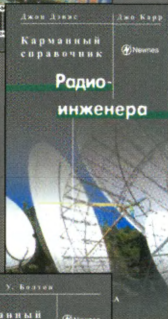


КАРМАННЫЙ СПРАВОЧНИК

СЕРИЯ ПЕРЕВОДНЫХ КНИГ



В справочнике собраны сведения об основах современной электронной техники. Достаточно полно представлена элементная база: транзисторы, фотодиоды, светодиоды, оптроны, лазеры и т.д. Рассмотрены основы построения практически всех возможных узлов, образующих электронные схемы. Книга содержит разнообразный дополнительный справочный материал – от физических величин и их единиц до аббревиатур терминов, используемых в электронике.



Предлагаемый вниманию читателей справочник очень популярен в Великобритании. Его авторам удалось собрать и компактно объединить под одной обложкой огромное количество информации: от вопросов распространения электромагнитных волн до описания современных видов связи, таких как мобильная радиосвязь, спутниковая и транкинговая связь, беспроводная телефония. Книга содержит много дополнительной информации справочного характера, от международного кода «Q» и азбуки Морзе до формул и таблиц для расчетов радиотехнических цепей и сведений о кодировке электронных компонентов.



Книга в простой и доступной форме знакомит со средствами и методами измерений, с основными компонентами измерительных систем, учит правильному выбору и применению систем измерения в конкретных условиях. В справочнике объяснены физические принципы методов и даны математические основы их количественной оценки. Специальный раздел посвящен применению микропроцессоров в измерительных системах.



В справочник включены сведения, необходимые как на производстве, так и в домашней мастерской при изготовлении, эксплуатации и ремонте окружающих нас изделий. Приведены сведения о резьбовых и неразъемных соединениях, крепежных изделиях, уплотнении соединений, режущем инструменте: сверлах, развертках, зенкерах и т.д. Справочник включает также общетехнические сведения: таблицы пересчета единиц, формулы, полезные для работы, практические примеры использования измерительного инструмента. Все данные имеют ссылки на британские и международные стандарты.

Издательский дом «Додэка-XXI»

105318 Москва, ул. Щербаковская, д. 53

Тел./факс: (095) 366-0922, 366-8145, 366-2429, 366-1155

E-mail: books@dodeca.ru

www.dodeca.ru



Карманный
справочник

Конструкционные материалы:
металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты

У. Болтон

Карманный
справочник



Конструкционные
материалы:

металлы,
сплавы,
полимеры,
керамика,
композиты

ISBN 5-94120-046-3



Более 900 наименований

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА:

вычислительная техника,
радиоэлектроника,
программирование
и многое другое

Книги всех
ведущих
издательств

Постоянно
действующая
подписка

Оптовые
поставки

Эффективная
система
скидок

**ИЗДАТЕЛЬСКИЙ
ДОМ
«ДОДЭКА-XXI»**

Приглашаем авторов,
редакторов,
переводчиков



105318 Москва, а/я 70
ул. Щербаковская, д. 53
Тел./факс: (095) 366-11-55,
366-09-22, 366-24-29,
366-81-45, 366-04-56
red@dodeca.ru, books@dodeca.ru
www.dodeca.ru

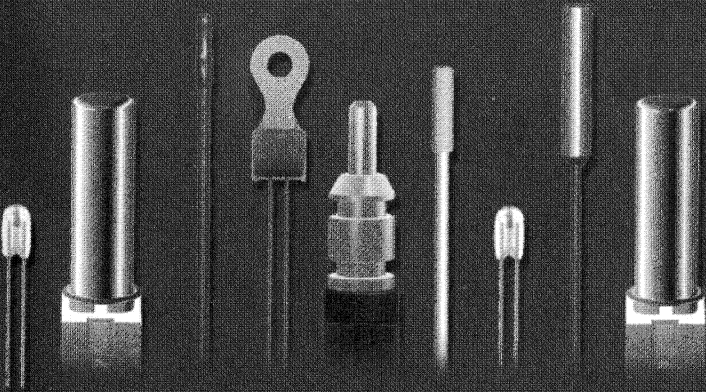


**Фирма «ДОДЭКА», официальный дистрибьютор
концерна EPCOS AG,**
предлагает со склада в Москве и под заказ
высококачественные NTC-термисторы
(резисторы с отрицательным температурным коэффициентом):

- Для измерений температуры в автоматике, промышленном и телекоммуникационном оборудовании
- Для систем ограничения пускового тока в промышленной электронике

Диапазон рабочего сопротивления 0.001...5000 Ом.

