)	Стальные детали	Осаждение никеля из раствора NiCl ₂ · 6H ₂ O + Na ₂ H ₂ PO ₄ · 10H ₂ O + CH ₃ COONa	Для деталей машин и приборов сложной формы и с глухими отверстиями
ДП	Слой оксинитридов и оксикарбонитридов	Детали из сталей и титановых сплавов	Обработка в среде аммиака с автоматическим поддержанием степени диссоциации при 400–600 °С	Для повышения износостойкости деталей
ДРМ	Цинк (20–40)	Стальные трубо- нефтепроводы, шайбы, болты, детали сложного профиля	Диффузионное цинкование с последующим хромированием	Во влажной атмосфере и морской воде

Способ получения покрытия	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защищаемые детали	Условия и режим получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ДРС	Нитриды и сульфиды железа	Детали из чугуна и сталей	Диффузное нитросульфидирование в соляных ваннах при 560–570 °С (процесс SUR-SULF)	Для повышения износостойкости деталей
	Сплав Ni+(7–10) % Р с дисперсными включениями синтетических алмазов диаметром 0,1–10 мкм	Стальные детали	Электролитическое осаждение	Для повышения износостойкости деталей насосов текстильного оборудования
ОЭГ	Медь + никель (15–27)	Детали приборов и машин	Медь в цианистых, пирофосфатных и фторборатных электролитах, никель в электролитах типа Уоттса	Для декоративной отделки и защиты от коррозии
	Кадмий (9–12)	Детали, находящиеся в контакте с медными деталями	–	Внутри помещений и в условиях повышенной влажности
ДПМ	Свинец (51–54)	Детали машин	В сульфатных и фторборатных электролитах	В контакте с H ₂ SO ₄
	Хром (51–54)	Детали машин из литейных сплавов	–	В контакте со щелочами
	Хром (60–90)	Алюминиевые сплавы АК12, Д16	Хромирование при 500 °С, 10 ч в смеси, % (мас.): 98 (30 Al ₂ O ₃ + 70 (85 Cr ₂ O ₃ + 15Al)), 2 NH ₄ Cl	Для повышения износостойкости деталей
ХОР	Хром (28)	Алюминиевый сплав АМц	То же	То же
	Кремний, хром (185)	Титан ВГ1-0	Диффузное насыщение при 900 °С, 4 ч	»
ХОР	Оксидно-фосфатное (2)	Детали из деформируемых и литейных сплавов	–	Внутри помещений и в атмосферных условиях
	Оксидное и с напылением в хромпике (10)	Детали из коррозионно-стойких сплавов АМг, АМц, деформируемых сплавов АК4, АК6, Д16, В95	Анодное окисление в хромпике	Внутри помещений

Способ получения покрытия, мкм	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защищаемые детали	Условия и режим получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ОЭГ	<i>Детали из меди и медных сплавов</i>			
	Никель (3–6)	Детали высокой точности	В растворе $H_2SO_4 \cdot 7 H_2O + NiCl_2 \cdot 6H_2O + H_3BO_4$ при $j = 0,025 \dots 0,1 \text{ А/м}^2$	Внутри помещений
	Олово (3–12)	Резьбовые детали в контакте с алюминием и коррозионно-стойкими сталями	В щелочном электролите при плотности тока $j = 0,09 \dots 0,1 \text{ А/м}$ и $t = 60 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$	То же
	Никель (6–12)	Высокоточные детали	В высокохлористом электролите типа Уоттса	»
	Никель (3–12)	Резьбовые детали	То же	В атмосферных условиях и внутри помещений
		Пружины, мембраны	»	То же
	Кадмий (6–12), олово (9–12)	Пружины	–	»
	Никель (3–6) + хром (6)	Детали высокой точности, резьбовые детали	Никель в электролите типа Уоттса, хром в стандартном электролите $CrO_3 + H_2SO_4$	Внутри помещений
	Никель (6–9) + хром (15)	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
	Хром (30–33)	Детали машин	В электролите $CrO_3 + H_2SO_4$ при $j = 0,1 \text{ А/м}$ и $t = 45 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$	В контакте с паром
	Никель (6) + кадмий (3)	Детали, работающие до $300 \text{ }^\circ\text{C}$	–	–
	Кадмий (24–30)	Детали машин и приборов	В цианистых электролитах	Во влажной атмосфере и в морских условиях

Способ получения покрытия	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защищаемые детали	Условия и режим получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ОЭГ, ХОР	Кадмий (9-24)	Детали в контакте с алюминием и коррозионно-стойкими сталями	Гальваническое осаждение с последующим хромированием	В атмосферных условиях и внутри помещений с тропическим климатом
ДПМ	Железо, титан	Мель М1, латунь Л62	Ферротитанирование при 700 °С, 6 ч	В агрессивных средах
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
<i>Неметаллические покрытия</i>				
ПЛ	Поливинилхлорид (200-300)	Стальные листы шириной до 1 м, толщиной 0,5-1,0 мм	Приклеивание поливинилхлоридной пленки на предварительно подготовленную поверхность листа кле-ем ВИЛАД-6К	В агрессивных средах
	Полиэтилен (2050-5000)	Стальные трубы диаметром до 1,5 м	-	То же
	Полиэтилен	Глубоководные основания мостов и морских причалов из коррозионно-стойких сталей	Приклеивание полиэтиленовой пленки с помощью модифицированных полистиленовых клеящих веществ	Во влажной атмосфере и морских условиях
	Эпоксидная смола с добавками отвердителя, пигментов и других компонентов	Стальные трубы больших диаметров	Нанесение порошка на горячий металл с одновременным оплавлением	В условиях атмосферной и подземной коррозии
	SiO ₂ со связующим (10-15)	Электропроводящие материалы, материалы термозащитных датчиков	Отжиг 850 °С, 30 ч	В условиях электрохимической и газовой коррозии

Способ получения покрытия	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защищаемые детали	Условия и режим получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ПШ	Al_2O_3 со связующим (10–15)	Электропроводящие материалы, материалы термозлектрических датчиков	Отжиг 800 °С, 30 ч	В условиях электрохимической и газовой коррозии
	Cr_2O_3 со связующим	То же	Отжиг 800 °С, 25 ч	То же
	Виниловая пленка на клеевой основе (100–250)	Стальные и алюминиевые листы	Приклеивание пленки	Для повышения коррозионной стойкости
ДШ	Эмаль	Стальные трубы	Отжиг шликера скоростным печным нагревом	В условиях атмосферной и подземной коррозии
	Стеклоэмаль	Трубы горячего водоснабжения	–	Для подземных трубопроводов
	Эпоксидные смолы ЭД-16 (70–20), титановый порошок	Магистральные трубопроводы, строительные конструкции, емкости гальванических ванн	Окрашивание поверхности слоем 0,8–1 мм с последующей полимеризацией в течение 12–16 ч	В агрессивных средах
ПН	Полиэфиры, винилы и эпоксидные смолы с наполнителем в виде стеклянных чешуек, до 3 мм	Металлоконструкции	Окрашивание поверхности шликеров с последующей сушкой или полимеризацией	В нефтехимическом производстве, мостостроении
	Эпоксидная смола	Стальные трубы диаметром 0,2–2 м	Одновременная намотка стальной ленты эпоксидной смолы и стеклоткани	То же
	Покрытие Poliken (слой грунтовки, противокоррозионная липкая лента, внешняя защитная пленка)	Стальные трубы	–	»

Высокими защитными свойствами в атмосферных условиях при воздействии кислот и щелочей обладают неметаллические покрытия, в качестве которых используют полиэфир, винилы, полиэтилен, стекломали, эпоксидные 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. 6.90 приведены также 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. 6.92).

Экономическая эффективность применения покрытий должна удовлетворять соотношению [15]

$$100 \frac{\Delta\tau}{\tau} \left(1 - \frac{L}{C}\right) - 100 \frac{\Delta C}{C} > 0,$$

где $\Delta\tau$ – увеличение срока службы конструкции, годы; τ – срок службы конструкции, годы; L – стоимость замены конструкции; C – стоимость материалов конструкции; ΔC – добавочная стоимость мероприятий по нанесению покрытий.

Ниже приведены основные способы получения покрытий и дана их краткая характеристика.

Вакуумная металлизация с индукционным нагревом испаряемого металла (ВИМ) отличается от вакуумной металлизации с радиационным нагревом более эффективным использованием электроэнергии, однако приходится защищать индуктор от испаряемых металлов с температурой плавления более 1000 °С. Возникает проблема выбора материала для тигля.

Вакуумная металлизация с радиационным нагревом испаряемого металла (ВРМ) осуществляется в камере с остаточным давлением не более 0,0133 Па. Пары легкоплавких металлов или сплавов, осаждаясь на насыщаемый материал, образуют покрытие.

Вакуумная металлизация с электронно-лучевым нагревом (ВЭМ) 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.

Диффузионное насыщение в виброкипящем слое (ДВКС) проводят в специальных установках с вибрирующим контейнером, в которые загружают твердые частицы и детали. В случае азотирования в нагретый контейнер подают аммиак.

Прямоточное диффузионное насыщение из газовых смесей (ДГП) имеет две разновидности. В первом варианте через печную камеру с диффундирующим элементом или его сплавом пропускают галогенид водорода, галоиды 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 лучшем 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).

Таблица 6.92. Жаростойкие покрытия [16, 17, 41]

Способ получения покрытия	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защитимый материал	Условия и режим получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ДПО	Кремний (110–120)	Молибден	Силицирование при 1100 °С, 8 ч в порошковой смеси, % (мас.): 60 Si, 35 шамота, 5 NH ₄ Cl	Нагревательные элементы
	Кремний (40)	Вольфрам	Силицирование при 1065 °С, 8 ч в порошковой смеси, % (мас.): 10 NaF, 5 NH ₄ Cl, остальное Si	Детали из тугоплавких сплавов
	Кремний, титан (38–76)	Ниобий и его сплавы	Насыщение при 930–1040 °С, 16 ч в порошковой смеси, % (мас.): 67–75 (Si + Ti) (в отношении 1:1), 20–25 Al ₂ O ₃ , 5–9 AlF ₃ ; окислительный отжиг при 980 °С, 25 ч	То же
	Кремний, бор, хром (50)	Сплавы (Nb + 10 % Hf + Ti), (Nb + 10 % Ti)	Насыщение в порошковой смеси в две стадии: 1) силицирование при 1150 °С, 16 ч в смеси, % (мас.): 60 Si, 6–10 активатора, остальное Al ₂ O ₃ ; 2) хромоборирование 1200 °С, 16 ч в смеси, % (мас.): 30 Cr, 39 ферробора, 4 активатора, остальное Al ₂ O ₃	»
	Бор, кремний (100)	Ta + 30 % Nb + 7,5 % V	Насыщение в порошковой смеси в две стадии: 1) борирование 1205 °С, 4 ч с добавкой NaF; 2) силицирование 1315 °С, 6 ч с добавкой NaF	»
	Алюминий	Жаропрочные сплавы	Насыщение гранул 2–4 мм алюминием в смеси, % (мас.): 2 NH ₄ Cl, остальное ферроалюминий	Для лопаток газовых турбин при 850–1100 °С
	Алюминий, хром, кремний	То же	Насыщение при 850 °С, 5 ч в смеси, % (мас.): 45 Al ₂ O ₃ + 50 (70 Al + 15 Cr + 15 Si), 5 NH ₄ Cl	»
	Алюминий, хром	»	Насыщение при 982 °С, 5 ч в среде водорода в смеси, % (мас.): 45 Cr, 10 Al, 0,5 NH ₄ Cl, остальное Al ₂ O ₃ – для внутренней поверхности лопаток и 20 Cr, 11 Al, 14 Si, 0,5 NH ₄ Cl, остальное Al ₂ O ₃ – для внешней	Внутренние и наружные поверхности полых лопаток ГТД
	Al + Cr + Si (50)	Сплавы Nb + 1 % Zr; Nb + 10 % Hf + 1 % Ti; Nb + 10 % Mo + 10 % Ti	Диффузионное насыщение в две стадии: 1) силицирование 1150 °С, 16 ч в смеси, % (мас.): 60 Si, 6–10 активатора, остальное Al ₂ O ₃ ; 2) хромоалитирование 1260 °С, 16 ч в смеси, % (мас.): 35 Cr, 20 Al, 4 активатора, остальное Al ₂ O ₃	Детали энергетических установок

Способ получения покрытия	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защитаемый материал	Условия и режим получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ДПО	Al + Si	Медные сплавы	Насыщение 600–800 °С, 2–6 ч в смеси, % (мас.): 50 (40–60 Al) + (60–40 Si), 48 Al ₂ O ₃ + 2 NH ₄ Cl	Лопатки летящих установок
	Алюминий (70–210)	XH10K, X16H25M6	Аллитирование 1050 °С, 6–8 ч в смеси состава, % (мас.): 99 FeAl + 1 NH ₄ Cl; старение 750–800 °С, 6–10 ч	Детали энергетического оборудования
	Cr + ZrB ₂	Тантал	–	То же
	Cr или CrAl; Si или SiCr	Молибден	–	»
ВЭМ	Ni + (20–35) % Cr + (15–20) % Al + (0,5–0,3) % Y (120–150)	Жаропрочные сплавы	В вакууме 1,33·10 ⁻² Па при 950±30 °С, 5–10 мин. Для устранения радиальных пор покрытие подвергают наклету стеклянными шариками диаметром 200 мкм	Лопатки турбин
	Co + (26–32) % Cr + (3–9) % Al + (0,01–1) % Y	То же	То же	То же
	Ni + (26–52) % Co + (14–22) % Cr + (10–13) % Al + (0,01–1,0) % Y	»	»	»
	Ni + 18 % Cr + 12 % Al + 0,3 % Y (123)	Жаропрочный эвтектический сплав: Ni + 19,7 % Nb + 6 % Cr + 2,5 % Al	Отжиг шликера состава, % (мас.): 55 Co, 20 Ni, 25 Cr, 0,5 Y	»
	Алюминий, хром, РЗМ	Жаропрочные сплавы	Отжиг 100 °С, 2–3 ч в водороде шликера состава, % (мас.): 25–50 % Cr, остальное соединения алюминия с РЗМ	»
ДШ	Алюминий, хром, иттрий	То же	Отжиг шликера состава, % (мас.): 85–91 Al, 8–10 Cr, 1–5 никель-иттриевой лигатуры, содержащей 20 Y	»
	Алюминий, платина	»	Отжиг в вакууме при 1200 °С, 0,5 ч шликера состава, % (мас.): 50 Al, 50 Pt.	»
	Со + Cr + Al + Ni + Y	Жаропрочный никелевый сплав	Отжиг шликера состава, % (мас.): 55 Co, 20 Ni, 25 Cr, 0,5 Y	»
ДШЦ	Кремний (120)	Молибден	Силицирование циркуляционным методом при p = 10 ³ Па, 8–9 ч в среде SiCl ₄ : H ₂ = 1,1 + Ag + Si; температура молибдена 1125 °С, кремния 1200 °С	Нагревательные элементы

Способ получения покрытия	Материал (толщина покрытия, мкм)	Защитаемый материал	Условия и режимы получения покрытия	Рекомендуемое применение покрытий
ДПЦ, ИХТО	Кремний (100–120)	То же	Силицирование циркуляционным методом в тлеющем разряде при $p = 200\text{--}260$ Па, 2–2,5 ч в среде SiCl_4 ; температура молибдена 1300°C , кремния 1100°C	Нагревательные элементы
	Кремний, бор	Mo + 0,5 % Ti	Боросилицирование при 1300°C , 2 ч в расплаве	То же
ДРМ	Алюминий, кремний, хром (200–300)	Молибденовый сплав	Насыщение в расплаве при $830\text{--}850^\circ\text{C}$, 8 мин	»
	Al + Cr + Si	То же	В расплаве Al + Cr + Si + Mo при $830\text{--}850^\circ\text{C}$, 8 мин	Детали ракетных двигателей
ПНП	Al_2O_3 , со стекловидной пленкой	Ниобий, тантал	Нанесение Al_2O_3 плазменным методом, затем стекловидного шлака в воде и спекание при 1482°C	Нагревательные элементы
ПНП в вакууме	Co+29% Cr+6% Al+1% Y, (127–178)	Жаропрочный никелевый сплав	Нанесение в потоке аргона и гелия порошком сплава с размером частиц 37 мкм; закалка в вакууме 1121°C , 2 ч и старение в аргоне 843°C , 24 ч	Лопатки турбин
ДТП	Кремний, бор	Mo + 0,5 % Ti	Борирование при 1100°C , 1 ч в потоке BF_3 с расходом газа 2 л/мин и силицирование при 1100°C , 6 ч в SiCl_4	Нагревательные элементы
ДПЦ, ДПО	Al + Cr	Мель	Алитирование 950°C , 2 ч прямоточным методом в среде AlCl_3 ; хромирование 100°C , 8 ч в порошковой смеси, % (мас.): 50 Cr, 43 Al_2O_3 , 7 NH_4Cl	Сопла плазмотронов
ДКС	Кремний	Ниобиевый сплав	Насыщение 1040°C , 3 ч в среде йода и порошка кремния в герметичной реторте	Детали энергетического оборудования
КИБ	Co + Cr + Al + Y	Жаропрочные сплавы	Катодное распределение ионами аргона материала покрытия в вакууме $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па с последующим осаждением его на подложку	Лопатки турбин
ОЭГ	Платина (7), алюминий (43–63)	То же	Нанесение платины в электролите гексахлороплатиновой кислоты, фосфорнокислого аммония и динатрийфосфата; алитирование при 1100°C , 2,5 ч в среде водорода в смеси, % (мас.): 5 Al, 95 Al_2O_3	То же

Циркуляционное диффузионное насыщение из газовых смесей (ДГЦ). 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 насыщения циркуляционное является более производительным, безвредным и экономичным.

Диффузионное насыщение в кипящем слое (ДКС). Псевдооживленная 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.

Диффузионное насыщение из порошковых смесей с активаторами (ДПО). 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 % (мас.) добавляют галогениды аммония, чаще хлористый аммоний, которые значительно ускоряют процесс диффузионного насыщения вследствие образования субгалогенидов диффундирующего элемента.

Разновидностью диффузионного насыщения из порошковых смесей является ДПМ. Источником диффундирующего элемента в этом случае 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.

Диффузионное насыщение из легированных металлических расплавов (ДРМ). 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.

Диффузионное насыщение из расплавов солей (ДРС). 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).

Диффузионное насыщение из суспензий шликерным способом (ДШ) заключается в том, что суспензию наносят окраской, окунанием 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.

Диффузионное насыщение из паст (ДЭП) 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, криолита) и связующего (например, гидролизованного этилсиликата). В состав различных паст входят, как правило, галоидные соединения, которые активизируют диффузионное насыщение.

Электролизное диффузионное насыщение из расплавов солей (ДЭС) основано 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.

Ионное легирование, или имплантация (ИЛ), поверхности возможно 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.

Ионная химико-термическая обработка (ИХТО) – 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 тлеющего разряда, в результате чего происходит очистка, разогрев и диффузионное насыщение деталей. Для высокотемпературных процессов (цементация, силицирование и др.) вводят дополнительный радиационный нагрев деталей. В результате автоматизированного управления процессом получается диффузионное покрытие высокого качества.

Конденсация покрытия при ионной бомбардировке (КИБ) осуществляется в специальных установках («Булат», «Пуск» и др.). После ионной очистки обрабатываемой поверхности (катада) распыленные электродугой частицы металла соединяются с подаваемым в установку газом (например, азотом) и осаждаются на изделие (например, в виде нитрида титана).

Композиционные электролитические покрытия (КЭП) 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.

Лазерное поверхностное легирование (ЛПЛ) 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.

Электролитическое осаждение металлов (ОЭГ), или гальваническое покрытие. Перед нанесением гальванического покрытия поверхность детали необходимо тщательно очистить (обезжирить и протравить). Плотность тока на поверхности катода (детали), температура и состав электролита обеспечивают заданное качество покрытия. Гальваническим способом можно осаждать не только металлы, но и сплавы.

Плакирование листами металла (ПЛ) осуществляют на прокатных станах при соответствующей подготовке плакируемой поверхности. Полимерные листы приклеивают к защищаемой стальной поверхности.

Плакирование намоткой (ПН) производят на специальных станках, используя металлическую или полимерную ленту.

Плазменное напыление покрытий (ПНП) 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 %).

Детонационный способ (СД) 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 ацетилен с кислородом.

Химическое осаждение из газовых смесей (ХОГ) осуществляют в реакторах при 700–1000 °С, куда загружают 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 покрытия на твердых сплавах, состоящие, например, из слоев оксида алюминия, нитрида титана и карбида титана.

Химическое осаждение из растворов (ХОР). Основано на выделении металлов из солей химическими восстановителями. Например, никелирование осуществляется в результате взаимодействия хлористого никеля с гипофосфитом.

Электронное поверхностное легирование (ЭПЛ) 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.

6.8. Материалы для криогенной техники

Криогенную технику используют в металлургии, химической промышленности, ракетной и авиационной технике, приборостроении, криобиологии, криомедицине и т. д. По функциональному назначению эта техника 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	CH ₄	O ₂	Ar	F ₂	N ₂	Ne	H ₂	He
<i>t</i> _{кип} , °С	-161	-183	-185	-188	-196	-246	-253	-269

Основные требования к сталям и сплавам, работающим при низких температурах, 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 предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение и сужение определяют на гладких образцах, а ударную вязкость, порог хладноломкости, критерии Ирвина K_{1c} и G_{1c} , критическое раскрытие трещины – на образцах с концентратором напряжений в виде надреза или трещины. В зависимости от назначения к стали и сплаву могут предъявлять требования по коррозионной стойкости, магнитности или немагнитности, значению коэффициента линейного расширения, теплопроводности, вакуумплотности и т. д.

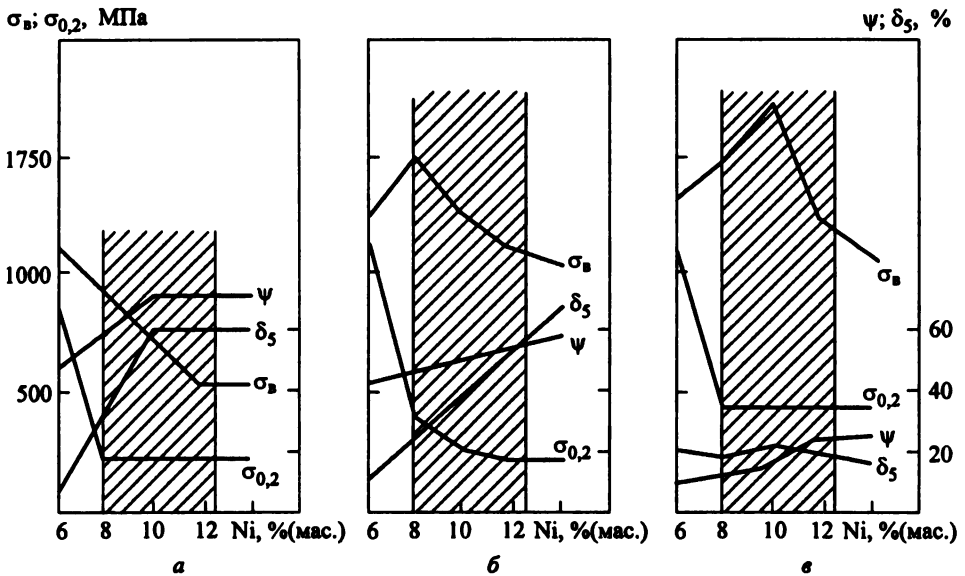


Рис. 6.21. Механические свойства сталей, содержащих 0,03 % С, 18 % Сг и 8–12,5 % Ni, при 20 (а), –196 (б) и –253 °С (в) (термическая обработка – закалка с 1050 °С в воде; заштрихованные области – возможное содержание никеля) [40]

В криогенной технике широко используют стали различных классов, а также сплавы на основе алюминия, меди, реже титана.

Стали. Среди сталей аустенитного класса наибольшее распространение получили стали 08X18H9T, 12X18H9T, 12X18H10T, 08X18H10T, 03X18H11, 12X18H9 (химический состав по ГОСТ 5632–72). Механические свойства материалов этой группы изменяются в зависимости от содержания никеля (рис. 6.21). Влияние никеля на структуру стали в диапазоне от 20 до –253 °С выражается в стабилизации аустенита относительно ($\gamma \rightarrow \delta$)-превращения при нагреве под закалку, а также относительно мартенситного превращения при охлаждении и пластической деформации.

Стали 12X18H9T, 12X18H10T, 03X18H11 используют для создания широкой номенклатуры изделий, работающих при температурах от 800 до –269 °С, изготавливаемых методами горячей и холодной пластической деформации с применением различных видов сварки и пайки. Термическую обработку сварных и паяных соединений, как правило, не проводят.

Сталь 12X18H9 используют для изготовления упругочувствительных элементов, работающих при криогенных температурах (пружины, мембраны, сильфоны и т. д.); эта сталь хорошо шлифуется и полируется, однако ее сварные и паяные соединения почти всегда требуют термической обработки во избежание снижения пластичности и

орупчивания при криогенных температурах. Механические свойства наиболее типичных полуфабрикатов из стали 12Х18Н10Т даны в табл. 6.93 и 6.94.

Таблица 6.93. Механические свойства прутков из стали 12Х18Н10Т при 20 °С и отрицательных температурах [40]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_s	σ_s^H	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	KCU	KCT
	МПа			%		МДж/м ²	
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	—	—

Таблица 6.94. Механические свойства тонколистовой стали 12Х18Н10Т при 20 °С и отрицательных температурах [40]

Обработка	$t, ^\circ\text{C}$	σ_s	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	KCU	KCT
		МПа			МДж/м ²	
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

Сталь 07Х21Н5АГ7 (химический состав по ГОСТ 5632–72) предназначена для изготовления сварных и несварных изделий, работающих при температурах от 400 °С до -253 °С: подвесок в кислородных установках, крепежа, цепей, шпинделей, тонкостенных сварных и паяных конструкций, получаемых методами горячей и холодной деформации.

По сравнению с рассмотренными выше сталь 07Х21Н5АГ7 обладает более высокой прочностью. После закалки с 1000–1050 °С она 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 к изделиям, которые в процессе технологических операций подверглись нагреву в интервале 600–800 °С, следует применять термическую обработку – закалку с 1000–1050 °С в воде.

Механические свойства стали 07Х21Н5АГ7 представлены в табл. 6.95.

Таблица 6.95. Механические свойства стали 07Х21Н5АГ7 при 20 °С и отрицательных температурах [40]

$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ГПа}$	σ_s	$\sigma_{0,2}$	σ_s^H	δ	ψ	KCU	KCV	KCT
		МПа			%		МДж/м ²		
20	207	760	420	630	59	60	1,50	1,40	1,20
-70	209	880	635	805	52	55	—	—	—
-196	216	1300	1000	1140	48	34	1,40	1,20	0,90
-253	221	1530	1240	800	12	10	1,20	0,95	0,80

Влияние степени холодной пластической деформации ε на механические свойства стали 07X21H5AГ7 характеризуют следующие данные [40]:

ε , %	0	10	20	40	60
σ_b , МПа	766	830	1104	1250	1365
$\sigma_{0,2}$, МПа	463	675	1104	1180	1299
δ , %	59	42	20	12	7

Сталь 07X21H5AГ7 технологична при аргодуговой сварке вольфрамовым электродом с присадкой и без нее, при сварке плавящимся электродом в среде гелия высокой чистоты, при автоматической сварке под флюсом АН-26. В качестве присадочного материала применяют проволоку марок Св-10X16H25AM6 и Св-08X15H23B7Г7М2; сталь удовлетворительно сваривается со сталями 12X18H10Т, 12X21H5Т, 07X16H6 и других.

Сталь 03X20H16AГ6 предназначена для изготовления сварных крупногабаритных емкостей и резервуаров, находящихся длительное время под давлением при периодическом изменении температур от 20 до -269°C ; допускается применение стали при температурах от 600 до -259°C без ограничения давления.

Химический состав этой стали следующий, % (мас.): $\leq 0,025\text{ C}$; $\leq 0,6\text{ Si}$; $6-7,5\text{ Mn}$; $20-25\text{ Cr}$; $15-16,5\text{ Ni}$; $0,15-0,28\text{ N}$; $\leq 0,02\text{ S}$; $\leq 0,025\text{ P}$.

Для стали 03X20H16AГ6 характерна стабильно аустенитная структура во всем диапазоне температур: от нагрева под горячую пластическую обработку до температуры сжиженного гелия (-269°C). Пластическая деформация при 20°C 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_6 и CrN) при нагреве в интервале $600-850^\circ\text{C}$. 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°C , а также высокий запас пластичности и вязкости при низких температурах (табл. 6.96).

Таблица 6.96. Механические свойства стали 03X20H16AГ6 при 20°C и отрицательных температурах (термическая обработка – закалка с 1000°C в воде) [40]

t , $^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_b^H	σ_b^T	σ_b^T/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	1,00	0,90	0,80
-269	1500	1000	–	–	–	25	21	0,80	–	–

Ниже показано влияние степени холодной пластической деформации ϵ на механические свойства стали 03Х20Н16АГ6, закаленной с 1000 °С в воде [40]:

ϵ , %	0	10	20	40	60
σ_b , МПа	675	780	880	1060	1200
$\sigma_{0,2}$, МПа	370	590	820	950	1160
δ_5 , %	52	38	18	8	5

Сталь 03Х20Н16АГ6 сваривается ручной дуговой сваркой, ручной и автоматической аргодуговой, автоматической сваркой под флюсом. Стойкость стали к образованию трещин удовлетворительная.

Сталь 07Х16Н6 аустенитно-мартенситного класса (химический состав по ГОСТ 5632–72) применяется для изготовления нагруженных деталей, работающих от 20 до –253 °С. Максимальная температура эксплуатации стали при кратковременной и длительной выдержке составляет 500 и 400 °С соответственно.

После нагрева до 1000 °С и охлаждения в воде или на воздухе до 20 °С в структуре стали содержится 10–50 % мартенсита (остальное аустенит). Охлаждение предварительно нормализованной или закаленной стали до –70 °С в течение 2 ч повышает содержание мартенситной составляющей до 70–80 %; охлаждение до более низких температур, например до –196 °С, к дополнительному $\gamma \rightarrow \alpha$ -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 07Х16Н6 приведены в табл. 6.97.

Таблица 6.97. Механические свойства стали 07Х16Н6 при 20 °С и отрицательных температурах [40]

t , °С	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_b^H	σ_{TP}^H	K_{1c} , 1/2 МПа·м	σ_{TP}^H/σ_b	δ_5	ψ	ψ^H	KCU	KCV	KCT
	МПа											
<i>Прутки диаметром 15 мм^{*1}</i>												
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	66	26	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
<i>Прутки диаметром 16 мм^{*2}</i>												
20	1270	1100	2080	–	–	–	10	67	–	–	–	–
–196	1730	1480	2740	–	–	–	17	58	–	–	–	–
–253	2060	1830	2190	–	–	–	15	51	–	–	–	–

^{*1} Режим ТО: закалка с 980 °С, воздух + обработка холодом при –70 °С, 2 ч, отпуск при 250 °С, 1 ч, воздух. ^{*2} Режим ТО: закалка с 1000 °С, вода + обработка холодом при –70 °С, 8 ч + отпуск при 410 °С, 1 ч.

Сталь 07X16H6 обладает хорошей технологичностью при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом без присадки и с присадкой, плавящимся электродом в среде гелия и смеси аргона с 15–20 % CO₂. Для выполнения сварных соединений, подвергаемых упрочняющей термической обработке, в качестве присадочного материала применяют сварочную проволоку 07X16H6; при этом минимальная температура эксплуатации сварных соединений составляет –253 °С.

Сталь 0Н9 широко применяют 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. Ее химический состав следующий, % (мас.): ≤ 0,10 С; 0,3–0,60 Mn; 0,15–0,35 Si; 8,5–10,0 Ni; ≤ 0,15 S; ≤ 0,02 P.

После нормализации с температуры $A_{c3} + 30$ °С сталь 0Н9 имеет структуру мартенсита с 10–15 % аустенита. Ее термическую обработку можно осуществлять по двум режимам:

- 1) двойная нормализация с 900 и 790 °С и высокий отпуск при 550–600 °С;
- 2) закалка с 810–830 °С в воде и высокий отпуск при 550–600 °С.

Механические свойства стали 0Н9, термообработанной по этим режимам, даны в табл. 6.98.

Таблица 6.98. Механические свойства стали 0Н9 при 20 и –196 °С [40]

$t, ^\circ\text{C}$	σ_s	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	KCU, МДж/м ²	V ^{*1} , %
	МПа		%			
<i>Режим 1</i>						
20	720	520	28	82	2,53	100
–196	1100	820	26	65	1,29	90
<i>Режим 2</i>						
20	600	450	27	79	1,96	100
–196	900	800	22	62	0,98	70

*1 Доля вязкой составляющей в изломе образца.

Смягчающей термической обработкой для стали 0Н9 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 низкий температурный коэффициент линейного расширения (рис. 6.22). Сплав применяют в сварных конструкциях, работающих в условиях циклической смены температур от 20 до –253 °С, например, для изготовления бескомпенсационных криогенных трубопроводов. Химический состав сплава следующий, % (мас.): ≤ 0,05 С; ≤ 0,3 Si; 0,3–0,6 Mn; 35,0–37,0 Ni; 0,4–0,6 Cr; 0,25 Cu; 0,02 S; остальное – Fe.

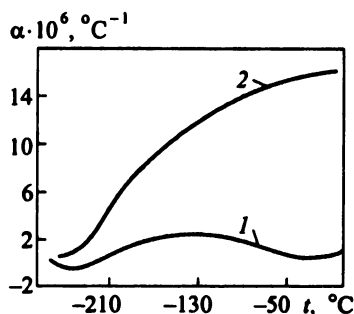


Рис. 6.22. Температурная зависимость температурного коэффициента линейного расширения сплава 36НХ (1) и стали 12Х18Н10Т (2) [40]

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 температурного коэффициента линейного расширения рекомендуется следующий режим ТО: закалка с 830 °С + отпуск для снятия внутренних напряжений при 315 °С, 1 ч + стабилизирующий отпуск при 95 °С, 48 ч.

Хранение изделий на открытом воздухе допускается только в упакованном виде с применением ингибиторов.

Механические и физические свойства сплава 36НХ приведены в табл. 6.99 и 6.100.

Сплав 36НХ толщиной до 4 мм сваривается аргонодуговой сваркой проволокой 36НГТ и 36НГ6 и неплавящимися электродами. Сварные соединения не требуют термической обработки.

Таблица 6.99. Влияние режима термической обработки на механические свойства сплава 36НХ [40]

Термическая обработка	$t, ^\circ\text{C}$	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$
		МПа		%		
Закалка 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 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 830 °С, 5 мин, воздух	–196	846	584	40,8	76,4	1,70
То же + отпуск 315 °С, 1 ч	–196	865	585	41,4	76,8	–
Закалка 950 °С, 5 мин, воздух + отпуск 315 °С, 1 ч	–196	857	599	39,6	76,9	1,84
Закалка 1000 °С, 5 мин, вода	–196	821	574	36,2	71,9	1,85
Закалка 1090 °С, 5 мин, вода + 760 °С, 5 мин, вода	–196	770	566	40,4	72,4	2,02

Таблица 6.100. Температурный коэффициент линейного расширения сплава 36НХ после различных режимов термической обработки [40]

Термическая обработка	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$, при $t, ^\circ\text{C}$				
	–248...–240 ^{*1}	–23...–3 ^{*1}	–153...–123 ^{*2}	20	–253...20 ^{*3}
Холодная прокатка с обжатием 63 %	–2,3	0,4	1,45	0,6	0,5
Закалка 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 950 °С, 3 мин, воздух	–	1,3	2,1	1,5	1,4
Отжиг 950 °С	–1,9	1,55	2,22	1,8	1,6
Отжиг 600 °С, 5 ч + охлаждение до 100 °С, 90 ч	–1,8	2,26	2,68	2,46	1,8

^{*1} Для данного интервала даны минимальные значения α . ^{*2} То же максимальные значения α .

^{*3} То же средние значения α .

Алюминий и его сплавы. В металлоконструкциях криогенной техники доля алюминия и его сплавов составляет примерно 30 % от общего объема используемого металла.

Для алюминия характерно отсутствие порога хладноломкости, сохранение высокой пластичности с понижением температуры (а иногда даже ее повышение), слабое изменение прочностных характеристик при отрицательных температурах, коррозионная стойкость на воздухе и в окислительных средах, высокая тепло- и электропроводность. Эти свойства алюминия в той или иной степени наследуются его сплавами, что и оправдывает их широкое распространение в криогенной технике.

Технический алюминий хорошо сваривается газовой, аргонодуговой и контактной сварками. Его используют во всем диапазоне температур ниже 150 °С для труб теплообменных аппаратов и других малонагруженных деталей и узлов.

Ниже приведены механические свойства отожженного алюминия АД1 (1013) (химический состав по ГОСТ 4784–97).

	20 °С	–196 °С	–253 °С
σ_B , МПа	70	160	250
$\sigma_{0,2}$, МПа	30	40	50
δ_3 , %	36	50	40
ψ , %	89	60	50
KCU , МДж/м ²	0,9	1,6	2,0

Термическая обработка технического алюминия заключается в отжиге при 350–400 °С с охлаждением на воздухе.

Среди деформируемых сплавов алюминия в криогенной технике наибольшее распространение получили сплавы АМг5, АМг6 системы Al–Mg, а также сплавы АВ, Д16, 1201, АК6 на основе более сложных систем легирования (с добавками меди, магния, марганца и т. д.).

Применяют также литейные алюминиевые сплавы, главным образом силумины, легированные 6–13 % Si. Рассмотрим наиболее употребляемые в криогенной технике сплавы алюминия.

Сплав АМг5 (химический состав по ГОСТ 4784–97) применяют для нагруженных деталей, в том числе сварных: обечаек, днищ, фланцев, трубных решеток и других металлоизделий, работающих при температурах –253...–150 °С. Термическая обработка сплава состоит в отжиге при 305–340 °С с охлаждением на воздухе. После этого сплав имеет следующие механические свойства [30]:

	20 °С	–183 °С	–196 °С	–253 °С
σ_B , МПа	300	390	420	520
$\sigma_{0,2}$, МПа	130	150	160	170
δ_3 , %	23	40	44	33
ψ , %	42	39	37	28
KCU , МДж/м ²	0,4	0,3	0,3	0,3

Чаще всего для изготовления сварных металлоизделий применяют аргонодуговую сварку.

Сплав Д16 (химический состав по ГОСТ 4784–97) 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 (крепезжа, фланцев и т. д.), работающих в интервале температур $-253 \dots 230$ °С. Промежуточная термическая обработка сплава Д16 состоит в отжиге при $380-430$ °С с охлаждением до $250-275$ °С со скоростью не более 30 °С/ч, а далее на воздухе. Окончательная термическая обработка состоит в закалке с 500 °С в воде и естественного старения при 20 °С в течение $90-100$ ч. Нагартованные листы после холодной прокатки непосредственно подвергают искусственному старению при 130 °С в течение 20 ч.

Механические свойства сплава Д16 после окончательной термической обработки приведены ниже [30]:

	20 °С	-73 °С	-196 °С	-253 °С
σ_b , МПа	470	490	560	660
$\sigma_{0,2}$, МПа	300	300	380	450
δ_3 , %	19	22	27	16

Сплав 1201, содержащий, %: (мас.): $5,8-6,8$ Cu; $0,2-0,4$ Mn; $0,10-0,25$ Zr; $0,05-0,15$ V; $0,02-0,10$ Ti, принадлежит к упрочняемым свариваемым сплавам алюминия. Его применяют для изготовления сварных металлоизделий (обечак, днищ, фланцев и т. д.), работающих при температурах от -253 до 200 °С (в случае кратковременного нагружения до 300 °С).

Смягчающей термической обработкой сплава являются отжиг при $350-370$ °С в течение $2-4$ ч с охлаждением на воздухе. Упрочняющая термическая обработка состоит в закалке с 540 °С в воде с последующим искусственным старением при $150-190$ °С, 18 ч.

Механические свойства сплава 1201 после термической обработки по режиму закалка 540 °С, вода; правка листа с деформацией $1-3$ %; искусственное старение при 180 °С, 18 ч приведены ниже [30]:

	20 °С	-196 °С	-253 °С
σ_b , МПа	440	550	650
$\sigma_{0,2}$, МПа	350	400	470
σ_b^H , МПа	550	650	710
σ_b^H / σ_b	1,25	1,18	1,11
δ , %	8	10	12

Сплав 1201 сваривают аргонодуговым, гелиево-дуговым, электронно-лучевым, шовным и точечным способами.

Медь и ее сплавы. Эти материалы стали одними из первых применять в криогенной технике. Для меди характерна высокая пластичность и вязкость до температур, 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.

Техническую медь М1, М2, М3 (химический состав по ГОСТ 859–01) применяют для изготовления металлоизделий криогенной техники (днищ, обечаек трубчатых теплообменников и др.), работающих при температурах от -273 до 250 °С. Листовую медь используют для внутренних емкостей и экранов сосудов Дьюара, применяемых для хранения и транспортирования сжиженных газов. Техническую медь применяют в отожженном (мягком) состоянии (температура отжига составляет 500 – 700 °С), а также после холодной нагартовки.

Отожженная медь марки М3 имеет следующие механические свойства [30]:

	20 °С	-183 °С	-196 °С	-253 °С
σ_b , МПа	200	300	330	470
$\sigma_{0,2}$, МПа	60	80	80	130
δ , %	45	50	52	58
ψ , %	85	84	83	74
KCU , МДж/м ²	1,7	2,1	2,1	2,1

Основной способ соединения меди – пайка на мягких (типа ПОС) и твердых (типа ПСр) припоях. Можно получать и сварные соединения, однако последнее связано с рядом трудностей. В криогенной технике применяют ручную сварку плавящимся электродом (например, «Комсомолец-100») сварку 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) в криогенной технике используют при температурах от -253 до 250 °С в мягком и полутвердом состоянии (обечайки, днища, фланцы и др.). После холодной деформации ее подвергают отжигу при 600 – 700 °С; для снятия внутренних напряжений применяют отжиг при 270 – 285 °С. Механические свойства этой латуни приведены в табл. 6.101.

Таблица 6.101. Механические свойства прутков диаметром 10–12 мм из латуни Л63 при 20 °С и отрицательных температурах [30]

Термическая обработка	t , °С	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU , МДж/м ²
		МПа		%		
Без ТО	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

Латунь имеет удовлетворительную свариваемость. При автоматической сварке используют присадочный материал из бронзы БрОЦ 4-3 и флюс 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 Cu-Al-Fe-Mn (химический состав по ГОСТ 18175-78). Ее используют для изготовления деталей, работающих при $-196...150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях статической и циклической нагрузок, когда требуется малый коэффициент трения (шестерни, втулки, арматура, фасонное литье и т. д.).

В деформированном состоянии БрАЖМц 10-3-1,5 применяют непосредственно после горячей пластической деформации и после закалки с отпуском (табл. 6.102). Смягчающей термической обработкой для нее является отжиг при $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с охлаждением с печью.

Таблица 6.102. Механические свойства бронзы БрАЖМц 10-03-1,5 при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отрицательных температурах [30]

Вид полуфабриката	Режим ТО	$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
			МПа		%	
Пруток прессованный диаметром 65 мм*	Без ТО	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	То же	20	760	410	23	30
		-183	920	510	22	30
		-196	950	560	16	21
	Закалка $860\text{ }^{\circ}\text{C}$ вода	20	830	340	17	20
		-183	980	480	16	19
		-196	1000	460	12	17
	Закалка $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, вода + отпуск при $400\text{ }^{\circ}\text{C}$	20	820	340	22	35
		-183	930	420	—	—
		-196	950	450	—	—
	Отжиг $700\text{ }^{\circ}\text{C}$	20	620	310	29	36
		-183	730	390	27	29
		-196	740	400	26	27

* При $20, -183$ и $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ударная вязкость KCU (KCV) прутка составляет соответственно, 1,0 (0,65), 0,90 (0,55) и $0,85\text{ МДж/м}^2$.

Соединения из бронзы выполняют сваркой и пайкой. При сварке деталей толщиной до 4 мм применяют 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 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на уровне аустенитных и других сталей), имеют удовлетворительную пластичность и ударную вязкость при криогенных температурах.

Преимуществом титана является малая плотность (4500 кг/м^3), что обеспечивает 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, его можно применять в криоэнергетике для изготовления электрических машин, использующих сверхпроводящие материалы.

Технический титан ВТ1-0 (химический состав по ГОСТ 19807-91) применяют в несварных и сварных конструкциях (обечайки, фланцы и т. д.), работающих под давлением в интервале температур $-269 \dots 250$ °С. Его используют в отожженном состоянии (температура отжига $520-540$ °С). Нагрев полуфабрикатов или деталей желательно осуществлять в вакуумных печах или в печах с защитной атмосферой. Механические свойства технического титана в отожженном состоянии приведены в табл. 6.103.

Таблица 6.103. Механические свойства технического титана ВТ1-0 при 20 °С и отрицательных температурах [30]

Вид полуфабриката	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$
		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

Технический титан хорошо сваривается; при этом сварку осуществляют аргодуговым способом. Для однородных соединений или соединений с алюминием применяют пайку в вакууме, аргоне или диффузионную. Наилучшие свойства паяных соединений достигаются при использовании серебряных припоев.

Титан обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и окислительных средах.

Сплав ВТ5-1 (химический состав по ГОСТ 19807-91) предназначен для изготовления деталей и узлов, в том числе сварных, работающих под давлением в интервале температур $-253 \dots 500$ °С. Сплав в основном используют в отожженном состоянии (отжиг при $700-750$ °С). Механические свойства отожженного при 720 °С сплава ВТ5-1 указаны в табл. 6.104.

Таблица 6.104. Механические свойства сплава ВТ5-1 при 20 °С и отрицательных температурах [30]

Вид полуфабриката	$t, ^\circ\text{C}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, \text{МДж/м}^2$
		МПа		%		
Пруток диаметром 20 мм	20	820	800	21	55	1,0
	-196	1320	1310	16	27	0,4
	-253	1580	1400	15	9	0,4
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	—	—

Сплав технологичен при сварке: аргонодуговой под слоем флюса, электрошлаковой и др. При изготовлении из сплава ВТ5–1 крепежа последний подвергают оксидированию при 890 °С в течение 6 ч.

Сплав ОТ4–1 (химический состав по ГОСТ 19807–91) предназначен для изготовления деталей и узлов, в том числе сварных, сосудов и т. д., работающих при –196...350 °С. В отдельных случаях, когда содержание легирующих элементов (алюминия и марганца) находится на нижнем пределе, допускается применение сплава начиная с –253 °С. Сплав используют в виде труб, листа и других полуфабрикатов в отожженном при 740–760 °С состоянии. Для снятия наклепа применяют отжиг при 640–660 °С, а для снятия внутренних напряжений – при 520–560 °С. Механические свойства отожженного сплава ОТ4–1 приведены в табл. 6.105.

Таблица 6.105. Механические свойства сплава ОТ4–1 при 20 °С и отрицательных температурах [30]

Вид полуфабриката	t, °С	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
		МПа		%		
Лист, отожженный при 650 °С	20	700	580	11	–	–
	–196	1150	940	15	–	–
	–253	1390	1130	7	–	–
	–269	1330	1090	11	–	–
То же, при 750 °С	20	650	510	21	42	50
	–196	1080	830	17	21	23
	–253	1370	1150	15	11	27

Сплав ОТ4–1 сваривается аргонодуговой сваркой, сваркой под слоем флюса, контактной сваркой; термообработка сварных соединений не обязательна.

Список литературы

1. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка в активизированных газовых средах. М.: Машиностроение, 1979.
2. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов: Справочник. М.: Металлургия, 1987.
3. Братухин А.Г., Гурвич Л.Я. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей. М.: Авиатехинформ, 1999.
4. Васильева Е.В., Воронова Т.А., Горлова А.С. Новые способы повышения прочностных свойств ниобия // Труды МВТУ. 1983. № 280.
5. Ватрушин Л.С., Осинцев В.Г., Козырев А.С. Бескислородная медь. М.: Металлургия, 1982.
6. Ворошнин Л.Г. Антикоррозионные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1981.
7. Газовыделение алюминиевой полимерной пленки в вакууме при пониженных температурах / А.Н. Сафонов, В.И. Макарова, В.П. Шатохин и др. // Электронная техника. 1982. Вып. 2.

8. Газовыделение малоуглеродистой стали с коррозионно-стойкими покрытиями / Г.В. Скибина, Е.В. Андронов, В.И. Макарова // Электронная техника. Материалы. 1981. Вып. 5.
9. Еремина З.И. Производство и применение металлопродукции с антикоррозионными покрытиями в УССР. Киев: УкрНИИТИ, 1984. Сер. II.
10. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. М.: Энергоиздат, 1981.
11. Защита строительных конструкций и технологического оборудования от коррозии: Справочник строителя. М.: Стройиздат, 1981.
12. Зубарев П.И., Сухарева Л.А. Структура и свойства полимерных покрытий. М.: Химия, 1982.
13. Ибрагимов Ш.Ш., Кирсанов В.В., Пятилетов Ю.С. Радиационные повреждения металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
14. Исследования кинетики газовыделения теплоизоляционных материалов в вакууме при температурах от нуля до 20 °С / В.И. Макарова, В.П. Шатохин, А.Н. Сафонов и др. // Электронная техника. Материалы. 1980. Вып. 6.
15. Картер В.И. Металлические противокоррозионные покрытия: Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1980.
16. Коломыцев П.Т. Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984.
17. Конструкционные материалы: Справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буже и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990.
18. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1985.
19. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1987.
20. Макарова В.И., Скибина Г.В. Газовыделение и закономерность процесса выделения водорода из металлов в вакууме при 20 °С // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. 1980. Вып. 4.
21. Макарова В.И., Скибина Г.В., Жигулев А.И. Газовыделение покрытий из алюминия, нанесенного газопламенным методом. М., 1987. Деп. в ВИНТИ, № 5207–В87.
22. Макарова В.И., Скибина Г.В. Влияние концентрации и параметров диффузии на выделение водорода из металлов в вакууме при температурах 20...500 °С // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. 1983. Вып. 2.
23. Макарова В.И., Сафонов А.Н., Скибина Г.В. Влияние различных способов обработки поверхности на газовыделение стали 12Х18Н10Т в вакууме // Изв. вузов. Машиностроение. 1980. № 1.
24. Макарова В.И., Скибина Г.В., Сафонов А.Н. Роль диффузии в процессе выделения водорода из металлов в вакууме при комнатной температуре / Новые сплавы и методы упрочнения деталей машин. МВТУ. 1981.
25. Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1983.
26. Мовчан Б.А., Малащенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наукова думка, 1983.
27. Никитин В.И., Комиссарова И.П., Ревзюк М.Б. Жаростойкость конструкционных материалов энергомашиностроения. Л.: НПО ЦКТИ, 1978. Вып. 38.

28. *Николаев А.К., Новиков А.И., Розенберг В.М.* Хромовые бронзы. М.: Металлургия, 1983.
29. *Промышленные алюминиевые сплавы:* Справочник. М.: Металлургия, 1984.
30. *Солнцев Ю.П., Степанов Г.А.* Материалы в криогенной технике: Справочник. Л.: Машиностроение, 1982.
31. *Сплавы для нагревателей / Л.Л. Жуков, И.М. Племянникова, М.Н. Миронова и др.* М.: Металлургия, 1985.
32. *Структура и коррозия металлов и сплавов:* Справ. изд. / И.Я. Сокол, Е.А. Ульянов, Э.Г. Фельдгандлер и др. – М.: Металлургия, 1989.
33. *Сухотин А.М., Зотиков В.С.* Химическое сопротивление материалов: Справочник. Л.: Химия, 1975.
34. *Томашов Н.Д.* Титан и коррозионно-стойкие сплавы на его основе. М.: Металлургия, 1985.
35. *Томашов Н.Д., Чернова Г.П.* Теория коррозии и коррозионно-стойкие конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1986.
36. *Тугоплавкие металлы и сплавы / Е.М. Савицкий, Г.С. Бурханов, К.Б. Поварова и др.* М.: Металлургия, 1986.
37. *Туфанов Д.Г.* Коррозионная стойкость сталей, сплавов и чистых металлов. М.: Металлургия, 1982.
38. *Ульянин Е. А.* Коррозионно-стойкие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1980.
39. *Ульянин Е.А., Свистунова Т.В., Левин Ф.Л.* Коррозионно-стойкие сплавы на основе железа и никеля. М.: Металлургия, 1986.
40. *Ульянин Е.А., Сорокина Н.А.* Стали и сплавы для криогенной техники: Справочник. М.: Металлургия, 1984.
41. *Усынин Г.Б., Кусмарцев Е.В.* Реакторы на быстрых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
42. *Химико-термическая обработка металлов и сплавов:* Справочник / Под ред. Л.С. Ляховича. М.: Металлургия, 1981.
43. *Чехов А.П.* Коррозионная стойкость материалов: Справочник. Днепропетровск: Промінь, 1980.
44. *Электротермическое оборудование:* Справочник. 11-е изд. / Под общ. ред. А. П. Альтгаузена. М.: Энергия, 1980.

7. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

7.1. Материалы высокой проводимости

Проводниковый материал с удельным электрическим сопротивлением при нормальных условиях не более $10 \cdot 10^{-8}$ Ом·м называют материалом высокой проводимости. Основные показатели проводникового материала: удельная электрическая проводимость либо удельное электрическое сопротивление, температурный коэффициент удельного электрического сопротивления, работа выхода электрона из проводника.

Материалы высокой проводимости применяют в электротехнике, а также в приборостроении для изготовления обмоточных и монтажных проводов, различного рода токоведущих частей и т. п. Эти материалы должны обладать малым удельным электрическим сопротивлением (высокой удельной электрической проводимостью), высокими механическими свойствами, хорошими технологическими параметрами и стойкостью против окисления.

Материалы высокой проводимости подразделяют на следующие группы: медь, ее сплавы (бронзы, латуни), алюминий, серебро и прочие металлы (табл. 7.1). В особую группу выделяют материалы для электрических контактов.

Таблица 7.1. Физические свойства металлов высокой проводимости [7]

Металл	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	$\alpha_p \cdot 10^4$	$\alpha \cdot 10^6$	λ , Вт/(м·°C)	Ф, эВ	$t_{пл}$, °C	γ , т/м ³
		°C ⁻¹					
Серебро Ag	1,6	40	19	415	4,4	961	10,50
Медь Cu	1,72	43	16	390	4,3	1083	8,94
Золото Au	2,4	38	14	293	4,8	1063	19,30
Алюминий Al	2,8	42	24	209	4,3	657	2,70
Бериллий Be	4,0	60	13	167	3,9	1284	1,85
Магний Mg	4,5	42	26	167	3,6	651	1,74
Иридий Ir	5,4	41	6,5	146	—	2410	22,50
Вольфрам W	5,5	46	4,4	168	4,5	3380	19,30
Молибден Mo	5,7	46	5,1	151	4,2	2620	10,20
Цинк Zn	5,9	—	31	111	—	420	7,14
Кобальт Co	6,2	60	12	79	—	1492	8,71
Никель Ni	7,3	65	13	95	5,0	1455	8,90
Кадмий Cd	7,6	42	30	93	4,0	321	8,65
Индий In	9,0	47	25	25	—	156	7,28
Железо Fe	9,8	60	11	73	4,5	1535	7,87
Платина Pt	10,5	39	9	71	—	1773	21,40
Олово Sn	12,0	41	23	65	4,4	232	7,31

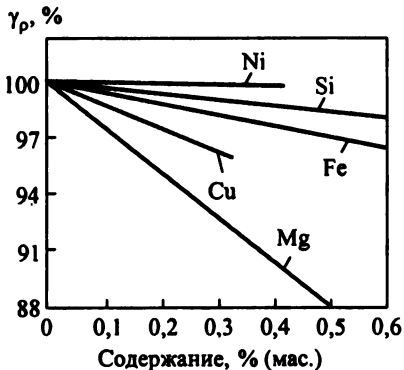


Рис. 7.1. Влияние примесей на изменение удельной электрической проводимости алюминия, принятой за 100 %, [13]

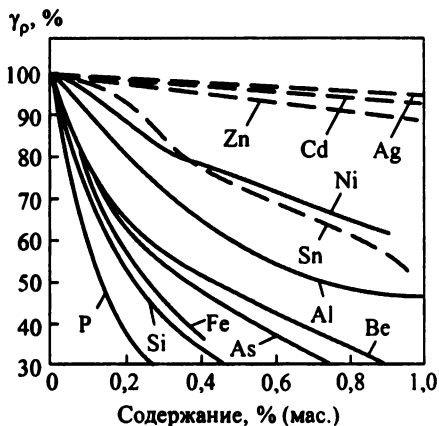


Рис. 7.2. Влияние примесей на изменение удельной электрической проводимости меди, принятой за 100 %, [7]

Электрическая проводимость металлов, являясь структурно-чувствительным параметром, в значительной степени зависит от количества примесей (рис. 7.1; 7.2).

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. Медь поставляют в мягком (отожженном) и твердом состоянии.

Физические и механические свойства меди приведены ниже:

γ , т/м ³	8,90/8,95
$t_{пл}$, °C	1083/1080
σ_b , МПа	250–300/350–480
δ , %	18–50/0,5–4

Примечание. В числителе приведены свойства меди в отожженном, а в знаменателе — в неотожженном состоянии.

Для электротехнических целей применяют наиболее чистую техническую катодную медь марок М0к (99,95 % Cu), М1к (99,9 % Cu); бескислородную медь марок М00б (99,9 % Cu), М1б (99,95 % Cu); переплавленную медь марки М1 (99,9 % Cu) и др.

Из меди марок М00б, М1б изготавливают медные слитки. Из медных слитков этих марок и медного сплава с серебром марки МС0,1 (0,08–0,12 % Ag, примесей $\leq 0,1$ %, остальное — Cu) для пластин коллекторов электрических машин, электромеханизмов и электроприборов выпускают профили трапециевидальной формы высотой, нормированной по размерному ряду в диапазоне 4–112 мм. Твердость профилей первой категории из медных слитков составляет 70 НВ, из медного сплава — 84 НВ. 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 % [46].

Из медной катанки изготавливают проволоку круглого сечения диаметром 0,020–9,42 мм в мягком и твердом состоянии и для воздушных линий электрической связи. Сортамент, механические и электрические свойства проволоки даны в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Свойства медной проволоки круглого сечения (ГОСТ 2112–79)

Состояние	Диаметр проволоки, мм	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	σ_s , МПа	δ , %
Мягкое	0,02–1,00	1,724	200–290	6–30
	1,00–9,42	1,724	200–270	30–35
Твердое	0,02–1,00	1,80	400–450	0,6
	1,00–9,42	1,77–1,78	360–400	1,0–2,0
Для линий связи	0,02–1,00	1,80	–	–
	1,00–9,42	1,77–1,78	430–440*	1,5*

* Для проволоки диаметром 2,0–4,0 мм.

Из медной катанки изготавливают также проволоку прямоугольного сечения (табл. 7.3), ленты, мягкие и твердые шины нормированных размеров и свойств (ГОСТ 434–78).

Таблица 7.3. Механические свойства полуфабрикатов из медной катанки (ГОСТ 434–78)

Толщина a , мм	δ , %, не менее			σ_s , МПа, не менее	
	Проволока	Шины	Ленты	Проволока	Ленты
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
Св. 10,00	–	35	–	–	–

Примечание. Значения δ даны для полуфабрикатов в мягком, а σ_s – в твердом состоянии.

Размеры поставляемых изделий по сторонам $a \times b$ (толщина \times ширина) сечения приведены ниже, мм:

Проволока	(0,80–5,60) \times (2,00–30,00)
Ленты	(0,10–3,53) \times (8,0–100,00)
Шины	(4,00–30,00) \times (16–120)

Горячекатаные и холоднокатаные медные листы и холоднокатаные полосы имеют регламентированные размеры (ГОСТ 495–77), мм:

Холоднокатаные:

листы	(0,4–12,0) \times (600–1000) \times (1500–2000)
полосы	(0,4–0,6) \times (40–600) \times (500–2000)

Горячекатаные листы (3,0–25,0) \times (600–3000) \times (1000–6000)

Примечание. Толщина \times ширина \times длина.

Листы и полосы бывают мягкие, полутвердые и твердые из меди марок М1, М1р, М2, М2р, М3 и М3р. Механические свойства их приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4. Механические свойства медных листов и полос (ГОСТ 495–77)

Способ изготовления	Состояние	σ_b , МПа	δ , %, не менее	НВ	Способ изготовления	Состояние	σ_b , МПа	δ , %, не менее	НВ
Холодная прокатка	Твердое	290*	3	95	Холодная прокатка	Мягкое	200–260	36	55
	Полутвердое	250–310	12	75		Горячая прокатка	–	200*	30

* Не менее.

Для изготовления фольгированных диэлектриков электролитическим осаждением применяют медную фольгу ФМЭ (неоксидированная), ФМЭО (оксидированная нормальной шероховатости), ФМЭОШ (оксидированная повышенной шероховатости). Химический состав фольги соответствует меди М1. Фольгу поставляют в виде рулонов и листов регламентированных размеров. Толщина оксидированного слоя на фольге ФМЭО и ФМЭОШ составляет 0,15–0,35 мм.

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 типа 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 них являются бронзы, особенно бериллиевые и кадмиевые. Бериллиевые бронзы применяют для изготовления токоведущих пружин, щеткодержателей, скользящих контактов, электродов и т. п.; кадмиевые – для контактов, троллейных проводов и коллекторных пластин. Они обладают большим сопротивлением истиранию и имеют рабочую температуру до 250 °С. Латунни имеют существенно худшие электрические свойства, чем бронзы.

В табл. 7.5 приведены механические свойства прутков из бериллиевой бронзы БрБ2 (1,8–2,1 % Ве).

Таблица 7.5. Механические свойства прутков из бронзы БрБ2 [46]

Диаметр, мм	Способ изготовления	Состояние	σ_b , МПа	δ , %, не менее	НВ
5–40	Волочение	Мягкое	400–600	25	100–150
5–15	»	Твердое	750–1000	1,0	150*
16–40	»	»	650–900	1,0	150*
42–100	Прессование	Прессованное	450	20	–

* Не менее.

Алюминий применяют для проводов воздушных линий электропередачи, в распределительных устройствах, для кабелей, обмоток трансформаторов и электрических машин, электромагнитов и т. п. Его используют также в качестве конструкционного и защитного (обмотки кабелей) материала.

Алюминий дешевле меди, которая к тому же является дефицитным материалом. Кроме того, алюминий существенно легче меди (плотности 2,70 и 8,94 т/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.

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 изготовляют чушки, из алюминия А995, А99, А97, А7Е и А5Е – слитки, предназначенные для производства проволоки для кабелей и проводов, а также проволоки для сварочных и других целей.

Прокаткой из слитков получают алюминиевую катанку АКЛП-5ПТ, АКЛП-7ПТ в полутвердом состоянии; непрерывным литьем и прокаткой – катанку АКЛП-5Т в твердом состоянии. Катанку изготовляют из алюминия А5Е и А7Е с нормированными размерами, механическими свойствами и удельным электрическим сопротивлением (табл. 7.6).

Таблица 7.6. Свойства алюминиевой катанки (ГОСТ 13843–78 Е)

Диаметр, мм	σ_b , МПа, не менее		δ , %, не менее, для АКЛП-5ПТ, АКЛП-7ПТ	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м, не более	
	АКЛП-5ПТ, АКЛП-7ПТ	АКЛП-5Т		АКЛП-5ПТ	АКЛП-5Т
9,0; 9,5	83,0	95,0	15,0	2,815	2,813
11,5–15,5	78,0	–	15,0	–	–
18,0–19,0	74,0	–	15,0	–	–
23,0; 25,0	64,0	–	15,0	–	–

Для неизолированных проводов линий электропередачи из алюминиевой катанки производят проволоку АМ (мягкая), АПТ (полутвердая), АТ (твердая), АТп (твердая повышенной прочности) с нормированными размерами и механическими свойствами. Механические свойства проволоки диаметром 0,6–10,0 мм из алюминиевой катанки приведены ниже (ГОСТ 6132–79):

	АМ	АПТ	АТ	АТп*
σ_b , МПа	73,5–98	88–137	147–167	167–191
δ , %	15–25	2,0–3,0	1,0–2,0	1,5–2,0
$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	2,80	2,83	2,83	2,83

* Для проволоки диаметром 1,5–4,5 мм.

Для электротехнических целей из алюминия марки АД0 и алюминиевого сплава АД31 изготавливают прессованные шины (с термической обработкой и без нее). Механические свойства их приведены в табл. 7.7.

Таблица 7.7. Свойства образцов, вырезанных из прессованных шин (ГОСТ 15176–89)

Марка сплава	Состояние поставки шин	σ_b	σ_T	$\delta, \%$	$\rho \cdot 10^8, \text{ Ом} \cdot \text{м}$
		МПа			
АД0	Без термической обработки	60–70	–	15	2,90
АД31	Закаленное и естественно состаренное	130	60	13	3,50
	Закаленное и искусственно состаренное	200	150	8	3,25

Для деталей с повышенными механическими свойствами используют алюминиевые сплавы на основе систем Al–Mg–Si–Fe, Al–Mg–Si–Fe–Zn.

Стали в качестве проводникового материала применяют в мягком состоянии с содержанием углерода 0,10–0,15 %. Их используют для изготовления проводов воздушных линий электропередачи небольших мощностей, для шин, рельсов трамваев и электрических железных дорог. Поверхность стальных проводов покрывают цинком с целью защиты их от коррозии [7]. В качестве токопроводящей жилы в кабелях используют углеродистую качественную проволоку оцинкованную (тип КО) и без покрытия (тип КС). Проволоку изготавливают диаметром 0,5–6,0 мм из низкоуглеродистых сталей. Проволока всех диаметров должна иметь $\sigma_b \geq 362$ МПа (для оцинкованной проволоки) и 392 МПа (для проволоки без покрытия); удельное электрическое сопротивление проволоки при 20 °С не более $15 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Серебро имеет наименьшее удельное электрическое сопротивление из группы металлических проводников, но является остродефицитным материалом. Его используют в виде микропроводников, гальванических покрытий в ответственных высоко- и сверхвысокочастотных устройствах, слаботочных контактов.

Материалы для электрических контактов должны одновременно иметь высокие значения дугостойкости, твердости, удельной электрической проводимости, теплопроводности, химической стойкости, а также быть устойчивыми к атмосферной коррозии и микроклимату, существующему в коммутационном устройстве. Контакты регламентированных типоразмеров изготавливают из материалов на основе порошкового вольфрамоникелевого сплава, пропитанного жидким серебром или медью; на основе серебра (60–95 %), легированного кадмием, графитом, а также оксидами кадмия, меди и никеля [46]. Для контактов используют также сплавы систем 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. 7.8 приведены свойства контакт-деталей, изготовленных пропиткой порошковых заготовок из вольфрамоникелевого сплава.

Таблица 7.8. Свойства рабочего слоя порошковых контакт-деталей (для первой категории) [46]

Марка контакт-детали	$\gamma, \text{т/м}^3$	НВ	$\rho \cdot 10^8, \text{Ом} \cdot \text{м}$, не более
КМК-Б45	11,8–12,4	120–150	7,5
КМК-Б25	13,2–14,4	180–220	9,0
КМК-А45	13,4–14,0	100–150	4,2
КМК-А25	14,8–15,6	170–220	4,6

7.2. Сверхпроводники

Сверхпроводимость – явление, заключающееся в том, что электрическое сопротивление некоторых материалов исчезает при уменьшении температуры ниже некоторого значения, зависящего от материала и от магнитной индукции. Сверхпроводник – это 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 B_c называется критическим и зависит от температуры, при которой находится образец. Сверхпроводящее состояние может быть разрушено и магнитным полем, созданным протекающим через образец током. Плотность тока, при которой разрушается состояние сверхпроводимости, называется критической и обозначается j_c . Желательно иметь сверхпроводники с максимально высокими критическими параметрами.

Сверхпроводимость является сверхтекучестью «электронной жидкости», образованной валентными электронами. Электроны имеют полуцелый 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 начинает двигаться как единое целое.

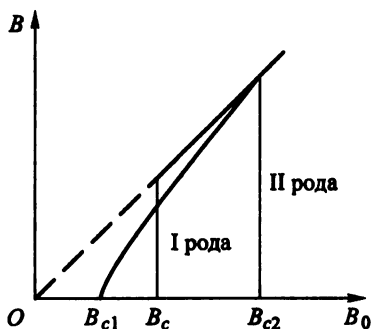


Рис. 7.3. Зависимость внутреннего магнитного поля от внешнего магнитного поля для сверхпроводников I и II рода

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 него при переходе в сверхпроводящее состояние во внешнем магнитном поле — так называемый эффект Мейснера. Следствием эффекта Мейснера 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. 7.3). 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 незагущающийся сверхпроводящий ток 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

$$\Phi = hc/(2e) = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб.}$$

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 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, который имеет 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 критических 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 петлю гистерезиса.

Известно более 1 000 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 гелиевых 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 однотипными 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 со структурой типа A15, B 1, C15, C14, фазы Шевреля.

Таблица 7.9. Критические характеристики некоторых соединений со структурой типа A15 [15]

Соединение	t_c , °C	B_{c2} , Тл	Соединение	t_c , °C	B_{c2} , Тл
Ta ₃ Sn	-265	7,24 (-277 °C)	Nb ₃ Sn	-255	23,5 (-269 °C)
Nb ₃ Ge	-250	34,0 (-277 °C)	Nb ₃ Au	-261	23,5 (-273 °C)
Nb ₃ Ga	-252	33,6 (-277 °C)	V ₃ Si	-256	22,8 (-269 °C)
Nb ₃ Al	-254	29,5 (-277 °C)	V ₃ Ga	-256	21,0 (-269 °C)

В табл. 7.9 приведены критические характеристики некоторых сверхпроводящих интерметаллических соединений со структурой типа A15. В этом классе материалов находятся все сверхпроводники с рекордным значением t_c . В соединениях со структурой 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 B1(NaCl) 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. Наивысшие значения t_c у карбидов и нитридов VA и VIA подгрупп. Как правило, эти соединения гомогенны в широких областях концентрации, причем максимальное значение t_c соответствует стехиометрическому составу, при отклонении от которого наблюдается резкое падение t_c . Из тройных соединений этого класса наибольший интерес вызывают карбонитриды ниобия NbN_xC_{1-x}. Максимальные значения характеристик соответствуют 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 со структурой типа В1 приведены в табл. 7.10.

Таблица 7.10. Критические характеристики некоторых соединений со структурой типа В1 [40]

Соединение	$t_c, ^\circ\text{C}$	$B_{c2}, \text{Тл}$	Соединение	$t_c, ^\circ\text{C}$	$B_{c2}, \text{Тл}$
MoC	-259	5,2 (-269 °C)	ZrN	-262	0,3 (-273 °C)
NbC	-261	2,0 (-269 °C)	HfN	-264	-
TaC	-263	0,46 (-272 °C)	TaN	-264	-
TiC	-270	-	VN	-264	-
$\delta\text{-NbN}$	-256	25,0 (-272 °C)	UN	-267	-

Соединения типа фаз Лавеса состава AB_2 с плотноупакованной кубической структурой типа C15 (MgCu_2) и гексагональной структурой типа C14 (MgZn_2) различаются разной последовательностью чередования одинаковых слоев атомов компонентов A и B . 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 ниобия) 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. 7.11.

Таблица 7.11. Температура перехода фаз Лавеса в сверхпроводящее состояние [15]

Соединение	$t_c, ^\circ\text{C}$	Соединение	$t_c, ^\circ\text{C}$	Соединение	$t_c, ^\circ\text{C}$	Соединение	$t_c, ^\circ\text{C}$
	<i>Tun C15</i>		<i>Tun C15</i>		<i>Tun C14</i>		<i>Tun C14</i>
Hf(V, Nb) ₂	-263	CaIr ₂	-267	TaJ ₂	-263	ThRe ₂	-268
HfV ₂	-264	LaRu ₂	-267	ZrTc ₂	-265	YOs 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

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 PbMo_6S_8 была установлена критическая температура $-258\text{ }^\circ\text{C}$ и рекордное значение критического поля $B_{c2} = 60$ Тл. Из соединения PbMo_6S_6 можно делать как пленки, так и проволоку.

Перспективными материалами являются сверхпроводящие металлические стекла, которые получают быстрой закалкой из жидкого состояния. Эти материалы обладают высокой прочностью и определенной степенью деформируемости. Максимальная $t_c = -269\text{ }^\circ\text{C}$ получена для металлических стекол состава $(\text{Mo}_{0,8}\text{Re}_{0,2})_{80}\text{P}_{10}\text{B}_{10}$.

Крупномасштабное применение сверхпроводимости связано с уменьшением массы и размеров 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, линии электропередач постоянного и переменного тока, высокоскоростные поезда, обогащение руд – далеко не полный перечень областей возможного использования сверхпроводящих материалов.

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 проводок; вихревые потери в жиле, вызванные индуцированными токами между проволоками и др. Энергетические потери приводят к тепловыделениям в сверхпроводнике, и, если температура поднимается выше критической, в сверхпроводнике возникает 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 изготавливают с охлаждающими каналами, обеспечивающими отвод теплоты от проводов через металл-проводник.

Таблица 7.12. Сверхпроводящий скрученный многожильный провод из сплава НТ-50 [15]

Тип провода	Диаметр		Число жил	Кэффициент заполнения, %	I_c, A	$j_c \cdot 10^{-9}, A/m^2$	Шаг скрутки, мм
	провода, мм	жилы, мкм					
ПНТ-0,5-37, ПНТ-0,7-37 и т. п.	0,5; 0,7; 0,85; 1,0; 1,2; 1,5	40–200	35; 55; 61	30–50	60–1300	(1,1–1,5)	25
ПНТ-0,5-24, ПНТ-0,7-24 и т. п.	0,5; 0,7; 0,85; 1,0; 1,2; 1,5	30–160	24; 37; 48; 55; 61	30–50	60–1300	(1,1–1,5)	25
ПНТ-0,45-121	0,45	30	121	50	90–130	(1,1–1,6)	10
ПНТ-0,45-168	0,45	25	168	40	85–110	(1,3–1,6)	10
ПНТ-0,45-199	0,45	25	199	50	100–130	(1,3–1,7)	10
ПНТ-0,5-1045	0,50	10	1045	40	90–140	(1,1–1,7)	5
ПНТ-1,0-1045	1,0	20	1045	40	360–560	(1,1–1,4)	10
ПНТ-0,85-3025	0,85	10	3025	40	250–310	(1,2–1,4)	10
ПНТ-0,33-1	0,33	240–250	1	70	80–100	(1,3–1,7)	–

Таблица 7.13. Многожильные сверхпроводящие модули и фольга на основе сплава НТ-50 [15]

Тип изделия	$a \times b, мм$	Диаметр жилы, мкм	Число жил	Шаг скрутки, мм	Кэффициент заполнения, %	$I_c, A, при B = 6 Tл, t = -269 °C$
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	$5 \cdot 10^9$ *

* Критическая плотность тока j_c без внешнего магнитного поля, A/m^2 .

В табл. 7.12 и 7.13 приведены основные характеристики типовых многожильных сверхпроводящих проводов и модулей на основе ниобий-титанового сплава НТ-50, выпускаемых серийно в промышленных условиях и изготавливаемых методом совместной деформации сверхпроводников с матрицей. Указанные многожильные провода и шины используют для изготовления большого числа сверхпроводящих магнитных систем. В табл. 7.14 приведены характеристики сверхпроводящих шин, полученных методом гальванического сращивания медью сверхпроводящих проводов, а в табл. 7.15 – различных многожильных проводов на основе Nb_3Sn и V_3Ga , полученных по бронзовой технологии.

Таблица 7.14. Сверхпроводящие электролитические шины на основе сплава HT-50 [15]

Тип шины	Размеры шины, мм		Диаметр провода, мм	Число сверхпроводников	Коэффициент заполнения, %	I_c, A , при $B = 5 Tл$, $t = -269 °C$
	ширина	толщина				
ШНТ-1,5/1,1	1,5-5,0	1,1	0,5	3-10	15-20	400-1400
ШНТ-2,1/1,3	2,1-7,0	1,3	0,7	3-10	15-20	800-2800
ШНТ-2,6/1,5	2,6-8,5	1,5	0,85	3-10	15-20	1100-4000
ШНТ-3,0/1,6	3,0-10,0	1,6	1,0	3-10	15-20	1600-5600
ШНТ-50/3	60	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

Таблица 7.15. Многожильные сверхпроводящие провода на основе интерметаллических соединений [15]

Тип провода	Сверхпроводящее вещество	Диаметр (размеры)		Число жил	I_c, A , при $B, Tл$						$j_c \cdot 10^{-9}, A/м^2$, при $B, Tл$											
		Диаметр провода, мм			жилы, мм	7,0		8,5		12		15		7,0		8,5		12		15		
		1	0,24			5	7225	550	500	240	94	0,7	0,64	0,30	0,12	0,7	0,62	0,30	0,12	0,7	0,62	0,30
ПНО-1-7225	Nb ₃ Sn	1	0,24	5	7225	550	500	240	94	0,7	0,64	0,30	0,12	0,7	0,62	0,30	0,12	0,7	0,62	0,30	0,12	
ПВГ-0,24-361	V ₃ Ga	0,24	0,47	5	361	-	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПВГ-0,47-361	V ₃ Ga	0,47	0,16 × 1,93	10	361	-	107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПНО-0,16/1,93-6859	Nb ₃ Sn	0,16 × 1,93	0,7	0,7	6859	2	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПНО 1-575	Nb ₃ Sn	1,0	1,0	-	575	1340	950	340	90	1,7	1,22	0,43	0,115	1,7	1,22	0,43	0,115	1,7	1,22	0,43	0,115	
ПНО-1-650	Nb ₃ Sn	1,0	3,5 × 3,5	22	650	750	550	200	73	0,95	0,70	0,25	0,093	0,95	0,70	0,25	0,093	0,95	0,70	0,25	0,093	
ШНО-3,5/3,5	Nb ₃ Sn	3,5 × 3,5	30 × 3	5	7225 × 3	1650	-	720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ШНО-30/3	Nb ₃ Sn	30 × 3	30 × 3	5	7225 × 25	12000	-	6000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

7.3. Резистивные материалы

Материалом высокого электрического сопротивления (резистивным) называют проводниковый материал с удельным электрическим сопротивлением при нормальных условиях не менее $0,3 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

По области применения резистивные материалы разделяют на три основные группы: 1) материалы для резисторов (медные, медно-никелевые, никелевые, никель-хромовые; пленочные, проволочные, углеродистые), 2) материалы для термоэлектродов термопар и удлиняющих проводов (сплавы на основе Ni, Pt систем, Cu-Ni, Pt - Rh, W-Re; неметаллические порошковые материалы) и 3) материалы для нагревателей (сплавы на основе систем 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 α_p , 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 проволочных, 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 реостаты, нагрузочные элементы), для прецизионных резисторов (образцовые сопротивления, различные элементы электроизмерительных приборов, катушки сопротивления, шунты, обмотки потенциометров).

Сплавы для проволочных резисторов. Для технических резисторов основными являются сплавы на основе системы Cu-Ni (сплав МН16, мельхиор МН19, нейзильбер МНЦ 15-20); для прецизионных резисторов – сплавы на медной основе (манганин МНМц 3-12, МНМцАЖ 3-12-0,3-0,3, константан МНМц 40-1,5) и сплавы на никелевой основе (Х20Н80-ВИ, 80ХЮД-ВИ, Х15Н60, ЭП277-ВИ). Для изготовления высокоточных прецизионных сопротивлений используют резистивные сплавы на основе благородных металлов (Au, Ag, Pt, Pd), составы и свойства которых приведены в [13].

Промышленность изготавливает резистивную стандартную проволоку: холоднодеформированную из сплава нейзильбер МНЦ 15-20 диаметром 0,10–5,0 мм в мягком, полутвердом и твердом состоянии; из сплава манганин МНМц 3-12 в твердом состоянии диаметром 0,020–6,0 мм и 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); холодноотянутую константановую неизолированную проволоку из сплава МНМц 40-1,5 диаметром 0,020–0,09 мм в твердом состоянии и диаметром 0,09–5,00 в мягком состоянии для работы при температуре не выше 500 °С. Свойства резистивной проволоки из медно-никелевых сплавов приведены в табл. 7.16, а сплавов на никелевой основе – в табл. 7.17.

Таблица 7.16. Свойства проволоки из медно-никелевых сплавов

Марка сплава	Состояние материала	Диаметр проволоки, мм	δ , %	σ_b , МПа, не менее	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м
Нейзильбер МНЦ 15-20	Мягкое	0,1–0,2	15	343	–
		0,25–0,5	20	343	–
		0,6–1,0	25	343	–
		1,1–5,0	30	343	–
	Полутвердое	0,6–1,0	3	441	–
		1,1–5,0	5	441	–
	Твердое	0,1–0,5	–	686–1078	–
		0,6–1,0	–	686–1078	–
1,1–2,0		–	686–1078	–	
2,2–5,0		–	539	–	
Константан МНМц 40-1,5	Мягкое	0,1–0,45	15	450–650	0,465
		0,5–5,0	20	450–650	0,465
	Твердое	0,02–5,0	–	650	0,490
Манганин МНМц 3-12	Мягкое	0,05–0,09	≥ 10	–	0,480
	Твердое	0,02–0,04	–	–	0,480
		0,05–6,0	≤ 9	–	0,480
МНМцАЖ 3-12-0,3-0,3	Мягкое	0,1–6,0	≥ 15	–	0,470

Таблица 7.17. Свойства сплавов на никелевой основе для резисторов и тензорезисторов (ГОСТ 8803–89) [31]

Сплав	$\rho \cdot 10^6$, 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, Х20Н80-ВИ	0,98–1,10	–	–	12–20	–
Н63ГХ + Ga	1,70–1,80	15	1100–1300	10–12	+20... 150
НМ10ХС	1,50–1,60	14	–	–	–196... 200
Х20Н75Ю-ВИ	1,30–1,40	14	850–950	10–18	–70... 300
НМ23ХЮ-ИЛ	1,50–1,60	12	> 1200	> 18	–196... 430
НМ20ЮФ + Ge	1,70–1,80	12	> 1300	8–15	–269... 430
Х20Н73ЮМ-ВИ	1,40–1,50	14	900–1000	10–18	–196... 430
НМ10ХЮ + Ge	1,60–1,65	12,5	1100–1250	> 18	–196... 400
НМ23ЮФ-ВИ	1,50–1,60	12	> 1300	8–15	–196... 430
Х21Ю5ФМ-ВИ	1,40–1,50	14	> 800	8–12	–196... 480

Для малогабаритных резистивных элементов в приборах используют промышленную стандартную проволоку (наитончайшую диаметром 0,009–0,09 мм и тончайшую диаметром 0,09–0,4 мм) из прецизионных никельхромовых сплавов Х20Н80-ВИ, Н80ХЮД-ВИ, Х20Н80, ЭП277-ВИ. Проволоку поставляют в отожженном состоянии.

Непроволочные резистивные материалы подразделяют на пленочные металлические и пленочные на основе оксидов, силицидов, карбидов, а также 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. 7.18 и 7.19.

Таблица 7.18. Свойства пленочных резистивных материалов [13]

Материал пленки	$\rho_n, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\alpha_{\rho_n} \cdot 10^4, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$N_{\text{доп}} \cdot 10^4, \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$	$\Delta\rho_n/\rho_n, \text{ \%}$, за 100 ч
<i>Металлические пленки</i>				
Хром	200–500	0,6...1,8	2	1,6–3,2
X20N80	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
<i>Металлооксидные пленки</i>				
Оксид олова	400–1000	± 5	–	≤ 2
<i>Пленки сплавов, содержащих кремний</i>				
PC3001	800–3000	≤ 1	2–5	≤ 1
МЛТ-3М	100–20000	$\pm (1,2...2,4)$	1	$\pm 0,5$

*¹ Удельное поверхностное сопротивление. *² Допустимая мощность рассеяния.

Таблица 7.19. Свойства графита и пиролитического углерода [7]

Материал	$\rho \cdot 10^6, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\gamma, \text{ т/м}^3$	$\alpha_p \cdot 10^4$	$\alpha \cdot 10^6$
			$^\circ\text{C}^{-1}$	
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

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 металлические элементы электрических нагревателей изготавливают из железохромалюминиевых и никельхромовых прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением марок X15Ю, X23Ю5Т, X23Ю5, X27Ю5Т, X15Н60, X15Н60-Н, X23Н80-Н и ХН70Ю. Механические и физические свойства, живучесть

и максимальная рабочая температура сплавов для нагревательных элементов приведены в табл. 7.20–7.23 соответственно.

Таблица 7.20. Механические свойства прецизионных сплавов в зависимости от температуры испытания (ГОСТ 12766.1–90)

Марка сплава	Режим закалки	$t_{исп}, ^\circ\text{C}$	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
X70Ю	1000 °С, 20 мин, вода	10	813	–	37,5	–
		800	392	–	14,0	–
		1200	32,4	–	143,0	–

Таблица 7.21. Физические свойства прецизионных сплавов (ГОСТ 12766.1–90)

Марка сплава	$\gamma, \text{т/м}^3$	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$
<i>Магнитные сплавы</i>				
X15Ю5	7,26	1500	16	16,8
X23Ю5	7,25	1500	15	16,8
X23Ю5Т	7,21	1500	15	16,8
X27Ю5Т	7,19	1510	15	16,8
<i>Немагнитные сплавы</i>				
X15Н60	8,2	1390	17	12,6
X20Н80-Н	8,4	1400	18	16,8

Примечание. Магнитные сплавы имеют ферритную структуру, немагнитные – аустенитную.

Живучесть прецизионных сплавов с заданным электрическим сопротивлением для электронагревательных элементов определяют на проволочных образцах диаметром 0,8 мм в условиях частых переменных нагревов до заданной температуры и охлаждений до потемнения поверхности. Живучесть характеризуется временем до перегорания образцов и отражает жаростойкость материала в условиях частых теплосмен.

**Таблица 7.22. Свойства проволоки из прецизионных сплавов
(ГОСТ 12766.1–90 – ГОСТ 12766.5–90)**

Марка сплава	$t_{исп}$, °С	Живучесть, ч, не менее		$\rho \cdot 10^6$, Ом·м	δ %, не менее
		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
XН70Ю	1200	80	100	1,25–1,35	15

* Для проволочных резисторов диаметром более 6 мм.

**Таблица 7.23. Максимальные рабочие температуры нагревательных
элементов, работающих на воздухе (ГОСТ 12766.1–77), °С**

Марка сплава	Диаметр или толщина, мм				
	0,2	0,4	1,0	3,0	≥ 6,0
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	950	1000	1100	1175	1200

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 теплотянутые профили диаметром 8–10 мм; сортовой горячекатаный прокат круглого сечения диаметром 6–30 мм и теплокатаный прокат квадратного сечения; плющеную ленту толщиной 0,1–1,0 мм и шириной 0,5–5,0 мм. Проволоку и ленту поставляют в мягком термически обработанном состоянии.

Серийно выпускают нагреватели из керамических материалов для печей сопротивления (из карбида кремния и дисилицида молибдена с рабочей температурой до 1500 °С и до 1700 °С соответственно). Преимущественное применение находят 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. 7.24.

Таблица 7.24. Предельные рабочие температуры керамических нагревателей [29]

Газовая среда	Предельная рабочая температура, °С, для нагревателей из		Газовая среда	Предельная рабочая температура, °С, для нагревателей из	
	SiC	MoSi ₂		SiC	MoSi ₂
Инертные газы (He, Ar, Ne и др.)	1500	1650	Сухой водород	1250	1350
Азот	1470	1500	Влажный водород с точкой росы, °С:		
Кислород	1400	1700	10	1300	1400
Углекислый газ	1450	1700	20	–	1500
Оксид азота	–	1650	35	–	1600
Диоксид азота	–	1700	Вакуум:		
Сернистый ангидрид	–	1600	13,3 · 10 ⁻² Па	1200	–
Оксид углерода	1300	1500	6,65 · 10 ⁻² Па	1100	–

Нагреватели из карбида кремния изготавливают следующих типов: сплошные с размерами $d = 12 \dots 32$ мм, $L_{\text{раб}} = 190 \dots 560$ мм и трубчатые с $d = 8 \dots 30$ мм и $L_{\text{раб}} = 200 \dots 1200$ мм. Нагреватели из дисилицида молибдена изготавливают U-образной формы из-за повышенной ползучести при рабочих температурах; в печи их размещают вертикально. Предназначены они для работы в окислительной среде благодаря высокой жаростойкости, которая обеспечивается образованием при нагреве на поверхности непрерывной стекловидной пленки SiO₂. При недостаточном содержании кислорода в рабочей среде защитный слой разрушается. Нагреватели из карбида кремния неработоспособны в среде водорода в связи с образованием летучих силанов. Эксплуатировать нагреватели рекомендуется непрерывно с целью повышения их долговечности. Частые охлаждения способствуют изменению при нагреве объема диоксида кремния, находящегося в порах, что приводит 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 всех металлических термопар, за исключением имеющих в составе термоэлектродов молибден и вольфрам, которые образуют при нагреве летучие оксиды, рекомендуемой рабочей атмосферой является окислительная. Термопары, приведенные в табл. 7.25, можно использовать в инертной атмосфере и в вакууме. Последние вместе с восстановительной атмосферой являются рекомендуемой средой эксплуатации термопар, содержащих в составе термоэлектродов молибден и вольфрам.

Таблица 7.25. Диапазон рабочих температур проволочных термопреобразователей (ГОСТ 3044–84)

Тип термопреобразователя	Термопара (марка сплава)	Диапазон измеряемой температуры при длительном применении, °С	Предельная температура при кратковременном применении, °С
ТМК	Медь–копель (М1–МНМц 43-0,5)	–200... +100	100
ТХК	Хромель–копель (НХ9,5–МНМц 43-0,5)	–200... +600	800
ТХА	Хромель–аломель (НХ9,5–НМцАК 2-2-1)	–200... +1000	1300
ТПП	Платинородий–платина ПР10–ПР0	0... 1300	1600
ТПР	Платинородий–платинородий ПР30–ПР6	300... 1600	1800
ТВР	Вольфрам–рений ВР5–ВР20	0... 2000	2500

Примечание. В обозначении термопары первым указывается положительный термоэлектрод. Указанный ГОСТ нормирует изготовление проволоки соответствующих термоэлектродов.

Рабочие температуры термопреобразователей представлены в табл. 7.25.

Проволоку для термоэлектродов термопар из сплавов хромель Т марки НХ 9,5, алломель марки НМцАК 2-2-1, копель марки МНМц 43-0,5 изготавливают диаметром 0,2–5,0 мм с механическими свойствами, приведенными в табл. 7.26. Проволоку для термоэлектродов термопар ПР 10/0, ПР30/6 изготавливают 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 43-0,5 для низкотемпературных термопар (от –200 до 100 °С) изготавливают диаметром 0,2–0,5 мм и поставляют в отожженном (мягком) состоянии со свойствами, указанными в табл. 7.27. Электрическое сопротивление проволоки из сплава копель составляет $0,47 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Таблица 7.26. Механические свойства проволоки для термоэлектродов термопар при 20 °С [37]

Материал	Диаметр проволоки, мм	σ_b , МПа,	δ , %
		не менее	
Хромель Т	0,2; 0,3	490	15
	0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5,0	490	20
Алломель	0,2; 0,3	441	20
	0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5,0	441	25
Копель	0,2; 0,3	392	15
	0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5,0	392	20
Медь	0,2; 0,3; 0,4; 0,5	200	20

Термопреобразователи с металлическими термопарами типов ТВР, ТПР, ТПП, ТХА, ТХК (по материалу термоэлектродов термопар) используют для получения информации о температуре в диапазоне –200...2500 °С. 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.

Таблица 7.27. Механические свойства проволоки для термоэлектродов термопар при низких температурах [37]

Материал	t, °C	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
Медь	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

Диапазоны измеряемых температур соответствуют указанным в табл. 7.25. У всех термопреобразователей маркируют положительный термоэлектрод.

Кабельные термоэлектрические преобразователи с хромель-алюмелевыми термоэлектродами типа КТХАС (в стальной оболочке) или типа КТХАСп (в оболочке из жаропрочного сплава) используют для измерения температур от -50 до 1300 °C, а с хромель-копелевыми термоэлектродами типа КТХКС – для измерения температур от -50 до 800 °C в газообразных, жидких и твердых средах, не агрессивных к материалу (коррозионно-стойкие стали или сплавы) оболочек термопреобразователя. Кабельные термопреобразователи предназначены для работы в вакууме, при нормальном и избыточном давлении измеряемой среды до 40 МПа. Термоэлектроды изолированы между собой и от оболочки минеральной изоляцией. У всех кабельных термопреобразователей вывод положительного термоэлектрода закрасен красной нитроэмалью.

Для измерения низких температур в диапазоне -259,34...0 °C используют платиновые образцовые термометры сопротивления с чувствительным элементом из платины марки Пл0.

Температуру в окислительных средах до 2200 °C измеряют с помощью термопар с термоэлектродами из иридия и его сплавов: ИР40/0, ИР50/0, ИР60/0 [37].

Для удлиняющих проводов термопар используют проволоку диаметром 0,2–2,5 мм из никелевых и медно-никелевых сплавов: хромель К, копель, константан и сплава ТП.

Проволоку поставляют в мягком (отожженном) состоянии с окисленной поверхностью. Основные свойства проволоки для удлиняющих проводов приведены в табл. 7.28.

Таблица 7.28. Свойства проволоки для удлиняющих проводов термопар (ГОСТ 1 791–67)

Сплав	ТермоЭДС в паре с медью при температуре свободного конца проволоки 0 °С и рабочего конца 100 °С, мВ	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м, при 20 °С	Диаметр проволоки, мм	σ_a , МПа	δ , %
				не менее	
Хромель К	+2,09	0,67 ± 0,05	0,2; 0,3	490	15
	+2,09	0,67 ± 0,05	0,4–2,5	490	20
Копель	–4,77	0,47 ± 0,02	0,2; 0,3	390	15
	–4,77	0,47 ± 0,02	0,4–2,5	390	20
Константан	–4,10	0,465 ± 0,015	0,2–0,3	390	10
	–4,10	0,465 ± 0,015	0,4–2,5	390	15
Сплав ТП	–0,64	0,025 ± 0,003	0,20–0,67	200	20
	–0,64	0,025 ± 0,003	0,70–2,50	200	25

Неметаллические высокотемпературные термопары с электродом из тугоплавких соединений широкого распространения не получили, так как требуется градуировка для каждой термопары.

7.4. 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. Полупроводниковый материал предназначен для использования его полупроводниковых свойств (ГОСТ 22622–77). Полупроводники бывают простые и сложные. Полупроводник будет простым, если его основной состав образован атомами одного химического элемента, и сложным, если атомами двух или большего числа химических элементов.

В полупроводниках носителями заряда, обуславливающими электрическую проводимость, являются дырки проводимости и электроны. Полупроводник, не содержащий примесей, влияющих на его электропроводность, называется собственным. Электропроводность собственно полупроводника в равновесном состоянии обусловлена как дырками, так и электронами проводимости, причем их концентрации равны. У примесного полупроводника электропроводность определяется в основном примесями, у дырочного – в основном перемещением дырок проводимости, а у электронного – в основном электронами проводимости.

Электрическая проводимость полупроводников увеличивается с повышением температуры и определяется соотношением

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[-\frac{\Delta E}{2kT} \right],$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Известно около 1 000 простых и сложных полупроводников. Многие из них используют для изготовления различных электронных приборов и микросхем, генераторов СВЧ, 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. Свойства полупроводниковых приборов определяются свойствами исходных материалов. Для полупроводниковых материалов, выпускаемых промышленностью, применяют показатели качества, установленные ГОСТ 4.64–80.

Простые полупроводники. Из простых полупроводников наибольшее применение нашли кремний и германий. Некоторые физико-химические свойства германия и кремния приведены в табл. 7.31.

Таблица 7.29. Физико-химические свойства кремния и германия [15, 28, 38]

Свойство	Si	Ge
Относительная атомная масса	28,0855	72,60
Постоянная решетки при 25 °С, нм	$0,543072 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$0,565754 \pm 1 \cdot 10^{-6}$
Плотность при 25 °С, т/м ³	2,32902	5,32674
Твердость HV0,1	104	76
Температура, °С:		
плавления	1415±3	937,2
кипения	2600	2700
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	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 °С	266	80
при 27 °С	416	133
Молярная теплота плавления, кДж/моль	49,9±0,8	37,1±0,2
Поверхностное натяжение, 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	$9,15 \cdot 10^3$	$5,4 \cdot 10^3$
Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м	$2,3 \cdot 10^3$	0,68
Концентрация собственных носителей заряда при 20 °С, м ⁻³	$3 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{19}$

Свойство	Si	Ge
Ширина запрещенной зоны, эВ:		
при -213°C	1,21	0,78
при 25°C	1,12	0,75
Подвижность при 27°C , $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$:		
электронов	$(1350 \pm 100) \cdot 10^{-4}$	$3800 \cdot 10^{-4}$
дырок	$(480 \pm 15) \cdot 10^{-4}$	$1800 \cdot 10^{-4}$
Эффективная масса дырок:		
тяжелых	$0,5m_0$	$0,379m_0$
легких	$0,16m_0$	$0,042m_0$
Диэлектрическая проницаемость статическая	12,5	16
Магнитная восприимчивость	$-0,13 \cdot 10^{-4}$	$-0,12 \cdot 10^{-6}$

* Для Si в направлении [111], для Ge – в [110].

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) с ориентацией продольной оси монокристаллического слитка [111], [100] или [013] диаметром $42_{-2}^{+3} \dots 102,5_{-2}^{+3}$ мм и базовой длиной 60–150 мм или бестигельной зонной плавкой (БК) с ориентацией [111] диаметром 23–46 мм и длиной 40–70 мм. Отклонение α плоскости торцового среза слитка кремния от плоскости ориентации не должно превышать 3° . Концентрация атомов оптически активного кислорода должна быть $N_{\text{O}_2} \leq 1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ в слитках кремния, полученных бестигельной зонной плавкой, и $\leq 7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ в слитках, полученных методом Чохральского.

Слитки монокристаллического кремния, легированные бором (Б) или алюминием (А), изготавливают дырочного (Д) типа электрической проводимости, а 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 – группа и подгруппа марки; кц – индексы дополнительных требований; КДБ – монокристаллический слиток кремния, выращенный по методу Чохральского, дырочного типа электрической проводимости, легированный бором; 7,5 – номинальное значение удельного электрического сопротивления, Ом·см; 2,5 – время жизни неравновесных носителей заряда, мкс; 76 – диаметр, мм.

В табл. 7.30, 7.31 приведены некоторые электрофизические параметры слитков монокристаллического кремния.

Таблица 7.30. Основные электрофизические параметры слитков монокристаллического кремния, полученных методом Чохральского

Группа марки	Подгруппа марки	$\rho_n^* \cdot 10^2, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Тип проводимости	Легирующий элемент
1А	1-3	1-15	Э, Д	Ф, Б
2А	1-3	15-45	Э, Д	Ф, Д
3А	1-3	0,005-1	Э, Д	Ф, Б
3А	4-5	0,002-0,006	Э	М
3Б	1-3	0,003-0,1	Э	С, М

* Номинальное значение ρ .

Таблица 7.31. Основные электрофизические параметры слитков монокристаллического кремния, полученного бестигельной зонной плавкой

Группа марки	Подгруппа марки	$\rho_n \cdot 10^2, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Тип проводимости	Легирующий элемент	$\rho_{\text{дис}}^* \cdot 10^{-8}, \text{ м}^{-2}$, не более
1А	1-3	1-15	Э	Ф	0,2-5
1Б	1-2	1-15	Э	Ф	1
2А	1-3	15-45	Э	Ф	1
2В	1	40-75	Э	Ф	1
2Г	1-2	50-140	Э	Ф	1
2Д	1	100-250	Э	Ф	1
2Е	1-4	500-2000 и выше	Д	Б	5
2Ж	1	1,5-3,5	Д	Б	5
3А	1-4	0,012-1	Э	Ф	2-5
4А	1-2	0,02-0,2	Д	А	-
5А	1	3-18	Э	Ф	0,2-5

* Здесь и далее плотность дислокаций.

В зависимости от группы и подгруппы марки техническими условиями допускается отклонение средних значений удельного электрического сопротивления торцов от номинального значения $\delta\rho_n = 15 \dots 35 \%$, радиальное относительное отклонение удельного электрического сопротивления от среднего значения по торцу слитка $\delta\rho_R = 10 \dots 20 \%$ и относительное отклонение средних значений удельного электрического сопротивления по длине слитка $\delta\rho_l = 20 \dots 35 \%$.

Кремний монокристаллический, полученный методом бестигельной плавки (ТУ 48-4-466-85), предназначен для производства полупроводниковых приборов (ПЭС, БИС, СБИС). Слитки монокристаллического кремния, легированные фосфором, изготовляют электронного (Э), а легированного бором – дырочного (Д) типа проводимости. Монокристаллические слитки не должны иметь дислокаций и свирлевых дефектов. Концентрация атомов оптически активного кислорода N_{O} должна быть не более $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, а оптически активного углерода N_{C} – не более $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Слитки имеют диаметр $78 \pm 2 \text{ мм}$ и длину не менее 80 мм. Удельное электрическое сопротивление монокристаллического

кремния различных марок и ориентация продольной оси монокристаллического слитка приведены в табл. 7.32. Допустимое относительное отклонение $\delta\rho_n$ составляет 20 % для марок КВЭ и 25 % для марок КВД, а $\delta\rho_R = 10\%$.

Таблица 7.32. Удельное электрическое сопротивление и ориентация продольной оси монокристаллического слитка для различных марок кремния

Марка кремния	$\rho_n \cdot 10^2, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Ориентация	Марка кремния	$\rho_n \cdot 10^2, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Ориентация
КВЭ1	1–50	[111]	КВД1	1–50	[111]
КВЭ2	1–50	[100]	КВД2	1–50	[100]
КВЭ3	50–150	[111]	КВД3	50–150	[111]
КВЭ4	50–150	[100]	КВД4	50–150	[100]

Время жизни неравновесных носителей заряда зависит от ρ_n слитка и для электронного типа проводимости составляет, мкс: $\geq 400\rho_n$ при $\rho_n = 0,01 \dots 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\geq 200\rho_n$ при $\rho_n \geq 0,5 \dots 1,00 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\geq 150\rho_n$ при $\rho_n \geq 1,00 \dots 1,50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а для дырочного типа проводимости $\geq 400\rho_n$, $\geq 0,4 \dots 1,50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\geq 200\rho_n$ при $\rho_n \geq 0,4 \dots 1,50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Монокристаллический кремний в слитках (ГОСТ 19658–81), предназначенный для пластин-подложек эпитаксиальных структур и структур металл – диэлектрик – полупроводник и легированный бором (марки ЭКДБ), изготавливают дырочного типа проводимости, а легированный фосфором (марки ЭКЭФ) или сурьмой (марки ЭКЭС) – электронного типа проводимости с $\rho_{\text{дис}} \leq 10^5 \text{ м}^{-2}$. Продольная ось монокристаллического слитка кремния имеет ориентацию [111] или [100]. Отклонение плоскости торцового среза монокристаллических слитков от плоскости ориентации не должно превышать $\alpha = 3^\circ$. Номинальные диаметры слитков $62,5_{-2}^{+3}$, $78,5_{-2}^{+3}$ и $102,5_{-2}^{+3}$ мм. В слитках кремния диаметром 62,5 и 78,5 мм $N_{\text{O}_2} \leq 7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, а в слитках диаметром 102,5 мм – $N_{\text{O}_2} \leq 1 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Слитки кремния с $\rho_n > 0,03 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ должны иметь время жизни неравновесных носителей заряда $\geq 7,5$ мкс – для электронного и $\geq 2,5$ мкс – для дырочного типа проводимости. Десять групп марок слитков монокристаллического кремния характеризуются $\rho_n = 0,00005 \dots 0,4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\delta\rho_n = 20 \dots 40\%$ и $\delta\rho_R = 10 \dots 20\%$.

Монокристаллический кремний, предназначенный для производства полупроводниковых источников тока (ТУ 48-4-258–80), изготавливают в виде монокристаллических слитков, выращенных по методу Чохральского, диаметром 40–55 мм и длиной не менее 50 мм. Продольная ось монокристаллического слитка имеет ориентацию [111] или по согласованию с потребителем [100]; плотность дислокаций для всех марок не должна превышать $5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$.

Кремний марок КСД –солнечный дырочного типа проводимости, легированный бором; $\rho = 0,003 \dots 0,03 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ либо $0,05 \dots 0,45 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Кремний марок КСЭ – солнечный электронного типа проводимости, легированный фосфором; $\rho = 0,006 \dots 0,25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Время жизни неравновесных носителей заряда зависит от удельного электрического сопротивления слитка.

Монокристаллический кремний, полученный бестигельной зонной плавкой, легированный фосфором в процессе нейтронной активации, предназначенный для производства

силовых полупроводниковых приборов, выпускают либо марок БО – бестигельный однороднолегированный (ТУ 48-4-449–83), либо марок КОФ – однородный, легированный фосфором [15].

Слитки монокристаллического кремния марок БО имеют диаметр $54 \pm 0,05$ мм, длину не менее 100 мм; ориентацию продольной оси монокристаллического слитка [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 2° ; электронный тип проводимости; значения $\rho_n = 1,3 \dots 1,5$ Ом·м; время жизни неравновесных носителей заряда не менее 70 мкс; плотность дислокаций не более 10^5 м⁻². В них отсутствуют свирлевые дефекты; концентрация атомов оптически активного кислорода $N_{O_2} \leq 1 \cdot 10^{22}$ м⁻³, а оптически активного углерода $N_C \leq 4 \cdot 10^{22}$ м⁻³.