**Соответствие Российским стандартам!
Консультации специалистов,
документация на все компоненты!
Доступные цены!**



Наш адрес: 105318, Москва, ул. Щербаковская, д. 53
тел./факс: (095) 366-2429, 366-8145
e-mail: icmarket@dodeca.ru

Карманный справочник

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ:
МЕТАЛЛЫ, СПЛАВЫ, ПОЛИМЕРЫ,
КЕРАМИКА, КОМПОЗИТЫ**



МОСКВА
Издательский дом «Додэка-XXI»
2004

W . B o l t o n

N e w n e s

Engineering Materials

P o c k e t B o o k

Third Edition

 Newnes

У. Болтон

Карманный справочник

Конструкционные материалы:

металлы,
сплавы,
полимеры,
керамика,
композиты



УДК 620.1/2(035)

ББК 30.3я2

Б79

Болтон У.

Б79 Конструкционные материалы металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты Карманный справочник /Пер с англ — М Издательский дом «Додэка-XXI», 2004 — 320 с , ил (Серия «Карманный справочник»)

ISBN 5-94120-046-3

В справочнике представлен весь спектр материалов, применяемых в машиностроении и электротехнике железо, алюминий, медь, магний, никель, титан, сплавы на их основе, полимерные, керамические и композитные материалы Приведены сведения об их химическом составе, физических, термических и механических свойствах Дается система кодирования материалов по американскому и британскому стандартам Рассматриваются способы обработки и методы испытаний представленных материалов

Справочник снабжен удобным предметным указателем и предназначен для работников и студентов соответствующих технических специальностей для использования в повседневной работе

УДК 620 1/ 2(035)

ББК 30 3я2

Newnes Engineering Materials Pocket Book 3ed by Bolton

ISBN 0 7506 4974 7 (англ) © W Bolton 1989, 1996, 2000

© Reed Educational & Professional
Publishing Ltd (2000)

ISBN 5-94120-046-3 (рус) © Издательский дом «Додэка-XXI», 2004

® Серия «Карманный справочник»

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	13
Глава первая ТЕРМИНОЛОГИЯ	15
Глава вторая МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ	32
Испытание на изгиб	32
Испытание на ползучесть	32
Испытание на усталость	33
Прокаливаемость	34
Измерение твердости	36
Испытание на удар	40
Испытание на растяжение	43
Глава третья ЖЕЛЕЗНЫЕ СПЛАВЫ	46
3.1. Материалы	46
Сплавы	46
Легированные стали	46
Углеродистые стали	47
Литейные чугуны	48
Автоматные стали	49
Мартенситно-старееющие стали	49
Нержавеющие стали	49
Инструментальные стали	50
3.2. Коды и составы сплавов	51
Системы кодирования углеродистых сталей	51
Системы кодирования литейных чугунов	51
Системы кодирования нержавеющей сталей	52
Американская система кодирования сталей	52
Британская система кодирования сталей	54
Системы кодирования инструментальных сталей	57
Составы легированных сталей	58
Составы углеродистых сталей	59
Составы литейных чугунов	60
Составы автоматных сталей	63
Составы мартенситно-старееющих сталей	63
Составы нержавеющей сталей	64
Составы инструментальных сталей	65
3.3. Термическая обработка	67
Отжиг	67
Науглероживание	69
Азотирование	69

	Поверхностное упрочнение	69
	Закалка с последующим отпуском	69
3.4.	Свойства сталей	70
	Параметры ползучести	70
	Удельное электрическое сопротивление	71
	Усталость	71
	Твердость	71
	Ударные свойства	71
	Обрабатываемость на станках	72
	Механические свойства легированных сталей	74
	Механические свойства углеродистых сталей	77
	Механические свойства литейных чугунов	80
	Механические свойства автоматных сталей	83
	Механические свойства	
	мартенситно-старееющих сталей	84
	Механические свойства нержавеющей сталей	84
	Сопротивление коррозии	86
	Критическое сечение	86
	Плотность	87
	Тепловые свойства	87
	Свойства инструментальных сталей	88
3.5.	Применение сталей и чугунов	92
	Применение легированных сталей	92
	Применение углеродистых сталей	93
	Применение литейных чугунов	94
	Применение нержавеющей сталей	95
	Применение инструментальных сталей	96
	Глава четвертая. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ	100
4.1.	Материалы	100
	Алюминий	100
	Сплавы алюминия	100
	Литейные сплавы	101
	Ковкие сплавы	102
4.2.	Коды и составы сплавов	104
	Системы кодирования составов	
	литейных сплавов	104
	Системы кодирования составов	
	ковких сплавов	105
	Системы кодирования твердости сплавов	106
	Составы литейных сплавов	107
	Составы ковких сплавов	109
4.3.	Термическая обработка	110
	Отжиг	110
	Термическая обработка литейных сплавов	110
	Термическая обработка ковких сплавов	112

4.4. Свойства сплавов	113
Плотность	113
Электрические свойства	113
Технологические свойства	115
Усталостные свойства	117
Обрабатываемость на станках	117
Механические свойства литейных сплавов	117
Механические свойства ковких сплавов	119
Тепловые свойства	122
Свариваемость сплавов	123
4.5. Применение сплавов	123
Формы материала	123
Применение литейных сплавов	124
Применение ковких сплавов	125
Глава пятая МЕДЬ	127
5.1. Материалы	127
Медь	127
Медные сплавы	128
Латуни	132
Оловянные бронзы	132
Алюминиевые бронзы	133
Бериллиевые бронзы	133
Кремнистые бронзы	133
Медно-никелевые сплавы	133
5.2. Коды и составы сплавов	134
Системы кодирования составов	134
Системы кодирования твердости сплавов	136
Составы литейных сплавов	138
Составы ковких сплавов	141
5.3. Термическая обработка	145
Отжиг	145
Преципитатное упрочнение	146
Закалка и отпуск	146
Снятие напряжения	146
5.4. Свойства сплавов	146
Пайка твердым припоем	146
Параметры ползучести	146
Плотность	147
Электрическая проводимость	147
Усталостные свойства	147
Твердость	148
Ударные свойства	148
Обрабатываемость на станках	148
Механические свойства литейных сплавов	149
Механические свойства ковких сплавов	152

Паяемость	157
Тепловые свойства	157
Свариваемость	158
5.5. Применение меди и сплавов	159
Формы материала	159
Применение литейных сплавов	163
Применение ковких сплавов	166
Глава шестая. МАГНИЙ	170
6.1. Материалы	170
Магний	170
Магниеые сплавы	170
6.2. Коды и составы сплавов	171
Системы кодирования составов	171
Системы кодирования твердости сплавов	172
Составы литейных сплавов	173
Составы ковких сплавов	173
6.3. Термическая обработка	174
Отжиг	174
Термическая обработка на твердый раствор и старение	174
Снятие напряжения	175
6.4. Свойства сплавов	175
Плотность	175
Электрические свойства	175
Усталостные свойства	175
Механические свойства литейных сплавов	176
Механические свойства ковких сплавов	176
Тепловые свойства	177
Свариваемость	177
6.5. Применение литейных и ковких сплавов	178
Формы литья	178
Применение литейных сплавов	178
Применение ковких сплавов	179
Глава седьмая. НИКЕЛЬ	180
7.1. Материалы	180
Никель	180
Сплавы	180
7.2. Коды и составы сплавов	181
Системы кодирования никелевых сплавов	181
Составы никеля и сплавов	183
7.3. Термическая обработка	184
Отжиг	184

Обработка на твердый раствор и дисперсионная обработка	184
Снятие напряжения	185
7.4. Свойства	185
Параметры ползучести	185
Плотность	186
Электрическое удельное сопротивление	186
Усталостные свойства	186
Механические свойства литейных сплавов	186
Механические свойства ковких сплавов	187
Предел окисления	189
Тепловые свойства	189
7.5. Применение никелевых сплавов	189
Формы материала	189
Применение ковких и литейных сплавов	190
Глава восьмая ТИТАН	192
8.1. Материалы	192
Титан	192
Титановые сплавы	192
8.2. Коды и составы сплавов	193
Системы кодирования составов	193
Составы	194
8.3. Термическая обработка	194
Отжиг	194
Обработка на твердый раствор и дисперсионная обработка	195
Снятие напряжения	195
8.4. Свойства сплавов	196
Параметры ползучести	196
Плотность	197
Электрическое удельное сопротивление	197
Усталостные свойства	197
Вязкость разрушения	197
Твердость	197
Ударные свойства	198
Обрабатываемость на станках	198
Механические свойства	199
Тепловые свойства	200
Свариваемость	201
8.5. Применение и формы изделий из титана и его сплавов	201
Формы изделий	201
Применение титана и его сплавов	202