Слитки монокристаллического кремния марок КОФ имеют диаметр 44, 54, 60 или 84 мм с погрешностью ± 1 мм; ориентация оси слитка [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° ; два интервала значений ρ_n , Ом·м: 0,4–2,0 и 2,1–3,5; время жизни неравновесных носителей заряда не менее 0,35–1,0 мкс при $\rho_n = 0,7 \dots 2,0$ Ом·м, не менее 30 мкс при $\rho_n = 0,4 \dots 0,6$ Ом·м и не менее 100 мкс при $\rho_n = 2,1 \dots 3,5$ Ом·м; плотность дислокаций $\rho_{дис} \leq 10^5$ м⁻². Концентрация оптически активных кислорода и углерода у них не должна превышать $5 \cdot 10^{22}$ м⁻³, а допустимые относительные отклонения $\delta\rho_n$ и $\delta\rho_R$ – соответственно 12 и 7 % для слитков с $\rho_n = 0,40 \dots 2,00$ Ом·м и 15 и 10 % для слитков с $\rho_n = 2,10 \dots 3,50$ Ом·м.

Монокристаллический кремний для фотоприемников [15] получают методом бестигельной зонной плавки (марки КБ) и методом Чохральского (марки КЧ), дырочного (легирование бором) и электронного (легирование фосфором) типа проводимости. Диффузионная длина неравновесных носителей заряда

$$L = 10^{-2} \sqrt{D\tau},$$

где D – коэффициент диффузии, равный 35,36 см²/с для кремния дырочного типа проводимости и 13 см²/с для кремния электронного типа проводимости; τ – время жизни, с.

Концентрация оптически активного кислорода должна быть не более $1 \cdot 10^{23}$ м⁻³ для марок КБ и $7 \cdot 10^{23}$ м⁻³ для марок КЧ. Некоторые электрофизические свойства кремния, предназначенного для фотоприемников, приведены в табл. 7.33. Кроме приведенных величин, слитки кремния различаются геометрическими размерами.

Таблица 7.33. Некоторые электрофизические свойства кремния, предназначенного для фотоприемников

Марка кремния	$\rho_n \cdot 10^2$, Ом·м	$\rho_{дис} \cdot 10^{-5}$, м ⁻² , не более	L , мм, не менее
КБ1	80–140	1	0,3
КБ2	80–140	10–5000	0,3
КБ3	100–250	1	0,3
КБ4	100–250	1	0,3
КБ5	20	1	0,3
КБ6	20	1	0,3

Марка кремния	$\rho_n \cdot 10^2, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$\rho_{\text{дис}} \cdot 10^{-5}, \text{ м}^{-2}$, не более	$L, \text{ мм}$, не менее
КБ7	≥ 2000	5000	0,3
КБ8	5–50	1	0,16
КБ9	50–100	1	0,25
КБ10	100–200	1	0,35
КБ11	200–400	1	0,35
КБ12	400–600	1	0,35
КЧ1	40	1	0,3
КЧ2	7,5	100–2000	0,5

Примечание. Кремний марки К41 имеет дырочный тип электрической проводимости, остальные – электронный.

Монокристаллический кремний, полученный методом бестигельной зонной плавки из поликристаллического кремния водородного восстановления и предназначенный для производства полупроводниковых приборов, выпускают марок КВД (кремний водородный дырочного типа проводимости) [15]. Слитки монокристаллического кремния марок КВД имеют диаметр 18–23 мм, длину не менее 30 мм; ориентацию продольной оси монокристаллического слитка [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° ; плотность дислокаций $\rho_{\text{дис}} \leq 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$; концентрацию атомов оптически активного кислорода $N_{\text{O}_2} \leq 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Монокристаллический моносилановый кремний [15] используют для производства рiп-диодов и магнитодетекторов. Изготавливают его методом бестигельной зонной плавки в вакууме или газовой среде электронного или дырочного типа проводимости. Удельное электрическое сопротивление марок кремния дырочного типа (КМД) и электронного (КМЭ) типа проводимости приведено ниже:

Марка	КМД-1	КМД-2	КМД-3	КМД-4	КМД-5
$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{м}$, не менее	10	20	30	40	50
Марка	КМД-6	КМД-10	КМД-20	КМЭ-1	
$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{м}$, не менее	60	100	200	10	

Слитки кремния имеют допустимое относительное отклонение $\delta \rho_l \leq 35\%$; время жизни неравновесных носителей заряда не более 500 мкс; ориентацию продольной оси монокристаллического слитка [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° ; плотность дислокаций $\rho_{\text{дис}} \leq 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$; концентрацию атомов оптически активного кислорода $N_{\text{O}_2} \leq 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Поликристаллический зонноочищенный германий (ГОСТ 16153–80) марок ГПЗ 1 и ГПЗ 2 предназначен для изготовления легированных монокристаллов германия, получения сплавов, производства заготовок оптических деталей, а также для других целей.

Монокристаллы германия, используемые для производства полупроводниковых приборов, согласно ГОСТ 16153–80 изготавливают электронного (легирование сурьмой) и дырочного (легирование галлием) типа проводимости. Диаметр монокристаллических

слитков 28–40 мм, длина не менее 50 мм; значения $\rho_n = 0,001 \dots 0,45 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111]; предельное отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 2° .

В соответствии с ГОСТ 8032–84, значение ρ_n монокристаллического слитка выбирают из следующего ряда, Ом·м:

0,001; 0,0012; 0,0015; 0,002; 0,0025; 0,0031; 0,004; 0,005; 0,0063; 0,008; 0,01 – для $\rho_n = 0,0001 \dots 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

0,011; 0,014; 0,018; 0,022; 0,028; 0,035; 0,045; 0,056; 0,071; 0,09 – для $\rho_n = 0,01 \dots 0,10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

0,112; 0,14; 0,18; 0,224; 0,28; 0,355; 0,45 – для $\rho_n = 0,10 \dots 0,45 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Монокристаллические слитки германия по допускаемому отклонению $\delta\rho_n$ и плотности дислокаций $\rho_{\text{дис}}$ делят на три подгруппы: 1) $\delta\rho_n \leq 25\%$, $\rho_{\text{дис}} \leq 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$; 2) $\delta\rho_n \leq 20\%$, $\rho_{\text{дис}} \leq 2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$ и 3) $\delta\rho_n \leq 15\%$, $\rho_{\text{дис}} \leq 8 \cdot 10^7 \text{ м}^{-2}$.

Подвижность носителей заряда в монокристаллических слитках германия в зависимости от значения ρ_n и типа проводимости должна соответствовать нормам, указанным в табл. 7.34.

Таблица 7.34. Подвижность носителей заряда в монокристаллических слитках германия

$\rho \cdot 10^2, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Подвижность носителей заряда при $23 \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, не менее		$\rho \cdot 10^2, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Подвижность носителей заряда при $23 \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, не менее	
	электронов	дырок		электронов	дырок
0,1–0,23	0,18	0,13	2,5–5,9	0,33	0,17
0,24–0,49	0,23	0,14	6,0–15,9	0,34	0,17
0,50–0,89	0,26	0,15	16,0–45,0	0,36	0,17
0,9–2,4	0,31	0,16			

Монокристаллический германий, легированный золотом (З), сурьмой и золотом (СЗ), галлием и золотом (ГЗ), предназначенный для производства полупроводниковых приборов, поставляют в виде слитков электронного и дырочного типа проводимости. Монокристаллические слитки имеют диаметр 18–35 мм и длину > 30 мм; ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111] и отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° . Некоторые электрофизические свойства германия приведены в табл. 7.35.

Таблица 7.35. Электрофизические свойства германия

Марка германия	$\rho_n \cdot 10^2, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\delta\rho_n, \%$	$\rho_{\text{дис}} \cdot 10^{-8}, \text{ м}^{-2}$, не более	$N_{\text{Au}}^{\text{расч}} \cdot 10^{-20}, \text{ м}^{-3}$, не менее
ГДЗ 0,6	0,6	± 10	0,5	50
ГДЗ 0,7	0,7	± 10	0,5	40
ГДГЗ 0,6	0,6	± 10	0,5	45
ГДГЗ 3	3,0	± 10	0,4	2–5
ГЭСЗ 0,16	0,16	± 20	5	40
ГЭСЗ 0,20	0,20	± 20	5	40
ГЭСЗ (2,0–3,0) $\pm 15\%$	2,0–3,0	± 15	5	6
ГЭСЗ (2,0–3,0) $\pm 20\%$	2,0–3,0	± 20	5	6
ГЭСЗ 6,0 $\pm 25\%$	6,0	± 25	5	6

Таблица 7.36. Физико-химические свойства полупроводниковых соединений типа А^{III}В^V [15, 38]

Свойство	GaP	GaAs	GaSb	InP	InAs	InSb
Относительная молекулярная масса	100,69	144,64	191,47	145,79	189,74	236,57
Плотность $\gamma_{\text{рект}} \cdot 10^{-3}$, т/м ³	4,07	5,32	5,65	4,78	5,67	5,78
Постоянная решетки при 25°С, нм	0,54506	0,565315	0,60954	0,58687	0,605838	0,64789
Твердость НВ0,1	950	760	470	440	330	235
Температура плавления, °С	1467	1238	706	1058	942	530
Удельная теплота плавления, кДж/кг	1220	730	340	590	390	203
Удельная теплоемкость при 27°С, Дж/(кг·°С)	437	320	254	312	252	209
Теплопроводность при 27°С, Вт/(м·°С)	77	44	33	68	27	17
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	4,7	5,39	6,1	4,6	4,68	4,9
Температура Дебая, °С	173	71	-7	48	-24	-71
Ширина запрещенной зоны, эВ:						
при 27°С	2,26	1,43	0,70	1,35	0,36	0,18
при -273°С	2,34	1,52	0,813	1,42	0,425	0,236
Приведенная эффективная масса $m_{\text{эф}}/m_0$:						
электронов	0,35	0,068	0,047	0,073	0,025	0,0155
легких дырок	0,17	0,087	0,052	0,078	0,025	0,02
тяжелых дырок	0,67	0,48	0,35	0,4	0,41	0,4
Подвижность при 27°С, м ² /(В·с):						
электронов	0,019	0,95	0,40	0,46	3,30	7,80
дырок	0,012	0,045	0,14	0,015	0,046	0,075
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	0,01	0,004	~0,0009	0,005	0,0003	0,00024
Показатель преломления	3,45	3,58	3,79	3,27	3,52	3,96
Низкочастотная диэлектрическая проницаемость	11,12	12,53	15,63	12,35	14,55	17,72
Упругие постоянные, ГПа:						
C ₁₁	141,2	118,8	88,5	102,2	86,5	67,2
C ₁₂	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

Монокристаллический германий, легированный фосфором, имеет электронный тип проводимости и предназначен для производства подложек эпитаксиальных структур (марка ГЭФ-0,001) и полупроводниковых приборов (марка ГЭФ-0,005) [15]. Монокристаллические слитки германия марок ГЭФ-0,001 и ГЭФ-0,005 имеют диаметр 20 и 25 мм, длину не менее 50 и 25 мм и ρ_n не более 0,000012 и 0,00005 Ом·м соответственно; ориентацию продольной оси монокристаллических слитков [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 2°; плотность дислокаций $\rho_{\text{дис}} \leq 3 \cdot 10^7 \text{ м}^{-2}$ для марки ГЭФ-0,001 и $\leq 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$ для ГЭФ-0,005.

Сложные полупроводники типа $A^{III}B^V$ используют для изготовления диодов, транзисторов, приборов СВЧ на основе эффекта Гана, модуляторов инфракрасного излучения, приемников излучения, солнечных батарей, лазеров, датчиков Холла, магниторезисторов и др.

В табл. 7.36 приведены некоторые физико-химические свойства фосфидов, арсенидов и антимонидов галлия и индия. Эти соединения имеют кубическую решетку типа цинковой обманки (пространственная группа $T_d^2 - F\bar{4}3_m$).

Сложные полупроводники типа $A^{III}B^V$ промышленно выпускают в широком ассортименте. Для характеристики отдельных марок используют буквенно-цифровые обозначения. Первые две буквы обозначают собственно полупроводник: АГ – арсенид галлия, ФГ – фосфид галлия, ГС – антимонид галлия, ИМ – арсенид индия, ФИ – фосфид индия, ИС – антимонид индия. Далее добавляется буква, обозначающая тип проводимости: 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, и 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.

Таблица 7.37. Концентрация ОНЗ в слитках арсенида галлия

Марка AsGa	$N_{\text{ОНЗ}} \cdot 10^{-24}, \text{ м}^{-3}$
АГЧ	$\leq 0,01$
АГН-1	$\leq 0,02$
АГН-2	$\leq 0,02$
АГЧТ-1	0,05–4
АГЧТ-2	0,05–8
АГЧТ-3	4–10
АГНК	0,9–3,5
АГЧО-1	0,015–2,5
АГЧО-2	0,1–4
АГЧО-3	2,5–5
АГЧЦ-1	0,15–20
АГЧЦ-2	20–65
АГЧЦ-3	65–90
АГЧЦ-4	90–120

Арсенид галлия применяют для производства электронных приборов и эпитаксиальных структур [15]. Выпускают его 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 проводимости, остальные – электронный. Слитки арсенида галлия различных марок отличаются концентрацией основных носителей заряда (ОНЗ), допустимым отклонением (10–80 %) этой концентрации (табл. 7.37) от ее номинального значения, номинальным значением

диаметра слитков (20–50 мм), плотностью дислокаций ($5 \cdot 10^7 - 8 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$). Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111], [100] или [110]. Отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3° . Подвижность ОНЗ должна соответствовать данным, приведенным в табл. 7.38.

Таблица 7.38. Подвижность ОНЗ (нижний предел) для нелегированного и легированного теллуrom, оловом, цинком арсенида галлия при $23 \pm 2^\circ \text{C}$ [15]

$N_{\text{ОНЗ}} \times 10^{-24}, \text{ м}^{-3}$	Подвижность ОНЗ, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$				$N_{\text{ОНЗ}} \times 10^{-24}, \text{ м}^{-3}$	Подвижность ОНЗ, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$			
	AsGa	AsGa + Te	AsGa + Sn	AsGa + Zn		AsGa	AsGa + Te	AsGa + Sn	AsGa + Zn
0,01	0,50	–	–	–	0,6	–	0,32	0,29	0,0135
0,02	0,48	–	–	–	0,8	–	0,30	0,28	0,0120
0,04	0,44	–	0,40	–	1	–	0,25	0,22	0,0100
0,06	0,42	–	0,39	–	4	–	0,20	0,16	0,0080
0,08	–	0,39	0,38	–	6	–	0,17	–	0,0065
0,1	–	0,38	0,37	0,0170	8	–	0,14	–	0,0055
0,2	–	0,36	0,34	0,0160	10	–	–	–	0,0050
0,4	–	0,34	0,31	0,0140	50	–	–	–	0,0040

Арсенид галлия, легированный кремнием, выпускают пяти марок (АГНК-1–АГНК-5) с номинальной концентрацией $N_{\text{ОНЗ}} = (0,9 \dots 3,5) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Подвижность ОНЗ не ниже $0,12 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, плотность дислокации $\rho_{\text{дис}} = (0,01 \dots 1) \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$.

Выпускают четыре разновидности арсенида галлия (полуизолирующий, легированный хромом, кислородом и индием) с $\rho_n \geq 1 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и арсенид галлия для модуляторов марки АГЧПМ с $\rho_n \geq 5 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Монокристаллический фосфид галлия, предназначенный для производства полупроводниковых приборов, изготовляют как электронного, так и дырочного типа проводимости. В качестве легирующих примесей используют серу, цинк, оксид хрома. Для легирования высокоомного фосфида галлия марки ФГВ-1 применяют железо, ванадий и марганец. Фосфиды галлия марок ФГВ-2 и ФГВ-3 легируют хромом. Слитки монокристаллического фосфида галлия выпускают 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. 7.39.

Таблица 7.39. Электрофизические свойства слитков фосфида галлия [38]

Марка	$N_{\text{ОНЗ}} \times 10^{-23}, \text{ м}^{-3}$	Подвижность ОНЗ, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, при 27°C	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$\rho_{\text{дис}} \cdot 10^{-8}, \text{ м}^{-2}$, не более
ФГЭ-1	1–80	0,015–0,065	–	–
ФГЭС-1А	1–4	0,012–0,050	–	5
ФГЭС-1Б	1–4	0,012–0,040	–	4
ФГЭС-2	3–7	0,010–0,035	–	20
ФГДЦ-1	1–4	$\geq 0,004$	–	20
ФГДЦ-2	4–9	–	–	20
ФГВ-1	–	–	$1 - 10^6$	5
ФГВ-2	–	–	$10^4 - 10^9$	20
ФГВ-3	–	–	$\geq 10^9$	20

Антимонид галлия, предназначенный для производства полупроводниковых приборов и других целей, выпускают в виде нелегированных и легированных теллуром или кремнием монокристаллических слитков, выращенных по методу Чохральского, длина и диаметр слитков не менее 20 мм; плотность дислокаций $\rho_{\text{дис}} \leq 10^8 \text{ м}^{-2}$ [15]. Нелегированный и легированный кремнием антимонид галлия имеет дырочный тип проводимости, а легированный теллуром – электронный. Основные электрофизические свойства антимонида галлия приведены ниже:

Марка	ГСД	ГСДК	ГСЭТ
Ориентация оси	[211], [111]	[111]	[211]
Концентрация $N_{\text{ОНЗ}} \cdot 10^{-24}$ при -196°C , м^{-3}	$\leq 0,03$	≥ 1	0,3–1,5
Подвижность ОНЗ, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, не менее	0,200	0,015	0,300

Арсенид индия для производства полупроводниковых приборов и оптических целей выпускают в виде поликристаллических слитков, выращенных по методу Бриджмена (марка ИМЭП-0) и по методу Чохральского (марка ИМЭП-1), а также в виде монокристаллических слитков, нелегированных и легированных теллуром, оловом, цинком и марганцем, выращенных по методу Чохральского.

При -196°C в образцах поликристаллического арсенида индия $N_{\text{ОНЗ}} \leq 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Концентрации ОНЗ для различных марок монокристаллического арсенида индия приведены в табл. 7.40.

Таблица 7.40. Концентрация основных носителей заряда в монокристаллических слитках арсенида индия при -196°C

Марка	$N_{\text{ОНЗ}} \cdot 10^{-24}, \text{ м}^{-3}$	Марка	$N_{\text{ОНЗ}} \cdot 10^{-24}, \text{ м}^{-3}$
ИМЭ	$\leq 0,03$	ИМЭТ-2	0,9–2
ИМЭО-1	0,05–0,9	ИМЭТ-3	1–5
ИМЭО-2	0,9–2	ИМДЦ-1	0,01–0,05
ИМЭО-3	1–5	ИМДЦ-2	0,05–0,1
ИМЭО-4	≥ 5	ИМДЦ-3	0,1–1
ИМЭО-5	0,7–2	ИМДЦ-4	1–80
ИМЭТ-1	0,05–0,9	ИМДМ	0,01–0,07

В зависимости от плотности дислокации выделяют четыре группы марок арсенида индия: 1) $\rho_{\text{дис}} \leq 5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-2}$; 2) $\rho_{\text{дис}} = 7 \cdot 10^7 \text{ м}^{-2}$; 3) $\rho_{\text{дис}} = 1 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$ и 4) $\rho_{\text{дис}}$ 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 более 3° .

Ниже приведены значения коэффициента пропускания, равного отношению прошедшего светового потока $\Phi_{\text{пр}}$ к падающему $\Phi_{\text{пад}}$ при толщине образца $3 \pm 0,1$ мм:

Длина волны, мкм	3,4	4,3	4,7	$> 5,3$
$\Phi_{\text{пр}}/\Phi_{\text{пад}}$	0	0,4	0,42	0,4

Монокристаллический фосфид индия, предназначенный для производства полупроводниковых приборов, изготавливают электронного (ФИЭ) и дырочного (ФИД) типа проводимости. В качестве легирующих элементов используют теллур или цинк. Основные электрофизические свойства различных марок фосфида индия приведены в табл. 7.41.

Таблица 7.41. Электрофизические свойства монокристаллов фосфида индия

Марка	$N_{\text{ОНЗ}} \cdot 10^{-24}, \text{ м}^{-3}$	Подвижность ОНЗ, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, при 27 °С	$\rho_{\text{днс}} \cdot 10^{-8}, \text{ м}^{-2}$
ФИЭ-1	$\leq 0,05$	0,30	5
ФИЭТ-2	0,05–0,5	0,25	5
ФИЭТ-3	0,5–5	0,10	5
ФИДЦ-1	0,5–1	–	10
ФИДЦ-2	1–8	–	10

Антимонид индия 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° [15].

Основные электрофизические свойства антимонида индия различных марок приведены в табл. 7.42. Слитки марок ИСЭ-0, ИСЭ-1, ИСЭ-5 и ИСЭВ-1 изготавливают нелегированными. Образцы с электронным типом проводимости легированы теллуром, с дырочным – германием. По согласованию с потребителем возможно легирование цинком, марганцем, кадмием. Время жизни неравновесных носителей заряда для марок ИСЭВ-1 и ИСЭВ-2 составляет не менее 0,5 и 1 мкс соответственно.

Таблица 7.42. Электрофизические свойства антимонида индия

Марка	$N_{\text{ОНЗ}} \cdot 10^{-21}, \text{ м}^{-3}$	$\rho_{\text{н}}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Подвижность ОНЗ, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, не менее	$\rho_{\text{днс}} \cdot 10^{-6}, \text{ м}^{-2}$, не более
ИСД-1	0,001–0,05	0,5–5,0	0,3	5
ИСД-2	0,003–0,03	0,5–3,0	0,4	5
ИСД-3	0,005–0,03	0,5–2,5	0,5	10
ИСД-3у	0,005–0,015	0,65–2,0	0,5	10
ИСД-4	0,03–1	< 0,5	–	10
ИСД-5	1–1000	< 0,5	–	10
ИСЭ-1	0,08–0,2	–	50	5
ИСЭ-2	0,2–3	–	20	5
ИСЭ-2у	0,6–3	–	20	5
ИСЭ-3	0,01–1400	$\geq 0,5$	2	10
ИСЭ-4	0,001–0,06	0,001–0,1	10	5
ИСЭ-5	0,06–0,2	–	10	5
ИСЭП-1	1500–5000	–	–	–
ИСЭП-2	4000–8000	–	–	–
ИСЭВ-1	0,2	–	60	2
ИСЭВ-2	0,2	–	30	2

7.5. 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). Количественно электрическая поляризация вещества характеризуется поляризованностью \vec{p} (Кл/м²) – векторной величиной, равной пределу отношения электрического момента \vec{p}_i некоторого объема вещества к этому объему v_i при стремлении последнего к нулю:

$$\vec{p} = \lim_{v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\vec{p}_i}{v_i} \right).$$

Механизм поляризации диэлектрика зависит от его строения. Диэлектрики бывают полярными и неполярными. Полярный диэлектрик содержит электрические диполи – молекулы, 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 – величина, характеризующая диэлектрические свойства диэлектрика. Для изотропного вещества это скалярная величина, равная отношению модуля электрического смещения \vec{D} к модулю напряженности электрического поля \vec{E} , для анизотропного – тензорная. Относительная диэлектрическая проницаемость – отношение абсолютной диэлектрической проницаемости ϵ_a к электрической постоянной ϵ_0 :

$$\epsilon_r = \epsilon_a / \epsilon_0.$$

В СИ электрическая постоянная определяется как величина, обратная произведению магнитной постоянной μ_0 на квадрат скорости света в вакууме:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м,}$$

а магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Абсолютная диэлектрическая восприимчивость – величина, характеризующая свойство диэлектрика поляризоваться в электрическом поле. Для изотропного вещества это скалярная величина, равная отношению модуля поляризованности к модулю напряженности электрического поля, для анизотропного – тензорная. Относительная диэлектрическая восприимчивость – отношение абсолютной диэлектрической восприимчивости χ_a к электрической постоянной ε_0 :

$$\chi_r = \chi_a \varepsilon_0.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость связана с относительной диэлектрической восприимчивостью соотношением

$$\varepsilon_r = \chi_r + 1,$$

а электрическое смещение

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}.$$

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 характерное время поляризации составляет $10^{-13} - 10^{-15}$ 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, часто слабо возрастающая с увеличением температуры. У полярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость проходит обычно через максимум: диэлектрическая проницаемость сначала увеличивается вследствие уменьшения вязкости диэлектрика, а затем падает в результате разориентирующего 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 молионы (коллоидные частицы); различают соответственно электронную, ионную и молионную электрическую проводимость. Диэлектрики имеют более широкую запрещенную зону энергий, чем полупроводники, и соответственно

более низкую электрическую проводимость. Ионная электрическая проводимость сопровождается явлением электролиза, молионная наблюдается в коллоидных системах и объясняется наличием электрических зарядов на поверхности частиц дисперсной фазы (молионов), а электрическая приводит к токам утечки, играющим отрицательную роль при использовании диэлектриков в качестве изолирующих материалов. Ток утечки обусловлен приложением не 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 теплоту – так называемые диэлектрические потери. Диэлектрические потери зависят от свойств диэлектрика, величины и частоты приложенного напряжения. Диэлектрические потери на электрическую проводимость составляют часть диэлектрических потерь, обусловленную сквозным током диэлектрика. величиной, характеризующей потери в диэлектрике, является угол диэлектрических потерь – угол между векторами плотности переменного тока проводимости и тока смещения диэлектрика на комплексной плоскости. Чем этот угол больше, тем значительнее диэлектрические потери, а его тангенс 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 термоударам, холодостойкость, дугостойкость, химостойкость, радиационная стойкость, короностойкость, трекинговая стойкость, влагостойкость, водостойкость, водопоглощение, тропикостойкость, плеснестойкость, влагопоглощение и старение диэлектрика.

Наибольшая по количеству и стоимости часть выпускаемых 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. Листовой электроизоляционный слоистый пластик выпускают в виде листов, фасонный – в виде различных форм поперечного сечения (стержней, трубок, цилиндров). В зависимости от вида волокнистого наполнителя различают гетинакс, текстолит, асботекстолит, асбогетинакс, стеклотекстолит.

Электроизоляционный фольгированный материал – листовой или рулонный электроизоляционный материал, облицованный с одной или двух сторон металлической фольгой.

Слюдосодержащий электроизоляционный материал – листовой 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 бумагу.

Миканит, слюдинит и слюдопласт – слюдосодержащие электроизоляционные материалы на основе пластин щипаной слюды, слюдинитовой и слюдопластовой бумаги соответственно. По назначению различают коллекторный, прокладочный, формовочный, гибкий и ленточный миканит, слюдинит и слюдопласт.

Пленкосодержащий электроизоляционный материал – листовой 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 термоусаживаемые 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 электрооборудования. 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 хлопчатобумажные и шелковые лакоткани, 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 сегнето- 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 с 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).

Пироэлектрик – 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, хемозлектреты, 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 $(10^{-3} - 10^{-5})$ 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 Петрянова, 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.

Требования, предъявляемые к электроизоляционным материалам, сформулированы в ГОСТ 4.73–81.

7.6. Магнитотвердые материалы

Магнитотвердыми называют ферро- и ферримагнитные материалы с коэрцитивной силой по индукции не менее 4 кА/м.

Основными показателями свойств магнитотвердых материалов являются удельная магнитная энергия $W = 0,5 BH$ (где B , H – соответственно индукция и напряженность магнитного поля в заданной точке на кривой размагничивания) и максимальная удельная магнитная энергия $W_{\max} = 0,5 (BH)_{\max}$. От последнего показателя 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 используют величину $(BH)_{\max}$. К основным показателям

телям также относят проницаемость возврата μ_v – 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, автомобилестроении, 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 по составу и основному способу получения подразделяют 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. Диапазоны нормированных магнитных параметров для этих групп магнитотвердых материалов даны в табл. 7.43.

Таблица 7.43. Характеристики размагничивания магнитотвердых материалов различных групп

Группа	Марка сплава	W_{\max} , кДж/м ³	B_r , Тл	H_c , кА/м	
Легированные стали	EX3	0,595	0,95	4,8	
	EX9K15M2	1,035	0,80	12	
Литые сплавы системы: 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
	Pt–Co	ПлК-78	39,8–43,8	0,75	270
Деформируемые сплавы системы Fe–Cr–Co	28X10K	3,5	0,8	10	
	22X15KA	28	1,5	47	
Порошковые сплавы системы: 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
Сплавы на основе РЗМ: феррит бария	4БИ145	2,0	0,17	95	
	28БА190	14,0	0,39	185	
	феррит стронция	28СА250	14,0	0,39	240
		Sm–Co	КС37А	65	0,82
	Sm–Pr–Co	КСП37А	72,5	0,90	500

Примечания: 1. Данные приведены для материалов стандартных марок с минимальными и максимальными значениями магнитных параметров W_{\max} и H_c среди промышленных стандартизованных сплавов классификационных групп. 2. Свойства сплава системы Pt–Co не нормированы.

Магнитотвердые 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, содержащие кобальт, в несколько раз дороже сплавов на бескобальтовой основе. Широко распространенными материалами для постоянных магнитов являются ферриты.

Магнитотвердые легированные стали предназначены для изготовления постоянных магнитов неотчетственного назначения. Легированные магнитотвердые стали (марки типа E) содержат, % (мас.): 0,90–1,05 C; 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 и 0,30–0,60 Ni. Из этих сталей изготовляют горячекатаные или кованные прутки с диаметром или стороной квадрата до 70 мм включительно, 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. 7.44 указаны свойства термообработанных магнитотвердых сталей.

Таблица 7.44. Магнитные свойства и твердость термически обработанных сталей [31, 38]

Марка стали	H_c , кА/м	B_r , Тл	НВ	W_{\max} , кДж/м ³	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м	σ_b , МПа
EX3	4,8	0,95	229–285	0,595	0,29	2060
EB6	4,8	1,00	255–321	0,65	0,30	2060
EX5K5	7,2	0,85	269–341	0,795	0,30	2060
EX9K15M2	12,0	0,80	285–341	1,035	0,28	2060

Литые магнитотвердые материалы – это в основном сплавы на основе систем Fe–Al–Ni, Fe–Al–Ni–Co. Свойства этих сплавов приведены в табл. 7.45.

Таблица 7.45. Магнитные свойства магнитотвердых литых сплавов на основе системы Fe–Al–Ni–Co [15]

Марка сплава	W_{\max} , кДж/м ³	H_c , кА/м	B_r , Тл	$(B/H) \cdot 10^{-3}$ в точке
				$(BH)_{\max}$, кДж/м ³
не менее				
ЮНД4	3,6	40	0,50	12,0–16,0
ЮНД8	5,1	44	0,60	13,0–16,0
ЮНТС	4,0	58	0,43	7,0–10,0
ЮНДК15	6,0	48	0,75	15,5–18,0
ЮНДК18	9,7	55	0,90	15,0–20,0
ЮНДК18С	14	44	1,10	22,0–28,0
ЮН13ДК24С	18	36	1,30	30,0–33,0
ЮН13ДК24	18	40	1,25	25,0–27,5
ЮН14ДК24	18	48	1,20	20,0–22,0
ЮН15ДК24	18	52	1,15	15,0–17,5
ЮН13ДК25А	28	44	1,40	27,5–30,0
ЮН14ДК25А	28	52	1,35	24,0–25,0
ЮН13ДК25БА	28	48	1,40	26,5–27,5
ЮН14ДК25БА	28	58	1,30	21,5–24,0
ЮН15ДК25БА	28	62	1,25	16,5–21,5

Марка сплава	$W_{\text{max}}, \text{кДж/м}^3$	$H_c, \text{кА/м}$	$B_r, \text{Тл}$	$(B/H) \cdot 10^{-3}$ в точке $(BH)_{\text{max}}, \text{кДж/м}^3$
	не менее			
ЮНДК34Т5	14	92	0,75	8,0–11,0
ЮНДК35Т5Б	16	96	0,75	8,0–10,0
ЮНДК35Т5	16	110	0,75	7,0–8,0
ЮНДК35Т5БА	36	110	1,02	8,0–9,0
ЮНДК35Т5АА	40	115	1,05	8,0–9,0
ЮНДК38Т7	18	135	0,75	4,5–5,5
ЮНДК40Т8	18	145	0,70	3,5–4,5
ЮНДК40Т8АА	32	145	0,90	4,0–5,0

Сплавы используют для магнитов измерительных приборов, автоматических и акустических устройств, электрических машин, магнитных муфт, опор, тормозов. Высококоэрцитивное состояние сплавов обеспечивается выделением при отпуске после заковки сильно высокодисперсной фазы, преимущественно анизотропной. На рис. 7.4 приведены

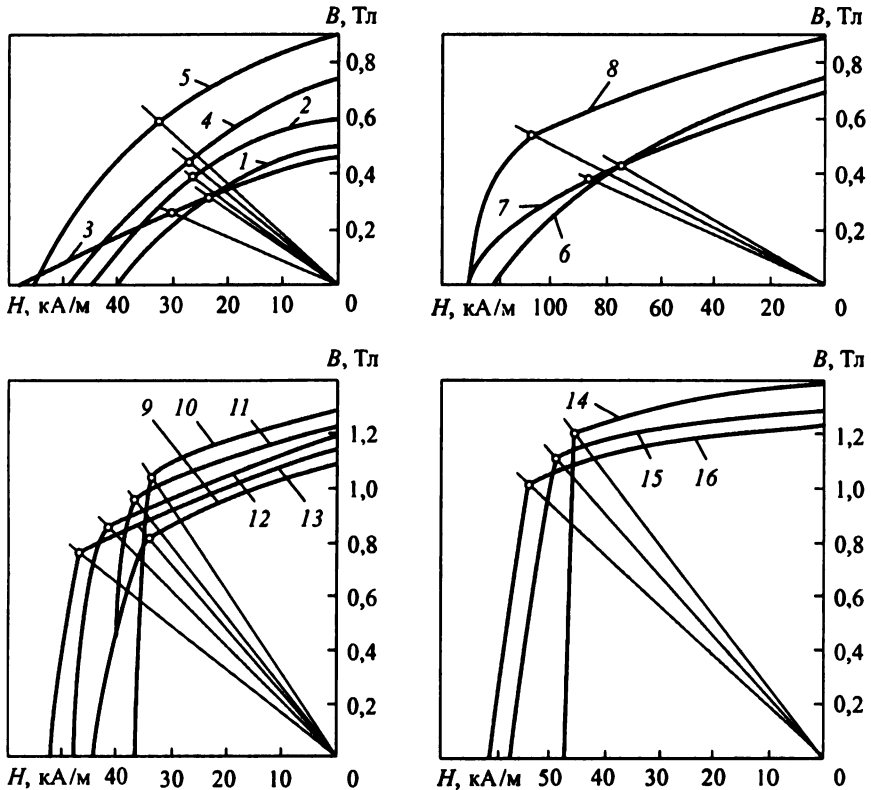


Рис. 7.4. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:

1 – ЮНД4; 2 – ЮНД8; 3 – ЮНТС; 4 – ЮНДК15; 5 – ЮНДК18; 6 – ЮНДК38Т7; 7 – ЮНДК40Т8; 8 – ЮНДК40Т8АА; 9 – ЮНДК18С; 10 – ЮН13ДК24С; 11 – ЮН13ДК24; 12 – ЮН14ДК24; 13 – ЮН15ДК24; 14 – ЮН13ДК25БА; 15 – ЮН14ДК25БА; 16 – ЮН15ДК25БА

кривые размагничивания некоторых материалов. Прямые на этих рисунках соединяют начало координат с точкой $(BH)_{\max}$.

Деформируемые магнитотвердые сплавы предназначены для производства постоянных магнитов, активной части роторов гистерезисных электродвигателей, элементов памяти систем управления автоматизации связи, носителей магнитной записи информации. Магнитотвердые деформируемые материалы на основе сплавов системы Fe–Cr–Co используют для изготовления постоянных магнитов толщиной не более 50 мм и диаметром не более 100 мм. Поставляют их литыми, горяче- и холоднокатаными в виде круглых и квадратных прутков, полос, труб, цилиндров и колец. В зависимости от направленности магнитных свойств материалы подразделяют на анизотропные и изотропные. Магнитные свойства материалов приведены в табл. 7.46.

Таблица 7.46. Магнитные характеристики магнитотвердых деформируемых сплавов [15]

Марка сплава	W_{\max} , кДж/м ³	H_{cB} , кА/м	B_r , Тл	$(B/H) \cdot 10^{-3}$ в точке $(BH)_{\max}$, кДж/м ³	μ_b
28X10K	3,5	20	0,8	30–40	5–8
28X10КА	13	38	1,1	25–30	3,5–5
25X15K	5,0	24	0,9	30–40	5–8
25X15КА	16	40	1,2	25–30	3,5–5
23X15K5ФА	19	42	1,25	25–30	3,5–4,5
30X23K	6,0	50	0,75	15–20	4–5
30X23КА	15	55	1,00	15–20	3–4
22X15КА	28	47	1,5	28–33	3–4
23X15КА	17	40	1,23	30–35	3,5–5
25X12K2БА	17,5	40	1,25	28–33	3,5–5
23X14K3ФА	18	41	1,27	30–35	3,5–5
32X12KДТ	12	48	1,05	18–22	3–4,5

Высококоэрцитивное состояние сплавов системы Fe–Cr–Co достигается образованием в результате термической обработки высокодисперсных анизотропных включений сильномагнитной фазы FeCo в слабомагнитной матрице FeCr. Сплавы системы Fe–Cr–Co в высококоэрцитивном состоянии имеют плотность 7,65–7,70 т/м³ и следующие механические свойства [15]:

σ_b , МПа	196/785–883
$\sigma_{0,2}$, МПа	490/569–686
δ , %	1/3–5
ψ , %	3/7
HRC ₃	32–41/32–41

Примечание. В числителе приведены свойства в литом, а в знаменателе – в горяче- или холоднокатаном состоянии.

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. Проволока обладает коррозионной стойкостью в условиях морского тумана при влажности 100 %, температуре 40 °С в течение 56 сут; ее рабочая температура от –60 до +70 °С. Магнитные свойства сплава ЭИ708-ВИ: $H_c \geq (47,7 \dots 79,5) \cdot 10^3$ А/м, $B_r = 0,2 \dots 0,5$ Тл; механические – $\sigma_b \geq 1960$ МПа; $\delta \leq 2$ %.

Порошковые магнитотвердые материалы получают спеканием порошков. Спекание проводят в вакууме при 1200–1300 °С в течение 1–5 ч; остаточная пористость при этом составляет 3–7 % и приводит к снижению параметра W_{\max} . Изготовление беспористых магнитов методом горячего прессования обеспечивает повышение магнитных свойств. Спеченные магниты имеют мелкозернистую структуру, однородные магнитные свойства и превышают по прочности литые. Порошковая металлургия обеспечивает возможность изготовления магнитов различных типоразмеров. Недостатком этого метода является повышенная стоимость исходных порошков. Используют эти магниты в узлах, работающих при ударных и вибрационных нагрузках. В табл. 7.47 приведены магнитные и механические свойства сплавов системы Fe–Al–Ni–Co.

Таблица 7.47. Магнитные и механические свойства порошковых магнитных сплавов системы Fe–Al–Ni–Co [35], не менее

Марка сплава		B_r , Тл	H_c , кА/м	W_{\max} , кДж/м ³	$\sigma_{сж}$	$\sigma_{н}$
литого	порошкового				МПа	
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

Ферриты (табл. 7.48) используют в качестве постоянных магнитов в электротехнике, радиотехнике, станкостроении, автомобилестроении, для создания различного рода технической аппаратуры – магнитных сепараторов, муфт, вентиляей. Их недостатком является существенная зависимость характеристик от температуры и недостаточная механическая прочность. Преимущества ферритов 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.

Таблица 7.48. Магнитные свойства магнитотвердых ферритов [30]

Марка феррита	B_r , Тл	H_{cB}	H_{cJ}	W_{\max} , кДж/м ³	Марка феррита	B_r , Тл	H_{cB}	H_{cJ}	W_{\max} , кДж/м ³
		кА/м					кА/м		
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 феррита цифры, стоящие перед буквами, показывают значение $(BH)_{\max} = 2W_{\max}$. Первая буква после цифр (Б, С, К или Р) означает бариевый, стронциевый, кобальтовый или содержащий редкоземельные добавки феррит; а вторая буква (И или А) – изотропный или анизотропный, наконец, цифры после букв указывают на значение H_{cJ} .

Металлопластические магниты изготавливают смешением металлических порошков, например из сплавов на основе системы Fe–Al–Ni–Co, с диэлектриком, прессованием и обжигом при 120–180 °С. Механические свойства металлопластических магнитов в несколько раз выше, чем литых, а 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 [30]: $B_r = 0,245$ Тл, $H_{cB} = 33$ кА/м, $H_{cJ} = 195$ кА/м, $W_{\max} = 2$ кДж/м³, $\rho = 104$ Ом·м.

Сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов: Ag–Mn–Al, Pt–Fe, Pt–Co, Pt–Pd–Co используют только для постоянных магнитов очень малых размеров (в основном в виде тонких пластин), для точных приборов. Большая коэрцитивная сила обуславливает высокую стабильность магнитов из этих материалов, однако высокая стоимость ограничивает их применение.

Сортамент литого сплава ПЛК-78 системы Pt–Co (76,5–79,0 % Pt, остальное Co) следующий [31]: проволока $d = 0,4...3,2$ мм, полосы размером $(0,5–3,7) \times (10–100)$ мм, прутки

$d = 0,6 \dots 20$ мм и трубы $d = 30$ мм и толщиной стенки 5 мм. Сплав поставляют без термической обработки на высококоэрцитивное состояние. Рекомендуемые режимы термической обработки приведены в [31].

При изготовлении магнитов широко используют порошковую металлургию. Порошковый сплав системы Pt–Co подвергают холодной деформации; после закалки он легко обрабатывается резанием, его рабочая температура до 350°C . Высококоэрцитивное состояние в сплаве Pt–Co возникает в результате появления упорядоченной тетрагональной фазы с высокой энергией магнитной анизотропии. Его физические свойства в высококоэрцитивном состоянии следующие [15]: $B_r = 0,7$ Тл; $H_{cB} = 280$ кА/м; $W_{\text{max}} = 38$ кДж/м³; $\theta = 520 \dots 530^\circ\text{C}$; $\gamma = 14,8 \dots 15,2$ т/м³.

Методами порошковой металлургии изготавливают сплавы на основе Co–P3M марок КС37, КС37А (36,0–38,5 % Sm) и марок КСП37, КСП37А (36,0–38,5 % Sm + Pr). Основные магнитные свойства этих сплавов приведены ниже (ГОСТ 21559–76), не менее:

	КС37	КС37А	КСП37	КСП37А
B_r , Тл	0,77	0,82	0,85	0,90
H_{cB} , кА/м	540	560	520	500
H_{cJ} , кА/м	1300	1000	800	640
W_{max} , кДж/м ³	55	65	65	72,5

7.7. Магнитомягкие материалы

Магнитомягкими называют магнитные материалы с коэрцитивной силой по индукции не более 4 кА/м. Магнитомягкие материалы имеют высокое значение начальной магнитной проницаемости, способны намагничиваться до насыщения и в слабых полях. Используют их в основном для изготовления магнитопроводов переменного магнитного поля в электромашиностроении, трансформаторостроении, в электротехнической и радиотехнической промышленности, измерительной технике, системах автоматики и телемеханики, вычислительной технике. К магнитомягким относят ферромагнитные материалы: железо (особо и технически чистое), низкоуглеродистые электротехнические стали (нелегированные и кремнистые), прецизионные низкокоэрцитивные сплавы на железной и железоникелевой основе, ферримагнитные (ферриты) и композиционные магнитодиэлектрические материалы.

Технически чистое железо является основным компонентом большинства магнитных материалов. 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).

Магнитные свойства железа (табл. 7.49) определяются количеством и составом примесей, наиболее вредными из которых являются углерод, кислород, сера, азот и водород.

Таблица 7.49. Состав и магнитные свойства железа [7]

Железо	Содержание примесей, % (мас.)		μ_n	μ_{max}	H_c , А/м
	С	О			
Технически чистое	0,020	0,060	250	7000	64,0
Электролитическое	0,020	0,010	600	15000	28,0
Карбонильное	0,005	0,005	3300	21000	6,4
Переплавленное в вакууме электролитическое	0,010	—	—	61000	7,2
Обработанное в водороде	0,005	0,003	6000	200000	3,2
Обработанное в водороде особо тщательно	—	—	20000	340000	2,4
Монокристалл чистейшего железа, обработанный в водороде особо тщательно	—	—	—	1430000	0,8

Примечание. Здесь и далее μ_n и μ_{max} — соответственно начальная и максимальная магнитная проницаемость.

Особо чистое железо получают электролизом раствора серноокислого или хлористого железа, термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$, а также обработкой в вакууме или в среде водорода. Состав и магнитные свойства различных видов железа приведены в табл. 7.49. Промышленное применение нашло карбонильное железо, которое используют в виде порошка в качестве ферромагнитной фазы высокочастотных магнитодиэлектриков и в виде листов различной толщины.

Низкоуглеродистые электротехнические стали. 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). Применяют ее в магнитных цепях электрических аппаратов и приборов. Содержание основных элементов в стали не превышает, % (мас.): 0,04 С; 0,3 Si; 0,3 Mn (остальное Fe).

В обозначении марки электротехнической нелегированной стали цифры означают: первая — класс по структурному состоянию и виду прокатки (1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная); вторая — тип по содержанию кремния (0 — сталь нелегированная без нормирования коэффициента старения; 1 — сталь нелегированная с нормированным коэффициентом старения); третья — группу по основной нормируемой характеристике (8 — коэрцитивная сила); четвертая и пятая — количественное значение основной нормируемой характеристики (для группы 8 — значение коэрцитивной силы в целых единицах, А/м).

Таблица 7.50. Магнитные свойства электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 3836–83)

Марка стали	Толщина, мм	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

Магнитные свойства (табл. 7.50) определяют на термически обработанных образцах (максимальная температура отжига 950 °С, максимальное время охлаждения до 600 °С, 10 ч). Увеличение коэрцитивной силы стали марок 11832, 21832, 11864, 21864, 11880, 11848, 21880, 11895, 21895 в результате старения не превышает 6 А/м.

Холоднокатаную ленту и листовой прокат изготавливают без термической обработки (нагартованными), горячекатаный прокат – с травленной поверхностью.

Сортовую электротехническую нелегированную сталь выпускают следующих марок: 10864, 20864, 10880, 20880, 10895, 20895, 11864, 21864, 11880, 21880, 11895, 21895. Сталь поставляют без термической обработки.

Магнитные свойства стали, определенные на термически обработанных образцах, приведены в табл. 7.51. Коэффициент старения стали марок 11880, 21880, 11895, 21895 не превышает 10 %.

Таблица 7.51. Магнитные свойства сортовой электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 11036–75)

Марка стали	H_c , А/м, не более	B , Тл, не менее, при H , А/м		
		500	1 000	2 500
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

Механические свойства горячекатаной* (числитель) и калиброванной (знаменатель) сортовой электротехнической нелегированной стали следующие (ГОСТ 11036–75):

σ_s , МПа, не менее	270/350
δ , %	24/4
ψ , %	60/–
НВ, не более	131/–

* На термически обработанных образцах.

Электротехническая кремнистая сталь предназначена для магнитных цепей электрических машин, трансформаторов, аппаратов и приборов. Промышленно выпускают холоднокатаную электротехническую анизотропную и изотропную стали. Холоднокатаную анизотропную сталь изготавливают в виде рулонов и листов толщиной 0,27–0,80 мм, а также лент толщиной 0,05–0,20 мм и 0,27–0,50 мм.

В обозначении марки электротехнической кремнистой стали первая цифра означает структурное состояние: 1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой, вторая – содержание кремния в % (мас.): 0 – до 0,04; 1 – св. 0,04 до 0,8; 2 – св. 0,8 до 1,8; 3 – св. 1,8 до 2,8; 4 – св. 2,8 до 3,8; 5 – св. 3,8 до 4,8; третья – основную нормируемую характеристику: 0 – удельные магнитные потери p при $B = 1,7$ Тл и $f = 50$ Гц, 1 – то же при $B = 1,5$ Тл и $f = 50$ Гц; 2 – то же при $B = 1,0$ Тл и $f = 400$ Гц; 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при $H = 0,4$ А/м; 7 – то же в поле $H = 10$ А/м. Вместе первые три цифры обозначают тип стали, четвертая – ее порядковый номер.

Листы и ленты из электротехнической кремнистой стали поставляют в термически обработанном состоянии (за исключением нелегированной стали) с электроизоляционным термостойким покрытием и без него. Магнитные свойства этой стали приведены в табл. 7.52 и 7.53. Удельное электрическое сопротивление холоднокатаной анизотропной электротехнической стали составляет $(0,45-0,50) \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Таблица 7.52. Магнитные свойства электротехнической холоднокатаной изотропной тонколистовой кремнистой стали толщиной 0,5 мм

Марка стали	$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	B , Тл, не менее, при H , А/м			$\rho \cdot 10^6$, Ом·м
	Вт/кг, не более		1000	2500	10000	
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

Таблица 7.53. Магнитные свойства электротехнической холоднокатаной анизотропной кремнистой стали

Марка стали	$P_{1,5/50}$ ($P_{1,7/50}$)	$P_{1,5/400}$	B , Тл, не менее, при H , А/м	
	Вт/кг, не более		100 (400)	2500
<i>Тонколистовая сталь толщиной 0,35 мм (ГОСТ 21 427.1-83)</i>				
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	—
<i>Стальная лента толщиной 0,15 мм (ГОСТ 21 427.4-78)</i>				
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

Прецизионные низкокоэрцитивные сплавы подразделяют на восемь групп: I – сплавы с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых полях; II – сплавы с высокой магнитной проницаемостью и повышенным удельным электросопротивлением; III – сплавы с повышенной магнитной проницаемостью и повышенной индукцией технического насыщения; IV – сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса (обладают анизотропией магнитных свойств); V – сплавы с высокой магнитной индукцией технического насыщения; VI – сплавы с низкой остаточной магнитной индукцией; VII – сплавы с высокой магнитной проницаемостью при однополярном намагничивании; VIII – сплавы с высокой коррозионной стойкостью. Свойства прецизионных магнитомягких сплавов приведены в табл. 7.54. Химический состав этих сплавов соответствует ГОСТ 10994–74.

Таблица 7.54. Свойства прецизионных магнитомягких сплавов (ГОСТ 10160–75)

Марка сплава	HB	σ_s	σ_T	E, ГПа	δ	ψ	θ , °C	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м
		МПа			%			
<i>Группа I</i>								
79НМ	210/120	1050/500	1000/150	210	3/50	–	430	0,50
80НХС	240/130	950/550	900/150	–	4/40	15	330	0,62
83НФ	–	950/550	–/150	220	–	–	360	0,70
81НМА	260/160	1300/650	1250/250	210	2/50	–	260	0,80
<i>Группа II</i>								
50НХС	190/125	900/500	850/150	–	2/40	–	360	0,90
<i>Группа III</i>								
45Н	170/130	750/–	750/–	200	3/–	15/–	450	0,54
50Н	170/130	800/450	700/150	160	3/35	15/60	500	0,45
<i>Группа IV</i>								
50НП	170/130	800/450	700/150	160	3/35	15/60	500	0,45
68НМП	230/120	950/550	–/150	–	3/50	5/–	580	0,45
34НКМП	155/130	950/550	900/–	–	4/40	5/40	580	0,50
35НХКСП	170/130	900/500	900/150	170	4/40	–	560	0,60
40НКМП	–/100	1000/550	1000/150	180	4/50	–	580	0,55
65НП	200/130	900/550	900/150	190	3/40	–	600	0,25
<i>Группа V</i>								
27КХ	40 HRC, /90 HRB	1100/600	–/300	220	2/20	–	940	0,20
49КФ, 49К2ФА, 49К2Ф	35 HRC, /90 HRB	1350/500	–/350	220	1/1	–	960	0,40
<i>Группа VI</i>								
47НК	160/130	900/500	–/150	200	3/40	–	700	0,20
47НКС	–	900/500	–	–	3/35	–	600	0,48
64Н	200/130	900/550	900/150	190	3/40	10/–	600	0,20
<i>Группа VII</i>								
78НЗМ	210/120	1050/500	1000/150	210	3/50	–	460	0,50
<i>Группа VIII</i>								
16Х	185/–	400/250	–/200	220	5/25	–/65	680	0,44
36КНМ	170/–	–/500	–/250	–	–/45	–/70	570	0,48

Примечание. В числителе приведены свойства сплавов до термической обработки, в знаменателе – после нее.

Магнитные свойства прецизионных магнитомягких сплавов даны в табл. 7.55–7.61 по группам и в табл. 7.62 – для сплавов на основе системы Fe–Al–Si.

Таблица 7.55. Магнитные свойства полуфабрикатов из прецизионных магнитомягких сплавов I группы марок 79НМ (числитель) и 80НХС (знаменатель) (ГОСТ 10160–75)

Толщина или диаметр, мм	$\mu_n \cdot 10^{-3}$	$\mu_{max} \cdot 10^{-3}$	H_c , А/м, не более	Толщина или диаметр, мм	$\mu_n \cdot 10^{-3}$	$\mu_{max} \cdot 10^{-3}$	H_c , А/м, не более
	не менее				не менее		
	<i>Холоднокатаные ленты и листы</i>				<i>Холоднокатаные ленты и листы</i>		
0,005	7/8	30/30	8,0/8,0	1,0	25/30	150/170	1,6/1,0
0,01	14/14	60/50	5,6/5,6	1,5	22/25	130/150	1,6/1,2
0,02	16/18	70/70	4,0/4,0	2,0; 2,5	22/25	130/150	1,6/1,2
0,05; 0,08	16/20	90/90	3,2/3,2		<i>Горячекатаные листы</i>		
0,10; 0,15	20/22	120/120	2,4/2,4	3–22	20/20	80/70	3,2/3,2
0,20	22/28	130/130	1,6/1,6		<i>Прутки</i>		
0,35; 0,5	25/35	150/150	1,6/1,2	8–100	20/–	80/–	3,2/–

Таблица 7.56. Магнитные свойства полуфабрикатов из прецизионных магнитомягких сплавов II группы марки 50НХС (числитель) и III группы марки 50Н (знаменатель) (ГОСТ 10160–75)

Толщина или диаметр, мм	$\mu_n \cdot 10^{-3}$	$\mu_{max} \cdot 10^{-3}$	H_c , А/м, не более	Толщина или диаметр, мм	$\mu_n \cdot 10^{-3}$	$\mu_{max} \cdot 10^{-3}$	H_c , А/м, не более
	не менее				не менее		
	<i>Холоднокатаные ленты</i>				<i>Холоднокатаные ленты</i>		
0,005	–/1,0	–/8	–/56	0,35; 0,5	2,6/3,2	35/30	10/8
0,01	–/1,3	–/10	–/40	1,0	3,0/3,0	30/20	12/10
0,02	–/1,5	–/15	–/20		<i>Горячекатаные листы</i>		
0,05; 0,08	2,0/2,0	20/20	20/16	3–22	2,5/–	20/–	24/–
0,10; 0,15	2,3/2,5	25/25	16/13		<i>Прутки</i>		
0,20	2,3/3,0	30/28	12/10	8–100	2,5/–	20/–	24/–

Таблица 7.57. Магнитные свойства холоднокатаных лент из прецизионных сплавов IV группы (ГОСТ 10160–75)

Толщина или диаметр, мм	B_r/B_{800}	$\mu_{max} \cdot 10^{-3}$	H_c , А/м, не более	Толщина или диаметр, мм	B_r/B_{800}	$\mu_{max} \cdot 10^{-3}$	H_c , А/м, не более
	не менее				не менее		
	<i>50НП/34НМП</i>				<i>65НП/40НМ</i>		
0,005	0,80/0,90	15/15	40/80	0,01	–/0,93	–/100	–/6,4
0,01	0,83/0,92	20/35	32/24	0,02	0,90/0,93	70/200	6,4/4,0
0,02	0,85/0,90	40/40	20/16	0,05	0,90/0,92	100/300	3,2/3,2
0,05	0,85/0,87	40/60	18/12	0,1	0,90/0,93	200/400	2,8/2,4
0,1	0,85/0,85	40/100	18/8	0,2	0,90/–	250/–	2,4/–
0,2; 0,35; 0,5	–/0,85	–/120	–/6,4				

Примечание. B_r/B_{800} – коэффициент прямоугольности петли гистерезиса при $H_c = 800$ А/м.

Таблица 7.58. Магнитные свойства полуфабрикатов из прецизионных сплавов V группы (ГОСТ 10160-75)

Марка сплава	Толщина или диаметр, мм	B_{2500}	B_{15000}	$H_c, \text{А/м}$, не более	Марка сплава	Толщина или диаметр, мм	B_{2500}	B_{15000}	$H_c, \text{А/м}$, не более
		Тл, не менее					Тл, не менее		
	<i>Холоднокатаные ленты</i>					<i>Прутки и поковки</i>			
27КХ	0,20; 0,35; 0,70	1,80	2,15	–	27КХ	30–100	1,75	2,05	–
49К2Ф	0,20	–	2,25	160	49КФ	10–80	1,90	2,10	160
49К2ФА	0,10	2,20	–	140					

Примечание. Цифровой индекс при B указывает напряженность магнитного поля в амперах на метр.

Таблица 7.59. Магнитные свойства холоднокатаных лент из прецизионных сплавов VI группы (ГОСТ 10160-75)

Марка сплава	Толщина, мм	$\mu_n \cdot 10^{-3}$, не менее	μ_{\max}/μ_n	B_r/B_{800}	$\alpha_\mu \cdot 10^2, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
			не более		
47НК	0,01; 0,02; 0,1	0,9	1,15	0,05	6
47НКХ	0,02; 0,1	1,5	1,20	0,05	3
64Н	0,01,0,02; 0,1	2,0	1,20	0,07	6

* Температурный коэффициент импульсной проницаемости при $t = -60 \dots 120 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Таблица 7.60. Магнитные свойства холоднокатаных лент из прецизионных сплавов VII группы (ГОСТ 10160-75)

Марка сплава	Толщина, мм	B_{800} , Тл, не менее	B_r/B_{800} , не более	Марка сплава	Толщина, мм	B_{800} , Тл, не менее	B_r/B_{800} , не более
79НМ3	0,005	0,8	0,45	79НМ3	0,02	0,08	0,25
	0,1	0,8	0,30	68НМ	0,02	1,15	0,2

Таблица 7.61. Магнитные свойства прецизионных сплавов VIII группы [31]

Марка сплава	$\mu_{\max} \cdot 10^{-3}$	B_{100}	B_{2500}	B_{10000}	$H_c, \text{А/м}$
		Тл			
16Х	7–15	0,6–1,2	1,2–1,45	1,45–1,65	12–64
36КНМ	4,5–6	1,3	1,45	–	40–65

Таблица 7.62. Магнитные свойства сплавов на основе системы Fe-Al-Si [30, 31]

Сплав	$\mu_n \cdot 10^{-3}$	$\mu_{\max} \cdot 10^{-3}$	$H_c, \text{А/м}$	Сплав	$\mu_n \cdot 10^{-3}$	$\mu_{\max} \cdot 10^{-3}$	$H_c, \text{А/м}$
Альсифер (Fe+0,6 Si+5,4 Al)	35,4	117	1,76	Сплавы альсифенол:			
Промышленный альсифер	6–7	–	–	12Ю	1	–	24
				12Ю-ВИ	10	–	–
				16Ю-ВИ	5,5–8	40–50	–

Ферритмагнитные материалы. Низкокоэрцитивные ($H_c < 4$ кА/м) ферриты – оксидные ферритмагнетики делят на четыре класса: 1) магнитомягкие ферриты на основе систем Ni – Zn и Mn – Zn для радиочастотных устройств; 2) ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ); 3) магнитоотрицательные ферриты; 4) сверхвысокочастотные (СВЧ) ферриты.

Ферриты изготавливают методами порошковой металлургии по технологии, включающей операции синтеза порошкового ферритового порошка из исходных компонентов (оксидов, солей), формование прессовок (заготовок) и высокотемпературное спекание. Особовысокоплотные ферриты с регулируемым размером зерна получают с использованием метода горячего прессования.

Основные области применения ферритов – радиоэлектронная и вычислительная техника, техника связи, приборостроение.

По технологии изготовления, эксплуатационным характеристикам и экономическим показателям ферриты имеют преимущества перед металлическими сплавами. Высокое электрическое сопротивление 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.

Промышленно выпускают следующие типы ферритовых сердечников: кольцевые, трубчатые, дисковые, стержневые, подстроечные, Ш-, П-, Е-, Г-, О-, П-образные, сложной конфигурации, для магнитных головок.

Магнитомягкие ферриты для радиочастотных устройств по назначению и магнитным свойствам подразделяют на десять групп [20]. В табл. 7.63 приведены плотность и электромагнитные свойства ферритов на основе систем Ni – Zn (марки НН, НТ, ВН, ННС) и Mn – Zn (группы НМ, МТ, НМС) первых семи групп: I – ферриты общего назначения; II – термостабильные ферриты; III – высокопроницаемые ферриты; IV – ферриты для телевизионной техники; V – ферриты для импульсных трансформаторов; VI – ферриты для широкополосных трансформаторов; VII – ферриты для магнитных головок. Группа VIII объединяет ферриты для датчиков температуры с заданной точкой Кюри и включает ферриты марок 1200НН, 1200НН1, 1200НН2, 1200НН3, 800НН, имеющие точку Кюри соответственно 70, 90, 60, 75, 185 °С. В группы IX и X входят соответственно ферриты для магнитного экранирования (марки 800ВНРП, 200ВНРП) и для перестраиваемых контуров мощных радиотехнических устройств (серия ВНП) с магнитной проницаемостью в диапазоне 10–300.

Кольцевые сердечники из магнитомягких ферритов изготавливают с наружным диаметром 3–180 мм, внутренним диаметром 2–115 мм и высотой 1,5–12 мм. Нетермостабильные марганец-цинковые ферритовые сердечники предназначены для магнитопроводов, применяемых в изделиях электронной техники производственно-технического назначения и народного потребления. Сердечники используют для работы в слабых синусоидальных полях напряженностью 8–24,0 А/м и на частотах от 0,06 МГц (для сердечников из 6000НМ) до 1,0 МГц (для сердечников из 1000НМ). Сердечники можно применять в элементах и устройствах аппаратуры, эксплуатируемой в условиях воздействия механических факторов: вибрационных нагрузок частотой от 1 до 5000 Гц с ускорением не более 392 м/с², одиночных ударов с ускорением не более 1471,5 м/с² и линейных (центробежных) нагрузок с ускорением не более 4905 м/с².

Таблица 7.63. Свойства магнитомягких ферритов для радиочастот [21]

Марка феррита	$\mu_n \cdot 10^{-3}$	$(\lg \delta / \mu_n) \cdot 10^6$, не более, при		f_{cp} , МГц, при $\lg \delta$		Параметры петли гистерезиса в статическом режиме				ρ , Ом·м	θ , °С, не менее	$\gamma \cdot 10^3$, Т/м ³	
		H , А/м		f_c , МГц		H , А/м, при μ_{max}	B , Тл	V , Тл	H_c , А/м				
		0,8	8	0,1	0,002								
													μ_{max}
Группа I													
100НН	0,1	125	—	7	15	120	0,44	0,290	56	10^6	300	4,7—5,0	
400НН	0,4	18	50	0,1	1,50	64	0,25	0,120	64	10^4	120	4,7—4,9	
400НН1	0,4	12	25	0,1	3,90	100	0,28	0,160	48	10^3	300	4,7—4,9	
600НН	0,6	22	75	0,1	0,70	56	0,31	0,140	32	10^4	110	4,8—5,0	
1000НМ	1,0	50	150	0,1	—	3000	0,27	0,150	20	10^4	110	4,8—5,1	
1000НМ	1,0	15	45	0,1	0,20	40	0,35	0,110	20	0,50	200	4,4—4,6	
1500НМ	1,5	15	45	0,1	0,10	2500	0,35	0,110	24	0,50	200	4,4—4,6	
2000НН	2,0	85	270	0,1	—	7000	0,25	0,120	8	10	70	4,8—5,1	
2000НМ	2,0	15	45	0,1	0,05	3500	0,38	0,130	24	0,50	200	4,4—4,6	
3000НМ	3,0	35	60	0,1	0,002	3500	0,35	0,120	12	0,50	140	4,6—4,8	
Группа II													
7ВН	0,007	680	—	70	150	4400	0,07	0,06	2240	10^6	450	3,8	
20ВН	0,02	300	—	30	120	2000	0,20	0,10	1000	10^6	450	3,7—4,0	
30ВН	0,03	170	—	30	200	1600	0,26	0,070	520	10^3	450	4,5—4,8	
50ВН	0,05	180	—	20	70	800	0,30	0,200	360	10^4	450	4,5—4,8	
100ВН	0,1	135	—	18	35	280	0,36	0,150	280	10^5	400	4,5—4,8	
150ВН	0,15	135	—	12	25,0	330	0,35	0,150	240	10^4	400	4,5—4,8	
700НМ	0,7	80	—	3	5,0	1900	0,38	0,050	240	20	240	4,3	
1000НМ3	1,0	5	15	0,1	1,80	2000	0,33	0,100	28	10	200	4,3—4,7	
1500НМ1	1,5	15	45	0,1	0,60	3000	0,35	0,100	16	5,0	200	4,3—4,7	
1500НМ3	1,5	5	15	0,1	1,50	3000	0,38	0,080	16	20	200	4,3—4,7	
2000НМ1	2,0	15	45	0,1	0,050	3500	0,38	0,120	16	5,0	200	4,3—4,7	
Группа III													
4000НМ	4,0	35	60	0,1	0,10	7000	0,35	0,130	8	0,50	125	4,6—4,8	
6000НМ	6,0	45	75	0,03	0,003	—	0,35	0,110	8	0,10	110	4,6—4,8	
10000НМ	10,0	35	90	0,02	0,050	8	0,35	0,110	4	0,01	110	4,9—5,0	
20000НМ	20,0	10	30	0,01	0,005	—	0,35	0,11	2,0	0,01	110	4,9—5,1	

Марка феррита	$\mu_n \cdot 10^{-3}$	$(\text{tg } \delta / \mu_n) \cdot 10^6$, не более, при		$f_{\text{ср}}$, МГц, при $\text{tg } \delta$		Параметры петли гистерезиса в статическом режиме				ρ , Ом·м	θ , °С, не менее	$\gamma \cdot 10^3$, г/м ³		
		0,8	8	f , МГц	при $\text{tg } \delta$	$\mu_{\text{мах}}$	при $H = 800$ А/м						H_c , А/м	
							H , А/м	B , Тл	V , Тл					
				0,1	0,002									
<i>Группа IV</i>														
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	—	—
<i>Группа V</i>														
300НН1	0,3	—	—	2,00	—	300	240	0,30	0,28	160	10	240	4,7—4,9	4,7—4,9
350НН1	0,35	—	—	2,50	—	1000	80	0,26	0,12	48	10 ⁷	180	4,7—4,9	4,7—4,9
450НН1	0,45	—	—	1,00	—	2100	56	0,37	0,160	40	10 ³	230	4,7—4,9	4,7—4,9
1000НН1	1,0	—	—	0,50	—	3000	32	0,30	0,090	16	10 ³	120	4,7—4,9	4,7—4,9
1100НН1	1,1	—	—	0,40	—	3000	32	0,27	0,080	20	10	110	4,7—4,9	4,7—4,9
1100НН1	1,1	—	—	0,30	—	3000	32	0,40	0,150	24	0,10	180	4,7—4,9	4,7—4,9
<i>Группа VI</i>														
50ВНС	0,05	—	—	80	70	170	800	0,17	0,020	4,8	10 ⁴	480	4,7—4,9	4,7—4,9
90ВНС	0,09	—	—	40	30	340	640	0,28	0,080	152	10 ⁴	400	4,7—4,9	4,7—4,9
200ВНС	0,2	—	—	11	5	650	280	0,31	0,080	64	10 ⁴	350	4,7—4,9	4,7—4,9
300ВНС	0,3	—	—	8	4	850	220	0,32	0,130	80	10 ⁴	250	4,7—4,9	4,7—4,9
<i>Группа VII</i>														
500НТ	0,5	—	—	0,50	—	—	—	0,35	0,200	32	10 ³	150	5,3	5,3
500НТ1	0,5	—	—	2	—	—	—	0,35	0,210	48	10 ³	150	5,3	5,3
1000НТ	1,0	—	—	0,2	—	—	—	0,32	0,140	16	10 ²	140	5,3	5,3
1000НТ1	1,0	—	—	0,8	—	—	—	0,32	0,150	32	10 ³	140	5,3	5,3
2000НТ	2,0	—	—	0,10	—	—	—	0,27	0,120	8	10	90	5,3	5,3
2000МТ	2,0	—	—	0,20	—	—	—	0,35	0,150	5	1,0	110	5,1	5,1
500МТ	0,5	—	—	—	—	—	—	0,48	—	20	0,10	240	5,1	5,1
1000МТ	1,0	—	—	—	—	—	—	0,50	—	20	1,0	240	5,1	5,1
5000МТ	5,0	—	—	—	—	—	—	0,35	0,150	5	0,10	110	5,1	5,1

Примечание. Здесь $\text{tg } \delta$ — тангенс угла магнитных потерь, $\text{tg } \delta / \mu_n$ — относительный тангенс угла магнитных потерь.

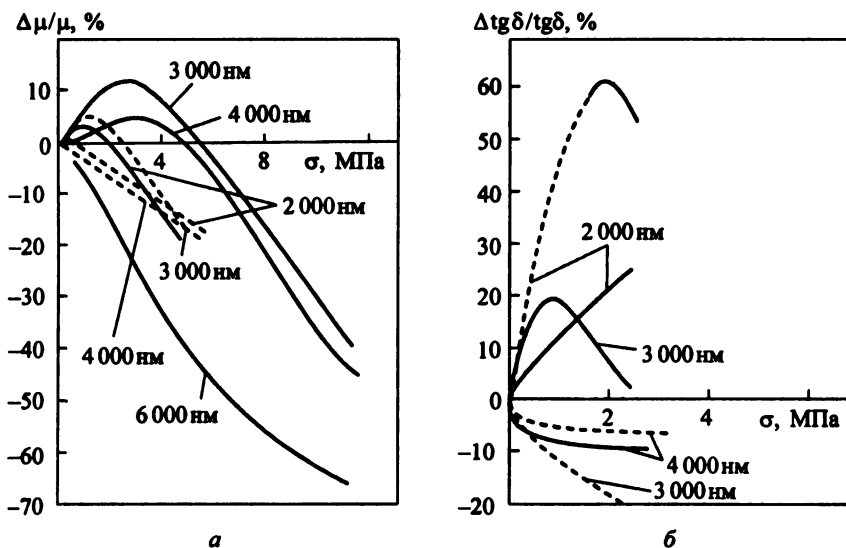


Рис. 7.5. Зависимость относительной проницаемости (а) и относительного тангенса угла магнитных потерь ферритов (б) от сжимающих напряжений:

а – сплошные линии при $H = 0,4$ А/м, штриховые – при $H = 0,8$ А/м; б – то же при H , равном 0,8 и 8 А/м соответственно

При воздействии на сердечник механических нагрузок в них возникают механические напряжения, вызывающие отклонения электромагнитных параметров. На рис. 7.5 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 обратимо. После воздействия механической нагрузки начальная магнитная проницаемость сразу же возвращается к значению, несколько превышающему исходное (в ненагруженном состоянии сердечника). С течением времени это превышение исчезает. Сердечники можно эксплуатировать в течение 50 000 ч. Значение σ_c при растяжении, сжатии и изгибе составляет 9,8; 147 и 29,4 МПа соответственно. Максимальная рабочая температура равна 155 °С – для ферритов марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ; 155 °С – для ферритов марок 3000НМ, 4000НМ и 100 °С – для феррита марки 6000НМ. Наименьшая температура окружающей среды составляет –60 °С.

Сердечники из ферритов марок 400НН, 150ВН, 30ВН, применяемые в магнитных антеннах радиовещательных приемников, предназначены для работ на частотах 2,6; 12,0; 100 МГц соответственно. Сердечники выпускают двух типов: стержневые круглого сечения и пластинчатые с регламентированным типоразмером. Сердечники выдерживают без разрушения статическую нагрузку, приложенную к середине сердечника перпендикулярно его оси, равную 29,43 Н – для пластинчатых сердечников и 49 Н – для стержневых. Рабочая температура сердечников – от –45 до +70 °С, длительность эксплуатации

50 000 ч. При эксплуатации сердечников допускается воздействие нормированных вибрационных нагрузок, одиночных и многократных ударов. Не рекомендуется допускать возникновения в сердечниках статических напряжений, превышающих 3 МПа.

У ферритов с ППГ отношение остаточной индукции к максимальной индукции на предельной статической петле гистерезиса составляет не менее 0,85. Сердечники из ферритов с ППГ и малой коэрцитивной силой ($H_c < 40$ А/м) применяют, как правило, в переключающих и накопительных элементах, а также в магнитных усилителях, а сердечники с большой коэрцитивной силой ($H_c > 40$ А/м) – в оперативных запоминающих устройствах. Кольцевые сердечники имеют наружный диаметр 0,3–10,0 мм и высоты 0,06–5,0 мм. Кольцевые сердечники из ферритов с ППГ используют в устройствах автоматизации и вычислительной техники. Ферриты с ППГ по химическому составу разделяют на пять групп (табл. 7.64). Рабочая температура этих ферритов от –60 до +70 °С.

Таблица 7.64. Основные свойства ферритов с ППГ [30]

Марка феррита	H_c , А/м	B_r , Тл	H_r/H_c^*	θ , °С	ρ , Ом·м, не менее
<i>Система Li–Na</i>					
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	$1 \cdot 10^6$
<i>Система Mg–Mn–Ca</i>					
300П	12–56	0,19–0,27	0,75	250	$2 \cdot 10^3$
<i>Система Li–Mg–Mn</i>					
3ВТ	223–227	0,19–0,27	0,75	500	$5 \cdot 10^5$
5ВТ	346–450	0,18–0,26	0,75	500	$1 \cdot 10^6$
<i>Система Mg–Mn</i>					
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	$5 \cdot 10^2$
<i>Система Mg–Mn–Zn–Ca</i>					
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	$5 \cdot 10^2$
0,12ВТ	7,9–11,0	0,16–0,23	0,65	110	$6 \cdot 10^4$

* Отношение напряженности поля трогания к коэрцитивной силе.

Магнитострикционные ферриты имеют сильно выраженную магнитострикцию в слабых переменных магнитных полях. Применяют их в прецизионных фильтрах, в том числе широкополосных, в качестве преобразователя колебаний магнитного поля в меха-

нические (продольные или крутильные) и наоборот. Способность ферритового материала преобразовывать магнитную энергию в упругую оценивают с помощью коэффициента магнитомеханической связи $K_{св}$, определяющего отношение энергии, превращенной в упругую, ко всей подведенной магнитной энергии: $K_{св}^2 = W_{упр}/W_{магн}$. Магнитострикционные ферриты изготовляют на основе никелевых ферритов, имеющих отрицательную константу магнитной кристаллографической анизотропии, с различными малыми присадками, % (ат.): ~ 1,25 CoO; 0,15 % CuO; $\leq 0,5 V_2O_5$. Наиболее эффективной является добавка CoO, так как феррит кобальта, обладая положительной константой кристаллографической анизотропии K_1 , образует с ферритом никеля твердый раствор, имеющий константу $K_1 \approx 0$. Точка Кюри этих ферритов составляет 530–590 °С. Свойства магнитострикционных ферритов приведены в табл. 7.65.

Таблица 7.65. Основные свойства магнитострикционных никель-кобальтовых ферритов [30]

Марка феррита	$K_{св}$, %	Добротность Q	Скорость колебаний $v \cdot 10^{-3}$, м/с		$\alpha_f^* \cdot 10^6, ^\circ C^{-1}$ (при $t, ^\circ C$)
			продольных	крутильных	
601С	13,0	2800	5,4–5,75	–	–10...+60 (5...60)
602С	12,0	2500	–	3,1–3,6	–60...+60 (–10...+70)
605С	12,0	2800	5,4–5,75	–	–12...+12 (–10...+50)
	10,0	2000	–	3,1–3,5	–25...+25 (–60...+85)
	10,0	2000	–	3,1–3,5	–14...+14 (–10...+50)
606С	12,0	3500	5,4–6,0	–	–10...+60 (–60...+85)
	10,5	4500	–	3,3–3,6	–25...+25 (–60...+85)

* Температурный коэффициент резонансной частоты.

Ферриты СВЧ характеризуются малыми магнитной кристаллографической анизотропией и коэрцитивной силой, очень высоким удельным электрическим сопротивлением (10^4 – 10^{12} Ом·м). Основным параметром этих ферритов является величина ΔH – ширина кривой ферримагнитного резонанса, определяющая эффективность их использования в устройствах СВЧ (вентили, фазовращатели, циркуляторы). Ферриты СВЧ применяют в диапазоне частот от сотен мегагерц до тысяч гигагерц (длины волн от метров до миллиметров).

По химическому составу и основному рабочему диапазону длин волн ферриты СВЧ разделяют на шесть групп: I – иттриевые ферриты-гранаты (для низкочастотной области диапазона СВЧ); II – литиевые ферриты; III – магниевые ферриты (для средней части сантиметрового диапазона длин волн); IV – никелевые ферриты (для миллиметрового диапазона и коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн); V – магниевые ферроалюминаты (для длинноволновой части диапазона СВЧ); VI – никелевые и магниевые феррохромиты (для длинноволновой части диапазона СВЧ в высоком уровне мощности). Свойства этих ферритов представлены в табл. 7.66.

Таблица 7.66. Основные свойства ферритов СВЧ [30]

Марка феррита	B_r , Тл	H_c , А/м	μ'	θ , °С	ε'	$\operatorname{tg} \varepsilon'' \cdot 10^3$	γ , т/м ³	ρ , Ом·м	ΔH , кА/м, при λ , см	
									3	10
<i>Группа I</i>										
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	$90 \cdot 10^9$	—	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
<i>Группа II</i>										
10СЧ9	0,070	80	20	180	13	3	4,89	$3,0 \cdot 10^8$	—	15
<i>Группа III</i>										
2СЧ1	0,200	320	20	300	11,3	—	4,05	$5,0 \cdot 10^6$	42	—
3СЧ	0,178	400	13	320	11,6	—	4,1	$5,5 \cdot 10^6$	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	$4,1 \cdot 10^5$	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	$1,1 \cdot 10^5$	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	$1,6 \cdot 10^5$	64	—
4СЧ4	0,170	280	25	300	10,5	—	3,90	$4,8 \cdot 10^5$	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	—	420	—	24	—
<i>Группа IV</i>										
1СЧ	0,450	200	100	300	12,2	—	4,85	$8,2 \cdot 10^4$	33,5	—
1СЧ2	0,290	320	20	450	12,5	—	4,95	$1,7 \cdot 10^7$	22,0	—
1СЧ3	0,440	240	80	420	11,0	—	4,40	$1,3 \cdot 10^3$	32	—
1СЧ4	0,480	88	80	420	12,3	—	5,05	$4,8 \cdot 10^6$	13,5	—
1СЧ7	0,490	120	140	320	12,5	—	4,95	—	13,5	—
2СЧ	0,220	720	12	500	10,0	—	4,5	$5,9 \cdot 10^4$	56	—
2СЧ4	0,450	120	50	440	12,5	—	5,0	$5,3 \cdot 10^6$	9,6	—
3СЧ8	0,450	320	50	370	11,2	—	4,75	$8,7 \cdot 10^4$	36	—
3СЧ16	0,340	120	—	370	12,7	—	5,10	—	9	—
4СЧ8	0,230	350	12	450	12,2	—	5,05	$7,9 \cdot 10^2$	48	—
4СЧ9	0,320	360	30	450	11,0	—	5,0	$2,0 \cdot 10^6$	22	—
4СЧ10	0,220	320	22	500	12,4	—	5,10	$7,8 \cdot 10^7$	17,5	—
5СЧ	0,310	96	90	350	12	—	5,10	$3,0 \cdot 10^6$	11	—

Марка феррита	B_s , Тл	H_c , А/м	μ'	θ , °С	ϵ'	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^3$	γ , т/м ³	ρ , Ом·м	ΔH , кА/м, при λ , см	
									3	10
<i>Группа V</i>										
4СЧ	0,080	440	8	280	4,5	—	3,00	$9,0 \cdot 10^5$	72	—
4СЧ1	0,100	400	10	280	5,5	—	3,20	$4,0 \cdot 10^5$	56	—
4СЧ6	0,120	320	15	280	10	—	3,75	$3,6 \cdot 10^6$	48	—
6СЧ1	0,145	80	65	180	12	—	4,20	$3,0 \cdot 10^6$	—	10,4
8СЧ1	0,175	360	12	280	9,6	3	3,85	$1,5 \cdot 10^5$	—	32
10СТ	0,080	400	10	270	10	2	4,00	$2,0 \cdot 10^7$	—	32
30СЧ2	0,110	80	30	150	10	15	4,20	$1,7 \cdot 10^6$	—	13
30СЧ4	0,085	160	35	120	10	3	4,00	$7,2 \cdot 10^8$	—	8
<i>Группа VI</i>										
4СЧ2	0,075	520	9	280	6,2	—	3,00	$5,2 \cdot 10^6$	56	—
10СЧ1	0,065	320	13	160	8	4	3,20	$6,8 \cdot 10^5$	—	24
10СЧ8	0,065	128	20	140	9,5	3	3,80	$5,8 \cdot 10^5$	—	16
10СЧ12	0,110	640	10	300	9,8	7	4,60	$5,2 \cdot 10^4$	—	20
15СЧ	0,120	720	9	320	4,8	6	4,50	$6,8 \cdot 10^4$	—	36
15СЧ1	0,055	200	20	150	6,8	3	3,00	$3,2 \cdot 10^5$	—	24
30СЧ	0,070	280	13	160	9,5	2	3,90	$3,3 \cdot 10^5$	—	17,6
30СЧ1	0,130	240	25	240	11,2	5	4,40	$3,0 \cdot 10^6$	—	13
40СЧ	0,085	72	60	90	10,2	2	4,30	$9,7 \cdot 10^6$	—	7

Примечания: 1. Все измерения проведены при 20 °С. 2. $B_s = \mu_0 J_s$ измерено при $H = 400 \dots 640$ кА/м, H_c — на кольцевых образцах при $H = 4$ кА/м, μ' — при $f = 1,1$ МГц; $\operatorname{tg} \delta$ — при $f = 3\,000$ МГц (μ' , ϵ' — действительные части магнитной и диэлектрической проницаемости соответственно; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; ΔH — ширина резонансной кривой).

Магнитодиэлектрические материалы. Магнитодиэлектриком называют магнитный материал, в котором связкой является диэлектрик, а наполнителем — магнитомягкий металлический или ферритовый порошок. В качестве металлического наполнителя применяют карбонильное железо, размолотые 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 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 в основном изготавливают на основе карбонильного железа и пермаллоя [30]. Свойства магнитодиэлектриков приведены в табл. 7.67.

Таблица 7.67. Свойства магнитодиэлектриков

Материал	μ_n	$\mu_{эф}$	Магнитные потери, не более			$f_{кр}$, МГц	$\alpha_\mu \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$, не более (при $t, ^\circ\text{C}$)
			$\delta_r \cdot 10^6$ А/м	$\delta_v \cdot 10^9, \text{Гц}^{-1}$	$\delta_n \cdot 10^3$		
<i>На основе карбонильного железа (ГОСТ 13610–79)</i>							
P-10	13–15	2,9	3–5	2,0–3,5	0,15–0,25	10	25–180 (–60...+100)
P-20	12–14	2,95	1,5–2,5	2,0–3,0	0,05–0,1	20	25–150 (–60...+100)
P-100	9–10	1,55	1,25–1,85	0,15–1,2	0,05–0,1	100	50–100 (–60...+100)
P-100Ф	10,5–12	1,60	1,2–2,0	1,0–2,8	0,05–0,1	100	30–150 (–60...+100)
Пс	11,0–13,0	2,90	≤ 1,5	≤ 3,5	≤ 0,2	20	25–110 (–60...+100)
<i>На основе пермаллоя [30]</i>							
П250	230	–	82	1000	3	0,03	200 (–60...+85)
П140	140	–	63	450	2	–	100 (–20...+70)
П100	100	–	31	200	2	–	100 (–60...+85)
П60	60	–	19	100	1,5	–	100 (–60...+85)
ПК100	100	–	31	200	2	0,2	30 (–60...+85)
ПК60	60	–	19	100	1,5	–	30 (–60...+85)

Примечание. Здесь $\mu_{эф}$ – эффективная магнитная проницаемость; $\delta_r, \delta_v, \delta_n$ – углы потерь на гистерезис, вихревые токи и на последствие соответственно; α_μ – температурный коэффициент магнитной проницаемости.

* Для магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа приведены значения μ' .

7.8. 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, подразделяют 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 ТКЛР относят сплавы, у которых $\alpha < 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Они 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 этих сплавов представлены в табл. 7.68. Сплавы 35НКТ и 39Н выпускают в том же сортаменте, что и сплав 36Н.

Таблица 7.68. Марки и сортамент ферромагнитных сплавов с минимальным ТКЛР [31]

Марка сплава	Сортамент	Толщина или диаметр, мм	
36Н, 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
		Лента	0,1–2,5
	32НК-ВИ	Холоднокатаные трубы	90
	32НК-ЭЛ	Трубная заготовка	85–160
	36НХ	То же	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	
35НКТ	Лента	0,5–0,8	
36НГТ	Проволока	2,0–4,0	

Значения α для некоторых из них приведены ниже [31]:

	36Н	32НКД	35НКТ	32НК-ВИ
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	-60...+100	-60...+100	+20...+100	+20...+100
$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	≤ 1,5	≤ 1,0	≤ 2,2–2,8	≤ 1,0

В качестве материалов с минимальным ТКЛР можно использовать аморфные металлические сплавы.

Ферромагнитные сплавы с низким ТКЛР характеризуются значениями $\alpha = (3 \dots 7) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Марки этих сплавов и их сортамент представлены в табл. 7.69.

Таблица 7.69. Марки и сортамент ферромагнитных сплавов с низким ТКЛР [31]

Марка сплава	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	»	0,3; 0,5
	Проволока	3,0–5,0
	Горячекатаные и кованые прутки	13,0–60,0
30НКД	Полоса	2,8–2,2
29НК	Шлифованные прутки	1,0–30
	Трубка	1,0–70,0
30НКФ	Горячекатаные и кованые прутки	16,2–60

Значения α для некоторых сплавов с низким ТКЛР приведены ниже [31]:

	38НК	30НКД	29НК
$\alpha \cdot 10^6, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \text{ при } t, \text{ }^\circ\text{C};$			
20–300	3,0–3,8	3,3–4,3	4,6–5,5
20–400	5,0–5,8	3,8–4,6	4,5–5,2

Сплавы с низким ТКЛР применяют в соединениях с керамикой, в вакуумно-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 смачивается стеклом при температурной пайке.

Ферромагнитные сплавы со средним значением ТКЛР ($\alpha = (7 \dots 15) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) используют в соединениях с керамикой типа 22ХС «Поликор», 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.

Таблица 7.70. Марки и сортамент ферромагнитных сплавов со средним ТКЛР [31]

Марка сплава	Сортамент	Толщина или диаметр, мм
34НК	Шлифованные прутки	1,0–30
31НК	Лента	0,3–1,0
	Полоса	5,0
	Лента	0,8
24НК	Полоса	16,0
	Горячекатаные или кованные прутки	8–200
33НК, 38НКД, 47НХ, 48НХ, 47НЗХ, 47НХР	Лента	0,3–0,8
50НЗХЮ		0,6–2,5
18ХТФ	Полоса	2,8–22
58Н-ВИ	Шлифованные прутки	1,0–30
52Н, 47НД	Горячекатаные и кованные прутки	8–200
	»	8–200

В табл. 7.70 представлены марки этих сплавов и их сортамент. Значения α для некоторых из них даны ниже [31]:

	34НК	88НКД	47НХ	47НХР	47НД
$\alpha \cdot 10^6, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \text{ при } t, \text{ }^\circ\text{C};$					
200–300	7,4–8,4	7,1–7,9	7,6–8,4	8,4–9,2	9,2–10,1
200–500	7,2–8,0	8,2–9,0	8,3–9,5	10,7–11,5	9,7–10,5

Немагнитные сплавы с минимальным и низким ТКЛР (марки 95ХК и 96Х) используют для изготовления изделий с высокой стабильностью размеров, не вносящих искажений в магнитные поля и обладающих высокой твердостью и коррозионной стойкостью. У этих сплавов ТКЛР составляет $(1 \dots 6) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале от 20 до 100 $^\circ\text{C}$.

Для создания соединений с «мягкими» стеклами и керамикой, а также в качестве конструкционного материала с заданным ТКЛР используют немагнитные сплавы со средними значениями α . В табл. 7.71 приведены марки и сортамент этих сплавов.

Таблица 7.71. Марки и сортамент немагнитных сплавов со средним ТКЛР [31]

Марка сплава	Сортамент	Толщина или диаметр, мм
75НМ-ВИ	Холоднокатаная лента	0,1–0,015
80НМВ	То же	0,03–2,5
	Кованые прутки	20–60
80НМВХ3	Холоднокатаная проволока	1,0–5,0
76НХВГ	Холоднотянутая проволока	1,0–5,0
	То же	3,0–5,0

Находят также применение сплавы 93ЦТ на циркониевой основе и сплавы 72ТФ, 75ТМ на титановой основе. Немагнитные сплавы со средним ТКЛР имеют следующие значения α [31]:

	75НМ-ВН	80НМВ	80НМВХ3
$\alpha \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$, при $t, ^\circ\text{C}$:			
20–300	11,5–12,0	11,7–12,2	11,7–12,2
20–800	–	12,8–13,3	13,0–13,5

В качестве немагнитных материалов с высоким ТКЛР применяют сплавы 56ДГНХ и 70ГНДХ, у которых $\alpha > 15 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале от 20 °С до температуры плавления. Из сплавов изготавливают детали, тепловое расширение которых должно согласованно соответствовать тепловому расширению деталей из алюминиевых сплавов. Их также используют в качестве компонента термобиметаллов.

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. Эти сплавы характеризуются низким значением α_E , который весьма чувствителен к химическому составу и термической обработке [10]. Свойства наиболее распространенных сплавов этой группы приведены в табл. 7.72.

Таблица 7.72. Свойства сплавов с низким температурным коэффициентом модуля упругости [31]

Марка сплава	E , ГПа	$\alpha_E \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	Марка сплава	E , ГПа	$\alpha_E \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$
42НХТЮ	177–186	9,5	45НХТ	177–196	7,0
44НХТЮ	177–181	8,0	37Н11Х	181	9,0
42НХТЮА	177–181	9,0	36Н11Х	177	9,0
43НХТЮ	167–172	8,2			

Сплавы находят применение для изготовления упругих элементов (спирали, пружины, сильфоны и т. д.) высокоточных приборов, обеспечивающих малую температурную погрешность при эксплуатации.

7.9. Аморфные металлические сплавы

Аморфные металлические сплавы (АМС), или металлические стекла, являются новым перспективным материалом. По химическому составу они состоят из легкоплавких, редкоземельных, а также из переходных металлов с добавками бора, углерода, кремния, азота и других элементов в количестве до 30 % (мас.). Аморфное состояние сплава характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении атомов упаковки. Достигается такое состояние сверхбыстрым охлаждением сплава из газообразного, жидкого или ионизированного состояния. Способы получения АМС следующие:

- 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) оплавление тонких поверхностных слоев деталей лазерным лучом, а также лазерная обработка смеси порошков с последующим быстрым отводом теплоты от расплава;
- 4) закалка из жидкого состояния.

Закалка – основной метод получения АМС. Осуществляют ее различными способами. Для производства лент струю жидкого металла направляют 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 газообразной или жидкой средах. 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 АМС определяется химическим составом и скоростью охлаждения жидкого расплава. Сплавы должны иметь низкую температуру плавления и высокую температуру аморфизации. Скорость охлаждения расплава составляет $10^5 - 10^{10} \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$.

Аморфное состояние сплава является метастабильным. Поэтому АМС подвергают отжигу, в процессе которого происходит переход к более стабильному состоянию стеклофазы. Однако при температурах отжига, превышающих $(0,4 - 0,65) t_{пл}$, материал кристаллизуется.

Конструкционные АМС обладают ценным комплексом механических свойств. Прежде всего их особенностью является сочетание высокой твердости и прочности. Твердость может достигать более 1000 HV0,1, а прочность – 4000 МПа и выше. Например, сплав $\text{Fe}_{46}\text{Cr}_{16}\text{Mo}_{20}\text{C}_{18}$ имеет твердость 1150 HV0,1 при $\sigma_{\text{в}} = 4000 \text{ МПа}$; сплав $\text{Co}_{34}\text{Cr}_{28}\text{Mo}_{20}\text{C}_{18}$ – соответственно 1400 HV0,1 и 4100 МПа.

АМС характеризуются высокой упругой деформацией – около 2 % и низкой пластичностью $\delta = 0,03 \dots 0,3$ %. Однако эти 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 АМС приведены в табл. 7.73.

Таблица 7.73. Механические свойства АМС [12]

Сплав	HV0,1	σ_a	σ_r	E, ГПа	E/ σ_a	δ , %
		МПа				
Fe ₈₀ B ₂₀	1100	3130	–	169	54	–
Fe ₇₈ Mo ₂ B ₂₀	1015	2600	–	144	55	–
Fe ₄₀ Ni ₄₀ P ₁₄ B ₆	640	1710	–	144	84	–
F 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 ₈ B ₁₇	860	2650	2160	103	39	0,14
Ni ₄₉ Fe ₂₉ P ₁₄ B ₆ Al 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 ₆ Si _{16,5}	129	1810	1000	82	45	0,3
La ₈₀ Al ₂₀	–	430	–	24	56	0,1–0,2
Co ₇₅ Si ₁₅ B ₁₀	910	2940	–	104	36	–

Наряду с высокими механическими свойствами АМС обладают хорошей коррозионной стойкостью. Возможность их использования ограничивается относительно низкой температурой их перехода при нагреве в кристаллическое состояние $t_{\text{крист}}$, наличием отпускной хрупкости, возникающей при кратковременном нагреве до температур существенно ниже $t_{\text{крист}}$, а также тем, что сортамент выпускаемых материалов ограничен (изготавливают только тонкие ленты, фольгу и нити). Получать массивные заготовки и изделия можно методами порошковой металлургии, однако обычная технология (спекание порошковых заготовок) неприемлема из-за низкой термической стабильности АМС. В экспериментальном порядке образцы из аморфных порошков получают взрывным прессованием.

Срок службы АМС зависит от температуры эксплуатации. Термическая стойкость этих сплавов невысока, однако имеются материалы с $t_{\text{крист}} > 725$ °С. К ним, в частности, относится сплав Ti₄₀Ni₄₀Si₂₀ с высокими механическими свойствами: 1070 HV0,1, $\sigma_a = 3450$ МПа и $\sigma_a/(g) = 58$ км.

Высокопрочные нити из АМС можно использовать в КМ, а ленты – в виде намотки для упрочнения сосудов высокого давления.

АМС – перспективный материал для изготовления упругих элементов. В этой связи заслуживает внимания сплав Ti₄₀Be₄₀Zr₁₀, имеющий высокую релаксационную стойкость и запас упругой энергии. По эффективной силе $F_3 = \sigma_{\text{уп}}^3/E^2$, где $\sigma_{\text{уп}}$ – предел упру-

гости пружины из этого сплава на порядок превосходят пружины из обычных поликристаллических металлов.

Отсутствие границ зерен, высокая твердость, износостойкость, коррозионная стойкость АМС 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 (1 050 HV0,1) повышена поверхностная твердость монокристаллического сплава $Ni_{60}Nb_{40}$ и достигнута твердость 1 200 HV0,1 на поверхности изделий из чугуна следующего состава, % (мас.): 3,20 С; 2,60 Si; 0,64 Mn; 0,06 Р.

Магнитомягкие и магнитотвердые АМС применяют в изделиях электронной техники. По химическому составу эти сплавы подразделяют на три системы: на основе железа, железа и никеля, железа и кобальта. Разработано большое количество составов АМС, однако опытными и опытно-промышленными партиями выпускают сплавы ограниченной номенклатуры.

АМС на основе железа отличает высокая индукция насыщения ($B_s = 1,5 \dots 1,8$ Тл), и в этом отношении они уступают только электротехническим сталям и железокобальтовым сплавам. По сравнению с электротехническими сталями АМС имеют в несколько раз более низкие потери на перемагничивание. Перспективно использовать АМС в силовых трансформаторах. Однако для этого требуется изменить технологию изготовления трансформаторов (намотку ленты на катушки, отжиг в магнитном поле и в инертной среде, особые условия герметизации и пропитки сердечников). Магнитные свойства некоторых АМС группы железа приведены в табл. 7.74.

Таблица 7.74. Свойства АМС на основе железа [31, 41]

Сплав	B_s , Тл	H_c^{*1} , А/м	θ^{*1} , °С	B_s/H_c^{*1}	B_s/B_s	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м
$Fe_{80}B_{20}$	1,60	2,4	374	$32 \cdot 10^4$	0,77	1,45
$Fe_{86}B_2C_7$	1,80	12,0	—	—	—	—
$Fe_{78}Si_{10}B_{12}^{*2}$	1,55	4,8	447	$21 \cdot 10^4$	0,9	1,55
$Fe_{82}Si_8B_{10}$	1,60	2,4	—	—	0,75	—
$Fe_{81}B_{13}Si_4C_2$	1,60	0,6	400	$180 \cdot 10^4$	0,90	1,25
$Fe_{81}B_{13}Si_{13,5}C_{1,5}$	1,60	4,8	370	$18 \cdot 10^4$	0,70	1,25
9ЖСП-А	1,60	4,7	370	—	0,70	1,25

*¹ Данные приведены после термической обработки в магнитном поле. *² Сплав получен закалкой в валках, остальные — закалкой на диске.

Железониелевые АМС (табл. 7.75) имеют высокую магнитную проницаемость, по индукции насыщения сравнимы с металлическими магнитными сплавами и ферритами, обладают малой коэрцитивной силой и высокой прямоугольностью петли гистерезиса.

Используют их для изготовления трансформаторов и электромагнитных устройств, работающих на повышенных частотах, что позволяет уменьшить габаритные размеры изделий и удельные потери. Промышленно выпускают сплавы марок Н25-А и 10НСР.

Таблица 7.75. Свойства поли- и монокристаллических железоникелевых и железокобальтовых АМС [31, 41]

Сплав	B_s , Тл	H_c , А/м	θ , °С	$\mu_n \cdot 10^{-3}$	$\rho \cdot 10^6$, Ом·м
<i>Железоникелевые АМС</i>					
$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$	0,79	1,6	264	5	1,80
$Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{19}$	0,88	0,56	230	70	1,50
$Fe_{62}Ni_{16}Si_{18}B_{14}$	1,30	0,48	310	20	1,30
Н25-А	1,30	0,015	435	—	1,20
10НСР	1,35	0,15	430	4,7	1,30
<i>Железокобальтовые АМС</i>					
$Fe_{4,5}Co_{7,5}Si_{10}B_{15}$	0,85	1,6	420	10	1,50
$Fe_{4,5}Co_{66}Cr_9Si_5B_{15}$	0,63	0,08	210	200	1,60
$Fe_{4,5}Co_{66,8}Ni_{1,5}Nb_{2,2}Si_{10}B_{15}$	0,71	0,40	420	20	—
45НПР-А	0,78	1,6	250	31	—
К83-А	0,7	0,08	350	20	1,20
К25-А	1,4	0,04	535	—	1,20
24КСР	1,5	0,1	550	—	1,25
71КНСР	0,5	0,008	—	20	—
<i>Традиционные материалы</i>					
Пермаллой (4-79Мо)	0,77	0,80	460	30	0,40
Хардперм	0,50	0,40	300	80	1,00
Сендаст	1,00	4,0	500	30	0,80
Монокристалл марганцевоцинкового феррита	0,40	1,6	180	20	$3 \cdot 10^6$

Высокопроницаемые железокобальтовые АМС (см. табл. 7.75) могут заменить в радиоэлектронной аппаратуре пермаллой с высокой индукцией; они превосходят последние по некоторым свойствам и по технологичности. Промышленно выпускают АМС марок: К83-А, К25-А, 24КСР, 71КНСР, 45НПР-А и др.

Методом катодного распыления получены аморфные пленки из магнитотвердого сплава $SmCo_5$, с магнитной энергией 120 кДж/м^3 , которые можно использовать для изготовления малогабаритных постоянных магнитов различного назначения.

Некоторые АМС на основе железа (93ЖХР-А, 96ЖР-А) в определенных температурных интервалах имеют низкий ТКЛР ($\alpha < 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). При комнатной температуре их свойства близки к свойствам поликристаллического сплава 36Н, однако они сохраняют низкое значение α вплоть до $250\text{--}300 \text{ } ^\circ\text{C}$, в то время как сплав 36Н только до $100 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Резистивные АМС имеют высокое электрическое сопротивление. Из них изготовляют микропровод в изоляции из стекла. Свойства некоторых резистивных материалов приведены в табл. 7.76.

Таблица 7.76. Свойства резистивных материалов [12]

Сплав	$\alpha_p \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	Сплав	$\alpha_p \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
	<i>АМС</i>			<i>АМС</i>	
Ni ₆₈ Si ₁₅ B ₁₇	0	1,52	Cu ₇₉ Ag ₆ P ₁₅	-93	1,37
Ni ₆₈ Si ₁₀ B ₂₂	3,9	1,42	Cu ₅₀ Ag ₆ P ₁₄	-90	1,37
Ni ₆₇ Si ₄ B ₂₉	4,2	1,39	<i>Традиционные сплавы</i>		
Ni ₆₇ Si ₇ B ₂₆	-2,6	1,55	Cu ₅₅ Ni ₄₅	±20	0,49
Ni ₆₈ Si ₁₂ B ₂₀	-2,3	1,54	Ni ₈₀ Cr ₂₀	70	1,08
Cu ₇₇ Ag ₈ P ₁₅	-123	1,36	Ni ₆₄ Cr ₁₁ Fe ₂₅	180	1,10

По свойствам АМС системы Ni-Si-B выгодно отличаются 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, микросмещений и т. д.

7.10. 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 15093-90).

Наиболее важными процессами, необходимыми для функционирования лазера, являются люминесценция и вынужденное излучение. Люминесценция – неравновесное излучение тел, избыточное по отношению к тепловому, 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 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 кристаллы, наиболее полно удовлетворяющие всем современным требованиям квантовой электроники. Это активированный неодимом иттрий-алюминиевый гранат $Y_3Al_5O_{12}-Nd^{3+}$, активированный неодимом алюминат иттрия $Y_3AlO_3-Nd^{3+}$, а также рубин $Al_2O_3-Cr^{3+}$. 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. 7.77. Перспективным материалом для использования в твердотельных лазерах являются кристаллы гадолиний-скандий-галлиевого граната с хромом и неодимом, на которых были созданы лазеры, обладающие рекордными параметрами.

Таблица 7.77. Основные свойства диэлектрических лазерных кристаллов [14]

Свойство	$YAlO_3$	$Y_3Al_5O_{12}$	Al_2O_3
Пространственная группа	$D_{2h}^{16} - Pbnm$	$O_h^{10} - Ia3d$	$D_{3d}^6 - R\bar{3}c$
Параметры элементарной ячейки (без активатора), нм	$a_0 = 0,5176;$ $b_0 = 0,6307;$ $c_0 = 0,7355$	$a_0 = 1,2008$	$a_0 = 0,47628;$ $b_0 = 1,30032$
Относительная молекулярная масса	163,88	593,59	101,59
Плотность γ , т/м ³ :			
без активатора	5,35	4,55	3,98
с ионами Nd^{3+}	–	4,55	–
с ионами Cr^{3+}	–	–	3,92
Упругие постоянные, ГПа	220	$C_{11} = 333;$ $C_{12} = 111;$ $C_{44} = 115$	$C_{11} = 496,8; C_{33} = 498,1;$ $C_{44} = 147,4; C_{12} = 163,6;$ $C_{13} = 110,9; C_{14} = -23,5$
Временное сопротивление, МПа	–	171–205	–
Температура, °С:			
плавления	1850±30	1930±20	~ 2040
кипения	–	–	~ 3500
характеристическая	–	427–477	662–677
Теплопроводность, Вт/(м·°С):			
без активатора	11	13	23 ⊥ оси c, 25 оси c
с ионами Nd^{3+}	–	11–14	–
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	420	580–630	760

Свойство	YAlO ₃	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Al ₂ O ₃
ТКЛР без активатора $\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	9,5 оси <i>a</i> ; 4,3 оси <i>b</i> ; 10,8 оси <i>c</i>	8,2 по [100]; 7,7 по [110]; 7,8 по [111]	6,66 оси <i>c</i> ; 5,0 \perp оси <i>c</i> ; –
Коэффициент диффузии, см ² /с: без активатора с ионами Nd ³⁺	0,049 –	0,046 0,050	0,084 –
Область оптической прозрачности, мкм	0,22–6,5	0,24–6,0	0,14–6,5
Диэлектрические постоянные	–	$\epsilon = 11,7; \epsilon_\infty = 3,5$	$\epsilon = 10,55$ оси <i>c</i> ; $\epsilon = 8,61$ \perp оси <i>c</i> ; $\epsilon_\infty = 3,1$

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), чем у монокристаллических лазерных материалов. Кроме того, 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 РЗМ и неодимом. Освоены силикатные (ГЛС-1–ГЛС-14) и фосфатные (ГЛС-21–ГЛС-24) стекла, активированные неодимом. К обозначению марки стекла, сваренного в платиновом тигле, добавляют букву П (ГЛС-1П).

Фосфатные стекла по сравнению с силикатными имеют больший коэффициент усиления, более высокое сечение индуцированного излучения, лучшие термооптические свойства; это позволяет использовать фосфатные стекла в мощных системах для усиления сверхкоротких импульсов. Недостатки фосфатных стекол – высокая стоимость, низкая 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 заготовки стекла марки ГЛС-10, ГЛС-9 и ГЛС-7, ГЛС-8 составляет 1, 3 и 5 кг соответственно; для всех остальных марок она равна 10 кг.