Глава девятая	ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	204
9.1. Материалы		204
Типичные полимеры		204
Эластомеры		204
Термореактивные пластмассы (реактопласты)		205
Термопластичные пластмассы (термопласты)		205
9.2. Полимерные структуры		206
Наполнители		206
Кристалличность		206
Структура полимеров		207
Структура и свойства полимеров		210
9.3. Коды и компоненты полимеров		211
Системы кодирования полимеров		211
Состав		213
9.4. Свойства		213
Химические свойства		213
Свойства ползучести		215
Плотность		215
Электрические свойства		217
Вязкость разрушения		218
Температуры стеклования		218
Твердость		219
Ударные свойства		220
Механические свойства		220
Оптические свойства		222
Проницаемость		223
Упругость		223
Тепловые свойства		223
9.5. Применение и методы изготовления		225
Методы изготовления		225
Применение полимеров		226
Глава десятая	КЕРАМИКИ	229
10.1. Материалы		229
Керамики		229
Технические керамики		229
Стекла		230
Огнеупоры		230
10.2. Коды		231
Системы кодирования связанных карбидов		231
10.3. Свойства		233
Плотность		233
Электрические свойства		233
Механические свойства алюминиевых керамик		233
Механические свойства связанных карбидов		233

Механические свойства стекол	234
Тепловые свойства связанных карбидов	234
10.4. Применение керамических материалов	235
Применение алюминиевых керамик	235
Применение связанных карбидов	235
Применение стекол	236
Глава одиннадцатая. КОМПОЗИТЫ	237
11.1. Материалы	237
Типы композитов	237
Волокнистые композиционные материалы	237
Армированные частицами материалы	238
Дисперсно-упрочненные композиционные материалы	239
11.2. Механические свойства	240
Механические свойства волокнистых композиционных материалов	240
Механические свойства древесины	242
Глава двенадцатая. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	243
12.1. Электрическая проводимость	243
Проводники	243
Полупроводники	244
Диэлектрики	246
12.2. Свойства	247
Электропроводность	247
Ширина запрещенной зоны полупроводников	249
Свойства диэлектриков	250
Глава тринадцатая. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА	251
13.1. Терминология	251
13.2. Магнитные свойства магнитных материалов	253
Глава четырнадцатая. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	255
14.1. Статическая прочность	255
14.2. Жесткость	258
14.3. Сопротивление усталости	260
14.4. Ударная вязкость	260
14.5. Ползучесть и температурное сопротивление	261
14.6. Критерий отбора материала	263
Глава пятнадцатая. СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРРОЗИИ И ИЗНОСУ	264
15.1. Сопротивление коррозии	264

15.2. Коррозия разнородных металлов	267
15.3. Подбор материалов по сопротивлению износу	269
Глава шестнадцатая. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА	271
16.1. Термины	271
16.2. Тепловые свойства	272
Глава семнадцатая. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ	274
17.1. Требования к выбору материала	274
Свойства материалов	274
Параметры переработки	275
Ассортимент	275
Стоимость материала	275
17.2. Критерий отбора материала	275
Идентификация критических свойств	276
Оценка достоинства	277
Стоимость материала на единицу свойства	277
17.3. Относительная стоимость материалов	277
17.4. Стоимость энергии	279
Глава восемнадцатая. АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ	280
18.1. Элементы	280
18.2. Конструкционные металлы	283
18.3. Технические полимеры	286
18.4. Технические керамики	289
Глава девятнадцатая. ВЫБОР ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ	291
19.1. Процессы и выбор материала	291
19.2. Конечный вид поверхности	292
19.3. Характеристики процессов формования металла	293
Литье металлов	293
Виды формования материалов	296
Порошковые процессы	297
Механическая обработка металлов	298
Процессы соединения материалов	300
19.4. Характеристики процессов формования полимеров	301
19.5. Расходы на процессы	304
Приложение: Единицы размерностей	306
Предметный указатель	310