Оптическое стекло марки ГЛС нормируют по показателю поглощения K_{386} , длительности затухания люминесценции τ , показателю преломления n_e , двойному лучепре-

ломлению, бессвильности, пузырчатости, включениям. По пузырчатости стекла марок ГЛС подразделяют на категории, установленные ГОСТ 3514–94. В зависимости от значения показателя поглощения K_{1060} установлены три категории стекла: 1) $K_{1060} \leq 0,001$, 2) $0,001 < K_{1060} \leq 0,002$, 3) $0,002 < K_{1060} \leq 0,0025$. По химической стойкости к влажной атмосфере силикатные стекла относятся к группе В, а фосфатные – к группе Д (ГОСТ 13917–92). Некоторые оптические свойства стекол приведены в табл. 7.78, а физико-химические – в табл. 7.79.

Таблица 7.78. Оптические свойства неодимовых стекол

Марка стекла	Показатель поглощения $K_{586}, \text{м}^{-1}$	Длительность затухания люминесценции [*] , мкс	Квантовый выход люминесценции η	Длительность затухания τ , мкс	Показатель преломления	
					n_{589}	n_{1060}
ГЛС-1	190±15	450/390	0,78	480	1,534	1,521
ГЛС-2	185±15	610/480	0,70	525	1,528	1,518
ГЛС-3	470±50	470/330	0,49	360	1,528	1,518
ГЛС-5	100±15	800/700	–	–	1,545	1,533
ГЛС-6	175±15	790/610	0,75	650	1,550	1,537
ГЛС-7	280±50	570/490	0,61	510	1,554	1,542
ГЛС-8	450±50	420/320	0,37	320	1,560	1,547
ГЛС-9	400±50	–/–	0,58	430	1,527	1,516
ГЛС-10	210±15	510/500	0,62	510	1,546	1,535
ГЛС-14	410±50	510/380	0,55	380	1,536	1,524
ГЛС-21	185±15	320/280	0,73	280	1,593	1,582
ГЛС-22	260±15	320/280	0,74	300	1,593	1,582
ГЛС-23	460±50	260/220	0,60	240	1,593	1,582
1710-24	770±50	220/150	0,44	190	1,592	1,582

* В числителе приведены номинальное значение, а в знаменателе – минимальное.

Таблица 7.79. Физико-химические свойства неодимовых стекол

Марка стекла	$N_{\text{Nd}}^{3+} \times 10^{26} \times 10^{-3}, \text{м}^{-3}$	$\text{Nd}_2\text{O}_3, \%$ (мас.)	$\gamma, \text{т/м}^3$, при 20 °С	E, ГПа	Коэффициент Пуассона	HV0,1	$\frac{\text{HV0,1}}{\text{HV0,1}_{\text{ГЛС-1}}}$	$\alpha \cdot 10^7, \text{°C}^{-1}$, при 20–180 °С	$c_p, \text{Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$		$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{°C)}$
									при 50 °С		
ГЛС-1	1,90	2,0	2,66	73,7	0,229	520	1,0	94	–	–	–
ГЛС-2	1,90	2,0	2,70	67,8	0,233	–	0,7	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	113	–	–	–
ГЛС-6	1,96	2,0	2,74	56,8	0,260	420	0,6	114	670	–	0,49
ГЛС-7	3,05	3,0	2,81	61,8	0,260	420	0,6	113	670	–	0,36
ГЛС-8	5,16	5,0	2,86	62,0	0,260	460	0,6	108	–	–	–
ГЛС-9	–	4,7	2,66	69,3	0,220	550	0,8	112	690	–	0,70

Марка стекла	$N_{Nd}^{3+} \times 10^{26} \frac{m^{-3}}{m}$	Nd ₂ O ₃ , % (масс.)	$\gamma, \tau/m^3$, при 20 °С	E, ГПа	Коэффициент Пуассона	HV0,1	$\frac{HV0,1}{HV0,1_{ГЛС-1}}$	$\alpha \cdot 10^7, ^\circ C^{-1}$, при 20–180 °С	при 50 °С	
									$c, Дж/(кг \cdot ^\circ C)$	$\lambda, Вт/(м \cdot ^\circ C)$
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	108	–	–
ГЛС-21	1,40	1,11	3,52	55,7	0,280	320	0,2	106	575	0,43
ГЛС-22	2,00	1,63	3,52	55,7	0,280	360	0,2	106	575	0,43
ГЛС-23	3,60	2,90	3,52	55,7	0,280	–	0,2	106	575	0,43
ГЛС-24	5,70	4,60	3,52	55,7	0,280	–	0,2	106	575	0,43

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 обозначения материалов, используемых в полупроводниковых лазерах, определены ОСТ 11.397.831–83. Наиболее широко в полупроводниковых лазерах применяют 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 с требуемыми характеристиками и перестраиваемой частотой излучения большое значение имеют материалы, позволяющие управлять лазерным излучением.

В качестве материалов для призм в дальней ультрафиолетовой области используют фтористый барий BaF₂, флюорит CaF₂, фтористый литий LiF и др.; в ближней ультрафиолетовой области чаще всего применяют кристаллический кварц; в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах – различные флинты, рутил TiO₂, титанат стронция SrTiO₃; в инфракрасной области ($\lambda > 2 \dots 3$ мкм) – диэлектрические и полупроводниковые кристаллы LiF, CaF₂, BaF₂, Ge, Si и др.

Для управления лазерным излучением широко используют 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 кристаллы дигидрофосфата калия KH₂PO₄ (ОСТ 11.397.831–83) и его аналоги: дигидрофосфат аммония NH₄H₂PO₄, дидейтерофосфат калия K₂PO₄, дигидрофосфат рубидия RbH₂PO₄ и ряд других.

Кристаллы дигидрофосфата калия выращивают в виде блоков. Изделия из этих кристаллов в виде прямоугольных призм, каждый из размеров которых может изменяться от 1 до 150 мм, применяют для изготовления электрооптических затворов и устройств сканирования луча на поперечном и продольном электрооптическом эффекте.

7.11. Материалы для высокотемпературных электродов различного назначения

Высокотемпературные электроды в зависимости от назначения подразделяют на две группы: самокалящиеся электроды, в которых осуществляется дуговой (или искровой) газовый разряд, и электроды различных электронных приборов. Условия работы электродов этих двух типов имеют некоторые различия.

Самокалящиеся электроды применяют в основном при электродуговой сварке и плавке в среде защитных газов, а также в азот- и углеродсодержащей атмосферах, в плазматронах и в высокоинтенсивных источниках света. Дуговой разряд в этих случаях имеет достаточно высокую силу тока ($I > 1$ кА), относительно низкие значения напряжения горения и катодного падения потенциала (< 20 В). Высокие значения плотности тока у поверхности катода (10^6 А/см²) и температуры газоразрядной плазмы электрической дуги (до 50000 К) приводят к исключительно большим нагрузкам электродов.

В отличие от самокалящихся электродов, электродные материалы в электронных приборах работают при температурах ниже 3000 К в условиях глубокого вакуума или в парах цезия, бария и других элементов. При работе через электроды могут проходить электрические токи до 1 кА, возникать кратковременные перегревы и охлаждения, происходить контакт с материалами других узлов прибора.

Электродные материалы в этих условиях должны обладать высокими эмиссионными свойствами, низкой упругостью пара, хорошей формоустойчивостью при высоких температурах и ударных нагрузках, быть химически нейтральными в отношении газов, выделяющихся в процессе работы прибора в целом.

Высокие значения эрозионной стойкости, прочности при высоких температурах, комплекс теплофизических характеристик определяют широкое использование тугоплавких металлов в качестве основы электродных материалов различного назначения (табл. 7.80). В табл. 7.81 приведены основные материалы для высокотемпературных электродов [34] и области их применения.

Таблица 7.80. Основные композиции на основе тугоплавких металлов для производства высокотемпературных электродов различного назначения [2, 5]

Композиция	Основа	Присадка
Металл – оксид металла	W, Mo, Re, W–Mo, W–Re, W–Mo–Re, Mo–Re	K ₂ O, Cs ₂ O, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , B ₂ O ₃ , Sc ₂ O ₃ , ThO ₂ , Y ₂ O ₃ , La ₂ O ₃ , ZrO ₂ , HO ₂
	Ta, Nb, Ta–Nb, Ta–Nb–W	Y ₂ O ₃ , Nb ₂ O ₅ , Ta ₂ O ₅ , BaO, CaO, MgO, ThO ₂ , Y ₂ O ₃
Металл – металл	W, Mo, Re, W–Re, Ta, Nb, Ta–Nb	Th, Y, La, Ce, Fe, Ni, Co, Ta, Nb, Mo, W, Zr
Металл – металлоподобное соединение	W, Mo, Re, W–Re, Ta, Nb	LaB ₆ , YB ₆ , ZnC, HfC
Металл – химическое соединение	W, Mo, Re, W–Mo, W–Re, W–Ni	Алюминаты и алмосиликаты бария, вольфраматы, тангалаты

Таблица 7.81. Основные материалы для высокотемпературных электродов и области их применения [34]

Материал	Область применения
<p>Вольфрам: марок В4 (без присадок)</p> <p>марок ВА (с кремнeshелочной и алюминиевой присадками)</p> <p>марок ВМ (с кремнeshелочной и ториевой присадками)</p> <p>марок ВТ7, ВТ10, ВТ15, ВТ50 (с присадкой диоксида тория)</p> <p>марок ВИ (с присадкой оксида иттрия)</p> <p>марок ВЛ (с присадкой оксида лантана)</p>	<p>Электрические контакты, катоды некоторых типов газоразрядных приборов и других высокотемпературных деталей</p> <p>Спираль мощных и специальных ламп накаливания, катоды, подогреватели мощных электронных приборов и другие детали, работающие при температурах до 2900 °С</p> <p>Спираль специальных ламп накаливания и другие детали, работающие при температуре до 2100 °С в условиях повышенных механических нагрузок (ударов и вибраций)</p> <p>Катоды электронных и газоразрядных приборов, крючки и пружины генераторных ламп и нерасходуемых сварочных электродов</p> <p>Нерасходуемые сварочные электроды, электроды импульсных приборов</p> <p>Нерасходуемые сварочные электроды и катоды плазматронов</p>
<p>Молибден: марок МЧ (чистый, без присадок)</p> <p>марок МК (с кремнeshелочной присадкой)</p> <p>марок МС (с присадкой кобальта)</p>	<p>Катоды некоторых электровакуумных приборов, сеток и кернов спиральных подогревателей радиоламп, кернов спиралей и крючков ламп накаливания</p> <p>Керны оксидных катодов некоторых газоразрядных приборов и других деталей, подвергающихся нагреву выше 1200 °С</p> <p>Катоды электровакуумных приборов</p>
<p>Рений марок РЧ (без присадок)</p>	<p>Катоды масс-спектрометров, электрических контактов и других деталей</p>
<p>Тантал марок ТЧ (без присадок) и Т (до 3 % Nb)</p>	<p>Катоды прямого и косвенного накала, аноды и другие детали электровакуумных приборов</p>
<p>Сплавы: ВР-5 ВР-10, ВР-20 (вольфрама с рением)</p> <p>ВАР-5, ВР-10 (вольфрама с рением, легированные кремнeshелочной и алюминиевой присадками)</p> <p>ВР10Т2, ВР20Т2 (вольфрама с рением, легированные присадкой диоксида тория)</p> <p>марок ВНБ (вольфрама с никелем и барием)</p> <p>МВ50 (молибдена с вольфрамом)</p> <p>МР50 (молибдена с рением)</p> <p>ТН-20, ТН-50, ТН-80 (тантала с ниобием)</p>	<p>Прямочанальные катоды, подогреватели и сетки электронных приборов, требующих материала с большой прочностью при высоких температурах</p> <p>Прямочанальные катоды и подогреватели радиоламп, требующие материала с более высокой температурой рекристаллизации, чем сплавы марок ВР</p> <p>Катоды электронных приборов</p> <p>Электроды импульсных приборов и холодных катодов газоразрядных приборов</p> <p>Некоторые типы электродов, диаметр которых не менее 0,07 мм</p> <p>Высокотемпературные электроды, работающие в углеродсодержащих средах</p> <p>Электроды, в которых тантал можно заменить на его сплавы с ниобием</p>

В табл. 7.82, 7.83 приведены составы и механические свойства некоторых сплавов тугоплавких металлов, применяемых для изготовления высокотемпературных электродов различного назначения.

Таблица 7.82. Составы сплавов тугоплавких металлов [34]

Марка сплава	Легирующие добавки, % (мас.)	Марка сплава	Легирующие добавки, % (мас.)
	<i>Сплавы вольфрама</i>		<i>Сплавы вольфрама</i>
BP5	5Re	BT15	1,5ThO ₂
BP10	10Re	BL15	1,5La ₂ O ₃
BP20	20Re	BI15	1,5Y ₂ O ₃
BAР5	5Re		<i>Сплавы молибдена</i>
BAР10	10Re	MB50	50W
BAР10Т2	10Re, 2ThO ₂	MP50	50Re
BAР20Т2	20Re, 2ThO ₂		<i>Сплавы тантала с ниобием</i>
BAМ5	5Mo	ТН20	20Nb
BT7	0,7ThO ₂	ТН50	50Nb
BT10	1,0ThO ₂	ТН80	80Nb

Примечание. Сплавы вольфрама марок BAР и BAМ дополнительно легируют кремнезельной и алюминиевой присадками (< 1 % (мас.)).

Таблица 7.83. Влияние температуры отжига на механические свойства проволоки диаметром 0,1 мм из сплавов тугоплавких металлов [34]

Марка сплава	$t_{отж}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta, \%$	Марка сплава	$t_{отж}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta, \%$
BA	1750	2400	1,5–2,0	BT15*	1300	2400	1,5
	1950	2200	2		1600	1650	1,5
	2154	1850	2		2200	1650	1,5
BAР5	1750	1900	5–7	MЧ	1300	800	12–14
	1950	1850	7–10		1450	800	8–11
	2150	1690	19–20		1650	750	7
BP5	1750	1800	12–14	MP50	1300	1750	2
	1950	1750	2–4		1450	1600	11–13
	2150	1500	1–2		1650	1450	14–15

* Диаметр проволоки 0,15 мм.

7.12. Деформированные заэвтектические силумины

Среди многообразия алюминиевых конструкционных сплавов, применяемых в самых различных отраслях машиностроения, в последнее время пристальное внимание привлекают сплавы системы Al–Si с концентрацией кремния значительно выше эвтектической. Эти, как правило, литейные сплавы содержат 17–25 % Si и ряд других легирующих элементов (Cu, Ni, Ti и др.).

Заэвтектические силумины обладают всеми положительными свойствами алюминиевых сплавов – малой плотностью при удовлетворительной прочности и высокой коррозионной стойкостью; они немагнитны, хорошо свариваются и склеиваются, сохраняют прочность и пластичность при пониженных, вплоть до криогенных, температурах. В то же время заэвтектические силумины имеют ряд специфических свойств, которые отличают их от обычных алюминиевых сплавов: пониженный коэффициент термического расширения, высокий модуль упругости, повышенная износостойкость в трущихся парах и другие, важные в практическом отношении характеристики.

Заэвтектические силумины можно рассматривать в качестве естественных композиционных материалов, имеющих двухфазную структуру, состоящую из пластичной эвтектической матрицы и хрупких первичных кристаллов кремния размером ≤ 150 мкм, а также кристаллов алюминидов железа, титана и циркония. Как правило, изделия из заэвтектических силуминов получают методами фасонного литья или жидкой штамповки, так как они имеют пониженную пластичность вследствие формирования крупных кристаллов первичного кремния, распределенных в матричной структуре сплава. Чтобы перейти к классической схеме производства деформированных полуфабрикатов через слиток непрерывного литья, необходимо было измельчить избыточные (первичные) кристаллы кремния до размеров, позволяющих повысить технологическую пластичность силумина. Традиционными методами модифицирования структуры заэвтектических силуминов и измельчения первичных кристаллов кремния путем введения в шихту небольших добавок фосфора ($\leq 0,1$ %) удавалось уменьшить размеры первичных кристаллов кремния до 100 мкм и менее [39]. Это позволяло получать отливки с удовлетворительной пластичностью ($\delta \leq 2,0$ %), однако для формирования слитков методом непрерывного литья такой пластичности было недостаточно.

Новая технология представляла собой комплексную модифицирующую обработку расплава – введение модификатора лигатурой Al–Fe–P или Cu–P и ультразвуковую обработку потока расплава, поступающего в кристаллизатор непрерывного литья (рис. 7.6) [24]. Достижимое при этом измельчение структуры слитка и повышение его пластичности ($\delta \geq 3$ %) обеспечивало не только отливку слитков без трещин, но и последующее их деформирование методами штамповки и горячего прессования.

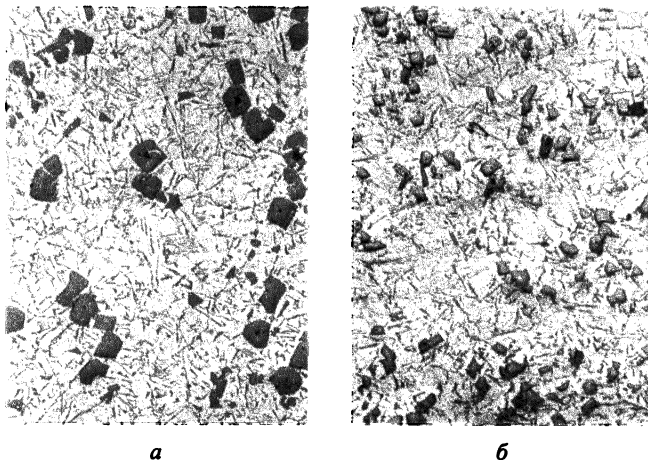


Рис. 7.6. Влияние комплексной модифицирующей обработки расплава на изменение структуры слитка диаметром 112 мм заэвтектического силумина марки 01390. $\times 100$:

a – структура немодифицированного слитка; *б* – структура после комплексного модифицирования с применением ультразвуковой обработки потока расплава

Применительно к этой технологической схеме получения деформированных полуфабрикатов были разработаны и паспортизированы три марки деформируемых заэвтектических силуминов [8, 49]. Это не упрочняемые термической обработкой сплавы 01390 и 01391 и упрочняемый путем закалки и старения сплав 01392 (табл. 7.84). Сплавы 01390 и 01392 получали простым синтезом алюминия с кремнием. Для сплава 01391 использовали более дешевый метод – разбавление алюминием высококремнистой лигатуры АК90 (Al–40 % Si) производства Запорожского алюминиевого комбината, получаемой в дуговой печи способом углетермического восстановления дешевого местного сырья (нефелинов, алунитов, каолинов и др.).

Таблица 7.84. Химический состав деформированных заэвтектических силуминов (остальное Al), % (мас.)

Марка сплава	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Zr	Fe	P	Прочие
01390	17–19	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	0,3–0,8	$\leq 0,15$	–	$\leq 1,5$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
01391	17–20	$\leq 0,5$	$\leq 0,2$	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$	$\leq 0,3$	$\leq 1,5$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
01392	17–19	3,0–3,5	0,3–0,5	0,1–0,3	$\leq 0,15$	–	$\leq 0,7$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$

Исследования паспортных характеристик заэвтектических силуминов 01390, 01391 и 01392 [8, 49] показали, что эти сплавы не теряют механических свойств при пониженных температурах (до -70°C), что очень важно при применении деформированных полуфабрикатов из них (трубы и др.) в условиях Крайнего Севера.

Завтетктические силумины имеют высокую коррозионную стойкость в среде сероводорода, при испытании на питинговую и общую коррозию в атмосфере, а также на коррозионное растрескивание (табл. 7.85). Они прекрасно свариваются методами аргонодуговой и точечной сварки. По характеристикам свариваемости (горячеломкость, прочность, угол загиба и др.) силумины превосходят один из лучших свариваемых алюминиевых сплавов АМг6 (табл. 7.86). Завтетктические силумины подвергают анодированию с получением темно-серого цвета с толщиной пленки 16–20 мкм.

Таблица 7.85. Коррозионная стойкость завтетктических силуминов 01390, 01391 и 01392

Характеристика	01390	01391	01392
Питинговая коррозия за 30 сут: глубина поражения, мм	0,28	0,16	0,47
потеря массы, г/(м ² ·ч)	0,0465	0,0559	0,065
балл	6	6	6
Общая коррозия за 30 сут: глубина поражения, мм	0,07	0,09	0,3
потеря массы, г/(м ² ·ч)	0,046	0,09	0,048
балл	7	6	6
Коррозионное растрескивание	Не чувствителен до 0,9 $\sigma_{0,2}$ в течение 30 сут	Не чувствителен до 0,9 $\sigma_{0,2}$ в течение 30 сут	Не чувствителен до 0,6 $\sigma_{0,2}$ в течение 30 сут
σ_b , МПа	18,9–21,3	14,3–16,5	22,8–25,6
δ , %	3,0	3,0	2,0
Расслаивающая коррозия, балл	6	6	6
Стойкость в среде сероводорода и нефти	Высокая	Высокая	Удовлетворительная

* После испытаний на коррозионное растрескивание.

Таблица 7.86. Показатели свариваемости завтетктических силуминов 01390, 01391 и 01392 и сплава АМг6

Показатель	01390	01391	01392	АМг6
<i>Аргонодуговая сварка плавлением</i>				
Средняя длина горячих трещин, мм, при сварке: без присадочной проволоки	0	0	0	28,8–46,9
с присадочной проволокой	0	0	0	5,5–21,7
Прочность сварного соединения σ_s , МПа	137–162	150–160	168–185	–
Ослабление сварного соединения $\sigma_s^{св.ш}/\sigma_s$	0,62–0,77	0,78–0,82	0,52–0,58	–
Угол загиба, град: основного металла;	33–46	33–46	0	–
сварного соединения	18–25	24–43	6	–
<i>Контактная точечная сварка</i>				
Предел прочности, МПа: на срез	–	368–440	467	345
на отрыв	–	115–154	150	–

Физические и механические свойства деформированных заэвтектических силуминов 01390, 01391 и 01392 в сравнении со свойствами малолегированного алюминиевого сплава АД31 (система Al–Mg–Si) и литейного доэвтектического сплава АЛ9 средней прочности (система Al–Si–Mg) представлены в табл. 7.87. Как следует из таблицы, заэвтектические силумины по ряду характеристик выгодно отличаются как от малолегированных деформируемых алюминиевых сплавов типа АД31, так и от литейных алюминиевых сплавов типа АЛ9.

Таблица 7.87. Физические и механические свойства горячепрессованных прутков из сплавов 01390, 01391, 01392, АД31 и фасонных отливок из силумина марки АЛ9

Свойство	01390	01391	01392	АД31	АЛ9
γ , т/м ³	2,603	2,614	2,678	2,710	2,660
$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	17	17	18,8	23,4	24,3
$\sigma_{\text{в}}$, МПа	192	195	320	240	170
$\sigma_{0,2}$, МПа	156	155	260	200	120
δ , %	5,9	6,0	3,0	10	4,0
γ , %	6,5	10,0	4,3	–	–
KCU , кДж/м ²	4,6	5,1	2,8	5,0	≤ 3,0
E , ГПа	79,0	80,5	75,5	71,0	–
σ_{-1} , МПа	90	90	130	–	–
$\tau_{\text{ср}}$, МПа	–	120	240	–	–
Угол загиба (до разрушения), град	–	8,5	6,0	–	–
Твердость НВ	63	73	120	80	55

Структура заэвтектических силуминов с дисперсными включениями первичных кристаллов кремния может обеспечить прекрасную работу на износ, причем эта износостойкость обратно пропорциональна размерам кристаллов кремния.

Ниже приведены данные, характеризующие влияние размеров первичных кристаллов кремния в заэвтектических силуминах (15–20 % Si) на износ пары трения силумин – чугуна при абразивном изнашивании [39]:

Размер кристаллов Si, мкм	14,8	18,8	22,4	52,0	88,6	155
Износ, мг/ч:						
силумина	0,30	0,32	0,31	0,37	0,37	0,39
чугуна	1,25	1,55	1,34	1,84	1,95	2,24

Следовательно, чем в большей степени в результате применения той или иной технологии модифицирования удастся уменьшить размеры кристаллов кремния в матричной структуре силумина, тем большую износостойкость приобретают изделия из этого сплава [39].

В процессе получения штампованных и прессованных полуфабрикатов из заэвтектических силуминов не удастся дополнительно (по сравнению со слитком) измельчить структуру силумина. Поэтому для дальнейшего модифицирования их структуры и повышения комплекса механических свойств был выбран метод поперечно-винтовой прокатки на универсальном прокатном стане ПВП 20-60 [25]. Усложненная схема пластического деформирования с циклическим характером прилагаемых деформирующих напряжений и многократным нагружением в очаге деформирования позволили эффективно измельчить структуру заэвтектических силуминов [48].

При разработке технологии в целом и отдельных технологических параметров поперечно-винтовой прокатки слитков из труднодеформируемых заэвтектических силу-

минов были использованы результаты анализа трехмерного моделирования прокатки сплошной заготовки методом конечных элементов [22, 43].

Результаты моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки показали, что, во-первых, трехвалковая схема в отличие от двухвалковой способствует более равномерному пластическому деформированию по сечению заготовки и обеспечивает большую суммарную пластическую деформацию. Во-вторых, трехвалковая схема прокатки, особенно в сочетании с применением осевого подпора, приближается к схеме вестороннего сжатия, что, как известно, способствует повышенной пластичности даже труднодеформируемых сплавов. Наконец, было установлено, что при трехвалковой схеме прокатки возникающие радиальные растягивающие напряжения в 2–2,5 раза меньше аналогичных напряжений при двухвалковой схеме, причем располагаются они не строго в осевой зоне заготовки, как в двухвалковой схеме, а со сдвигом в сторону периферии заготовки, что очень важно для получения плотных изделий [23].

Таблица 7.88. Влияние температурно-скоростных параметров прокатки на механические свойства гомогенизированного слитка из сплава 01390

$t, ^\circ\text{C}$	v, c^{-1}	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$t, ^\circ\text{C}$	v, c^{-1}	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
		МПа		%				МПа		%	
20	0,005	185,5	143,5	4,6	7,3	400	0,005	31	26,5	17,6	37,1
	0,03	174,5	152	3,2	4,1			55,5	36	32,6	36
	0,3	—	—	—	—			60,5	39,5	27,6	30,6
300	0,005	80,5	67	12,2	18,7	450	0,005	21	18	28	47,5
	0,03	97	68	12,4	15			43	31	32	34,3
	0,3	105,5	74	6	7,4			47,5	35	22,4	27
350	0,005	48,5	36	16	29,6	500	0,005	2	—	24,5	52
	0,03	74	51	19,6	26,1			28,5	24,5	38,2	50,2
	0,3	81,5	56	17,2	20,1			38	30,5	32,2	43,2

Для оптимизации процесса пластического деформирования труднодеформируемых заэвтектических силуминов на примере сплава 01390 были детально изучены реологические свойства слитков и прутков после поперечно винтовой прокатки с разными скоростями деформирования.

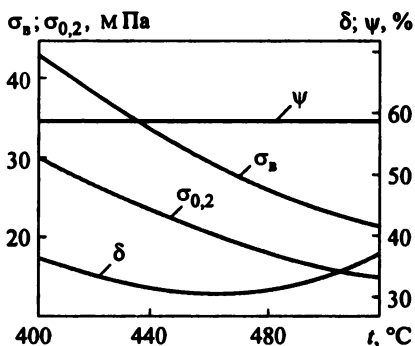


Рис. 7.7. Изменение механических свойств катаных прутков из сплава 01390 диаметром 80 мм в интервале температур горячей прокатки со скоростью 0,3 с⁻¹

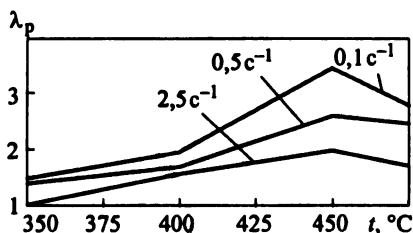
В табл. 7.88 представлены результаты испытаний образцов из сплава 01390 в литом состоянии, из которых следует, что наиболее благоприятные условия прокатки могут быть в интервале 400–450 °С. Именно в этом интервале независимо от скорости деформирования в наибольшей степени повышаются пластические характеристики слитка. Испытания на растяжение катаных прутков после поперечно-винтовой прокатки также подтверждают выбранный температурный интервал наибольшей пластичности слиткам сплава 01390 (табл. 7.89, рис. 7.7) [27].

Таблица 7.89. Влияние температурно-скоростных параметров прокатки на механические свойства катаного прутка из сплава 01390 диаметром 80 мм

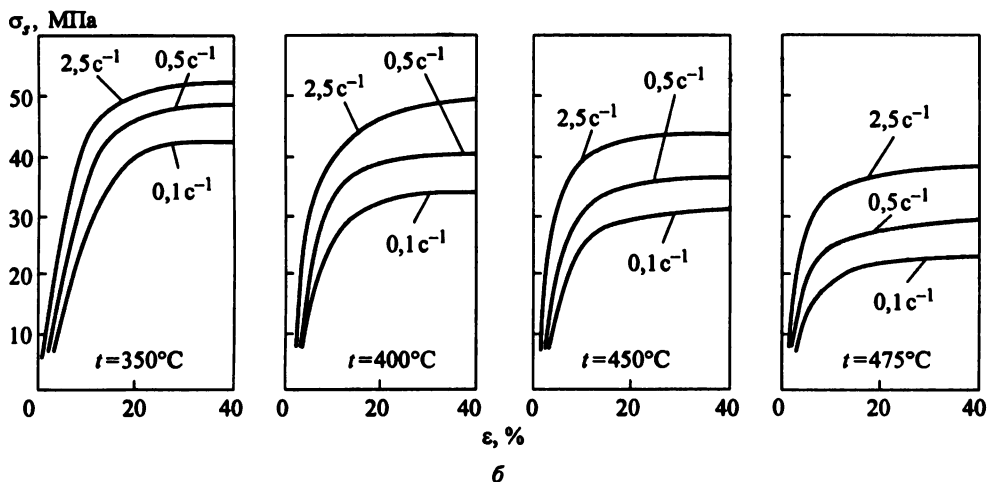
$t, ^\circ\text{C}$	v, c^{-1}	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$t, ^\circ\text{C}$	v, c^{-1}	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
		МПа		%				МПа		%	
20	0,005	183,4	120,0	10,4	12,5	450	0,005	23,0	21,1	29,8	48,0
	0,03	181,0	124,1	10,2	11,4		0,03	29,9	27,0	29,3	50,6
	0,3	166,8	112,9	8,0	10,0		0,3	39,2	30,7	30,0	60,5
400	0,005	32,8	29,0	39,2	48,0	500	0,005	19,2	17,2	26,0	50,4
	0,03	41,2	35,8	40,0	54,4		0,03	24,0	22,5	34,0	51,8
	0,3	53,0	39,7	36,2	54,2		0,3	31,4	25,5	37,0	59,6

Процесс поперечно-винтовой прокатки характеризуется сложным напряженным состоянием. Наиболее полно оценить реологические свойства материала применительно к этому виду деформирования можно, используя пластометрический метод оценки предельной пластичности λ_p и сопротивления пластическому деформированию σ_s при испытаниях на кручение в диапазоне реальных скоростей прокатки [24].

На рис. 7.8, а хорошо видно, что предельная пластичность λ_p имеет 450°C отчетливый максимум во всем исследованном диапазоне скоростей $0,1-2,5 \text{ c}^{-1}$. Кроме того, во



а



б

Рис. 7.8. Влияние температурно-скоростных параметров прокатки на предельную пластичность (а) и сопротивление деформированию (б) катаных прутков из заэвтектического силумина марки 01390 при испытании на кручение

всем исследованном температурно-скоростном диапазоне вначале происходит интенсивное деформационное упрочнение (в металле увеличивается плотность дислокаций и идет формирование субструктуры горячего наклепа), а с повышением температуры от 350 до 450–475 °С идет процесс динамического разупрочнения и кривые течения выходят на установившуюся стадию, которая характерна для процесса динамической полигонизации (рис. 7.8, б).

После прокатки гомогенизированных слитков со степенью деформации ≥ 40 –50 % удается существенно измельчить размеры кристаллов кремния в результате многократных циклических деформаций (табл. 7.90). При этом средние размеры первичных кристаллов кремния уменьшаются после прокатки до 10–15 мкм, а максимальные размеры не превышают 30–40 мкм, т. е. уменьшаются по сравнению с аналогичными размерами в исходном модифицированном слитке более чем в два раза.

Таблица 7.90. Влияние степени деформации при поперечно-винтовой прокатке на изменение размеров кристаллов первичного кремния в прутках из сплавов 01390 и 01391

Марка сплава	Вид заготовки	Диаметр слитка/прутка, мм	Степень деформации, %	Размер кристалла Si, мкм	
				средний	максимальный
01390	Слиток	100/100	–	35/20	100/50
	Пруток	70/70	51/51	15/10	20–30/20–30
	»	60/60	64/64	15/10	20–30/20–30
01391	Слиток	100/100	–	40/30	100/60
	Пруток	60/70	64/51	15/10	40/40

Примечание. В числителе для слитка, полученного без модифицирования расплава, а в знаменателе после модифицирования.

Детальный металлографический анализ структуры прутков диаметром 14–92 мм из сплава 01390 после поперечно-винтовой прокатки показывает (рис. 7.9–7.11, табл. 7.91),

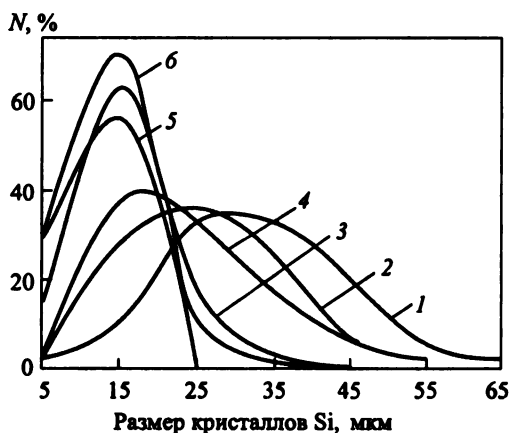


Рис. 7.9. Относительное распределение N по размерам первичных кристаллов кремния в слитке диаметром 112 мм (1) и в катаных прутках диаметром 92 (2), 80 (3), 50 (4), 28 (5) и 14 мм (6) после поперечно-винтовой прокатки

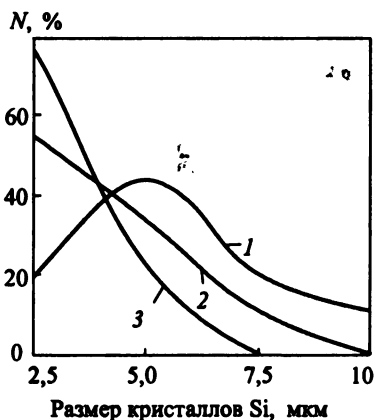


Рис. 7.10. Относительное распределение по размерам вторичных кристаллов кремния в слитке диаметром 112 мм (1) и в катаных прутках диаметром 70 (2) и 14 мм (3) после поперечно-винтовой прокатки

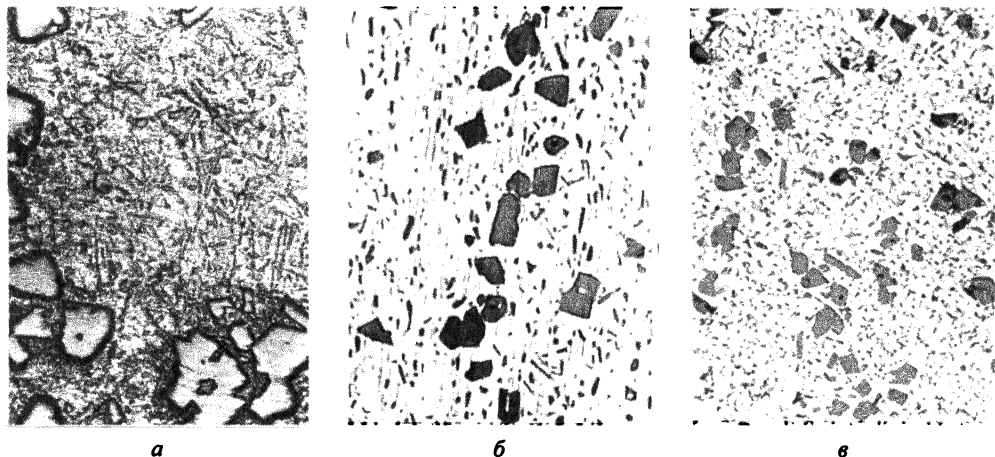


Рис. 7.11. Микроструктуры эвтектической матрицы слитка диаметром 112 мм (а) и катаных прутков диаметром 70 (б) и 14 мм (в) после поперечно-винтовой прокатки. $\times 400$

что прокатка оказывает большое влияние на измельчение первичных и вторичных (эвтектических) кристаллов кремния. Если в процессе прокатки первичные кристаллы по мере увеличения степени деформации ($> 40\text{--}50\%$) уменьшаются в 2–3 раза, то вторичные кристаллы вследствие ускорения диффузионных процессов при горячей деформации изменяют также и форму – становятся вместо пластинчатых глобулярными.

Таблица 7.91. Влияние степени деформации на структуру вторичных кристаллов кремния

Вид заготовки	d , мм	ϵ , %	Морфология вторичных кристаллов кремния
Слиток	112	–	Кристаллы вытянутой (пластинчатой) формы
Пруток после поперечно-винтовой прокатки	92	32	Смесь кристаллов пластинчатой и глобулярной формы
	70	49	Кристаллы преимущественно глобулярной формы
	28	93	Кристаллы только глобулярной формы
	14	98,5	То же

Измельчение структуры заэвтектических силуминов после поперечно-винтовой прокатки заметно влияет на рост механических свойств самых различных деформированных полуфабрикатов. На рис. 7.12 показана структура прошитой гильзы (трубы) из сплава 01390, полученной поперечно-винтовой прокаткой.

В табл. 7.92 даны сводные физико-механические свойства деформированных полуфабрикатов из заэвтектического силумина 01390, содержащего 18 % Si, после горячего прессования и горячей поперечно-винтовой прокатки. Отчетливо видны преимущества катаного прутка по сравнению с прессованными изделиями.

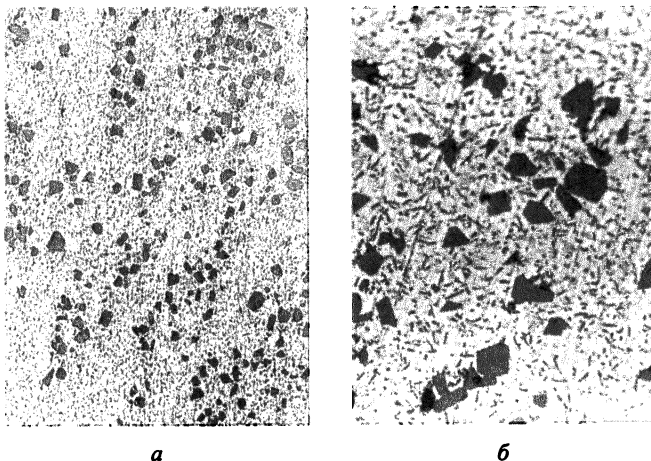


Рис. 7.12. Микроструктура прошитой гильзы из сплава 01390:
 а – $\times 100$; б – $\times 400$

Таблица 7.92. Физические и механические свойства слитка и деформированных полуфабрикатов из заэвтектического силумина марки 01390

Изделие	γ , т/м ³	σ_a	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	НВ	КСУ, МДж/м ²	$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	E, ГПа
		МПа		%					
Слиток, d = 112 мм	2,603	174	152	3,2	4,1	60	–	17	79
Прессованный пруток, d = 60 мм	2,603	200	110	3,5	6,0	60	0,46	17	79
Катаный пруток, d = 80 мм	2,603	181	124	11	10	60	0,46	17	79
Прошита гильза, 79 × 16 мм	2,603	207	138	8,6	17,8	60	–	17	79

Заэвтектические силумины можно рекомендовать для применения в самых различных отраслях промышленности, в частности для производства различной номенклатуры труб для нефтегазового комплекса и строительства. Использование этих материалов в нефтегазовом комплексе и строительстве может дать огромные преимущества перед применяемыми в настоящее время сталями для северных районов России, где крайне важными становятся такие свойства заэвтектических силуминов, как хладноломкость, отличная свариваемость и коррозионная стойкость в среде нефти и сероводорода. Для районов Крайнего Севера большое значение приобретают также транспортные издержки, которые значительно сокращаются благодаря уменьшению удельных характеристик конструкций нефтегазового комплекса более чем в 3 раза при использовании алюминиевых сплавов вообще и заэвтектических силуминов в частности. Не менее перспективно применение прутков и труб для изотермической штамповки различных трущихся деталей в автомобилестроении – поршней и гильз нагруженных двигателей внутреннего сгорания, тормозных цилиндров и др. Здесь огромное значение приобретают такие характеристики заэвтектических силуминов, как пониженный на 25 % коэффициент линейного расширения и высокая износостойкость.

Список литературы

1. *Аморфные магнитомягкие сплавы для устройств РЭА* / Р. Д. Нуралиева, Д.Г. Вербицкий, С.П. Поляков и др. // Труды ЦНИИ «Электроника». 1984. Вып. 12.
2. *Амосов В.М., Карелин Б.А., Кубышкин В.В.* Электродные материалы на основе тугоплавких металлов. М.: Metallurgy, 1976.
3. *Аникеев Ю.Г., Жаботинский М.Е., Кравченко В.Б.* Лазеры на неорганических жидкостях. М.: Наука, 1986.
4. *Анохов С.П., Марусий Т.Я., Соскин М.С.* Перестраиваемые лазеры / Под ред. М.С. Соскина. М.: Радио и связь, 1982.
5. *Арзамасов В.Б.* Структура, свойства, термическая обработка и области применения высокотемпературных электродных материалов. М.: Машиностроение, 1992.
6. *Басов Н.Г., Елисеев П.Г., Попов Ю.М.* Полупроводниковые лазеры // УФН. 1986. Вып. 1.
7. *Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.* Электротехнические материалы. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
8. *Пат. 2092604 РФ, МКИ⁶ С 22 С 21/04.* Гетерогенный сплав на основе алюминия / Г.И. Эскин, Д.Г. Эскин, Ю.П. Пименов и др.
9. *Головашкин А.И.* Сверхпроводники с необычными свойствами и возможности повышения критической температуры // УФН. 1986. Вып. 2. № 149.
10. *Головин С.А., Пушкар А.А., Левин Д.М.* Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Metallurgy, 1987.
11. *Елисеев П.Г.* Введение в физику инжекционных лазеров. М.: Наука, 1983.
12. *Золотухин И.В.* Физические свойства аморфных металлических материалов. М.: Metallurgy, 1986.
13. *Калинин Н.Н., Скибинский Г.Л., Новиков П.П.* Электрорадиоматериалы. М.: Высш. шк., 1981.
14. *Каминский А.А.* Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975.
15. *Конструкционные материалы: Справочник* / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буже и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990.
16. *Кузьмиков Ю.С.* Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука, 1982.
17. *Лазерные фосфатные стекла* / Н.Е. Алексеев, В.П. Гапонцев, М.Е. Жаботинский и др. М.: Наука, 1980.
18. *Лазеры на алюминиевом гранате с неодимом* / Г.М. Зверев, Ю.Д. Голяев, Е.А. Шалаев, А.А. Шокин. М.: Радио и связь, 1985.
19. *Луццейкин Г.А.* Полимерные электреты. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1984.
20. *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.
21. *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.
22. *Панов Е.И.* Некоторые аспекты напряженно-деформированного состояния заготовки при поперечно-винтовой прокатке // Metallurg. 2003. № 12.
23. *Панов Е.И.* Поперечно-винтовая прокатка сплошной заготовки: радиальные напряжения // Metallurg. 2004. № 1.

24. *Панов Е.И., Эскин Г.И.* Исследования реологических свойств труднодеформируемого заэвтектического силумина марки 01390 при растяжении с целью оптимизации параметров поперечно-винтовой прокатки // Цветные металлы. 2004. № 7.
25. *Панов Е.И., Эскин Г.И., Восканьянц А.А.* Получение прутков повышенного качества из заэвтектических силуминов поперечно-винтовой прокаткой // *Металлург.* 2002. № 8.
26. *Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А. Фаттахов и др. М.: Радио и связь, 1982.*
27. *Пластометрические исследования предельной пластичности и сопротивления деформации при кручении заэвтектического силумина марки 01390 применительно к процессу поперечно-винтовой прокатки / Е.И. Панов, Г.И. Эскин, А.М. Галкин, А.О. Коньков // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2004. № 6.*
28. *Полупроводниковая электроника: Справочник / П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич и др. Киев: Наукова думка, 1975.*
29. *Порошковая металлургия: Справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысльский и др. / Под ред. И.М. Федорченко. Киев: Наукова думка, 1985.*
30. *Преображенский А.А., Бишард Е.Г.* Магнитные материалы и элементы. М.: Высш. шк., 1986.
31. *Прецизионные сплавы: Справочник / Под ред. Б.В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983.*
32. *Прохоров А.М.* Новое поколение твердотельных лазеров // УФН. 1986. Вып. 1. № 148.
33. *Сверхпроводящие соединения переходных металлов / Е.М. Савицкий, Ю.В. Ефимов, Н.Д. Козлова и др. М.: Наука. 1976.*
34. *Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов: Справочник / Под ред. Р.А. Нилендера. М.: Энергия, 1973.*
35. *Спеченные материалы для электротехники и электроники: Справ. изд-е / Г.Г. Гнезин, В.А. Дубок, Г.Н. Братерская и др. М.: Металлургия, 1981.*
36. *Сплавы для нагревателей / Л.Л. Жуков, И.М. Племянникова, М.Н. Миронова и др. М.: Металлургия, 1985.*
37. *Сплавы для термопар: Справ. изд-е / И.Л. Рогельберг, В.М. Бейлин. М.: Металлургия, 1983.*
38. *Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева, Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. Т. 3.*
39. *Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б.* Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977.
40. *Структура сверхпроводящих соединений. М.: Металлургия, 1983.*
41. *Судзуки К., Фузизумори Х. Хасимото К.: Аморфные металлы: Пер. с япон./ Под ред. Ц. Масумото. М.: Металлургия, 1987.*
42. *Тареев Б.М.* Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1982.
43. *Трехмерное конечно-элементное моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки. / Е.И. Панов, А.А. Восканьянц, А.В. Иванов и др. // Технология легких сплавов. 2001. № 5–6.*
44. *Физика сегнетоэлектрических явлений / Г.А. Смоленский, В.А. Боков, В.А. Исапов и др. Л.: Наука, 1985.*
45. *Физико-химические основы получения сверхпроводящих материалов / Под ред. Е.М. Савицкого. М.: Металлургия, 1981.*

46. *Электротехнические материалы*: Справочник / В.Б. Березин, Н.С. Прохоров, Г.А. Рыков, А.М. Хайкин. М.: Энергоатомиздат, 1983.

47. *Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости* / И.А. Глебов, Ч. Лаверник, В.Н. Шахтари. Л.: Наука, 1980.

48. Эскин Г.И., Панов Е.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов разной шихтовой основы // Цветные металлы. 2002. № 9.

49. Эскин Г.И., Пименов Ю.П. Коррозионно-стойкие свариваемые заэвтектические силумины для нефтегазового комплекса // Технология легких сплавов. 1997. № 6.

50. Eskin G.I. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts. B. Gordon & Breach Sciences Publishers, Amsterdam, 1998.

8. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

8.1. Материалы инструментов для обработки резанием

8.1.1. Быстрорежущие стали

Быстрорежущие стали благодаря специальному легированию и термической обработке имеют теплостойкость 580–670 °С и предназначены для изготовления инструмента для резания со скоростями до 50–60 м/мин [1, 3–5, 9]. Химический состав быстрорежущих сталей приведен в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Химический состав быстрорежущих сталей (ГОСТ 19265–73), % (мас.)

Марка стали	C	W	Mo	Cr	V	Co
11P3M3Φ2Б ^{*1} (ЭП893)	1,02–1,10	2,5–3,0	2,5–3,0	3,8–4,4	2,1–2,7	–
P2AM9K5 ^{*2}	1,00–1,10	1,5–2,0	8,0–9,0	3,8–4,4	1,7–2,1	4,7–5,2
P18	0,7–0,8	17,0–18,5	< 1,0	3,8–4,4	1,0–1,4	–
P6M5	0,8–0,88	5,5–6,5	5,0–5,5	3,8–4,4	1,7–2,1	–
P12Φ3 (ЭП597)	0,95–1,05	12,0–13,5	< 1,0	3,5–4,0	2,5–3,0	–
P6M5Φ3	0,95–1,05	5,7–6,7	5,5–6,0	3,8–4,3	2,2–2,6	–
P18Φ2K5	0,05–0,95	17,0–18,5	< 1,0	3,8–4,4	1,9–2,4	5,0–6,0
P9K5	0,9–1,0	9,0–10,5	< 1,0	3,8–4,4	2,0–2,6	5,0–6,0
P9M4K8 (ЭП688)	1,0–1,1	8,5–9,6	3,8–4,3	3,0–3,6	2,1–2,5	7,5–8,5
P6M5K5	0,80–0,88	6,0–7,0	4,8–5,3	3,8–4,3	1,7–2,2	4,8–5,3

Примечание. Все стали содержат остаточные элементы, % (мас.), не более: 0,5 Mn; 0,5 Si; 0,4 Ni; 0,03S; 0,03P, до 0,5 Co и до 1 % Mo.

^{*1} Сталь также содержит 0,05–0,10 % N и 0,05–0,20 % Nb. ^{*2} Сталь также содержит 0,05–0,10 % N.

При выборе быстрорежущей стали необходимо наряду с основными свойствами (теплостойкостью, твердостью, прочностью, теплопроводностью и др.) учитывать и технологические свойства, необходимые для экономичного изготовления инструмента: обрабатываемость давлением и резанием, сложность термической обработки, шлифуемость.

Обрабатываемость давлением определяется запасом пластичности и твердостью; обрабатываемость резанием – твердостью в отожженном состоянии (в состоянии поставки); шлифуемость готового инструмента – твердостью мартенсита, наличием в структуре закаленной стали фаз повышенной твердости (карбиды) и высокой пластичности (остаточный аустенит).

Для инструментальных сталей характерно сильное влияние распределения второй фазы в структуре на свойства. Карбидная и интерметаллидная неоднородность, увеличивающаяся с ростом диаметра проката (уменьшения степени пластической деформации), снижают прочность, пластичность и ударную вязкость тем значительнее, чем больше количество второй фазы.

Карбидную неоднородность быстрорежущих сталей оценивают баллами стандартной шкалы согласно ГОСТ 19205–73, прутки и полосы разделяют на две группы. Диаметр или толщина заготовок I группы составляет 80...200 мм, II группы – 20...150 мм (табл. 8.2).

Таблица 8.2. Карбидная неоднородность быстрорежущих сталей, баллы, не более [3, 4]

Диаметр или сторона, мм	Группа		Диаметр или сторона, мм	Группа	
	I	II		I	II
< 20	–	2	80–100	5	6
20–40	–	3	100–150	6	7
40–60	–	4	150–180	7	–
60–80	–	5	180–200	8	–

Вследствие значительного содержания карбидов быстрорежущие стали имеют ограниченную пластичность, поэтому их деформируют при высоких температурах (табл. 8.3).

Таблица 8.3. Температура горячего деформирования быстрорежущих сталей, °С [3, 4, 9]

Марка стали	Слитки		Заготовки	
	Нагрев	Окончание обработки	Нагрев	Окончание обработки
P18; P6M5	1 150–1 200	975–1 000	1 140–1 180	900–920
P18Ф2K5	1 150–1 200	975–1 000	1 140–1 180	950–980
P9K5	1 150–1 200	975–1 000	1 140–1 180	900–920
P9M4K8Ф	1 130–1 150	980–1 010	1 140–1 160	940–970
P6M5K5	1 100–1 130	950–975	1 080–1 120	925–940

Для вязких сталей важнейшим механическим свойством является ударная вязкость, для износостойких – твердость и предел прочности при изгибе. Теплостойкость сталей определяет стойкость инструмента при эксплуатации. Свойства быстрорежущих сталей указаны в табл. 8.4, а области применения – в табл. 8.5.

Таблица 8.4. Режимы окончательной термической обработки и свойства быстрорежущих сталей [1,3–5,9]

Марка стали	НВ	Температура, °С		HRC ₂	σ _n , МПа	Красностойкость, °С(59HRC ₂)
		закалки	отпуска*			
11P3M3Φ2Б	255	1180–1210	540–560	63–64	3400–3800	620
P18	до 255	1270–1290	560–570	63–64	2600–3000	620
P6M5	255	1200–1230	540–560	64–65	3200–3600	620
P12Φ3	269	1230–1260	550–570	64–66	2400–2800	630
P9Φ5	269	1230–1250	560–580	63–64	2400–2800	620
P6M5Φ3	269	1200–1230	540–560	64–66	2700–3100	625
P18Φ2K5	285	1260–1290	560–580	66–67	1800–2200	640
P9K5	269	1210–1240	560–580	64–66	2700–2700	630
P9M4K8	285	1210–1240	550–570	66–68	2200–2600	630
P6M5K5	269	1210–1240	540–560	65–66	2600–3000	630
B11M7K23	32–38 HRC ₂	1270–1280	580–600	67–68	2500–2700	720

Примечание. Твердость НВ приведена после отжига, остальные свойства – после термической обработки.

* Как правило, проводят трехкратный отпуск с выдержкой 1 ч.

Таблица 8.5. Область применения быстрорежущих сталей [1, 3, 4, 9]

Марка стали	Назначение
P18	Черновой и чистовой режущий инструмент (фрезы, долбяки, протяжки, метчики, и т. п.) для обработки конструкционных сталей с σ _n ≤ 900...1000 МПа. Ввиду высокого содержания вольфрама целесообразно использовать только для изготовления инструмента высокой точности, когда применение сталей других марок ограничивается опасностью пережогов на режущей кромке при шлифовке и заточке
P6M5, 10P6M5	Все виды режущего инструмента для обработки на обычных скоростях резания углеродистых и среднелегированных конструкционных сталей с σ _n ≤ 900...1000 МПа; зуборезной и резборезной инструмента для обработки коррозионно-стойких сталей
11P3M3Φ2Б	Ножовочное полотно и другой инструмент (сверла, фрезы, метчики) для обработки углеродистых, низколегированных конструкционных сталей и серого чугуна
P12Φ3	Чистовой и получистовой инструмент (резцы, протяжки, развертки, фрезы) для обработки на средних режимах резания легированных сталей и сплавов, а также материалов с повышенными абразивными свойствамн
P6M5Φ3	Чистовой и получистовой инструмент (фасонные резцы, развертки, сверла, протяжки и др.) для обработки сталей и сплавов
P18Φ2K5	Получистовой и черновой инструмент (резцы, фрезы, сверла и т. п.) для обработки углеродных и легированных конструкционных сталей на повышенных режимах резания, а также конструкционных материалов с повышенной твердостью, коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов

Марка стали	Назначение
P9K5	Черновой и получистовой режущий инструмент (фрезы, долбяки, метчики и т. п.), предназначенный для обработки углеродистых и легированных конструкционных сталей на повышенных режимах резания, а также для обработки различных труднообрабатываемых материалов
P9M4K8	Инструменты (резцы, фрезы, зенкеры, метчики и т. п.) для обработки труднообрабатываемых материалов (жаропрочных сплавов, легированных конструкционных сталей с повышенной твердостью и т. п.), а также углеродистых и легированных сталей на высоких режимах резания. Целесообразно использовать в тех случаях, когда применение стали P6M5K5 недостаточно эффективно
P6M5K5	Черновой и получистовой инструмент (фрезы, долбяки, зенкеры и т. п.), предназначенный для обработки углеродистых и легированных конструкционных сталей на повышенных режимах резания, а также коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов
B11M7K23	Инструмент, предназначенный для обработки титана, его сплавов и труднообрабатываемых сплавов

* Имеет пониженную шлифуемость.

8.1.2. Спеченные твердые сплавы

Спеченные твердые сплавы – это композиции, состоящие из тугоплавких соединений (карбиды, карбонитриды переходных металлов IV–VI групп Периодической системы элементов) и связующей составляющей (сплавы с металлической связью) [2, 4, 7].

С учетом основных свойств каждого твердого сплава в зависимости от условий обработки резанием (скорости резания v , подачи S , глубины резания t , характера операции, состояния и характеристики обрабатываемого материала, типа формируемой стружки и др.) в соответствии с международным стандартом ИСО твердые сплавы разделяют на группы резания P, K и M. Внутри каждой группы твердые сплавы подразделяют на группы применения (по индексу вязкости) от 01 до 40 (50). Чем больше индекс подгруппы применения, тем ниже износостойкость твердого сплава и допустимая скорость резания, но выше прочность (ударная вязкость) и допустимая подача и глубина резания (табл. 8.6).

Таблица 8.6. Предпочтительные области применения твердых сплавов

Группа применения	Обрабатываемый материал. Тип стружки	Вид обработки	Условия применения
P01	Сталь. Сливная стружка	<i>Группа резания P</i>	
P10	То же	Чистовое точение, растачивание, развертывание	$S=0,1 \dots 0,3$ мм/об, $t=0,5 \dots 2$ мм
		Точение, нарезание резьбы, чистовое фрезерование, расверливание, растачивание	$S=0,2 \dots 0,5$ мм/об, $t=2 \dots 4$ мм

Группа применения	Обрабатываемый материал. Тип стружки	Вид обработки	Условия применения
<i>Группа резания Р</i>			
Р20	Сталь, ковкий чугун, цветной металл. Сливная стружка	Точение, фрезерование, чистовое строгание	$S=0,4...1$ мм/об, $t=4...10$ мм
Р25	Нелегированная, низко- и среднелегированная сталь	Точение, фрезерование	$S=0,4...1$ мм/об, $t=4...10$ мм
Р30	Сталь, ковкий чугун. Сливная стружка	Черновое точение, фрезерование, строгание	$S=1$ мм/об, $t=6...20$ мм
Р40	Сталь с включением песка и раковинами. Стружка надлома и сливная	Черновое точение, строгание в особо неблагоприятных условиях	—
Р50	Сталь средней или низкой прочности с включением песка и раковинами. Стружка надлома и сливная	Точение, строгание в особо тяжелых условиях, для инструмента сложной формы	—
<i>Группа резания М</i>			
М10	Аустенитные, жаропрочные и труднообрабатываемые стали и сплавы, серый, ковкий и легированный чугуны. Стружка надлома и сливная	Точение и фрезерование	$S=0,2...0,5$ мм/об, $t=2...4$ мм
М20	Жаропрочная сталь, труднообрабатываемые сплавы, серый и ковкий чугуны	Точение и фрезерование	$S=0,4...1$ мм/об, $t=4...10$ мм
М30	Аустенитная сталь, жаропрочные труднообрабатываемые стали и сплавы, серый и ковкий чугуны. Стружка надлома и сливная	Точение, фрезерование, строгание, в том числе в неблагоприятных условиях	$S=1$ мм/об, $t=6...20$ мм
М40	Низкоуглеродистая сталь пониженной прочности, автоматная сталь и другие металлы и сплавы. Стружка надлома и сливная	Точение, фасонное точение, отрезка преимущественно на станках-автоматах	—
<i>Группа резания К</i>			
К01	Серый чугун высокой твердости, алюминиевые сплавы с большим содержанием кремния, закаленная сталь, абразивные пластмассы, керамика, стекло. Стружка надлома	Чистовое точение, растачивание, фрезерование, шабрение	$S=0,1...0,3$ мм/об, $t=0,5...2$ мм

Группа применения	Обрабатываемый материал. Тип стружки	Вид обработки	Условия применения
		<i>Группа резания К</i>	
K05	Легированный чугун, закаленные, коррозионно-стойкие, высокопрочные и жаропрочные стали и сплавы. Стружка надлома	Чистовое и получистовое точение, растачивание, развертывание, нарезание резьбы	$S=0,2 \dots 0,5$ мм/об, $t=2 \dots 4$ мм
K10	Серый и ковкий чугуны повышенной твердости, закаленная сталь, алюминиевые и медные сплавы, стекло, керамика	Точение, растачивание, фрезерование, сверление	—
K20	Серый чугун, цветной металл, пластмасса. Стружка надлома	Точение, фрезерование, строгание, сверление, растачивание	$S=0,4 \dots 1$ мм/об, $t=4 \dots 10$ мм
K30	Серый чугун низкой твердости и прочности, сталь низкой прочности, цветной металл, пластмасса	Точение, фрезерование, строгание, сверление. Неблагоприятные условия обработки	$S \geq 1$ мм/об, $t=6 \dots 20$ мм
K40	Цветной металл, древесина, пластмасса. Стружка надлома	Точение, фрезерование, строгание	То же

Таким образом, малые индексы соответствуют чистовым операциям, когда от твердых сплавов требуется высокая износостойкость, а большие – черновым операциям, т. е. когда твердый сплав обладает высокой прочностью. В связи с этим каждая марка имеет свою предпочтительную область применения, в которой она обеспечивает максимальные работоспособность сплава и производительность процесса обработки.

По химическому составу твердые сплавы разделяют на четыре группы: вольфрамкобальтовые (WC–Co), титановольфрамкобальтовые (TiC–WC–Co), титанотанталовольфрамовые (TiC–TaC–WC–Co) и безвольфрамовые (БВТС).

По величине зерна карбида вольфрама вольфрамкобальтовые сплавы подразделяют на особомелкозернистые (ОМ, зерно < 1 мкм); мелкозернистые (М, зерно около 1 мкм); среднезернистые (С, зерно 1–2 мкм); крупнозернистые (В, зерно 2–5 мкм).

При замене тантала хромом твердый сплав маркируют на конце буквами «ХОМ».

Вольфрамкобальтовые сплавы (ВК) входят в группу резания К и М. Титановольфрамкобальтовые сплавы (ТК) предназначены для инструмента при обработке резанием сталей с образованием стационарных типов стружек – сливной и элементной. Титанотанталовольфрамовые сплавы (ТТК) входят в группы резания Р, М, К. Безвольфрамовые твердые сплавы состоят из карбидов, карбонитридов, нитридов тантала и связующей фазы на основе никеля.

Химический состав твердых сплавов, выпускаемых в России, и их основные свойства приведены в табл. 8.7, а области применения – в табл. 8.8.

Таблица 8.7. Химический состав и свойства твердых сплавов (ГОСТ 3882–74)

Твердый сплав	Содержания, %				σ_n , МПа, не менее	γ , т/м ³	HRA, не менее
	WC	TiC	TaC	Co			
ВК3	97	–	–	3	1176	15,0–15,3	89,0
ВК3-М	97	–	–	3	1176	15,0–15,3	91,0
ВК4-В	96	–	–	4	1519	14,9–15,2	89,0
ВК6	94	–	–	6	1519	14,6–15,0	88,5
ВК6-В	94	–	–	6	1660	14,8–15,1	87,5
ВК6-М	94	–	–	6	1421	14,8–15,1	90,0
ВК6-ОМ	92	–	2	6	1274	14,7–15;0	90,5
ВК8	92	–	–	8	1666	14,4–14,8	87,5
ВК10	90	–	–	10	1764	14,2–14,6	87,0
ВК10М	90	–	–	10	1617	14,3–14,6	88,0
ВК10-ХОМ	88	–	2	10	1600	14,3	89,0
ВК15	83	–	2	15	1700	13,8	86,0
Т30К4	66	30	–	4	980	9,5–9,8	92,0
Т15К6	79	15	–	6	1176	11,1–11,6	90,0
Т14К8	78	14	–	8	1274	11,2–11,6	89,5
Т5К10	85	6	–	9	1421	12,4–13,1	88,5
ТТ8К6	84	8	2	6	1323	12,8–13,3	90,5
ТТ10К8Б	82	3	7	8	1617	13,5–13,8	89,0
ТТ20К9	67	9,4	14,1	9,5	1470	12,0–13,0	91,0
ТТ7К12	81	4	3	12	1660	13,0–13,3	87,0
Т8К7	85	8	–	7	1550	12,0–13,0	91,0
МС 101	–	–	–	–	500	6,27–6,48	92,5
МС 111	–	–	–	–	1150	10,22–10,38	92,0
МС 121	–	–	–	–	1200	11,60–11,79	91,5
МС 137	–	–	–	–	1400	11,68–11,84	91,5
МС 131	–	–	–	–	1400	11,35–11,51	91,5
МС 146	–	–	–	–	1800	13,04–13,2	90,5
МС211	–	–	–	–	1500	14,7–14,86	92,5
МС221	–	–	–	–	1400	13,81–13,97	92,0
МС 241	–	–	–	–	2000	14,15–14,25	88,0
МС 301	–	–	–	–	1150	14,95–15,11	93,0
МС 306	–	–	–	–	1250	14,74–14,94	92,5
МС 312	–	–	–	–	1300	12,79–12,95	92,5
МС 313	–	–	–	–	1300	14,74–14,94	92,0
МС 318	–	–	–	–	1500	12,80–12,96	92,0
МС 321	–	–	–	–	1350	14,64–14,86	91,5
МС 347	–	–	–	–	1950	14,25–14,49	89,0

Таблица 8.8. Группы применения твердых сплавов [2, 4]

Марка сплава	Группа применения
T30K4	P01
T15K6, MC 111	P10
T14K8, MC 121	P20
TT20K9, TT21K9, MC 137	P25
T5K10, TT10K8-Б, MC 131	P30
T5K12, TT7K12, MC 146	P40
TT7K12	P50
ВК60М, MC 313	M05
ВК6М, ТТ8К6, MC 211	M10
ТТ10К8-Б, MC 221, MC 321	M20
ВК10-М, ВК10-ОМ, ВК8	M30
ВК10-ОМ, ТТ7К12, ВК15-ОМ, ВК15-ХОМ, MC 241, MC 146	M40
ВК3, ВК3-М, MC 301	K01
ВК6-ОМ, ВК6-М, MC 306	K05
ТТ8К6, ВК6-М	K10
MC 312, MC 313	K20
ВК4, ВК6, Т8К7, MC 318, MC 321	K25
ВК4, ВК8	K30
ВК8, ВК15, MC 347	K40

В табл. 8.9 приведены основные марки твердых сплавов, выпускаемых Московским комбинатом твердых сплавов (МКТС) по закупленной у фирмы Sandvik Coromant технологии, а также их аналоги, выпускаемые фирмами Hertel и Sandvik Coromant. Состав и свойства безвольфрамовых твердых сплавов приведены в табл. 8.10.

Таблица 8.9. Основные марки твердых сплавов, выпускаемых на СП МКТС – Hertel, и их аналоги

Группа применения		СП МКТС- Hertel	Hertel	Sandvik Coromant	МКТС
основная	дополнительная				
		<i>Для точения</i>			
P10	P01	MP1	P10	SIP, S10T	MC111
P20	P10	MP2	P20	S2	MC121
P30	P20	MP3	P25	S4	MC131
P40	M40	MP4	PVA	S6	MC146
P25	K10, K20	MA1*	GP3, 13E	GC415, GC3015	MC2215*
P30	M20, M30	MA2*	–	GC425	MC1465*

Группа применения		СП МКТС- Hertel	Hertel	Sandvik Coromant	МКТС
основная	дополни- тельная				
<i>Для точения</i>					
P25	M10, K10	MT1*	CM2	GC425, GC225	MC2215*
P30	M25	MT2*	CM3, CM4	GC435	MC1465*
M20	M30	MM2	–	SH	MC221
K05	K10	MKO	KM1	N10	MC306
K10	K01, K20	MK1	K10	HIP	MC312
K20	M25	MK2	K20	H20	MC321
K15	K10, K20	MA3*	–	GC3015	MC3215
<i>Для фрезерования</i>					
P10	P01	MP1	P10	SIP	MC111
P40	M40	MP4	PVA	S6	MC146
P25	P20, P30	MP7	P2F	SM, SMA, SM30	MC137
P25	M10, K10	MF1*	CF3	GC120	MC2215*
P40	M35	MF2*	–	GC235	MC1465*
K10	K01, K20	MK1	K10	HIP	MC312
K15	K10, K25	MK8	KMH	HM	MC318
K20	K10, K25	MF3*	–	GC320	MC3215*

* Сплавы с износостойкими покрытиями.

Таблица 8.10. Основные составляющие и свойства
безвольфрамовых твердых сплавов [2, 4]

Марка сплава	Основа	Связка	γ , т/м ³	HRA	σ_n , МПа
ТН20	TiC	Ni–Mo	5,5	91,0	1050
КНТ16	TiCN	Ni–Mo	5,8	89,5	1200
ЛКЦ20	TiCN	Ni–Mo	5,8	88,0	1270
ТВ4	TiCN	Ni–Mo–W	6,6	89,0	1300

Сплав ТН20 (P01–P05) предназначен для чистового точения и фрезерования углеродистых и низколегированных сталей и в отдельных случаях серого чугуна при высокой скорости резания, небольших подачах и глубинах резания, а сплав КНТ-16 (P10–P15) – для получистового точения и фрезерования сталей при средних скорости и подаче. При тех же условиях, но увеличенных сечениях среза используют сплав ЛКЦ-20 (P15–P20) повышенной прочности по сравнению с КНТ-16. Мало-вольфрамовый твердый сплав ТВ4 (P20–P30) применяют для черного точения и фрезерования сталей.

Для улучшения режущих свойств инструмента используют твердые сплавы с покрытиями, полученными по разным технологиям (табл. 8.11).

Таблица 8.11. Марки твердых сплавов с покрытиями, нанесенными различными способами

Марка сплава	Марка твердого сплава-основы	Покрытие	Способ нанесения покрытия*	Группа применения
MC2210	MC221	TiC	GC	P10–P30
MC2215	MC221	TiC–TiCN–TiN	GM	P10–P30
ВП1255	ТТ7К12	TiC–TiCN–TiN	GM	P15–P35
ВП1355	Т5К10	TiC–TiCN–TiN	GM	P20–P30
ВП1455	ТТ7К12	TiC–TiCN–TiN	GM	P20–P40
MC1460	MC146	TiC	GC	M15–M30 P20–P40
MC1465	MC146	TiC–TiCN–TiN	GM	M15–M30 P20–P30
MC3210	MC321	TiC	GM	M15–M30 K10–K20
MC3215	MC321	TiC–TiCN–TiN	GM	K10–K20
ВП3115	ВК6	TiC–TiCN–TiN	GM	K10–K30
ВП3225	ВК6	TiC–TiCN	GM	K20–K30

* GC – технология фирмы Sandvik Coromant, GM – то же фирмы Plansee.

Назначение скоростей резания обусловлено: свойствами обрабатываемого материала, видом операции и другими факторами. Некоторые сравнительные данные о скоростях резания приведены в табл. 8.6 [2, 7].

8.1.3. Керамические режущие материалы

Режущая керамика – это материал на основе химических соединений (оксидов или нитридов), полученный порошковой технологией [8].

По химическому составу основы керамические материалы подразделяют на оксидные (на основе Al_2O_3) и нитридные (на основе Si_3N_4) керамики.

Керамику на основе Al_2O_3 в зависимости от легирующих компонентов подразделяют на подгруппы: оксидная чистая, или белая (легированная оксидами MgO, ZrO₂ и др.); оксидно-карбидная смешанная, или черная (легированная карбидами тугоплавких металлов и оксидами) и оксидно-нитридная (легированная нитридом титана TiN и др.).

Важнейшие свойства керамики: плотность спекания и зернистость. Получают ее холодным прессованием при 20 °С с последующим спеканием спрессованных заготовок. Это наиболее дешевая технология. Иногда режущие пластины получают методом горячего прессования.

Состав, технология получения и механические свойства керамики приведены в табл. 8.12, а рекомендации по ее выбору – в табл. 8.13. Рекомендуемые режимы резания керамическими пластинами даны в табл. 8.14 и 8.15.

Таблица 8.12. Основные марки и свойства пластины из керамики отечественного производства [8]

Марка	Способ изготовления	Химическая основа	Цвет пластины	HRA	$\gamma, \text{ г/м}^3$	$\sigma_{\text{н}}$	$\sigma_{\text{сж}}$	Размер зерна, мкм								
									МПа							
ЦМ-332 ВО-13 ВШ-75	Холодное прессование То же Горячее прессование	$\text{Al}_2\text{O}_3 (\geq 99\%)$, $\text{MgO} (\leq 1\%)$ $\text{Al}_2\text{O}_3 (> 99\%)$ Al_2O_3	Белый » Черно-серый	91 92 91–92	3,85–3,90 3,92–3,95 3,98	300–350 450–500 500	– 2700–3000 2500–3000	4 3–4 3								
									То же » » »	$\text{Al}_2\text{O}_3 (\geq 60\%)$ $\text{TiC} (< 40\%)$ и др. $\text{TiC} (< 40\%)$ $\text{Al}_2\text{O}_3, \text{TiN}$	Серый Черный » Темно-коричневый	94 93 94 90–92	4,2 4,3 4,2–4,3 4,39	600 550–650 650–700 640	– – – –	2–3 2–3 2–3 –

Оксидная керамика

Оксидно-карбидная керамика

Керамика на основе нитрида кремния

Таблица 8.13. Область применения керамики

Обрабатываемый материал	Твердость	Марка керамики для обработки	
		тонкой	получистой
Чугун: серый ковкий	143–289 НВ	ВО-13, ВШ, ЦМ-332	ВО-13, ВШ, ЦМ-332
	163–269 НВ	ВО-13, ВШ	ВШ, ВО-13, В-3
отбеленный	170–369 НВ	ВШ, В-3, ВО-13	В-3, силинит-Р, ВШ, ВО-13
	400–650 НВ	ВОК-60, ОНТ-20, В-3	ВОК-60, ОНТ-20, В-3
Сталь: конструкционная улучшенная цементуемая	160–229 НВ	ВО-13, ВШ, ЦМ-332	ВО-13, ВШ, ЦМ-332
	229–380 НВ	ВШ, ВО-13, ВОК-60, силинит-Р	В-3, ВОК-60, ВШ, ВО-13
	36–48 НРС,	ВОК-60, ОНТ-20, В-3	ВОК-60, В-3, ОНТ-20
	48–57 НРС,	ВОК-60, ОНТ-20	ВОК-60, ОНТ-20
Сплавы на основе: меди никеля	57–64 НРС,	ВОК-60, В-3, ВОК-71, ОНТ-20	ВОК-60, В-3, ОНТ-20, ВОК-71
	60–120 НВ	В-3, ОНТ-20	В-3, ОНТ-20
–	–	Силинит-Р, ОНТ-20	Силинит-Р, ОНТ-20

Таблица 8.14. Рекомендуемые диапазоны режимов резания инструментами, оснащенными пластинами из керамики [8]

Обрабатываемый материал	Твердость	Марка керамики	Режим резания*		
			v, м/мин	S, мм/об	t, мм
Чугун: серый	170–240 НВ	ВОК-3, ВОК-60, ВОК-71, ОНТ-20, ВОК-63	400–800	0,1–0,2	0,3–1
			200–500	0,2–0,5	1–4
	ковкий	160–270 НВ	ВОК-60, ВОК-71, ВО-13, ОНТ-20, ВОК-63	200–400	0,12–0,25
150–250				0,2–0,4	1–2
отбеленный	400–650 НВ	ВОК-60, ВОК-71, ВОК-63	40–150 15–40	0,08–0,15 0,12–0,30	0,3–0,8 1–2
Сталь: конструкци- онная	229 НВ	ВО-13, ВОК-60, ВОК-63, ВОК-71, ОНТ-20	300–1000	0,15–0,2	0,3–0,8
			200–700	0,2–0,5	1–3
улучшенная	229–380 НВ	ВО-13, ВОК-60, ВОК-63, ВОК-71, ОНТ-20	300–700	0,1–0,2	0,3–0,8
			200–500	0,15–0,3	1–2
закаленная	36–48 HRC ₃	ВОК-60, ВОК-63, ВОК-71, ОНТ-20	100–300	0,08–0,15	0,1–0,3
			70–180	0,1–0,15	0,2–0,8
	48–57 HRC ₃	То же	60–150	0,05–0,12	0,1–0,3
			–	–	–
57–64 HRC ₃	»	40–120	0,04–0,15	0,1–0,8	
			–	–	–

* В числителе – для чистовой обработки, в знаменателе – для получистовой.

Таблица 8.15. Рекомендуемые диапазоны режимов резания инструментами, оснащенными пластинами из силлинта-Р [8]

Обрабатываемый материал	Режим обработки			Стойкость реза, мин, до износа h = 0,4 мм	
	v, м/мин	S, мм/об	t, мм		
Сталь:	конструкционная углеродистая 40,45,50	100–200	0,3–0,5	3,0	100–130
	конструкционная легированная 40Х	100–150	0,3–0,5	3,0	80–110
	инструментальная углеродистая У7, У8	100–150	0,3–0,5	3,0	120–160
	инструментальная легированная ХВГ, 9ХС*	100–150	0,3–0,5	3,0	60–80
		50–80	0,075	0,25	40–80
Чугуны СЧ21, СЧ35	55–85	0,14–0,5	1,5	120–250	
Дуралюмин Д16	150–300	0,3–0,5	3,0–5,0	> 180	
Бронза, латунь	150–350	0,3–0,5	3,0–5,0	> 180	

* В числителе режим обработки для стали в состоянии поставки, в знаменателе – после термообработки (60 HRC₃).

8.1.4. Сверхтвердые материалы

Необходимость обработки резанием закаленных сталей с твердостью около 60 HRC₂, жаропрочных сталей и сплавов, керамики, пластмасс, сплавов на основе титана потребовала применения особо стойких режущих инструментов. Наиболее перспективным направлением повышения стойкости инструментов стала разработка новых инструментальных материалов с твердостью выше 20 ГПа:

- природных и синтетических алмазов с твердостью около 100 ГПа;
- нитрида бора со структурой сфалерита с твердостью 70–90 ГПа;
- тугоплавких карбидов, боридов, нитридов, оксидов (например, Si₃N₄ с твердостью 33–34 ГПа).

Сверхтвердые материалы для режущих инструментов производят в виде монокристаллов, поликристаллов, полученных высокотемпературным спеканием; сверхтвердых композитов, в которых частицы сверхтвердых веществ соединены металлической или керамической связкой. Последние получают прессованием при высоких давлениях и температурах, по механическим свойствам и стойкости при резании они превосходят известные твердые сплавы. Преимуществом композитов является полное отсутствие в них весьма дефицитных и дорогих вольфрама и кобальта.

Режущие инструменты из сверхтвердых материалов используют на операциях полустачевой, чистовой и тонкой обработки при скоростях резания, на порядок превышающих скорости резания твердосплавным инструментом. Высокие скорости резания обеспечивают точность размеров и пониженную шероховатость обработанной поверхности при высокой производительности и экономичности.

Свойства материалов на основе нитрида бора, области их применения и режимы резания приведены в табл. 8.16–8.18. Рекомендуемые скорости резания композитами даны в табл. 8.19.

Таблица 8.16. Рекомендуемые диапазоны режимов резания инструментом, оснащенным поликристаллическим алмазом, при точении [8]

Обрабатываемый материал	Режим резания		
	v, м/мин	S, мм/об	t, мм
Алюминий и алюминиевые сплавы	600–3 000	0,03–0,3	0,05–1,0
Силумины	500–1 500	0,03–0,3	0,05–1,0
Медь, бронзы, латуни, баббиты	300–1 000	0,03–0,3	0,05–1,0
Пластмассы, стекло- и углепластики, твердая резина	200–1 000	0,03–0,3	0,05–1,0
Полуспеченные керамики и твердые сплавы	100–300	0,03–0,15	0,05–1,0
Спеченные твердые сплавы	15–40	0,03–0,1	0,05–1,0
Древесностружечные материалы	2 000–4 000	0,03–0,3	0,05–1,0
Горные породы (песчаник, гранит)	50–400	0,03–0,3	0,05–1,0

Примечания: 1. При фрезеровании скорости могут быть увеличены в 2 раза. 2. Глубина резания для древесностружечных материалов определяется шириной фрез и пил. 3. Алмазный инструмент может работать и при меньших скоростях, обеспечивая повышение стойкости по сравнению с твердым сплавом.

Таблица 8.17. Физические и механические свойства сверхтвердых материалов на основе нитрида бора при 20 °С [8]

Материал	$\gamma, \tau/\text{м}^3$	HV0,1	$\sigma_{\text{сж}}$	$\sigma_{\text{н}}$	E		η	$K_{1c}, 1/2$ МПа·м	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\alpha \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$
					ГПа						
Композит 01 (эльбор-РМ)	3,4	3 700	2,7	-	840		-	4,2	60–80 (77 °С); 160–180 (627 °С)	-	-
Композит 02 (белбор)	-	-	4–6,5	-	-		-	-	-	-	-
Композит 05	4,3	1 880	2,2	0,47	620		0,16	6,7	-	-	-
Композит 09 (ПТНБ)	-	-	3,4–4,9	1,00	-		-	-	-	-	-
Композит 10 (гекса-нит-Р)	3,28–3,4	3 000	2–4	1,0–1,5	712–1 000		0,14	3,8	21–80 (77 °С); 40–60 (627 °С)	-	-
Боразон	3,48	4 500	-	-	-		-	-	105–135	5,6	-
Амборит	-	4 050	-	0,57	680		0,22	-	37,8	-	-
Сумлборон BN200	4,2	3 000–3 500	-	-	-		-	-	21 (40 °С), 30 (400 °С)	4,7–5,6	628
Вюрцин	-	3 000–4 000	-	0,8	-		-	13	-	7,9	797 (40 °С); 1515 (400 °С)

Таблица 8.18. Рекомендуемые диапазоны режимов резания инструментом, оснащенным композитом [8]

Обрабатываемый материал	Характер процесса резания	Композит	Режим резания	
			$v, \text{м}/\text{мин}$	$S, \text{мм}/\text{об}$
Стали с твердостью: 40–58HRC, 58–70HRC,	Без удара С ударом Без удара С ударом	05; 01; 02 10; 10Д 01; 02 10; 10Д	Точение и растачивание	
			50–180	0,03–0,2
			40–120	0,03–0,1
			50–120	0,03–0,1
			40–100	0,03–0,07

Обработываемый материал	Характер процесса резания	Композит	Режимы резания		
			v , м/мин	S , мм/об	t , мм
<i>Точение и растачивание</i>					
Чугуны с твердостью: 150–300HB	Без удара	05; 01; 02	400–1000	0,03–0,5	0,05–3,0
	С ударом	10; 10Д; 05; 01; 02	300–800	0,03–0,2	0,05–2,0
400–600HB	Без удара	05; 01; 02	50–200	0,03–0,5	0,05–2,0
	С ударом	10; 10Д	40–90	0,03–0,1	0,05–1,0
Твердые сплавы, содержащие не менее 15% Со Износостойкие покрытия на основе никеля (плазменное напыление)	Без удара	10; 01; 02; 10Д	5–20	0,08–0,1	0,05–1,0
	По корке	01; 02; 10; 10Д	40–100	0,03–0,15	0,1–0,5
<i>Торцевое фрезерование*</i>					
Стали с твердостью: ≤ 30 HRC, 35–55HRC, 55–70HRC, 60–70HRC,	–	10; 01; 10Д	400–900	0,01–0,1	0,05–2,0
	–	10; 01; 10Д	200–600	0,01–0,1	0,05–1,2
	–	10; 01; 10Д	80–300	0,01–0,1	0,05–0,8
	–	01	20–40	0,01–0,1	0,05–0,8
Чугуны с твердостью: 150–300 HB 400–600 HB	–	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

Примечания: 1. Резцы со ступенчатым расположением пластин позволяют увеличить глубину резания до 6–8 мм. 2. Фрезы с трехступенчатым расположением пластин из композита 05 диаметром 8 и 9,52 мм позволяют увеличить глубину резания при обработке чугуна литья на соответствующем оборудовании до 8–10 мм.

* Для всех видов обрабатываемых материалов и композитов 0,01–0,1 мм/зуб.

Таблица 8.19. Рекомендуемые скорости резания композитами, м/мин [8]

Обрабатываемый материал	При точении	При торцевом фрезеровании
	<i>Композиты на основе КНБ*</i>	
Термически не обработанная сталь (состояние поставки) с твердостью ≤ 30 HRC _c	–	400–900
Закаленная сталь с твердостью 35–55 HRC _c	50–200	200–600
Закаленная сталь с твердостью > 55 HRC _c	40–120	80–300
Серые и высокопрочные чугуны с твердостью 150–300 HB	300–1 000	600–3 000
Отбеленные с твердостью 400–600 HB и закаленные с твердостью 40–60 HRC _c , чугуны	40–200	150–800
	<i>Композиты на основе синтетических алмазов</i>	
Алюминий и его сплавы	600–3 000	600–6 000
Медь и ее сплавы	300–1 000	300–2 000
Пластмассы, стекло- и углепластики, твердая резина	200–1 000	200–2 000
Полуспеченные твердые сплавы и керамика	100–300	100–400
Спеченные твердые сплавы	15–40	15–60
Древесно-стружечные материалы	–	2 000–4 000
Горные породы (песчаник, гранит)	50–400	50–400

* Сверхтвердый порошок кубического нитрида бора.

8.2. Штамповые стали для холодного деформирования

По условиям работы эти стали можно разделить на четыре группы: 1) высокой и повышенной износостойкости; 2) высокого сопротивления смятию и высокой теплоустойкости; 3) высокопрочные с высокой и повышенной ударной вязкостью; 4) для ударных инструментов. Химический состав штамповых сталей для холодного деформирования приведен в табл. 8.20, значения критических точек – в табл. 8.21, а режимыковки и отжига – в табл. 8.22.

Достижение экономической целесообразности 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. 8.23).

Наименьшая стойкость инструмента наблюдается при выполнении операций объемной штамповки (прессование, высадка, калибровка, чеканка) и резки (вырубка, пробивка, прорезка, отрезка) вследствие возникновения больших давлений, неблагоприятного напряженного состояния и нагрева рабочих частей инструментов. Гибка, вытяжка, формовка особых трудностей не вызывают.

Таблица 8.20. Химический состав штамповых сталей для холодного деформирования (ГОСТ 5950-73), % (мас.)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V
<i>Стали высокой и повышенной износостойкости</i>							
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	11,00-12,50	-	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
<i>Стали высокого сопротивления смятию и высокой теплостойкости</i>							
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
11Х4В2МФС2 (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
<i>Высокопрочные стали с повышенной ударной вязкостью</i>							
6Х4М2ФС (ДИ-55)	0,57-0,65	0,70-1,00	0,15-0,40	3,80-4,40	-	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
<i>Стали для ударных инструментов</i>							
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

Примечание. Содержание серы и фосфора не превышает 0,03 % (0,02 %) каждого элемента, а после электрошлакового переплава содержание серы не более 0,015 %.

* Производят по ТУ 14-1-1 227-75.

**Таблица 8.21. Критические точки штамповых сталей
для холодного деформирования [4], °C**

Марка стали	A_{c1}	A_{cm}	A_{r_m}	A_{r_1}	M_n	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*	—	—	290	—
6ХС	770	830*	—	—	250	—
4ХВ2С	780	840*	—	—	315	—
5ХВ2ФС	775	860*	—	—	295	—
6ХВ2С	775	810*	—	—	280	—
6Х3МФС	760–790	950–975	—	—	210–220	—
6ХВГ	780	795*	—	675	280	—

* Указана температура A_{c3} .

**Таблица 8.22. Режимыковки и отжига штамповых сталей
для холодного деформирования [4]**

Марка стали	Условияковки	Режимотжига	НВ*, не более
X6Ф4М	1140–850 °C, охлаждение замедленное	Нагрев до 860–880 °C, охлаждение 40 °C/ч до 700 °C, выдержка 2–3 ч, охлаждение 50 °C/ч до 550 °C, далее на воздухе	241
X12ВМФ, X12	1100–850 °C, охлаждение замедленное	Нагрев до 830–850 °C, охлаждение 40 °C/ч до 720 °C, выдержка 3–4 ч, охлаждение 50 °C/ч до 550 °C, далее на воздухе	255
X12Ф1, X12МФ	1140–850 °C, охлаждение замедленное	Нагрев до 850–870 °C, охлаждение 40 °C/ч до 710 °C, выдержка 3–4 ч, охлаждение 50 °C/ч до 550 °C, далее на воздухе	255
X6ВФ	1100–850 °C, охлаждение замедленное	Нагрев до 830–850 °C, охлаждение 40 °C/ч до 710 °C, выдержка 2–3 ч, охлаждение 50 °C/ч до 550 °C, далее на воздухе	241
8Х4В2МФС2	1150–850 °C, охлаждение замедленное	Нагрев до 880–900 °C, охлаждение 40 °C/ч до 740 °C, выдержка 3–4 ч, охлаждение 50 °C/ч до 550 °C, далее на воздухе	229

Марка стали	Условияковки	Режим отжига	НВ [°] , не более
11Х4В2МФ3С2	1150–880 °С (посадка в печь при 600–650 °С, нагрев с печью до 820 °С, выдержка до полного прогрева, затем нагрев до температурыковки), охлаждение замедленное	Нагрев 100–120 °С/ч до 860–880 °С, выдержка не менее 2,5–3 ч, охлаждение 50 °С/ч до 740–750 °С, выдержка 3–3,5 ч, охлаждение 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	255
6Х6В3МФС	1100–850 °С охлаждение замедленное	Нагрев до 860–880 °С, охлаждение 30 °С/ч до 770 °С, выдержка 2–3 ч, охлаждение 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	255
7ХГ2ВМФ	1160–800 °С, охлаждение замедленное	Нагрев до 770–790 °С, охлаждение 40 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	255
4ХС	1180–850 °С, воздух	Нагрев до 820–840 °С, охлаждение 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	217
6ХС	1180–850 °С, охлаждение замедленное	Нагрев до 820–840 °С, охлаждение 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	229
4ХВ2С	То же	Нагрев до 800–820 °С, охлаждение 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	229
5ХВ2ФС	»	То же	255
6ХВ2С	»	»	269
6Х3МФС	»	»	271
6ХВГ	1160–850 °С, охлаждение замедленное	Нагрев до 800–820 °С, охлаждение 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	217

Примечание. Для всех сталей посадка в печь при 600–650 °С.

[°] После отжига.

Таблица 8.23. Основные причины выхода из строя и средняя стойкость штамповых инструментов для основных операций холодной штамповки [6]

Технологическая операция	Характеристика	Основные причины выхода из строя	Средняя стойкость, тыс. шт.
Калибровка и чеканка	Изготовление изделий простой формы из низкоуглеродистых и низколегированных сталей	Износ рабочих частей	100–350
	Изготовление деталей сложной формы из высокопрочных материалов	Износ и смятие рабочих кромок, хрупкое разрушение	50–100
Высадка	Изготовление деталей из цветных сплавов, низко- и среднеуглеродистых, а также легированных сталей (ударные условия нагружения)	Хрупкое разрушение, износ	50–200

Технологические операции	Характеристика	Основные причины выхода из строя	Средняя стойкость, тыс. шт.
Прессование	Изготовление деталей из цветных сплавов, низко- и среднеуглеродистых, а также низколегированных сталей при степени деформации 40–50 % и $p = 1400$ МПа	Хрупкое разрушение, износ рабочих частей	30–100
	Изготовление деталей из низкоуглеродистых и низколегированных сталей при степени деформации 50–65 % и $p = 1400 \dots 1800$ МПа	Хрупкое разрушение, смятие и выкрашивание рабочих частей	20–50
	Однопереходное прессование деталей из конструкционных сталей с большими степенями деформации при $p \geq 1800 \dots 2200$ МПа	То же	10–40
Резка	Вырубка и пробивка отверстий в заготовках из конструкционных материалов	Износ, усталостное разрушение	50–250
	Прецизионная вырубка изделий электротехнической промышленности	Выкрашивание и износ рабочих кромок, хрупкое разрушение	10–100
Листовая штамповка	Гибка, вытяжка и формовка деталей небольших размеров и простой формы	Износ	200–250
	Изготовление деталей повышенной точности сравнительно небольших размеров	Износ рабочих частей, схватывание	100–250
	Изготовление крупных изделий сложной формы	Износ и выкрашивание рабочих кромок, схватывание	50–200

Примечание. Стойкость указана в основном до первого восстановления.

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 [4].

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 теплоустойчивостью материала, или с абразивным воздействием материала заготовки, или с усталостным выкрашиванием.

Кроме приемлемых износостойкости, сопротивления малым пластическим деформациям, теплоустойчивости, 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 $\text{Na}_2\text{V}_4\text{O}_7$ (4–5 % от массы соли) или MgF_2 (2–4 %), в печах с защитной атмосферой или в упаковке из чугунной стружки. Склонность к обезуглероживанию повышают кремний, вольфрам и молибден при содержании каждого более 1 % (мас.).

Во избежание возникновения чрезмерных термических напряжений, обусловленных низкой теплопроводностью сталей, перед окончательным нагревом под закалку рекомендуется одно- (650–700 °С) или двухступенчатый (300–400 °С + 800–850 °С) нагрев.

Время выдержки при температуре аустенитизации для сталей первых трех групп (см. табл. 8.20) устанавливают из расчета 50–70 с на 1 мм сечения при печном нагреве и 35–40 с при нагреве в ванне. При отпуске выдержка 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 ее ограничивают 1–1,5 ч. При обработке сталей четвертой группы время выдержки устанавливают 50–70 с (без учета времени прогрева) на 1 мм толщины детали в камерных печах и 20–30 с в соляных ваннах. 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, содержащих 12 % Cr (X12BM, X12, X12Ф1, X12МФ). Используют также стали с 6 % Cr (X6Ф4М и X6ВФ, см. табл. 8.20).

По относительной износостойкости стали после обработки на твердость 61–62 HRC, можно расположить так (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 ледебуритной группе. Высокая износостойкость сталей определяется повышенным количеством карбидной фазы, а также типом и морфологией карбидов.

Количество карбидной фазы в сталях после отпуска на твердость 62–64 HRC [4] приведено ниже:

Марка стали	X12	X6Ф4М	X12М	X12Ф1	X6ВФ
Содержание, % (мас.):					
углерода	2,1	1,8	1,5	1,3	1,1
карбидной фазы . . .	19–20	15–16*	16–17	13–14	12

* В том числе 8–9 % MeC.

Карбиды представлены преимущественно частицами $\text{Me}_7\text{C}_3(\text{Cr}_7\text{C}_3)$ и небольшим количеством $\text{Me}_{23}\text{C}_6(\text{Cr}_{23}\text{C}_6)$, MeC (VC), а также Me_3C при высоком содержании углерода (X12). Неблагоприятное распределение карбидной фазы, возникающее при кристаллизации слитков и сохраняющееся в горячекованом 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 ледебуритных сталей в термообработанном состоянии при изменении балла карбидов с 3-го (диаметр проката 20–35 мм) на 7-й (диаметр проката 80–100 мм) снижается в 1,5–2 раза.

Меньшую карбидную неоднородность имеют высокованадиевые стали типа Х6Ф4М, но их недостатком является пониженная шлифуемость и повышенная окисляемость при нагреве под ковку, отжиг и закалку.

Термическую обработку сталей высокой износостойкости, содержащих 6 и 12 % (мас.) Cr, проводят преимущественно на первичную твердость и реже на вторичную. Оптимальную температуру закалки на первичную твердость устанавливают на основе определенного сочетания характеристик твердости (62–65 HRC₃), размера зерна (не крупнее номера 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 % (об.)) (табл. 8.24). Максимальная твердость после закалки достигается при достаточно полном растворении карбидов (до 6–10 % (об.)), но таком, чтобы не происходил рост зерна и образование чрезмерного количества остаточного аустенита. У высокохромистых сталей интервал температур закалки небольшой.

Таблица 8.24. Влияние температуры закалки на твердость, размеры зерна аустенита и количество остаточного аустенита сталей высокой износостойкости [1, 4, 6]

Марка стали	$t_{\text{зак}}, ^\circ\text{C}$		HRC ₃	Номер зерна	$A_{\text{ост}}, \% (\text{об.})$
	рекомендуемая	применяемая			
Х6Ф4М	980–1010	975	63,5	–	8
		1000	64,5	–	10
		1025	64,5	–	17
		1050	64,0	–	21
		1100	62,5	12	37
		1150	60,5	11–10	55
		1175	59,0	10	–
Х12	950–980	880	57,5	–	–
		930	65,0	12	–
		980	65,0	10–10	–
		1030	57,0	10–11	–
		1100	50,0	11–9	–
Х12Ф1	1030–1050	900	53–54	–	3
		950	58–60	12–13	5
		1000	63,0	12	10
		1025	64–65	12–11	15–17
		1050	63–64	11–12	22–27
		1100	58–60	9–10	40–60
		1150	52,0	7–8	65–95
Х12МФ	1000–1030	900	54–55	12–13	3
		950	60–61	12	5
		975	62–63	12–11	8
		1000	64,0	11–12	12
		1025	64,5	11–10	20
		1050	63,0	10	40
		1100	54,0	8–9	74
Х6ВФ	980–1000	850	53,0	>9	3
		900	59,0	>9	5
		950	62,5	>9	9
		1000	64,0	>9	16
		1050	62,0	>9	29
		1100	54,0	>9	52

При закалке с 1010–1060 °С сталь Х12Ф1 прокаливается в сечении до 150–180 мм, а сталь Х12МФ – в сечении более 200 мм при охлаждении в масле и на воздухе.

Температуру отпуска при обработке на первичную твердость устанавливают по сочетанию характеристик твердости, прочности на изгиб и ударной вязкости (табл. 8.25), чтобы обеспечить наилучшую износостойкость при определенном сопротивлении хрупкому разрушению и выкрашиванию. Отпуск при 300–450 °С резко снижает ударную вязкость вследствие коагуляции карбидов и распада остаточного аустенита. Пониженная ударная вязкость стали Х12 по сравнению с другими объясняется ее большей карбидной неоднородностью.

Таблица 8.25. Влияние температуры отпуска после закалки с оптимальной температуры на механические свойства сталей высокой износостойкости [4]

Марка стали	Рекомендуемые параметры		$t_{\text{отп.}}^{\circ\text{C}}$	HRC ₃	$\sigma_{\text{н}}$, МПа	KCU, МДж/м ²
	$t_{\text{зак.}}^{\circ\text{C}}$	HRC ₃				
Х6Ф4М	1000	62–64	150	64	3300	0,45
			200	62	3500	0,54
			250	60	3700	0,60
			300	58	3750	0,65
			350	58	3800	0,70
			400	58	3500	0,76
			450	57	3200	0,85
			500	55	–	–
Х12ВМФ	1020	65	180	62	2150	0,2
			200	60	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	2750	0,40
			500	60	2500	–
Х12	970	65	180	63	2150	0,08
			200	62	2170	0,10
			250	60	2200	0,16
			300	59	2170	0,14
			350	58	2150	0,25
			400	57	2050	0,35
			450	56	1950	0,10
			500	55	1850	–
Х12Ф1	1040	63	150	63	2450	0,25
			200	61	2500	0,25
			250	60	2550	0,25

Марка стали	Рекомендуемые параметры		$t_{отп}$, °C	HRC ₂	σ_H , МПа	KCU, МДж/м ²
	$t_{зак}$, °C	HRC ₂				
X12Ф1			300	59	2580	0,30
			350	58	2600	0,35
			400	58	2850	0,65
			450	57	3100	0,75
			500	57	3000	0,35
			600	49	—	—
X12МФ	1020	64	150	63	2550	0,3
			200	62	2650	0,4
			250	61	2750	0,57
			300	59	2920	0,64
			350	59	3100	0,60
			400	58	3030	0,50
			450	58	2950	0,40
			500	59	2900	0,30
			550	51	—	—
X6ВФ	1000	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

Примечание. Свойства приведены для проката диаметром до 40 мм.

Стали типа X12, X12МФ, X12Ф1, X12ВМФ иногда обрабатывают на вторичную твердость с целью повышения теплостойкости. Обработка – закалка от 1110–1140 °C с последующим 4–5-кратным отпуском при 490–530 °C или обработка холодом с 1–2-кратным отпуском – применима только для малонагруженных штампов, поскольку закалка со столь высоких температур приводит к росту зерна на 3–4 номера, а отпуск или обработка холодом – к распаду остаточного аустенита. Небольшой эффект вторичного твердения после закалки с обычных температур наблюдается только у сталей X12ВМФ и X12МФ (см. табл. 8.25), что обеспечивает им большую теплостойкость по сравнению со сталью X12. Обработку холодом сталей типа X12 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.

Для минимальной деформации инструмента проводят следующие обработки.

1. Улучшение по режиму: закалка 880–900 °С, выдержка после нагрева 20–30 мин, масло + отпуск 620–640 °С, 2–3 ч, воздух, перед окончательной термической обработкой.

2. Закалку с температур на 20–30 °С выше, чем при обработке на первичную твердость, для повышения содержания остаточного аустенита (см. табл. 8.24) + отпуск 450–480 °С с кратностью (до трех раз), обеспечивающей требуемые размеры (тепловая доводка) [8].

3. Двухступенчатую закалку. Например, для стали Х12МФ охлаждение с температуры заковки 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 вследствие выделения вторичных карбидов и их коагуляции); затем следует перенос в печь, нагретую до 400–450 °С (интервал максимальной устойчивости аустенита), выдержка 20–40 мин и охлаждение на воздухе [8].

Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки и свойства сталей высокой износостойкости приведены в табл. 8.26, а области их применения – в табл. 8.27.

Таблица 8.26. Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей высокой износостойкости [4]

Марка сталей	Закалка			Отпуск				
	$t, ^\circ\text{C}$	Среда	HRC ₃	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$	HRC ₃	$\sigma_{\text{н}}, \text{МПа}$	KCU, МДж/м ²
Х6Ф4М	980–1010	Масло	62–64	170–190	1,5	60–62	2900	0,25–0,30
	1140–1160	»	61–62	550	1 (3 раза)	62–64	3100	0,45–0,70
Х12ВМФ	1000–1030	Масло	63–64	170–180	1,5	62–63	2400	0,20–0,30
		»	63–64	320–350	1,5	58–59	2600	0,25–0,40
Х12	950–980	»	63–65	170–200	1,5	60–62	2150	0,15–0,20
		»	63–65	300–350	1,5	57–58	2200	0,20–0,30
Х12Ф1	1030–1050	Масло, селитра	62–64	170–200	1,5	60–62	2500	0,25–0,30
	1030–1050	То же	62–64	400–420	1,5	56–58	3000	0,50–0,60
Х12МФ	1000–1030	»	62–64	170–200	1,5	60–62	2600	0,50–0,60
	1000–1030	»	62–64	320–350	1,5	56–58	3100	0,40–0,50
Х6ВФ	980–1000	Масло, щелочь, селитра	63–65	150–170	1,5	60–62	3000	0,70–0,80
	980–1000	То же	63–65	280–300	1,5	56–58	3500	0,90–1,00

Примечание. Температура нагрева инструмента перед закалкой (аустенитизацией) 650–700 °С.

Таблица 8.27. Рекомендуемые области применения сталей высокой износостойкости [4, 6]

Марка стали	Область применения
Х6Ф4М	Матрицы для прессования абразивных и твердых металлических порошков, пуансоны, вырубные и отрезные штампы для труднодеформируемых материалов, шлифуемые кубическим нитридом бора и работающие при $p = 1\ 500 \dots 1\ 700$ МПа
Х12, Х12ВМФ	Волоочильные доски и волокни, глазки для калибрования пруткового 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 Х12ВМФ делают штампы более крупные и более сложной формы, чем из стали Х12, которую целесообразно использовать в сечениях до 40–50 мм
Х12МФ, Х12Ф1	То же, что и для стали Х12, 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 $p = 1\ 500 \dots 1\ 700$ МПа
Х6ВФ	Матрицы и пуансоны холодного прессования, работающие при $p \leq 1\ 400 \dots 1\ 600$ МПа; резьбо- и зубонакатный инструмент

Стали с высоким сопротивлением смятию и высокой теплостойкостью (8Х4В2МФС2 и 11Х4В2МФ3С2) 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. 8.20). Поэтому количество карбидной фазы (и особенно крупных избыточных карбидов) в них меньше (10–18 % (об.)), а степень дисперсности выше. Это обеспечивает получение высоких механических свойств и лучшей технологичности. По износостойкости сталь 8Х4В2МФС2 близка к сталям Х12МФ и Х12Ф1, а сталь 11Х4В2МФ3С2 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. 8.28, 8.29). Необходимость использования высоких температур закалки связана с высокой термостойкостью карбидов Me_6C и MeC , растворяющихся выше 1050 °С. После закалки в структуре сохраняется 6–12 % (об.) карбидов, что позволяет получить аустенит с номером зерна 10–12. Количество остаточного аустенита после закалки составляет 20–30 % (об.).

Таблица 8.28. Влияние температуры отпуска после закалки от 1075 °С (твердость после закалки 64HRC₂) на механические свойства стали 8Х4В2МФС2

$t_{отп}, ^\circ C$	HRC ₂	σ_n , МПа	KCU , МДж/м ²	$t_{отп}, ^\circ C$	HRC ₂	σ_n , МПа	KCU , МДж/м ²
	<i>Однократный отпуск 1,5 ч</i>				<i>Однократный отпуск 1,5 ч</i>		
170	62,0	3000	–	450	59,7	3200	0,45
200	60,5	3330	0,35	480	61,0	3180	0,40
250	58,0	3700	0,45		<i>Трехкратный отпуск по 1 ч</i>		
300	57,2	3900	0,90	500	61,4	3200	0,35
350	57,6	3750	1,05	520	62,2	3250	0,30
400	58,5	3500	0,70	540	61,8	3500	0,40
				560	61,5	3800	0,44

Таблица 8.29. Влияние температуры отпуска после закалки от 1060 °С (числитель) и 1090 °С (знаменатель) (твердость после закалки 62 HRC₂) на механические свойства стали 11Х4В2МФ3С2

$t_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$	HRC ₂	$\sigma_{\text{н}}, \text{МПа}$	KCU, МДж/м ²
<i>Однократный отпуск 1,5 ч / 1 ч</i>			
170	61,0/60,2	3 800/3 200	0,50/0,35
200	60,0/58,8	4 000/3 600	0,57/0,40
250	58,0/57,7	4 200/3 600	0,74/0,60
300	57,5/56,7	4 300/3 670	0,78/0,65
350	57,0/56,4	4 200/3 700	0,75/0,60
400	57,5/57,0	4 000/3 500	0,64/0,45
450	58,5/58,5	3 600/3 100	0,37/0,30
<i>Трехкратный отпуск по 1 ч</i>			
500	60,4/61,0	3 600/3 300	0,30/0,22
520	61,0/62,0	3 800/3 400	0,30/0,24
540	59,5/60,2	3 900/3 600	0,30/0,26
560	57,6/58,6	4 100/3 700	0,30/—
580	55,0/56,3	—	0,30/—

При отпуске на вторичную твердость количество карбидов (очень дисперсных) увеличивается до 12–18 % (об.), а содержание остаточного аустенита уменьшается до 2–3 % (об.), 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. 8.30, а их применение – в табл. 8.31.

Высокопрочные стали с повышенной ударной вязкостью (6Х4М2ФС, 6Х6В3МФС и 7ХГ2ВМФ) относятся к мартенситному классу и эвтектоидной группе (см. табл. 8.20). Они имеют небольшое количество равномерно распределенных избыточных карбидов, вследствие чего в прокате сечением до 100 мм почти полностью отсутствует анизотропия деформации. В сталях 6Х4М2ФС и 6Х6В3МФС основной карбид $Me_{23}C_6$, а в стали 7ХГ2ВМФ избыточными являются карбиды Me_3C и MeC . Благодаря малой объемной доле карбидной фазы износостойкость сталей пониженная. Прокаливаемость 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 %) эти стали мало деформируются, но чувствительны к образованию шлифовочных 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. 8.32). Поэтому стали 6Х4М2ФС и 6Х6В3МФС более теплостойкие (до 450–500 °С) и износостойкие, лучше сопротивляются смятию. Низкая твердость этих сталей в отожженном состоянии (160 НВ) позволяет изготавливать инструмент холодной пластической деформацией.

Таблица 8.30. Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей с высокими сопротивлением смятию и теплостойкостью [9]

Марка стали	Закалка		Отпуск					КСУ, МДж/м ²	
	t, °С	HRC,	t, °С	τ, ч	HRC,	σ, МПа			
						σ _n	σ _{0,2}		σ _{0,05}
8Х4В2МФС2	1060–1090	62–64	530–540	1+1+1	62–63	3700–3800	2700–2800	2200–2300	0,40–0,60
11Х4В2МФ3С2	1000–1030	60–62	200–220	2,5	60–62	3400–3700	2500	2100	0,50–0,60
	1050–1070	60–62	320–350	2,5	56–58	3800–4000	2400	2000	0,68–0,80
	1080–1100	60–62	540	1+1+1	59–61	3600–3800	2700	2150	0,45–0,50
		60–62	540	1+1+1+1*	61–62	3400–3600	2800	2250	0,30–0,40

Примечания: 1. Температура нагрева инструмента перед закалкой (аустенинизацией) 650–700 °С. 2. Охлаждающая среда при закалке – масло.

* Последний отпуск проводят при 500 °С.

Таблица 8.31. Рекомендуемые области применения сталей с высокими сопротивлением смятию и теплостойкостью [4]

Марка стали	Область применения
8Х4В2МФС2	Матрицы и пуансоны штампов холодного объемного деформирования, испытывающие в процессе эксплуатации давление до 2300 МПа, резьбонакатные ролики
11Х4В2МФ3С2	Вырубные штампы, в том числе для обработки холоднокатаных электротехнических сталей с покрытиями типа «карлит»; пуансоны и матрицы холодновысадочных автоматов; пуансоны и выталкиватели для холодного выдавливания, эксплуатируемые при p ≤ 2000 МПа в условиях повышенного износа и нагрева рабочих поверхностей до 400 °С; шлице- и резьбонакатный инструмент

Таблица 8.32. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства поковок диаметром 25 мм из высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью [4]

Марка стали	$t_{отп}, ^\circ\text{C}$	HRC ₃	σ_n , МПа	KCU, МДж/м ²
<i>Трехкратный отпуск по 1 ч</i>				
6Х4М2ФС (1060 °С; 62 HRC ₃)	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
<i>Однократный отпуск 1,5 ч</i>				
6Х6В3МФС (1060 °С; 62,5 HRC ₃)	200	61,7	4000	1,6 (21 % A _{ост})
	250	58,0	—	—
	300	56,5	3950	1,6
	350	50,0	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
<i>Трехкратный отпуск по 1 ч</i>				
7ХГ2ВМФ (860 °С; 62 HRC ₃)	500	59,0	3600	1,25
	520	59,5	4000	1,30
	540	59,0	4150	1,35
	560	56,5	4000	1,30
	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. Здесь и далее в аналогичных таблицах в скобках после марки стали приведены рекомендуемая температура закалки и твердость после нее. 2. Для стали 7ХГ2ВМФ при прокате диаметром 50 мм и твердости 60 HRC₃, $\sigma_n=2000\dots 2500$ МПа, а при 57–58 HRC₃, $\sigma_n=2500\dots 2600$ МПа. 3. A_{ост} – остаточный аустенит.

Теплостойкость стали 7ХГ2ВМФ ограничивается 250 °С. Отпуск при 300–350 °С вызывает развитие хрупкости первого рода.

Для уменьшения деформации и снижения шероховатости поверхности при резании перед окончательной термической обработкой стали 7ХГ2ВМФ проводят закалку из межкритического интервала 770–780 °С и отпуск при 525–600 °С на твердость 28–30 HRC₃. В результате можно отказаться от операции шлифования. Возможно совмещение отпуска с азотированием при 520 °С в течение 12 ч (63–64 HRC₃).

Таблица 8.33. Режимы окончательной термической обработки и свойства высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью [4, 6]

Марка стали	Закалка		Отпуск						
	$t, ^\circ\text{C}$	Среда	HRC ₃	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$	HRC ₃	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\sigma_{0.2}, \text{МПа}$	KCU, МДж/м ²
6Х4М2ФС	1060–1075	Масло, воздух	60–62	520–540	1 + 1 + 1	58–61	4000–4200	1800–2000	1,20–1,40
6Х6В3МФС	1050–1070	Селитра, масло, воздух	60–62	530	1 + 1 + 1	58–60	–	–	–
7ХГ2ВМФ	850–870	Воздух, масло	61–62	150	1,5	59–60	2800	–	0,60
	850–870	То же	61–62	220	1,5	57–58	3000	–	0,80

Примечание. Температура нагрева инструмента перед закалкой (аустенитизацией) 650–700 °С.

Таблица 8.34. Рекомендуемые области применения высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью [4, 6]

Сталь	Область применения
6Х4М2ФС, 6Х6В3МФС	Высодочные пуансоны и матрицы; ножи трубозаводочных машин и гильотинных ножиц для резки высокопрочных сталей и сплавов; чеканочные штампы по твердым металлам; резьбонакатные ролики, зубонакатники, шлиценкатники, обрезающие 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 быстрорежущих сталей при изготовлении штампов холодного выдавливания и матриц прессования, работающих при высоких давлениях, но когда не требуется высокая износостойкость
7ХГ2ВМФ	Крупные и сложные инструменты для прецизионной вырубки, пробивки, вытяжки и формовки изделий из цветных сплавов и низкоуглеродистых сталей

Свойства всех сталей зависят от их химического состава в пределах марочного. Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки, свойства и применение высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью даны в табл. 8.33 и 8.34.

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. 8.20), которые относятся к перлитному классу (при 0,4–0,5 % С – к доэвтектоидной группе, а при 0,6 % С – к заэвтектоидной). Основной карбидной фазой в них является легированный цементит. Высокая вязкость достигается при отсутствии или минимальном количестве избыточных карбидов. Допустимы избыточные карбиды MeC , задерживающие рост зерна. Образование карбидов Me_7C_3 и Me_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 % (об.)). Однако уменьшение твердости инструмента, работающего со значительными ударными нагрузками, допустимо только до 45–48 HRC₃, а работающего при меньших динамических нагрузках – до 55–57 HRC₃. Необходимое количество аустенита высокой устойчивости (до –40...–60 °С) при твердости 48–55 HRC₃ получают даже в сечениях 50–60 мм при использовании изотермической закалки. Изотермическую закалку в горячих средах проводят при 250–300 °С (выше M_n).

Ниже приведены данные, характеризующие влияние времени выдержки τ при 260 °С стали 6ХС и при 280 °С стали 6ХВ2С на твердость и вязкость [6]:

τ , мин	5	10	15	30	60
HRC ₃	57/–	53/–	52/53	52/52	52/52
KCU, МДж/м ²	0,12/–	0,29/–	0,36/0,49	0,36/0,51	0,36/0,48

Примечание. В числителе – для стали 6ХС (закалка от 860 °С), в знаменателе – для 6ХВ2С (закалка от 360 °С).

Видно, что для получения твердости 50–55 HRC₃ достаточна выдержка 30–40 мин.

Твердость 58–60 HRC₃ достигается после непрерывной или ступенчатой закалки ($A_{ост}$ до 9–10 % (об.)). Прокаливаемость сложнолегированных сталей при охлаждении в масле составляет 70–80 мм, хромокремнистых – 50–60 мм.

Температуру отпуска инструментов выбирают с учетом того, что нагрев в интервале 270–400 °С вызывает развитие отпускной хрупкости первого рода со снижением вязкости. Для стали 6ХС она возникает при отпуске 300–350 °С, для стали 6ХВ2С – при 300–400 °С, для стали 6ХЗФС – 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. 8.35 и 8.36.

Таблица 8.35. Режимы окончательной термической обработки сталей для ударных инструментов [4]

Марка стали	$t_c, ^\circ\text{C}$		HRC _c после		Марка стали	$t_c, ^\circ\text{C}$		HRC _c после	
	закалки	отпуска	закалки	отпуска		закалки	отпуска	закалки	отпуска
4XC	880–900	240–270	≥57	52–55	6XB2C	860–900	200–250	≥57	53–58
6XC	840–860	240–270	55–59	52–55		860–900	430–470	≥57	45–50
4XB2C	860–900	200–250	≥53	53–58	6XBГ	850–900	200–250	≥57	53–56
	860–900	430–470	≥53	45–50		850–900	450–480	≥57	44–47
5XB2CФ	860–900	200–250	≥55	53–58	6X3ФC	980–1020	180–200	56–60	57–59
	860–900	430–470	≥55	45–50					

Примечания: 1. Температура нагрева инструмента перед закалкой (аустенитизацией) 650–700 °C. 2. Охлаждающая среда после закалки – масло, после отпуска охлаждение на воздухе. 3. Для предотвращения образования трещин отпуск осуществляют непосредственно после закалки.

Таблица 8.36. Влияние температуры отпуска после закалки с оптимальных температур на механические свойства сталей для ударных инструментов [4]

Марка стали	$t_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$	HRC _c	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
4XC (900 °C; 53 HRC _c)	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
6XC (880 °C, 58 HRC _c)	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
6XC (880 °C, 58 HRC _c)	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 °C; 54 HRC _c)	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

Марка стали	$t_{от}, ^\circ\text{C}$	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
5XB2CФ (880 °С; 57 HRC ₃)	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; 61 HRC ₃)	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; ≥ 57 HRC ₃)	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
6X3MФC (1000 °С; 59 HRC ₃)	150	58	–	–	–	–	0,25
	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

Вольфрамокремниевые стали чувствительны к обезуглероживанию, и поэтому при нагреве их под закалку требуется защита.

Механические свойства сталей для ударных инструментов в зависимости от температуры испытаний приведены в табл. 8.37, а рекомендуемые области применения – в табл. 8.38.

Таблица 8.37. Влияние температуры испытаний на механические свойства сталей для ударных инструментов [3, 4]

Марка стали	$t_{исп}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
		МПа		%		
6XC	<i>Закалка 880 °С, масло + отпуск 250 °С, 2 ч</i>					
	-60	–	–	–	–	0,21
	-20...+150	–	–	–	–	0,25
	<i>Изотермическая закалка 880 °С + выдержка при 250 °С</i>					
	-60	–	–	–	–	0,11
	-20	–	–	–	–	0,12

Марка стали	$t_{исп}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	КСУ, МДж/м ²	
		МПа		%			
<i>Изотермическая закалка 880 °С + выдержка при 250 °С</i>							
6ХС	20	—	—	—	—	0,35	
	60	—	—	—	—	0,50	
	100...200	—	—	—	—	0,55	
<i>Закалка 880 °С, масло + отпуск 430 °С, 2 ч</i>							
4ХВ2С	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	
<i>Закалка 880 °С, масло + отпуск 450 °С, 2 ч</i>							
5ХВ2СФ	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	
<i>Закалка 880 °С, масло + отпуск 250 °С, 2 ч</i>							
6ХВ2С	-60	—	—	—	—	0,20	
	-20	—	—	—	—	0,22	
	20	—	—	—	—	0,24	
	60	—	—	—	—	0,30	
	100	—	—	—	—	0,34	
	200	—	—	—	—	0,36	
	<i>Закалка 880 °С, масло + отпуск 450 °С, 2 ч</i>						
	6ХВ2С	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	
<i>Изотермическая закалка 880 °С + выдержка при 250 °С</i>							
6Х3МФС	-60	—	—	—	—	0,35	
	-20	—	—	—	—	0,45	
	20	—	—	—	—	0,49	
	60...150	—	—	—	—	0,50	
	<i>Закалка 1000 °С, масло + отпуск 150 °С, 2 ч (58 HRC₃)</i>						
6Х3МФС	-60	—	—	—	—	0,20	
	-20...200	—	—	—	—	0,22	
<i>Закалка 1000 °С, масло + отпуск 250 °С, 2 ч (55,5 HRC₃)</i>							
6Х3МФС	-60	—	—	—	—	0,30	
	-20...200	—	—	—	—	0,32	
<i>Изотермическая закалка 1000 °С + выдержка при 250 °С (52 HRC₃)</i>							
6Х3МФС	-60	—	—	—	—	0,52	
	-20	—	—	—	—	0,55	
	20...200	—	—	—	—	0,58	

**Таблица 8.38. Рекомендуемые области применения сталей
для ударных инструментов [3, 4]**

Марка стали	Область применения
4ХС	Зубила, обжимки, ножницы для горячей и холодной резки
6ХС	Пневматические зубила и штампы небольших размеров, рубильные 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

8.3. 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 ста-

дии эксплуатации. Износ может быть окислительным (нормальный), 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: 0,01–0,1 м/с (0,3–0,5 с⁻¹) для гидравлических прессов; 0,25–0,50 м/с для кривошипных прессов, 0,5–1,5 м/с для винтовых пресс-молотов и 4–9 м/с (8–12 с⁻¹) для молотов. 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 на некоторые размеры назначать оптимальные минусовые допуски (повышение стойкости на 30–40 %), применять в процессе штамповки на прессах черновой ручей и 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 вследствие 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 °С 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 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, становятся возможными скалывание торцевых поверхностей и смятие, у прошивных пуансонов преобладает смятие и разгар, у пережимных вставок – смятие.

По условиям работы и уровню основных свойств стали подразделяют на четыре основные группы: 1) умеренной теплостойкости и повышенной вязкости; 2) повышенной теплостойкости и вязкости; 3) высокой теплостойкости; 4) нетеплостойкие повышенной вязкости.

Химический состав штамповых сталей для горячего деформирования приведен в табл. 8.39, значения критических точек – в табл. 8.40, а режимыковки и отжига – в табл. 8.41.

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 760–790 °С для сталей 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХГМ, при 790–820 °С для стали 5ХНВС, при 800–820 °С для сталей 4ХМФС, 5Х2МНФ и при 820–840 °С для стали 3Х2МНФ [4]. Температуры отжига других сталей указаны в табл. 8.41. Время выдержки при отжиге составляет 1 ч плюс 1,5 мин на 1 мм толщины. Температура в печи при загрузке не должна превышать 600 °С.

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 [3].

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 34–37 НРС₃), а после проводят чистовую механическую обработку.

Режимы закалки крупных штампов на разных заводах отличаются. Температура печи при загрузке может быть 300–450 °С, а при скоростном нагреве – соответствовать температуре закалки (830–880 °С).

Таблица 8.39. Химический состав штамповых сталей для горячего деформирования (остальное Fe), % (мас.) (ГОСТ 5950-73)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Ni
<i>Стали умеренной теплостойкости и повышенной вязкости</i>								
5ХНМ	0,50-0,60	0,10-0,40	0,50-0,80	0,50-0,80	-	0,15-0,30	-	1,40-1,80
5ХНВ	0,50-0,60	0,15-0,35	0,50-0,80	0,50-0,80	0,40-0,70	-	-	1,40-1,80
5ХНВС	0,50-0,60	0,60-0,90	0,30-0,60	1,30-1,60	0,40-0,70	-	-	0,80-1,20
5ХТМ	0,50-0,60	0,25-0,60	1,20-1,60	0,60-0,90	-	0,15-0,30	-	-
4ХМФС	0,37-0,45	0,50-0,80	0,50-0,80	1,50-1,80	-	0,90-1,20	0,30-0,50	-
5Х2МНФ (ДП-32)	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
3Х2МНФ	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
4ХМНФС	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
<i>Стали повышенной теплостойкости и вязкости</i>								
4Х5МФС	0,32-0,40	0,90-1,20	0,20-0,50	4,50-5,50	-	1,20-1,50	0,30-0,50	-
4Х5МФ1С (ЭП572)	0,37-0,44	0,90-1,20	0,20-0,50	4,50-5,50	-	1,20-1,50	0,80-1,10	-
4Х3ВМФ (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	-
3Х3М3Ф	0,27-0,34	0,10-0,40	0,20-0,50	2,80-3,50	-	2,50-3,00	0,40-0,60	-
4Х4ВМФС (ДП-22)	0,37-0,44	0,60-1,00	0,20-0,50	3,20-4,00	0,80-1,20	1,20-1,50	0,60-0,90	-
4Х5В2ФС (ЭП958)	0,35-0,45	0,80-1,20	0,15-0,40	4,50-5,50	1,60-2,20	-	0,60-0,90	-
<i>Стали высокой теплостойкости</i>								
5Х3В3МФС (ДП-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	0,05-0,15 Nb
4Х2В5МФ (ЭП959)	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	-
2Х6В8М2К8 (ЭП745)	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	7,5-8,5 Co
<i>Нетеплостойкие повышенной вязкости</i>								
7Х3	0,65-0,75	0,15-0,35	0,15-0,40	3,20-3,80	-	-	-	-
8Х3	0,75-0,85	0,15-0,35	0,15-0,40	3,20-3,80	-	-	-	-

Примечание. Сталь марки 4ХМНФС должна содержать (по расчету) 0,03-0,09 % (мас.) Zr и 0,002-0,004 % (мас.) В.

Таблица 8.40. Критические точки (в °С) штамповых сталей для горячего деформирования [4, 15]

Марка стали	A_{c1}	A_{c3} (A_{cm})	A_{r3}	A_{r1}	M_n	M_x
5ХНМ	730	780	640	610	230	—
5ХНВ	730	780	—	—	205	—
5ХНВС	760	800	—	—	250	—
5ХГМ	700	800	—	—	215	—
4ХМФС	760	805	710	630	280	100
5Х2МНФ	740	815	730	650	210	40
3Х2МНФ	780	830	—	—	—	—
4Х5МФС	840	870	810	735	300	110
4Х5МФ1С	875	935	815	760	305	140
4Х3ВМФ	800	850	760	730	230	—
3Х3М3Ф	815	875	820	760	340	155
4Х4ВМФС	830	910	750	670	255	105
4Х5В2ФС	800	875	840	730	275	90
5Х3В3МФС	780	920	725	665	330	70
4Х2В5МФ	820	940	840	690	205	100
2Х6В8М2К8	827	890	—	—	180	—
7Х3	760	—	—	730	400	—
8Х3	785	830	770	750	370	110

Таблица 8.41. Режимыковки и отжига (отпуска) штамповых сталей для горячего деформирования [4]

Марка стали	$\Delta t_{ков}^{*1}$, °С	Режим отжига (отпуска)	HB ^{*2} , не более
5ХНМ	1180–850	Нагрев до 700–720 °С, охлаждение 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	241
5ХНВ	1180–850	То же	255
5ХНВС	1180–850	Нагрев до 730–750 °С, охлаждение 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	255
5ХГМ	1180–850	Нагрев до 680–700 °С, охлаждение 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	241
5Х2МНФ	1200–850	Нагрев до 720–740 °С, охлаждение 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	255
3Х2МНФ	1180–850	Нагрев до 700–720 °С, охлаждение 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	255
4Х5МФС, 4Х5МФ1С, 4Х3ВМФ, 4Х5В2ФС	1180–850	Нагрев до 840–860 °С, охлаждение 40–50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	241
5Х3В3МФС	1180–850	То же	229
4Х2В5МФ	1180–850	»	241

Марка стали	$\Delta t_{\text{ков}}^{\ast 1}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Режим отжига (отпуска)	HB ^{∗2} , не более
3Х3М3Ф	1180–850	Нагрев до 860–880 °С, охлаждение 40–50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2410
4Х4ВМФС	1180–850	То же	2290
2Х6В8М2К8	1200–900	Нагрев до 900–920 °С, охлаждение 40–50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2500
7Х3	1160–850	Нагрев до 790–810 °С, охлаждение 40–50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2290
8Х3	1160–850	То же	2410

^{∗1} Интервал температурковки, замедленное охлаждение. ^{∗2} Твердость после отжига.

Таблица 8.42. Нормы нагрева в пламенной печи, выдержки и охлаждения штампов при закалке [4]

Операция	Наименьшая сторона штампа, мм					
	300	350	400	500	600	700
Выдержка после загрузки в печь	30 мин	30 мин	1 ч	1 ч 30 мин	2 ч	2 ч
Нагрев до температуры закалки	8 ч	10 ч	11 ч	13 ч 30 мин	16 ч	19 ч
Выдержка при температуре закалки	1 ч 50 мин	2 ч 10 мин	2 ч 30 мин	3 ч	3 ч 40 мин	4 ч 10 мин
Подстуживание на воздухе	15 мин	15 мин	20 мин	25 мин	35 мин	40 мин
Охлаждение в масле с температурой 70–75 °С	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 %.

Скорость нагрева под закалку и длительность аустенитизации можно устанавливать по нормам, указанным в табл. 8.42. Выдержку в масле рассчитывают так, чтобы не допустить полного охлаждения. Во избежание коробления и образования трещин еще не остывшие штампы подвергают отпуску. Очень крупные штампы охлаждают водовоздушной смесью. Температура печи при загрузке крупных штампов для отпуска не превышает 300–350 °С; продолжительность нагрева и выдержка при отпуске приведены в табл. 8.43. Длительность выдержки можно также устанавливать из расчета 2 ч плюс 1,5 мин на 1 мм толщины штампа. На окончательную термическую обработку сменный инструмент поступает либо с припусками для выполнения заключительного шлифования или доводки, либо без припусков.

Таблица 8.43. Продолжительность нагрева и выдержка штампов при отпуске в пламенной печи [4]

Операция	Наименьшая сторона штампа, мм								
	250	300	350	400	450	500	550	600	700
Нагрев до температуры отпуска	7 ч 30 мин	9 ч	10 ч 30 мин	12 ч	13 ч 30 мин	15 ч	16 ч 30 мин	18 ч	21 ч
Выдержка при отпуске	1 ч 30 мин	1 ч 50 мин	2 ч 10 мин	2 ч 30 мин	2 ч 40 мин	3 ч	3 ч 20 мин	3 ч 40 мин	4 ч 10 мин

Примечание. Указанные нормы нагрева и выдержки при использовании электропечи увеличивают на 20 %.

Чтобы избежать обезуглероживания и окисления, нагрев под закалку осуществляют в камерных печах с упаковкой инструмента в защитный материал или (для мелкого инструмента диаметром до 170 мм и длиной 250 мм) в соляных ваннах. Рекомендуется применять следующие защитные материалы [4]: 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) карбюризатор; смесь свежей и пережженной чугушной стружки (без масел и цветной стружки) – для сталей, закаливаемых от температур ниже 900 °С; бумагу (2–3 слоя) и сухой древесный уголь; предварительно отработавший при температуре, превышающей температуру закалки на 50 °С, карбюризатор – для сталей, закаливаемых от температур выше 900 °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 следующее: 18–24 с при нагреве в интервале 650–850 °С и окончательном нагреве в интервале 820–950 °С; 15–20, 20–30 и 30–50 с при окончательном нагреве в интервале 1000–1150 °С сталей с суммарным содержанием вольфрама, молибдена и ванадия < 1,5, 1,5–3,0 и > 3 % (мас.) соответственно.

Продолжительность выдержки при отпуске устанавливают согласно данным, приведенным в табл. 8.43. 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, бандажей и матриц.

Содержание карбидообразующих элементов в сталях минимально (до 7–9 % (мас.)), что исключает возникновение карбидной неоднородности даже в крупных сечениях. Основная карбидная фаза – цементит. В небольших количествах (до 3 % (об.)) могут образовываться более термостойкие карбиды $Me_{23}C_6$, Me_6C , MeC , вызывающие вторичное твердение. Поэтому термостойкость 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 $Me_{23}C_6$, Me_6C , MeC .

Если термостойкость сталей после окончательной термической обработки оценивать температурой дополнительного отпуска в течение 4 ч, вызывающего разупрочнение (35 HRC₃), то по возрастанию термостойкости 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 небольших штампов с наименьшей стороной до 200–300 мм; стали 5ХНВС и 5ХГМ – для средних штампов со стороной до 300–400 мм; сталь 5ХНМ и 5Х2МНФ – для крупных штампов со стороной до 500 мм и сложной гравюрой; сталь 3Х2МНФ – для наиболее крупных штампов со стороной до 400–700 мм. Твердость стали 5ХНМ в середине блока размером 300×300×400 мм лишь на 1–2 HRC₃ 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 5–6 HRC₃.

Оптимальные температуры закалки устанавливают на основе определенного соотношения между твердостью и зерном аустенита (табл. 8.44), размер которого существенно влияет на ударную вязкость стали в отпущенном состоянии (табл. 8.45).

Таблица 8.44. Влияние температуры закалки на твердость и размер зерна сталей умеренной термостойкости и повышенной вязкости [4]

Марка стали (рекомендуемая $t_{\text{заж}}$)	$t_{\text{заж}}$, °С	HRC ₃	Номер зерна	Марка стали (рекомендуемая $t_{\text{заж}}$)	$t_{\text{заж}}$, °С	HRC ₃	Номер зерна
5ХНМ (840–860 °С)	850	58	10	4ХМФС (910–930 °С) 5Х2МНФ (960–980 °С)	1075	52	–
	900	60	9		950	59	11
	950	60,5	8		1000	60	10
	1000	60	7–6		1050	61	8
4ХМФС (910–930 °С)	850	46	11–12	3Х2МНФ (930 °С)	1100	58	7
	900	48	11		900	44	10–11
	950	50	10		950	50	9–10
	1000	51,5	9–8		1000	50	8
	1050	52	7–8		1050	49	7

Для молотовых штампов с наименьшей стороной (диаметром) не более 200–250 мм при получении после закалки структуры мартенсита желательнее иметь зерно аустенита не крупнее 9–10-го номера. При большем размере штампов, когда образуется смешанная бейнитно-мартенситная структура, лучший комплекс свойств достигается при зерне аустенита не крупнее 11-го номера.

Таблица 8.45. Зависимость ударной вязкости стали 6Х2МНФ от размера зерна аустенита после закалки, моделирующей закалку с охлаждением в масле центральных зон заготовки 200×200 мм (числитель) и 600×500 мм (знаменатель), и последующего отпуска на разную твердость [6]

Номер зерна	$t_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$	$KCU, \text{ в МДж/м}^2, \text{ после отпуска на твердость HRC}_s$		
		41–43	44–46	47–49
11	20	0,48/0,40	0,44/0,25	0,36/–
	600	1,02/0,86	0,94/0,75	0,80/–
10	20	0,50/0,34	0,46/0,26	0,34/0,20
	600	0,93/0,75	0,86/0,57	0,68/0,47
9	20	0,46/0,26	0,42/0,18	0,28/0,10
	600	0,80/0,58	0,74/0,38	0,54/0,32
8	20	0,28/0,19	0,20/0,08	0,14/0,01
	600	0,50/0,30	0,48/0,20	0,32/0,17

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. Установленные в результате многолетней практики оптимальные соотношения между твердостью и ударной вязкостью для молотовых штампов приведены в табл. 8.46.

Таблица 8.46. Ударная вязкость сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости при рекомендуемых значениях твердости молотовых штампов с различной массой падающей части [4]

Масса падающей части, т	HRC _s	$KCU, \text{ МДж/м}^2, \text{ для стали}$			
		5ХНМ	5ХНВ	5ХНВС	5ХГМ
< 1	41–46	0,40–0,55	0,30–0,50	0,22–0,35	0,17–0,30
1–3	37–41	0,60–0,80	0,50–0,80	0,35–0,60	0,30–0,70
3–4	34–38	0,80–1,10	0,60–1,00	0,50–1,10	0,50–1,00
4–6	32–36	1,05–1,30	0,85–1,25	0,86–1,35	–
> 6	30–33	1,20–1,35	1,10–1,30	1,23–1,40	–

Рекомендуемые режимы закалки и отпуска сталей в зависимости от размеров штампов приведены в табл. 8.47, а температуры отпуска хвостовиков штампов – в табл. 8.48. Влияние температуры отпуска на свойства сталей показано в табл. 8.49.

Таблица 8.47. Рекомендуемые температуры закалки (числитель) и отпуска (знаменатель) сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости в зависимости от размеров штампа [4, 6]

Наименьшая сторона штампа, мм	Температура нагрева, °С, для сталей				HRC _s
	5XHM, 5XГМ, 5XHB	4XMFС	3X2MНФ	5X2MНФ	
<i>Для молотов</i>					
<300	<u>820–850</u> 480–520	<u>910–930</u> 560–600	<u>910–930</u> 540–560	<u>960–980</u> 600–620	40–45
>300	<u>820–850</u> 520–560	<u>910–930</u> 600–620	<u>910–930</u> 560–580	<u>960–980</u> 620–640	38–41
<i>Для прессов</i>					
<300	<u>840–870</u> 420–450	<u>920–950</u> 530–550	<u>920–950</u> 530–550	<u>970–1000</u> 580–600	45–47
>300	<u>840–870</u> 450–480	<u>920–950</u> 580–600	<u>920–950</u> 540–560	<u>970–1000</u> 600–620	42–44

Примечания: 1. Для крупных штампов при большом количестве остаточного аустенита целесообразно проведение второго отпуска при температурах на 30–40 °С ниже и по продолжительности на 25–30 % короче первого. 2. Нагрев до температуры закалки со скоростью 35–25 °С/ч для штампов высотой 250–400 мм и 24–15 °С/ч для штампов высотой 450–700 мм. 3. Штампы с наименьшей стороной до 250–300 мм, имеющие простую форму, охлаждают в масле, а сложной формы – на воздухе; при стороне свыше 300 мм режим охлаждения выбирать по табл. 8.42.

Таблица 8.48. Температуры отпуска и твердость хвостовиков штампов [6]

Наименьшая сторона штампа, мм	Температура отпуска, °С, для сталей				HRC _s
	5XHM, БХГМ, 5XHB	4XMFС	3X2MНФ	5X2MНФ	
<300	580–610	630–650	620–640	640–660	34–37
>300	600–630	650–670	640–660	660–680	28–33

Таблица 8.49. Влияние температуры отпуска после закалки с оптимальных температур на механические свойства сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [4]

Марка стали ($t_{\text{зак}}$: твердость)	$t_{\text{отп}}$, °С	HRC _s	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
5XHM (850 °С; 58 HRC _s)	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
5XHB (870 °С; 58 HRC _s)	450	44,5	1300	1460	11	45	0,40
	500	43	1180	1350	12	46	0,55

Марка стали ($t_{\text{зак}}$; твердость)	$t_{\text{от}}, ^\circ\text{C}$	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$	σ_s	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
5XНВ (870 °С; 58 HRC ₃)	550	38	1050	1280	14	52	0,64
	600	34,5	800	1060	16	60	>1,2
5XНВС (870 °С; 58 HRC ₃)	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
5XГМ (850 °С; 58 HRC ₃)	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
4XМФС (920 °С; 53–55 HRC ₃)	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	1,60
5X2МНФ (980 °С; 58–59 HRC ₃)	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
3X2МНФ (930 °С; 54 HRC ₃)	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	1,00
	650	27	740	840	18	50	1,70

Примечания: 1. Продолжительность отпуска 2 ч. 2. Свойства оценивали на образцах 15×15 мм.

Образование верхнего бейнита (вместо мартенсита) при закалке штампов высотой более 250–300 мм снижает твердость в отпущенном состоянии на 2–3 HRC₃ и теплоустойчивость на 20–30 °С. При этом вязкость и пластичность сталей 5XНМ, 5XНВ, 5XНВС сохраняются, а сталей 4XМФС, 3X2МНФ, 5X2МНФ уменьшаются (бейнитная хрупкость). Поэтому во избежание хрупкого разрушения штампы из этих сталей необходимо нагревать до 250–300 °С или отпускать на меньшую твердость для получения необходимой

вязкости ($KCU = 0,35 \dots 40 \text{ МДж/м}^2$). Влияние температуры испытаний на свойства сталей показано в табл. 8.50.

Таблица 8.50. Влияние температуры испытаний и высоты штампа на механические свойства сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [4]

Марка стали (высота штампа)	$t_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$	σ_s	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
5ХНМ ($h > 250 \text{ мм}$)	20	44	1410	1520	9	41	0,32
	300	—	1150	1290	14	60	0,70
	400	38	1000	1250	14	48	0,65
	500	30	750	960	18	54	0,45
	600	—	360	520	32	92	1,60
5ХНМ ($h < 250 \text{ мм}$)	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 НВ	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
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 НВ	265	405	—	40,5	0,50
5ХГМ ($h < 250 \text{ мм}$)	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 ($h > 250 \text{ мм}$)	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
4ХМФ	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

Марка стали (высота штампа)	$t_{исп}, ^\circ\text{C}$	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$	σ_a	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
4ХМФС ($h > 250$ мм)	20	43	1350	1510	13	51	0,55
	300	—	1190	1350	12	50	0,65
	600	—	790	890	19	73	0,85
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 ($h < 250$ мм)	20	43	1380	1480	12	43	0,60
	300	—	1110	1270	13	55	0,65
	600	—	700	820	21	77	0,65
3Х2МНФ	20	42	1300	1450	11	45	0,55
	300	—	1110	1300	12	46	0,80
	600	—	860	1100	13	52	0,55

Примечание. Свойства оценивали на образцах, моделирующих закалку заготовки сечением 15×15 мм с охлаждением в масле.

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 4ХМФС в 1,5–2 раза, а из стали 5Х2МНФ в 1,5–2,5 раза выше, чем из стали 5ХНМ, вследствие их лучшей теплостойкости.

Крупные инструменты, работающие при длительном нагреве (внутренние втулки, пресс-штемпели, иглы) и кольца-бандажи целесообразно изготавливать из стали 3Х2МНФ, обладающей высокой длительной прочностью (табл. 8.51) и релаксационной стойкостью (табл. 8.52).

Таблица 8.51. Длительная прочность сталей [4]

Марка стали	σ , МПа, при $t_{исп}, ^\circ\text{C}$		τ , ч, при $t_{исп}, ^\circ\text{C}$	
	450	500	450	500
5ХНВ	600	400	75	46
	550	350	304	244
	500	300	2171	366
	—	250	—	377
Типа 4ХЗВМФ	1000	1000	29	5
	900	900	53	12
	800	850	100	19
	650	700	349	40

Марка стали	σ , МПа, при $t_{исп}$, °С		τ , ч, при $t_{исп}$, °С	
	450	500	450	500
4Х5В2ФС	1150	950	94	106
	950	900	435	130
	900	850	259	132
	–	800	–	130
4Х2В5ФМ	1150	1050	140	21
	1050	950	616	191
	1000	850	1549	240
	950	–	1202	–
Типа 3Х2МНФ	1000	900	37	3
	900	850	1777	240
	850	700	830	452
	–	650	–	944

* Время до разрушения.

Таблица 8.52. Релаксация напряжений в сталях при 500 °С [4], %

Марка стали	σ , МПа	Время, ч					
		1	63	120	300	500	1000
5ХНВ, 5ХНМ	750	85,5	92,4	94,0	94,3	95,3	96,5
	600	56,0	–	83,0	–	89,0	92,5
Типа 4Х3ВМФ	750	12,0	21,4	27,5	34,6	Поломка	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

В контейнерах из сталей 5ХНМ и 5ХНВ невозможно создать натяг при рабочих температурах 450–500 °С. Значения коэффициента линейного расширения сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости приведены ниже [4]:

Марка стали	5ХНМ	5ХНВС	30Х2МНФ
$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹ , при Δt , °С			
100–250	12,5	12,5	12,7
250–350	14,1	14,1	14,2
350–600	14,2	14,6	15,6
600–700	15,0	16,5	15,8

Видно, что для всех сталей значения α приблизительно одинаковы. Рекомендуемые области применения этих сталей приведены в табл. 8.53.

Таблица 8.53. Рекомендуемые области применения сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [4, 6]

Марка стали	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 скоростной 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 для 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 (с наименьшей стороной 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, ножи горячей резки; мелкие прессовые и молотовые вставки

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 одного-двух баллов. В отожженном состоянии доля карбидной фазы ($Me_{23}C_6$, Me_6C , VC) составляет 6–12 % (мас.). Теплостойкость сталей повышается с увеличением в структуре сталей количества карбидов Me_6C и VC, т. е. при повышении концентрации вольфрама, молибдена и ванадия.

После закалки на мелкое зерно (9–10) в структуре сохраняется 2–6 % (об.) нерастворившихся карбидов Me_6C и VC и 5–12 % (об.) остаточного аустенита. Их влияние на свойства незначительно. Выделение вторичных карбидов по границам зерен и образование

промежуточных структур снижает вязкость сталей (табл. 8.54). Поэтому при назначении режима ступенчатой закалки, обеспечивающего минимальное коробление, охлаждение с температуры аустенитизации до температур изотермической выдержки 450–500 °С в области наибольшей устойчивости аустенита проводят быстро (в расплаве 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 Me_6C и VC , препятствующих росту зерна аустенита, и в зависимости от состава закаливаются на твердость 48–59 HRC₃ (табл. 8.55). Лучшее сопротивление хрупкому разрушению и разгаростойкость получают при закалке на зерно не крупнее 9–10-го номера. Для получения высокой теплостойкости и износостойкости целесообразна закалка от повышенных температур с получением зерна 7–8-го номера (бандажированные штампы). Нагрев длительностью до 1 ч в интервале принятых температур закалки мало изменяет получаемые после закалки номер зерна, твердость и другие свойства. Однако более длительные выдержки снижают основные свойства.

Для исправления крупнозернистой структуры можно рекомендовать проведение перед закалкой изотермического отжига вместо отжига по режимам, указанным в табл. 8.41.

Отпуск проводят на вторичную твердость (выделяются карбиды MeC и Me_2C), его температуру назначают в зависимости от условий работы инструмента. Тяжелонагруженный инструмент с наименьшей стороной 100–120 мм, предназначенный для горячей объемной штамповки, отпускают на твердость 46–50 HRC₃; более крупные штампы – на твердость 44–46 HRC₃; крупные и сложные азотируемые или цианируемые пресс-формы литья под давлением цветных сплавов – на твердость 40–43 HRC₃ и даже 35–38 HRC₃.

Таблица 8.54. Влияние скорости охлаждения при закалке с оптимальной температуры на ударную вязкость штамповых сталей [4]

Марка стали	$t_{\text{нсп}}, ^\circ\text{C}$	KCU, МДж/м ² , при охлаждении от $t_{\text{зак}}$ по режиму*		
		I	II	III
4X5B2ФC	20	0,45	0,17	0,15
	600	0,60	0,45	0,35
4X3BMФ	20	0,50	0,15	0,10
	600	0,60	0,60	0,50
4X4BMФC	20	0,40	0,20	0,15
	600	0,55	0,35	0,30
4X5MФC	20	0,55	0,15	0,12
	600	0,60	0,45	0,45
3X3M3Ф	20	0,20	0,07	0,07
	600	0,50	0,45	0,35
4X2B5MФ	20	0,35	0,07	0,07
	600	0,45	0,25	0,27
5X3B3MФC	20	0,25	0,05	0,10
	600	0,40	0,20	0,17

Примечание. Отпуск сталей 4X2B5MФ, 5X3B3M на 45–46 HRC₃, остальных – на 47–49 HRC₃.

* I – охлаждение в масле образцов 10×10×55 мм; II – то же центра заготовки диаметром 200 мм; III – охлаждение на воздухе центра заготовки диаметром 120 мм.

Таблица 8.55. Влияние температуры заковки на твердость и величину зерна сталей повышенной теплостойкости и вязкости [6]

Марка стали (рекомендуемая $t_{\text{зак}}$)	$t_{\text{зак}}, ^\circ\text{C}$	HRC ₃	Номер зерна	Марка стали (рекомендуемая $t_{\text{зак}}$)	$t_{\text{зак}}, ^\circ\text{C}$	HRC ₃	Номер зерна	
4X5MΦC (1010 °C)	950	45	12	4X5B2ΦC (1040 °C)	1100	56,5	8	
	1000	49	10		1125	57	8-7	
	1050	51	9-8		1150	58	7	
	4X3BMΦ (1050 °C)	950	49	11	3X3M3Φ (1040 °C)	950	41,5	11
		1000	52	11		1000	46	10-9
		1050	53	10		1050	47,5	9
		1075	54	9		1075	48	8-9
1100		54	8	1100	48	8-7		
1125		55	8-7	1125	48	7		
1150		56	7	1150	48,5	7		
4X5B2ΦC (1040 °C)	950	46	11	4X4BMΦC (1060 °C)	950	54	12	
	1000	51,5	11-10		1000	55,5	11	
	1050	54,5	10-9		1050	57,5	10	
	1075	56	9		1075	58	10-9	
					1100	59	9	
1125	59	8	1125	59	8			
1150	59	7	1150	59	7			

Для повышения вязкости проводят второй отпуск, назначая температуру на 30–40 °C ниже, а продолжительность на 25–30 % меньше первого. Температура отпуска влияет на свойства сталей (табл. 8.56).

Таблица 8.56. Влияние температуры отпуска после заковки с оптимальной температуры на механические свойства сталей повышенной теплостойкости и вязкости [4]

Марка стали ($t_{\text{зак}}$; твердость)	$t_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
4X5MΦC (1000 °C; 51 HRC ₃)	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 °C; 52 HRC ₃)	300	51	1520	1900	9	28	0,48
	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 °C; 54 HRC ₃)	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

Марка стали ($t_{\text{зак}}$; твердость)	$t_{\text{отп}}$, °C	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
4X5B2ФC (1040 °C; 54 HRC ₃)	500	52	1700	2040	7	10	0,10
	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
3X3M3Ф (1040 °C; 49 HRC ₃)	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
4X4BMФC (1060 °C; 57 HRC ₃)	550	55	1880	2100	5	8	0,20
	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. Продолжительность отпуска 2 ч. 2. Свойства оценивали на образцах сечением 10×10 мм.

Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей повышенной теплостойкости и вязкости приведены в табл. 8.57. Если теплостойкость сталей оценивать

Таблица 8.57. Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей повышенной теплостойкости и вязкости [4, 6]

Марка стали	Закалка (в масле)		Отпуск					
	t , °C	HRC ₃	t' , °C	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$	σ_b	KCU, МДж/м ²	Теплостойкость (40 HRC ₃), °C
					МПа			
4X5MФC	1000–1020	50–52	530...560 + 500...520	47–49	1480	1750	0,57	600
	1000–1020	50–52	580...590 + 540...550	44–46	1400	1540	0,60	–
4X5MФ1C	1020–1040	53–55	560...580 + 520...540	47–49	1490	1650	0,46	630
	1020–1040	53–55	610...620 + 570...580	44–46	–	–	–	–
4X3BMФ	1040–1060	52–54	560...580 + 530...570	47–49	1520	1720	0,56	650
	1040–1060	52–54	620...630 + 590...600	44–46	1420	1580	0,50	–
4X5B2ФC	1030–1050	53–56	560...580 + 530...540	47–49	1690	1760	0,30	630
	1030–1050	53–56	600...620 + 570...590	44–46	1430	1550	0,50	–
3X3M3Ф	1030–1050	47–50	580...600 + 540...560	47–48	1500	1700	0,25	650
	1030–1050	47–50	610...620 + 570...580	44–46	1420	1600	0,30	–
4X4BMФC	1050–1070	55–60	620...630 + 560...580	47–50	1500	1700	0,44	660
	1050–1070	55–60	640...650 + 600...610	44–46	1300	1500	0,40	–

Примечание. Свойства оценивали на образцах сечением 10×10 мм.

* Продолжительность первого отпуска 2 ч, второго – на 25–30 % меньше.

по температуре отпуска (после окончательной термической обработки на твердость 47–49 HRC₃) продолжительностью 4 ч на твердость 40 HRC₃, то их можно расположить в следующий ряд: 4X5MΦС–600 °С; 4X5MΦ1С и 4X5B2ΦС–630 °С; 4X3BМΦ и 3X3M3Φ–650 °С; 4X4BМΦС–660 °С.

При твердости 45 HRC₃ ударная вязкость должна быть для большей части штампов не ниже 0,3–0,35 МДж/м² при 20 °С и 0,5 МДж/м² при температуре эксплуатации. Выполнение этого требования осложняется отрицательным влиянием масштабного эффекта (усиление карбидной неоднородности). С увеличением наименьшей 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 °С. Температура испытаний влияет на свойства сталей повышенной теплостойкости и вязкости (табл. 8.58). Область применения сталей повышенных теплостойкости и вязкости приведена в табл. 8.59.

Таблица 8.58. Влияние температуры испытаний на механические свойства сталей повышенных теплостойкости и вязкости [4]

Марка стали (режим отпуска)	t _{исп} , °С	HRC ₃	σ _{0,2}	σ _в	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
4X5MΦС (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
4X5MΦ1С (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
4X3BМΦ (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
4X5B2ΦС (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

Марка стали (режим отпуска)	$t_{исп}$, °C	HRC ₂	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
4Х4ВМФС (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 оценивали на образцах сечением 10×10 мм.

Таблица 8.59. Рекомендуемые области применения сталей повышенной теплостойкости и вязкости [4, 6]

Марка стали	Область применения
4Х5МФС	Мелкие молотовые штампы, особенно чистовой штамповки с наименьшей стороной до 100–125 мм; молотовые (диаметром или стороной до 200 мм) и прессовые вставки (предварительного и окончательного ручья, знаки, выталкиватели, внутренние втулки, пресс-штемпели, 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
4Х5МФ1С, 4Х5В2ФС	Молотовые и прессовые вставки (диаметром до 200–250 мм) с таким же назначением, как и из стали 4Х5МФС; инструмент для высадки заготовок из легированных конструкционных и жаропрочных материалов на горизонтально-ковочных машинах; пресс-формы литья под давлением алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов
4Х3ВМФ	Мелкие молотовые штампы; молотовые и прессовые вставки (диаметром до 300–400 мм); инструмент горизонтально-ковочных машин при горячем деформировании коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов, работающий в условиях повышенных давлений (800–1500 МПа) и нагрева до 650–660 °С; инструмент для высокоскоростной машинной штамповки конструкционных сталей
4Х4ВМФС	Инструмент для высокоскоростной машинной штамповки и 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
3Х3М3Ф	Инструмент для горячего деформирования на кривошипных прессах и горизонтально-ковочных машинах, подвергающийся в процессе работы интенсивному охлаждению (как правило, для мелкого инструмента); пресс-формы литья под давлением медных сплавов; ножи для горячей резки

Стали высокой теплостойкости (см. табл. 8.39) относят к заэвтектидным, причем стали 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС образуют группу сталей с карбидным упрочнением, а стали типа 2Х6В8М2К8 – с карбидоинтерметаллидным.

Штампы из сталей 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС с наименьшей стороной 100–150 мм при охлаждении в масле прокаливаются полностью. Уменьшение скорости охлаждения вызывает выделение вторичных карбидов по границам зерен аустенита и образование продуктов промежуточного превращения, что снижает вязкость. Сталь 2Х6В8М2К8 приобретает твердость 53–57 HRC, даже при охлаждении на воздухе заготовки диаметром более 120–150 мм. Замедленное охлаждение вязкость почти не снижает.

Содержание карбидной фазы в сталях 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС составляет 10–13 % (Me_6C и MeC), в стали 2Х6В8М2К8 – только 6–7 % (Me_6C), но в этой стали дополнительно содержится интерметаллид $(Fe, Co)_7W_6$. Карбидная неоднородность сталей 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС в заготовках диаметром до 100 мм, а стали 2Х6В8М2К8 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 штампы из сталей 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС используют для изготовления инструмента с наименьшей стороной до 100–150 мм, а из стали 2Х6В8М2К8 – до 70–80 мм.

Стали высокой теплостойкости сохраняют мелкое зерно (9–10-го номера) до следующих температур аустенитизации: 4Х2В5МФ – до 1100 °С, 5Х3В3МФС – до 1150 °С, 2Х6В8М2К8 – до 1200 °С (табл. 8.60). При термической обработке штампов на высокую теплостойкость (небольшие динамические нагрузки) температуру закалки устанавливают на 10–20 °С выше, чем при обработке на повышенную прочность и вязкость (табл. 8.61).

Таблица 8.60. Влияние температуры закалки в масле на твердость и размер зерна аустенита сталей высокой теплостойкости [6]

Марка стали (рекомендуемая $t_{зак}$)	$t_{зак}$, °С	HRC ₃	Номер зерна	Марка стали (рекомендуемая $t_{зак}$)	$t_{зак}$, °С	HRC ₃	Номер зерна
4Х2В5МФ (1050–1080 °С)	1000	49	12	5Х3В3МФС (1120–1150 °С)	1000	50	12
	1050	54	11		1050	51	11
	1100	55	9		1100	53	10
	1150	55	6		1150	57	9
	1200	55	4		1200	57,5	7

Таблица 8.61. Режимы окончательной термической обработки сталей высокой теплостойкости [6]

Марка стали	Закалка		Отпуск		Теплостойкость (40 HRC ₃), °С
	t , °С	HRC ₃	t , °С	HRC ₃	
4Х2В5МФ	1080–1100	54–56	640–650	44–47	670
	1080–1100	54–56	650–660	41–44	670
	1050–1080	52–56	610–630	46–49	660
	1050–1080	52–56	630–640	42–45	660
5Х3В3МФС	1130–1150	54–58	650–660	44–47	685
	1130–1150	54–58	660–680	41–44	685
	1100–1120	52–55	640–650	45–49	670
	1100–1120	52–55	650–660	42–45	670
2Х6В8М2К8	1180–1200	52–54	670–690	48–52	730
	1180–1200	52–54	690–710	44–48	730

Количество остаточного аустенита в сталях 4Х2В5МФ и 5ХЗВ3МФС после закалки составляет 10–15% (мас.); сталь 2Х6В8М2К8 почти не содержит аустенита.

Штампы сложной формы и относительно небольших размеров для уменьшения деформации охлаждают в горячих средах при 350–250 °С (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 5ХЗВ3МФС от 810–830 °С) и отпуск при 600 °С. Деформация штампов из стали 2Х6В8М2К8 незначительна в связи с небольшой концентрацией углерода.

Отпуск выполняют на вторичную твердость и немедленно после закалки для предотвращения образования трещин. Температура отпуска влияет на свойства сталей высокой теплостойкости (табл. 8.62). Режимы их обработки (см. табл. 8.61) назначают в зависимости от условий работы.

Таблица 8.62. Влияние температуры отпуска после закалки (в масле) от оптимальных температур на механические свойства сталей высокой теплостойкости [4]

Марка стали ($t_{\text{зак}}$; твердость)	$t_{\text{отп}}$, °С	HRC ₂	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
4Х2В5МФ (1080 °С; 50 HRC ₂)	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
5ХЗВ3МФС (1150 °С; 56 HRC ₂)	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
2Х6В8М2К8 (1200 °С; 54 HRC ₂)	650	52	1600	1900	–	–	0,02
	700	48	1340	1640	–	–	0,20
	730	40	1060	1370	–	–	0,80
	750	34	800	1180	–	–	1,28

Примечание. Свойства оценивали на образцах сечением 15×15 мм.

* Продолжительность отпуска 2 ч.

Наиболее приемлемое сочетание свойств при 20 и 600 °С у сталей 4Х2В5МФ и 5ХЗВ3МФС получают после отпуска на твердость 45–47 HRC₂ (табл. 8.63). Отпуск на твердость 41–44 HRC₂ выполняют с целью повышения сопротивления хрупкому разрушению. Сталь 2Х6В8М2К8 уступает этим сталям по вязкости, но сильно превосходит их по теплостойкости (см. табл. 8.61).

Таблица 8.63. Влияние температуры испытаний на механические свойства сталей высокой теплостойкости [6]

Марка стали ($t_{\text{зак}}^{\circ}\text{C}$)	$t_{\text{исп}}^{\circ}\text{C}$	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
4Х2В5МФ (1080 °С)	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
5Х3В3МФС (1130 °С)	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
2Х6В8М2К8 (1180 °С)	20	—	1450	1750	2	6	0,05
	600	—	950	1200	7	24	0,20
	700	—	800	900	8	25	0,35

Примечания: 1. Стали 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС отпущены на твердость 46–47 HRC₃, а сталь 2Х6В8М2К8 – на 48–50 HRC₃. 2. Свойства оценивали на образцах сечением 15×15 мм.

[•] В масле.

Температуру второго отпуска для сталей 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС назначают на 30–40 °С ниже, а продолжительность на 25–30 % меньше первого. Для стали 2Х6В8М2К8 рекомендуется предварительный отпуск при 340–360 °С длительностью 1,5–2 ч. Штампы перед началом работы нагревают до 300–350 °С. Область применения сталей высокой теплостойкости приведена в табл. 8.64.

Таблица 8.64. Рекомендуемые области применения сталей высокой теплостойкости

Марка стали	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 высадки 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

Стали прокаливаются на глубину до 70–80 мм. Повышенную вязкость и твердость 40–45 HRC₃ они получают благодаря проведению отпуска при 480–520 °С, что выше температур интенсивного развития хрупкости первого рода.

Предварительную термическую обработку для уменьшения деформации инструмента проводят по режиму: закалка 790–800 °С и отпуск при 520–600 °С. В этом состоянии стали получают менее шероховатую поверхность при резании (твердость 22–25 HRC₃). Режим окончательной термической обработки сталей 7Х3 и 8Х3: закалка 850–880 °С в масле, отпуск 480–520 °С. Твердость сталей 7Х3 и 8Х3 после закалки составляет ≥ 54 HRC₃ и ≥ 55 HRC₃, а после отпуска соответственно ≥ (38–44) HRC₃ и ≥ (41–46) HRC₃. Влияние температуры отпуска и температуры испытаний на механические свойства этих сталей характеризуют данные, приведенные в табл. 8.65 и 8.66.

Таблица 8.65. Влияние температуры отпуска после закалки (в масле) от оптимальных температур на механические свойства нетеплостойких сталей повышенной вязкости [4]

Марка стали ($t_{\text{зак}}$; твердость)	$t_{\text{отп.}}^{\circ}\text{C}$	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ	KCU, МДж/м ²
			МПа		%		
7Х3 (870 °С; 54 HRC ₃)	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; 55 HRC ₃)	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

Примечание. Свойства оценивали на образцах сечением 15×15 мм.

[°] Продолжительность отпуска 2 ч.

Таблица 8.66. Влияние температуры испытаний на механические свойства нетеплостойких сталей повышенной вязкости [4]

Марка стали	$t_{\text{исп.}}^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{0,2}$	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

Примечание. Свойства оценивали на образцах сечением 15×15 мм, термообработанных по режиму: закалка 870 °С, масло + отпуск 500 °С, 2 ч.

Штампы КГШП и ГКМ, пресс-формы литья под давлением с целью повышения стойкости (в 1,5–2,0 раза) целесообразно азотировать или цианировать [4]. Надежность инструмента возрастает при использовании для его изготовления сталей после электрошлакового переплава.

Список литературы

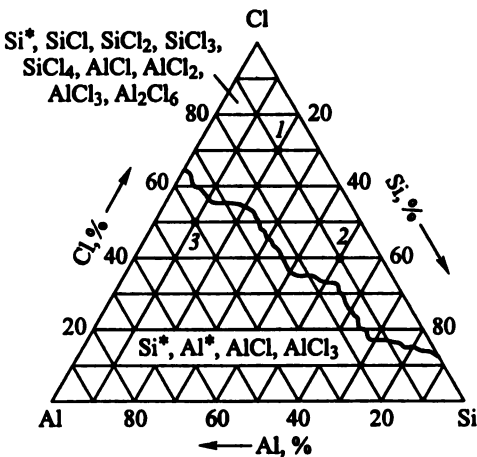
1. *Артингер И.* Инструментальные стали и их термическая обработка: Справочник / Пер. с венг.; Под ред. Л.С. Кремнева. М.: Металлургия, 1982.
2. *Баженов И.Ф., Байчман С.Г., Карпачев Д.Г.* Твердые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1978.
3. *Геллер Ю.А.* Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983.
4. *Конструкционные материалы:* Справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990.
5. *Кремнев Л.С.* От стали Р18 к безвольфрамовым низколегированным быстрорежущим сталям // МИТОМ. 1986. №. 7.
6. *Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И.* Штамповые стали. М.: Металлургия, 1980.
7. *Порошковая металлургия.* Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник / Под ред. И. М. Федорченко. Киев: Наукова думка, 1985.
8. *Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение:* Справочник / В.П. Шедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант, Г.М. Ипполитов. М.: Машиностроение, 1987.
9. *Сталь инструментальная быстрорежущая.* Технологические свойства в состоянии поставки и в термически обработанном состоянии: Таблица стандартных справочных данных (ГСССД 41–82). М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1983.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П1. Изотермические сечения диаграмм состояния металлов с хлором

На рис. П1–П11 приведены построенные в МГТУ им. Н.Э. Баумана изотермические сечения тройных диаграмм состояния, где одним из элементов является хлор. Подобные равновесные диаграммы состояния могут быть использованы при разработке экологически чистых, безопасных и экономичных процессов химико-термической обработки, а также для нанесения покрытий циркуляционным методом*.

Построение равновесных тройных диаграмм состояния, где участвуют два металла и хлор, необходимо для теоретического предвидения состава исходной газовой смеси.

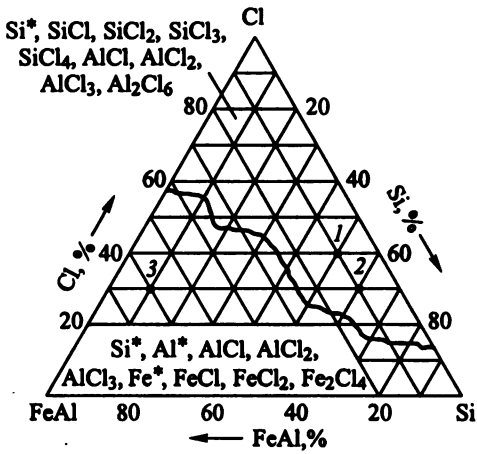


Соединения и элементы	Точки на диаграмме		
	1	2	3
SiCl	0,201	0,16	–
SiCl ₂	41,672	12,98	–
SiCl ₃	4	0,485	–
SiCl ₄	0,703	0,033	–
AlCl	1,284	5,611	88,033
AlCl ₂	4,619	7,859	0,015
AlCl ₃	40,259	26,684	–
Al ₂ Cl ₆	0,126	0,048	–
Si*	7,137	46,139	10
Al*	–	–	1,952

* В твердом состоянии.

Рис. П1. Изотермическое сечение системы Al–Si–Cl при температуре 1000 °C и давлении 0,1 МПа

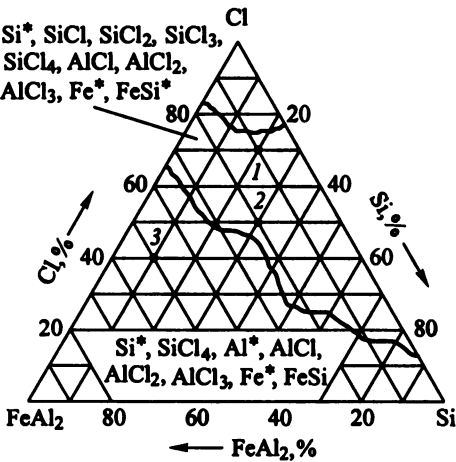
* Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. М.: Машиностроение, 1979. 224 с.



Соединения и элементы	Точки на диаграмме		
	1	2	3
SiCl	0,199	0,138	0,001
SiCl ₂	49,664	8,912	0,001
SiCl ₃	5,73	0,266	—
SiCl ₄	1,21	0,015	—
AlCl	0,477	3,807	44,898
AlCl ₂	2,063	4,258	0,507
AlCl ₃	21,618	11,514	0,014
Al ₂ Cl ₆	0,036	0,009	—
FeCl	0,069	0,263	5,934
FeCl ₂	14,462	14,236	3,243
Fe ₂ Cl ₄	0,437	0,36	0,013
Fe*	0,001	0,016	35,385
Si*	4,032	56,176	9,999
Al*	—	—	0,005

* В твердом состоянии.

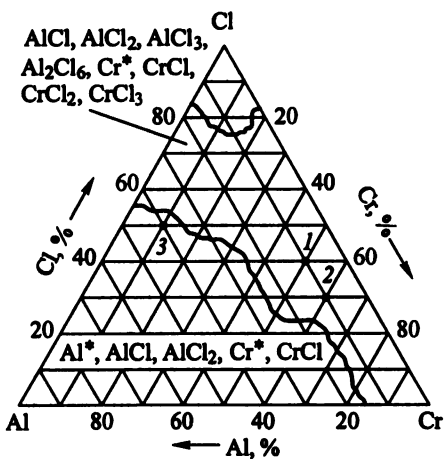
Рис. П2. Изотермическое сечение системы FeAl–Si–Cl при температуре 1000 °C и давлении 0,1 МПа



Соединения и элементы	Точки на диаграмме		
	1	2	3
SiCl	0,197	0,126	0,002
SiCl ₂	53,769	10,097	0,003
SiCl ₃	6,78	0,375	—
SiCl ₄	1,387	5,571	55,912
AlCl	1,828	7,741	1,409
AlCl ₂	1,828	7,741	1,409
AlCl ₃	20,934	26,076	0,086
Al ₂ Cl ₆	0,034	0,05	—
Fe*	0,001	0,016	17,759
Si*	2,983	26,997	9,998
Al*	—	—	0,003
FeSi*	11,552	22,927	14,828

* В твердом состоянии.

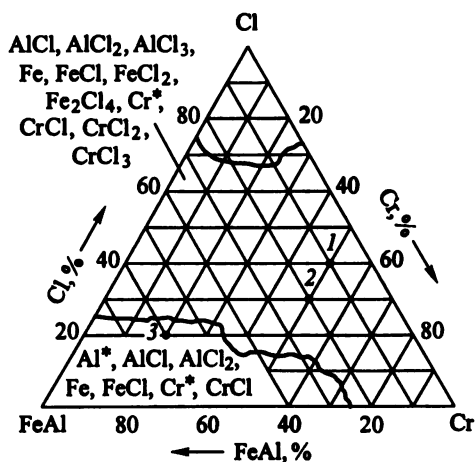
Рис. П3. Изотермическое сечение системы FeAl₂–Si–Cl при температуре 1000 °C и давлении 0,1 МПа



Соединения и элементы	Точки на диаграмме		
	1	2	3
CrCl	23,775	19,808	0,011
CrCl ₂	24,659	12,5	—
CrCl ₃	0,07	0,021	—
AlCl	19,124	20,788	88,025
AlCl ₂	4,452	2,944	0,015
AlCl ₃	2,512	1,011	—
Cr*	25,409	42,927	9,993
Al*	—	—	1,955

* В твердом состоянии.

Рис. П4. Изотермическое сечение системы Al–Cr–Cl при температуре 1000 °C и давлении 0,001 МПа



Соединения и элементы	Точки на диаграмме		
	1	2	3
CrCl	24,542	12,95	0,004
CrCl ₂	29,012	5,691	—
CrCl ₃	0,093	0,007	—
AlCl	6,039	14,005	35,198
AlCl ₂	1,602	1,381	0,002
AlCl ₃	1,031	0,33	—
FeCl	1,013	3,899	0,026
FeCl ₂	12,998	18,606	—
Fe ₂ Cl ₄	0,31	0,577	—
Fe	0,257	2,663	40,484
Cr*	23,103	39,89	19,998
Al*	—	—	4,289

* В твердом состоянии.

Рис. П5. Изотермическое сечение системы FeAl–Cr–Cl при температуре 1000 °C и давлении 0,001 МПа

Соединения и элементы	Точки на диаграмме				
	1	2	3	4	5
BCl	0,005	0,003	—	—	—
B ₂ Cl ₄	0,018	—	—	—	—
BCl ₃	12,9	2,4	—	—	—
AlCl	—	—	—	0,095	4,75
AlCl ₂	0,05	0,04	0,16	8,84	4,42
AlCl ₃	16,6	9	5,6	16,27	8,13
Al ₂ Cl ₆	0,02	—	—	0,016	—
Al*	—	—	—	54,95	79,2
B*	70,3	88,4	92,4	—	—
AlB ₁₂ *	—	—	1,7	10,4	3,46

* В твердом состоянии.

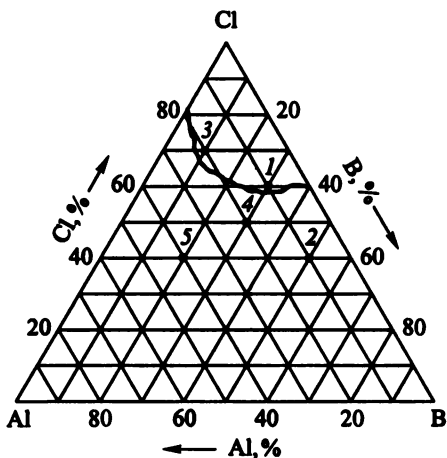


Рис. П6. Изотермическое сечение системы Al-B-Cl при температуре 100 °C и давлении 0,1 МПа

Соединения и элементы	Точки на диаграмме				
	1	2	3	4	5
BCl	0,11	0,036	—	—	—
B ₂ Cl ₄	—	—	—	—	—
BCl ₃	12,9	2,49	—	—	—
AlCl	—	—	0,19	71	35,5
AlCl ₂	0,26	0,18	0,69	2,32	1,16
AlCl ₃	16,4	8,9	5	0,15	0,075
Al*	—	—	—	16,5	59,8
B*	70,19	88,3	92,6	—	—
AlB ₁₂ *	—	—	1,38	10,4	3,46

* В твердом состоянии.

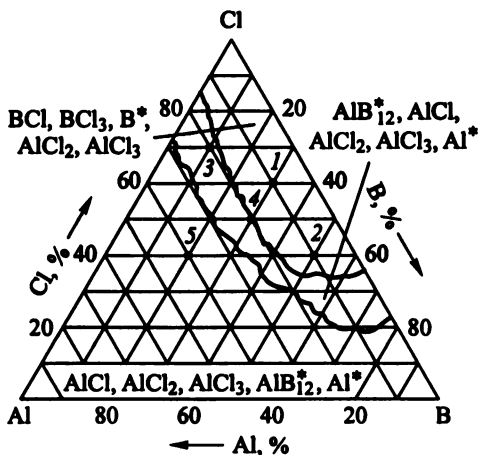
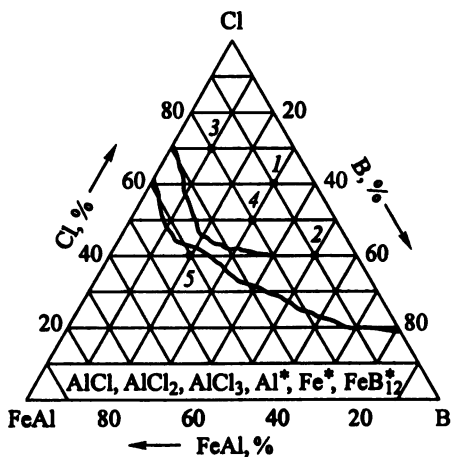


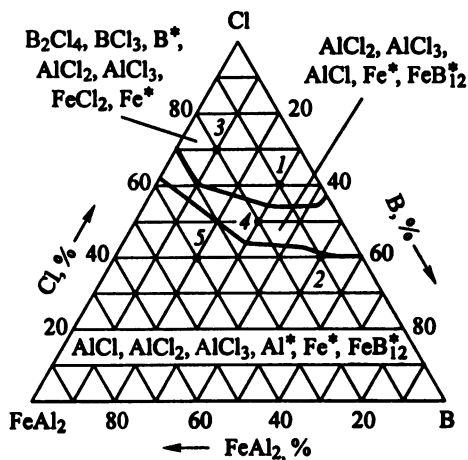
Рис. П7. Изотермическое сечение системы Al-B-Cl при температуре 100 °C и давлении 0,001 МПа



Соединения и элементы	Точки на диаграмме				
	1	2	3	4	5
BCl	0,006	0,0025	—	—	—
B ₂ Cl ₄	0,04	0,013	—	—	—
BCl ₃	23,2	8	—	—	—
AlCl	—	—	—	—	8,7
AlCl ₂	0,016	0,009	—	0,66	8
AlCl ₃	5,7	3	2	23,3	14,9
FeCl ₂	3,5	1,25	0,45	0,027	—
Al*	—	—	—	—	5,3
B*	65,15	85,8	93,3	38,6	—
Fe*	2,2	1,7	1,6	30,6	50
FeB ₁₂ *	—	—	—	6,5	12,7

*В твердом состоянии.

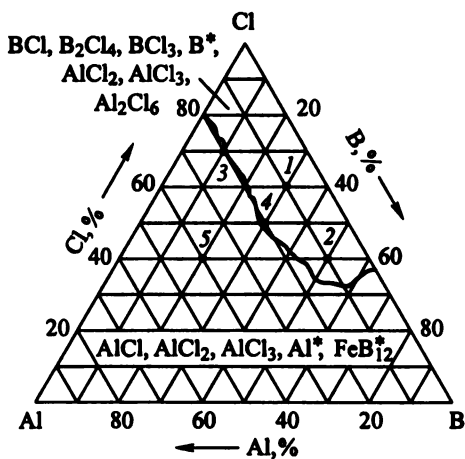
Рис. П8. Изотермическое сечение системы FeAl–B–Cl при температуре 1100 °С и давлении 0,1 МПа



Соединения и элементы	Точки на диаграмме				
	1	2	3	4	5
BCl	—	—	—	—	—
B ₂ Cl ₄	0,033	0,01	—	—	—
BCl ₃	20,15	6,5	1,5	—	—
AlCl	—	—	—	12,9	9,68
AlCl ₂	0,025	0,014	0,012	11,9	8,9
AlCl ₃	8,5	4,5	3,1	22	16,55
FeCl ₂	3,6	1	0,3	—	—
Al*	—	—	—	5,5	57,7
B*	66,6	86,6	93,8	—	—
Fe*	10,6	1,19	1,25	33,3	50
FeB ₁₂ *	—	—	—	14	7

*В твердом состоянии.

Рис. П9. Изотермическое сечение системы FeAl₂–B–Cl при температуре 1100 °С и давлении 0,1 МПа



Соединения и элементы	Точки на диаграмме				
	1	2	3	4	5
BCl	0,022	—	—	—	—
B ₂ Cl ₄	0,026	—	—	—	—
BCl ₃	12,95	2,45	—	—	—
AlCl	—	—	—	20	10
AlCl ₂	0,14	0,09	0,4	11,9	5,9
AlCl ₃	16,53	8,9	5,38	10,6	5,33
Al ₂ Cl ₆	0,01	—	—	—	—
Al*	—	—	—	46,8	75,15
B*	70,3	88,4	92,5	—	—
FeB ₁₂ *	—	—	1,6	10,4	3,46

* В твердом состоянии.

Рис. П10. Изотермическое сечение системы Al–B–Cl при температуре 1200 °C и давлении 0,1 МПа

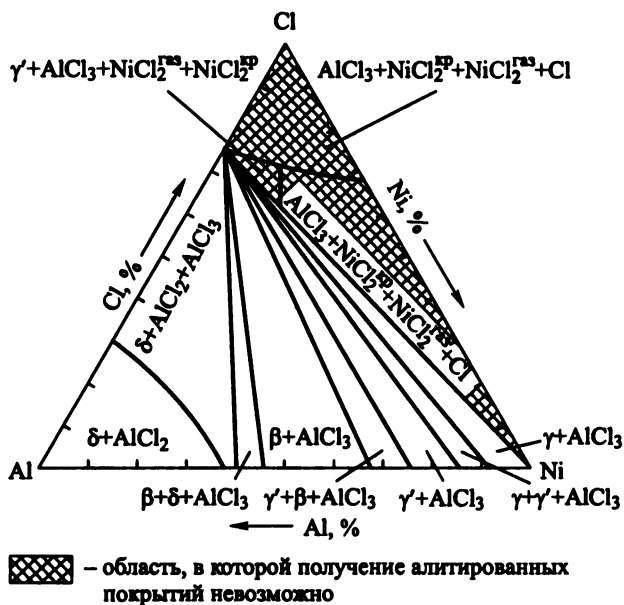


Рис. П11. Изотермическое сечение системы Al–Ni–Cl при температуре 1000 °C и давлении 0,1 МПа

Показанные примеры равновесных изотермических сечений тройных диаграмм состояния, где одним из элементов является галоид, дают возможность без постановки пробных экспериментов:

определить возможность того или иного нового процесса химико-термической обработки, иногда даже в нежелательных и вредных газовых смесях;

предложить рациональный и безопасный состав исходной и рабочей газовой смеси;

учесть влияние в широких пределах таких традиционных факторов, как температура и давление в рабочей газовой смеси.

Замена экспериментального поиска расчетным позволит сократить расходы и сроки разработки новых, более совершенных, экологически чистых, безопасных и экономичных процессов химико-термической обработки. Возможно, что подобные равновесные диаграммы состояния, где одним из элементов является газ, могут быть использованы при разработке «критических» технологий химических производств.

Подробные данные о построении изотермических сечений диаграмм состояния металлов с хлором приведены в научно-техническом и производственном издании «Справочник. Инженерный журнал» (М., Машиностроение. 2002. № 2).

П2. Ионно-плазменные покрытия

Развитие современного машиностроения невозможно без использования защитных технологий – ионно-плазменного нанесения покрытий, лазерной обработки, ионной имплантации. В настоящее время ионно-плазменные технологии рассматриваются как наиболее перспективные, так как одновременно повышают триботехнические характеристики материалов и их коррозионную стойкость. Кроме того, ионно-плазменные покрытия отличаются высокими адгезионными свойствами, несопоставимыми с гальваническими покрытиями, а также более низкими температурами технологических процессов по сравнению с диффузионными способами химического осаждения из газовой фазы.

Современными методами ионно-плазменной обработки рабочих поверхностей изделий можно получать декоративные покрытия на стекле и пластмассах толщиной 0,5–3 мкм, создавая при этом цветовую гамму под золото, серебро и др. Вакуумная ионно-плазменная технология нанесения покрытий обладает стерильностью и экологической чистотой и позволяет получать простые и сложные композиции декоративных покрытий с гарантируемым уровнем заданных свойств. Благодаря высокой степени ионизации и возбуждения компонентов конденсируемого плазменного потока обеспечивается возможность синтеза карбидов, нитридов и оксидов при относительно низкой температуре. Покрытия такого типа наносят на установках типа «Булат».

В МГТУ им. Н.Э. Баумана на установке низкотемпературного плазменного напыления «Плазменный котел» была разработана технология получения защитных покрытий из нитрида титана на алюминиевых сплавах Д16, ПВ90 и 1 420 (температура напыления ≤ 200 °С).

Целесообразность использования нитрида титана продиктована не только его физико-химическими свойствами, но и размерно-структурным соответствием кристаллических решеток алюминия и нитрида титана. Кристаллическая структура TiN имеет ГЦК решетку, в узлах которой расположены атомы Ti, а в октаэдрических пустотах атомы N ($a = 9,4239$ нм). Пространственная группа у Al и TiN $Fm\bar{3}m$, что соответствует только плотноупакованным структурам. При близости размеров периодов кристаллических решеток двух сопрягающихся фаз коэффициент поверхностного натяжения между ними минимален и кристаллическая решетка одной фазы служит продолжением другой, т. е. соблюдается принцип размерно-структурного соответствия двух адекватных решеток.

Использование сепарации вакуумно-дуговой плазмы позволяет получить покрытия из нитрида титана толщиной 1 мкм, свободного от наличия «капельной» фазы, образование которой обусловлено процессами, происходящими при напылении.

Алюминиевые сплавы с покрытиями из TiN обладают высокими триботехническими свойствами, интенсивность их изнашивания снижается в 50–60 раз. Они отличаются высокой коррозионной стойкостью и могут быть использованы для работы в нейтральных, сульфатных и хлоридных средах.

ПЗ. Алюминиевые сплавы для оболочек кумулятивных перфораторов

В настоящее время в связи с всеобщим энергетическим кризисом всемерно развиваются нефте- и газодобывающая отрасли промышленности, расширяются объемы геологических работ, осваиваются новые нефтяные и газовые скважины.

Одним из наиболее эффективных способов добычи нефти и газа является метод кумулятивной перфорации, связанный с прострелами в обсадных стальных колоннах и в основной породе каналов для прохождения нефти и газа в стволы скважин. Осуществляется это с помощью малогабаритных перфораторов, спускаемых в шахты в виде многокилометровых гирлянд. Оболочки перфораторов должны быть изготовлены из легких и прочных материалов, способных выдерживать гидростатические давления до 10^3 МПа при 100–200 °С в течение 5–6 ч, а также обладать значительной осколочностью, т. е. способностью разрушаться при взрыве на мелкие осколки и растворяться в специальном реактиве для полного их удаления из скважин. Кроме того, малая плотность этих материалов позволяет увеличить производительность перфорационных работ благодаря одновременному спуску в скважину (5–10 км) большого количества взрывных зарядов и применению более легкого подвесного и подъемного оборудования.

Всем этим требованиям отвечают высокопрочные литейные сплавы MBYU-2, MBYU-3, MBYU-4 и MBYU-5, разработанные на кафедре «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Они относятся к системе Al-Si-Cu, т. е. являются легированными силицидами (11–12 % Si и 4,8–5,2 % Cu). Помимо указанных компонентов сплав MBYU-3

содержит 0,1–0,1 Ti, а МВТУ-5 – 0,1–0,2 % Cd. Сплав МВТУ-4 является композиционным материалом (10–15 % SiC), что весьма положительно сказывается на его прочностных свойствах и особенно на осколочности. Многообразие сплавов связано с их способностью работать на различных глубинах.

Ввиду высокого содержания кремния и меди в структуре сплавов присутствует большое количество эвтектики, обеспечивающей хорошие литейные свойства: высокую жидкотекучесть, низкую склонность к образованию горячих трещин, среднюю усадку и высокую герметичность. Сплавы можно упрочнять с помощью термической обработки — закалки и последующего старения. При этом их временное сопротивление возрастает до 350–450 МПа, а относительное удлинение составляет менее 1 %.

Испытания перфораторов с деталями из сплавов МВТУ-1 – МВТУ-5 в глубоких скважинах в нашей стране и за рубежом показали их высокую эффективность и надежность в работе.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
1. Конструкционные стали.....	6
1.1. Углеродистые стали (<i>В.Н. Зикеев</i>).....	6
1.1.1. Углеродистые стали обыкновенного качества.....	6
1.1.2. Углеродистые качественные стали.....	8
1.2. Низколегированные и легированные стали.....	10
1.2.1. Низколегированные строительные стали (<i>В.Н. Зикеев</i>).....	10
1.2.2. Легированные машиностроительные стали (<i>В.Н. Зикеев</i>).....	15
1.2.3. Высокопрочные мартенситно-стареющие стали (<i>О.М. Ховова, А.Г. Рахштадт</i>).....	17
1.3. Стали с высокой технологичностью.....	33
1.3.1. Стали с улучшенной обрабатываемостью резанием (<i>В.Н. Глущенко</i>).....	33
1.3.2. Стали с высокой технологической пластичностью (<i>Е.В. Рябченко, В.Н. Зикеев</i>).....	39
Список литературы.....	57
2. Материалы с особыми технологическими свойствами.....	59
2.1. Железоуглеродистые сплавы с высокими литейными свойствами (<i>Э.Ч. Гини</i>).....	59
2.1.1. Классификация чугунов для отливок.....	59
2.1.2. Физические и химические свойства чугунов.....	66
2.1.3. Механические и технологические свойства чугунов.....	79
2.1.4. Легированные чугуны со специальными свойствами.....	93
2.2. Медные сплавы (<i>И.С. Гершман</i>).....	96
2.2.1. Латунни.....	96
2.2.2. Бронзы.....	115
2.2.3. Медно-никелевые сплавы.....	133
Список литературы.....	139
3. Материалы триботехнического назначения.....	141
3.1. Процесс изнашивания и методы повышения износостойкости (<i>Н.А. Буше, А.П. Семенов</i>).....	141
3.2. Износостойкие материалы высокой твердости (<i>А.П. Семенов</i>).....	147
3.2.1. Сверхтвердые материалы.....	148
3.2.2. Металлоподобные соединения.....	150
3.2.3. Неметаллические бескислородные соединения.....	153

3.2.4. Керамики и ситаллы.....	155
3.2.5. Твердые сплавы.....	156
3.2.6. Наплавочные материалы.....	157
3.3. Износостойкие покрытия и модифицированные слои (<i>А.П. Семенов</i>).....	162
3.3.1. Покрытия, получаемые методами химического осаждения из газовой фазы.....	163
3.3.2. Покрытия, получаемые термовакуумным напылением.....	164
3.3.3. Вакуумные ионно-плазменные покрытия и модифицированные слои.....	164
3.3.4. Газотермические покрытия.....	167
3.3.5. Покрытия, получаемые методами лазерного модифицирования и легирования поверхностных слоев.....	169
3.3.6. Электроискровые покрытия.....	170
3.3.7. Гальванические покрытия.....	172
3.3.8. Покрытия, получаемые при химико-термическом модифицировании поверхностных слоев.....	172
3.4. Материалы, устойчивые к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок (<i>Н.А. Буше</i>).....	173
3.5. Кавитационно-стойкие материалы (<i>Н.А. Буше</i>).....	177
3.6. Антифрикционные материалы.....	181
3.6.1. Металлические материалы (<i>Н.А. Буше</i>).....	181
3.6.2. Комбинированные неметаллические материалы (<i>А.П. Семенов</i>).....	188
3.7. Фрикционные материалы (<i>Н.А. Буше, А.П. Семенов</i>).....	197
Список литературы.....	208
4. Материалы с высокими упругими свойствами (<i>Н.В. Васильев, А.Г. Рахштадт</i>).....	212
4.1. Пружинные сплавы и основные способы их упрочнения.....	212
4.2. Основные группы пружинных сплавов.....	213
4.2.1. Пружинные сплавы общего назначения.....	213
4.2.2. Пружинные сплавы специального назначения.....	223
Список литературы.....	238
5. Материалы малой плотности и высокой удельной прочности.....	239
5.1. Алюминиевые сплавы (<i>Т.В. Соловьева, Г.Б. Строганов</i>).....	239
5.1.1. Деформируемые алюминиевые сплавы.....	239
5.1.2. Литейные алюминиевые сплавы.....	259
5.2. Магниеые сплавы (<i>В.И. Силаева</i>).....	268
5.2.1. Общая характеристика магния и его сплавов.....	268
5.2.2. Деформируемые магниеые сплавы.....	271
5.2.3. Литейные магниеые сплавы.....	278
5.3. Титановые сплавы (<i>В.И. Силаева, Т.В. Соловьева</i>).....	285
5.3.1. Общая характеристика титана и его сплавов.....	285
5.3.2. Деформируемые титановые сплавы.....	293
5.3.3. Литейные титановые сплавы.....	309
5.4. Бериллиевые сплавы (<i>И.Н. Фридляндер, В.И. Силаева</i>).....	315

5.4.1. Общая характеристика бериллия.....	315
5.4.2. Сплавы систем Ве – Al и Ве – Al – Mg.....	323
5.5. Композиционные материалы.....	329
5.5.1. Полимерные композиционные материалы (А.А. Зябрев).....	329
5.5.2. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (А.А. Зябрев).....	332
5.5.3. Эвтектические композиционные материалы (А.А. Зябрев).....	338
5.5.4. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей (А.Б. Арзамасов).....	343
Список литературы.....	358
6. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и внешней рабочей среды.....	361
6.1. Коррозионно-стойкие материалы (Ю.А. Пучков, Е.А. Ульянин).....	361
6.6.1. Металлические сплавы.....	361
6.6.2. Неметаллические материалы.....	376
6.2. Теплостойкие материалы (Т.А. Панайоти).....	381
6.3. Жаростойкие материалы (Т.А. Панайоти).....	389
6.4. Жаропрочные материалы.....	402
6.4.1. Аустенитные жаропрочные стали (В.И. Третьяков).....	402
6.4.2. Жаропрочные сплавы на основе никеля (В.И. Третьяков).....	412
6.4.3. Сплавы на основе тугоплавких металлов (В.И. Третьяков).....	416
6.4.4. Жаропрочные медные сплавы (И.С. Гершман).....	422
6.5. Радиационно-стойкие материалы (В.И. Солонин).....	426
6.6. Материалы с малым газовыделением в вакууме (В.И. Макарова).....	439
6.7. Коррозионно-стойкие и жаростойкие покрытия (Б.Н. Арзамасов, В.Н. Симонов).....	448
6.8. Материалы для криогенной техники (Ю.А. Пучков, Е.А. Ульянин).....	464
Список литературы.....	476
7. Материалы с особыми свойствами.....	479
7.1. Материалы высокой проводимости (Л.М. Соколенко, Ю.А. Быков).....	479
7.2. Сверхпроводники (И.В. Кириллов).....	485
7.3. Резистивные материалы (Л.М. Соколенко, Ю.А. Быков).....	491
7.4. Полупроводниковые материалы (И.В. Кириллов).....	499
7.5. Диэлектрические материалы (И.В. Кириллов).....	512
7.6. Магнитотвердые материалы (Л.М. Соколенко, Ю.А. Быков).....	516
7.7. Магнитомягкие материалы (Л.М. Соколенко, Ю.А. Быков).....	523
7.8. Материалы с особыми тепловыми свойствами (Ю.А. Быков).....	538
7.9. Аморфные металлические сплавы (Ю.А. Быков).....	542
7.10. Лазерные материалы (И.В. Кириллов).....	546
7.11. Материалы для высокотемпературных электродов различного назначения (В.Б. Арзамасов).....	551
7.12. Деформированные заэвтектические силумины (Е.И. Панов, Г.И. Эскин).....	554
Список литературы.....	563

8. Инструментальные материалы.....	566
8.1. Материалы инструментов для обработки резанием (В.Ф. Моисеев, Г.Г. Мухин).....	566
8.1.1. Быстрорежущие стали.....	566
8.1.2. Спеченные твердые сплавы.....	569
8.1.3. Керамические режущие материалы.....	575
8.1.4. Сверхтвердые материалы.....	580
8.2. Штамповые стали для холодного деформиро- вания (В.Ф. Моисеев, Г.Г. Мухин).....	581
8.3. Штамповые стали для горячего деформирования (В.И. Кучерявый, С.А. Герасимов).....	600
Список литературы.....	624
Приложения.....	625
П1. Изотермические сечения диаграмм состояния металлов с хлором (Б.Н. Арзамасов).....	625
П2. Ионно-плазменные покрытия (Т.В. Соловьева).....	631
П3. Алюминиевые сплавы для оболочек кумулятивных перфораторов (Т.В. Соловьева).....	632

Справочное издание

**Арзамасов Борис Николаевич, Соловьева Татьяна Всеволодовна,
Герасимов Сергей Анатольевич и др.**

СПРАВОЧНИК ПО КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Редактор Е.Н. Ставицкая
Корректор Л.И. Малютина
Художник Н.Г. Стоярова
Технический редактор Н.В. Быкова
Компьютерная верстка И.В. Степанова
Компьютерная графика М.А. Белявской

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.005683.09.04. от 13.09.2004 г.

Подписано в печать 28.06.2005. Формат 70×100/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Гарнитура «Таймс». Печ. л. 40 + 0,5 цветная вкл.
Усл. печ. л. 52. Уч.-изд. л. 50,8. Тираж 3000. Заказ 1300

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Отпечатано с оригинал-макета в ГУП ППП «Типография «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., 6

Для заметок

Для заметок

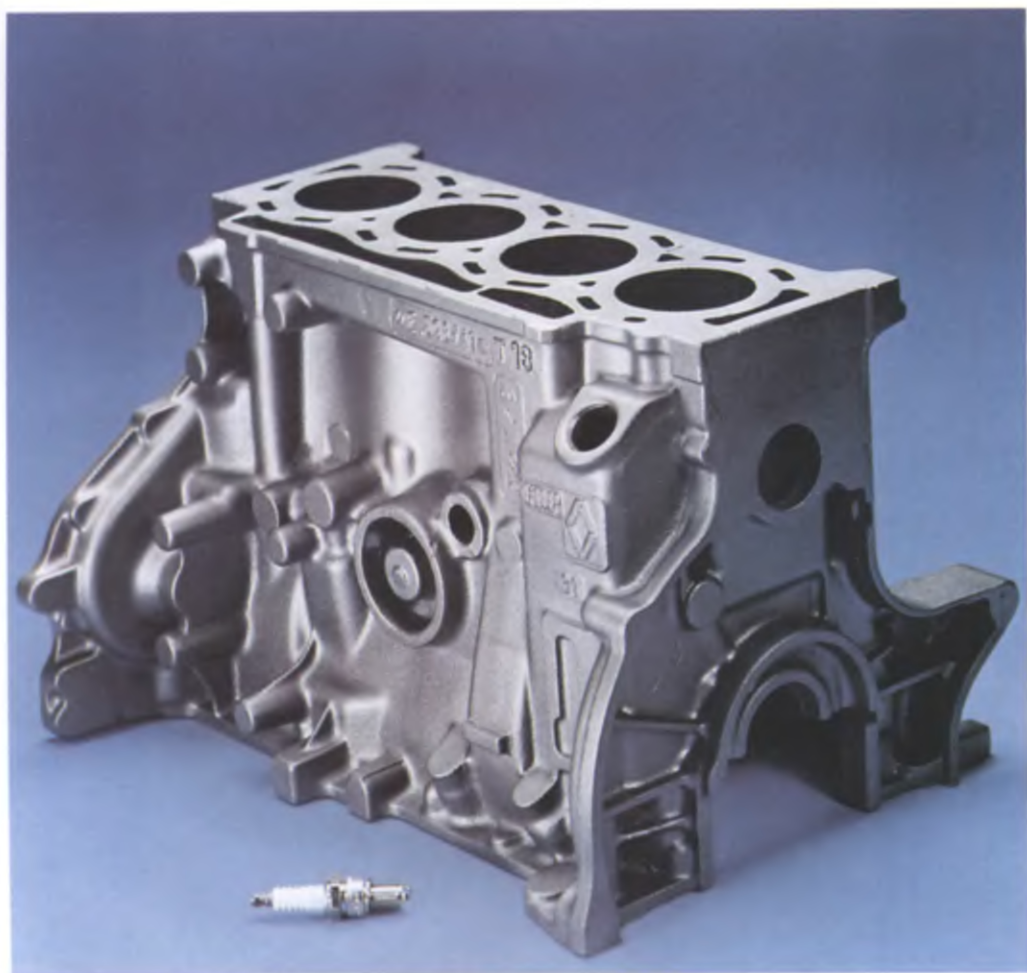
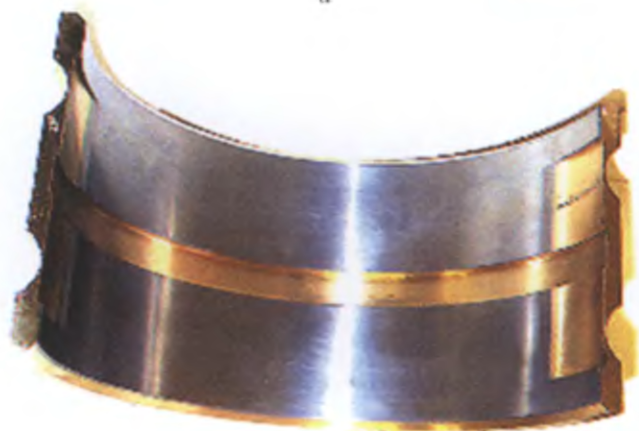


Рис. 1. Блоки двигателя, изготовленные из чугуна



a



b



c



z



д



e

Рис. 2. Изделия из медных сплавов, используемые на железнодорожном транспорте:

a – вкладыш моторно-осевого подшипника магистрального тепловоза (БрО4Ц4С17); *б* – нерабочий вкладыш шатунного подшипника дизеля 10Д100, (БрО5Ц5С5 с антифрикционным слоем на основе баббита БК2); *в* – подшипник турбокомпрессора (БрО10С10); *г* – сепаратор роликового подшипника буксового узла грузовых и пассажирских вагонов (ЛЦ40С); *д* – питающий зажим контактной сети (ЛК80-3); *е* – стыковой зажим контактной сети (ЛЦ16К4)



Рис. 3. Зубчатое колесо после ионной цементации



Рис. 4. Зубчатые колеса для топливного насоса после ионной нитроцементации



Рис. 5. Лопатки авиационных двигателей

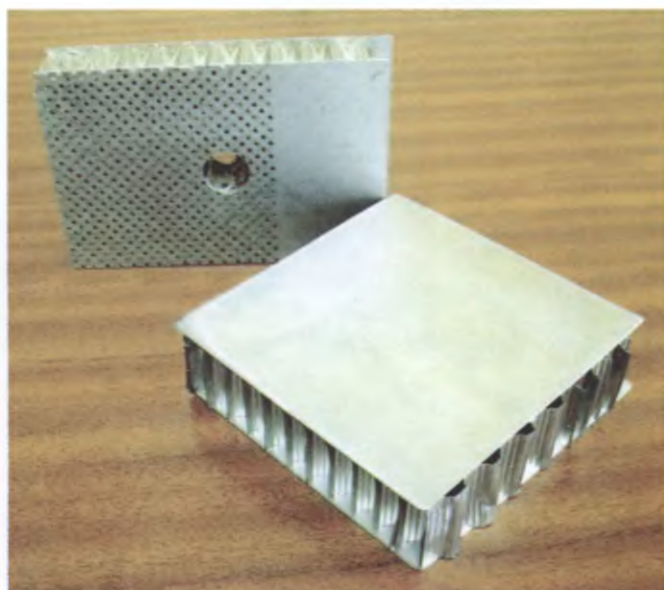


Рис. 6. Сотовая панель из титана

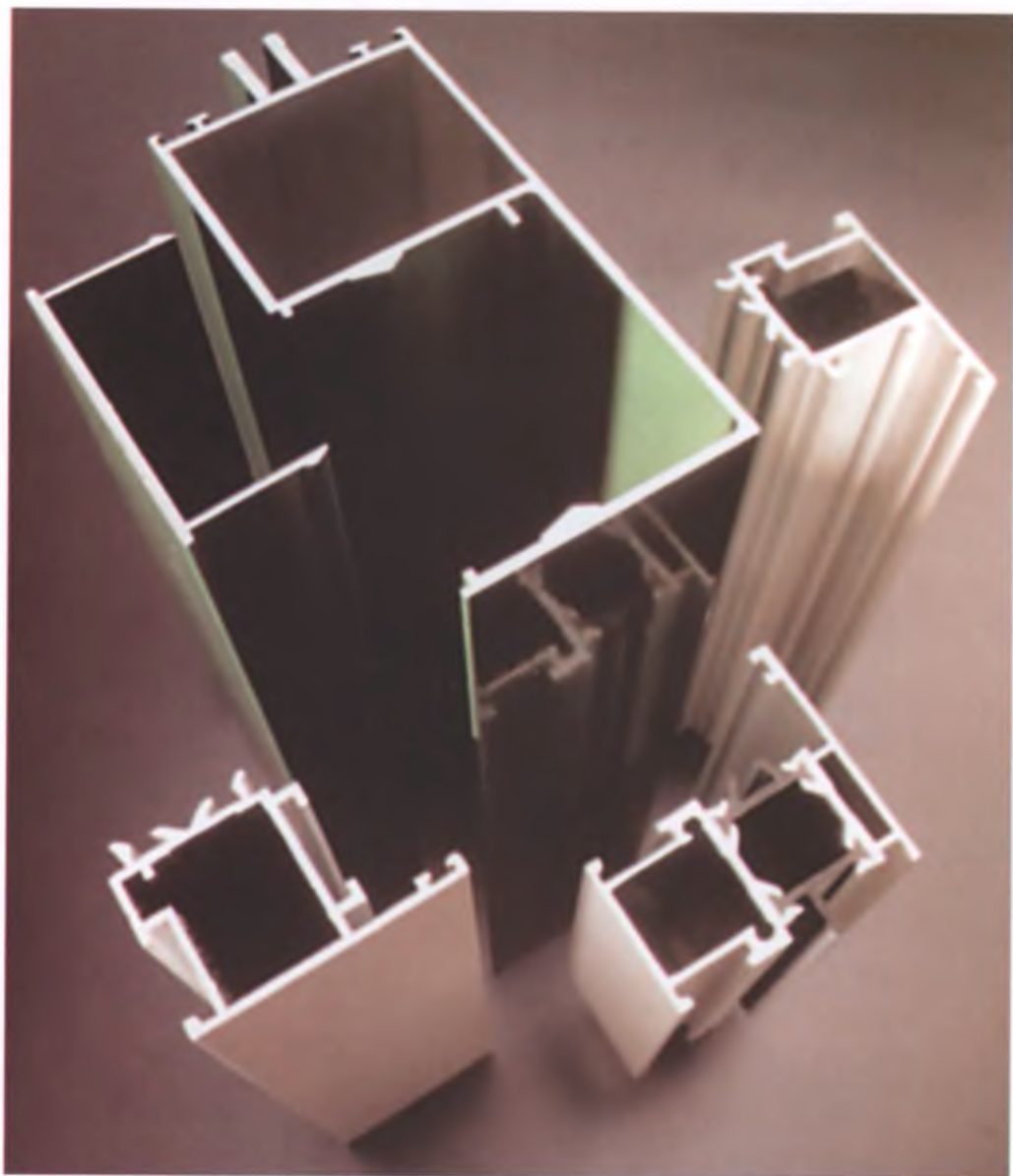


Рис. 7. Профили из алюминиевых сплавов

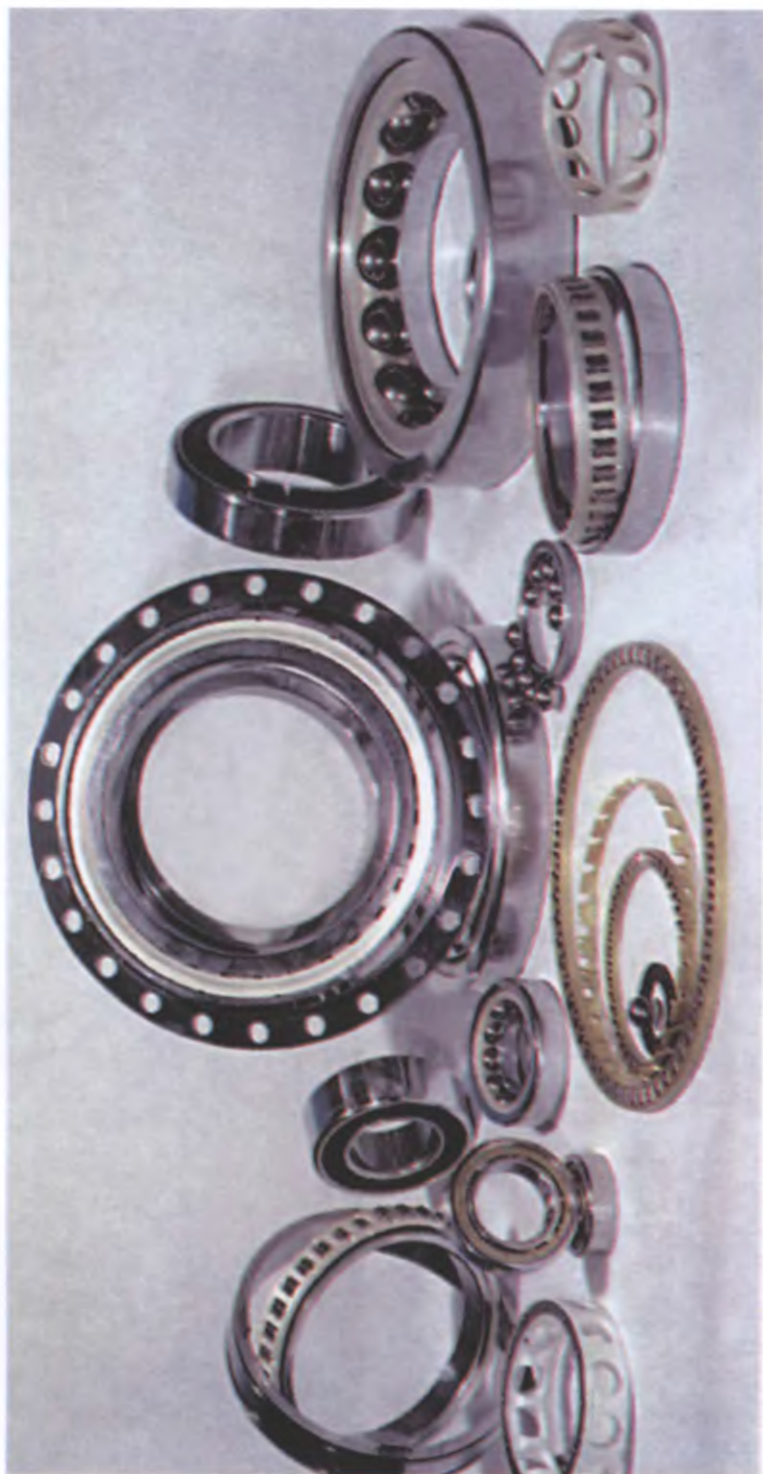


Рис. 8. Высокоточные подшипники для аэрокосмической промышленности

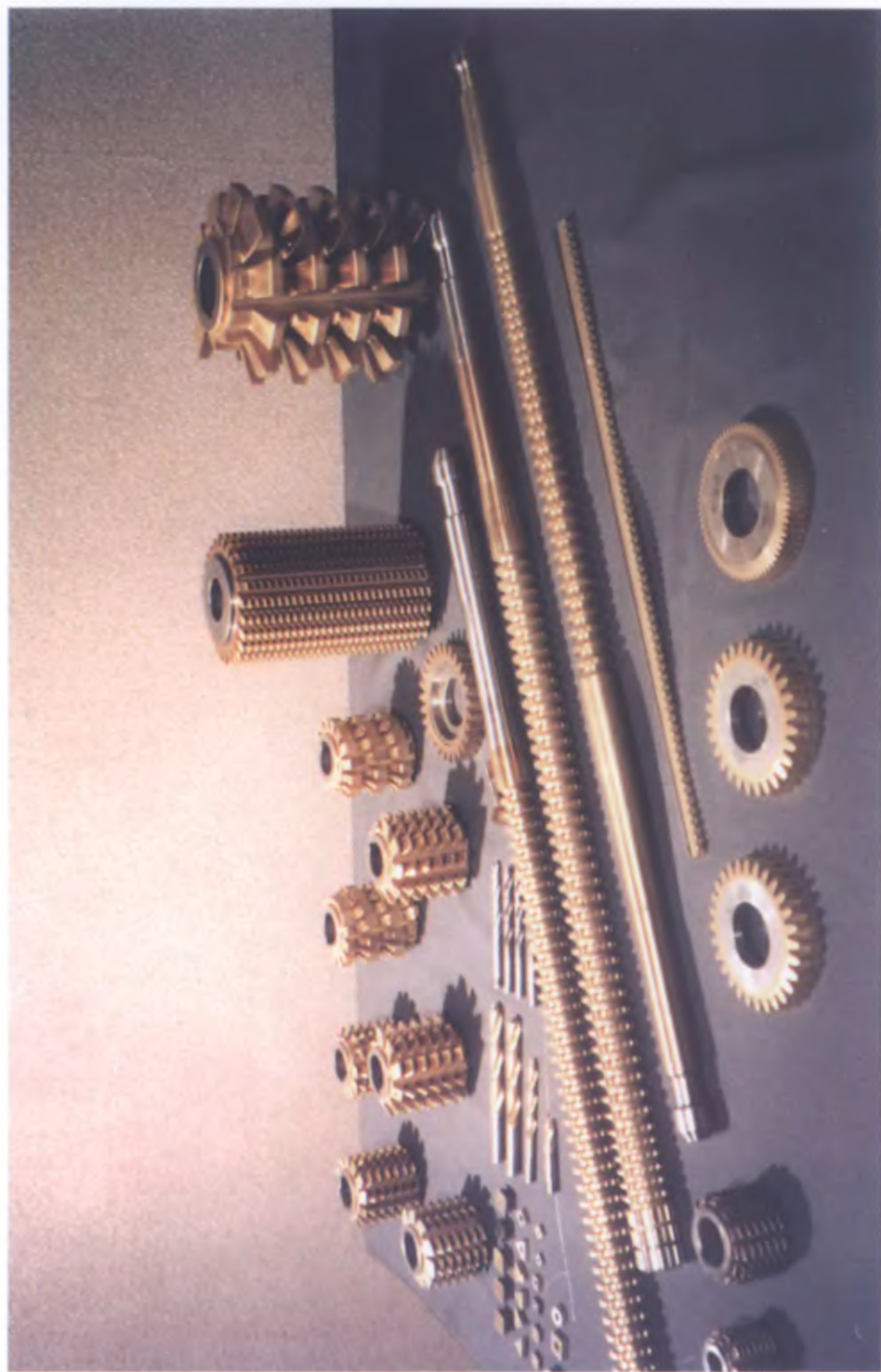


Рис. 9. Инструменты с покрытием из нитрида титана