Предисловие

Цель этой книги состоит в том, чтобы дать инженерам и студентам дешевый и краткий, карманного формата, справочник по материалам, применяемым в технике, таким, как сплавы на железной основе, цветные металлы, полимеры, керамика и композитные материалы. Такой она была задумана в первом издании, выдержана во втором и настоящем третьем издании. Во втором издании текст был расширен, в него были включены дополнительные главы. Третье издание отличается от второго включением Главы 19 «Выбор процессов изготовления». Книга может быть полезной, в частности, студентам, занятым проектной работой. Очевидно, что ни книга этого размера, ни большего формата и с более подробным изложением не может быть совершенно исчерпывающей, настолько широк диапазон проблем. Поэтому выбор материалов ограничен большей частью теми, с которыми обычно сталкиваются специалисты в технике, и в основном рассматриваются те их свойства, которые относятся к применению. Справочник не претендует на то, чтобы заменить большие подробные спецификации, имеющиеся в национальных и международных группах стандартов.

В помощь читателю для информации о свойствах материалов в Главе 1 приводится краткое описание необходимых терминов, с которыми он столкнется в этой книге. В Главе 2 излагаются основные методы испытаний материалов. В Приложении даны переводные коэффициенты и таблицы для различных единиц размерностей, применяемых в описании свойств материалов. Главы 3...11 посвящены свойствам следующих основных технических материалов: сплавы на железной основе, алюминий, медь, магний, никель, титан и сплавы на их основе, полимеры, керамика и композитные материалы. Как правило, главы разбиваются на пять следующих разделов: обсуждение материалов, детали кодирования систем и составов, информация о тепловой обработке, свойства материалов и типичные области их применения. Коды и данные приведены для двух стандартов — американского и британского. Для помощи читателю в выборе материала в Главах 12...16 разделы сгруппированы по следующим его свойствам: электрическим, магнитным, механическим, тепловым, сопротивлению коррозии и износу. В Главе 18 обсуждаются характеристики процессов, которые можно применять для получения различных форм изделий. Глава 19 посвящена выбору процессов.

Кроме того, в Приложении даны переводные коэффициенты и таблицы различных единиц размерности, применяемых в описании свойств материалов, а также предметный указатель.

Книга имеет отношение, по существу, к свойствам материалов, и данные научного характера приводятся очень кратко. Для

получения дополнительной информации читателю рекомендуем воспользоваться следующими учебниками¹:

Anderson J.C., Leaver K.D., Rawlings R.D. and Alexander J.M. (1985). *Materials Science* (Van Nostrand, 3rd Ed.).

Ashby M. and Jones R.H. *Engineering Materials*, vol.1 and vol.2 (Butterworth-Heinemann, 1996, 1998).

Bolton W. (1998). *Engineering Materials Technology* (Butterworth-Heinemann, 3rd Ed.).

Mills N.N. (1986). *Plastics: Microstructure, Properties and Applications* (Arnold).

Smith W.F. (1981). *Structure and Properties of Engineering Alloys* (McGraw-Hill).

Для обсуждения оптимальных процедур, с целью обдуманного выбора материалов, отсылаем читателя к следующим книгам:

Ashby M.F. (1999). *Materials Selection in Mechanical Design* (Butterworth-Heinemann).

Bolton W. (1998). *Engineering Materials Technology* (Butterworth-Heinemann, 3rd Ed.).

Crane F.A.A. and Charles J.A. (1997). *Selection and Use of Engineering Materials* (Butterworths-Heinemann, 3rd Ed.).

Farag M.M. (1989). *Selection of Materials and Manufacturing Processes for Engineering Design* (Prentice Hall).

Для обсуждения выбора процессов автор рекомендует книгу Swift K.G. and Booker J.D. *Process Selection* (Agnold 1997).

Данные, использованные в этой книге, получены из обширного ряда источников. Основными из них были: Публикации Британского института стандартов, Публикации Американского общества производителей металлических материалов, Торговые ассоциации.

Интерпретация и размещение данных, тем не менее, выполнены автором. Для ознакомления с полными деталями стандартов читателю советуют обратиться к соответствующим изданиям стандартов Классификационной группы.

У. Болтон

Ссылки на источники

Выдержки из британских стандартов воспроизведены с разрешения Британского института стандартов (BSI). Комплект копий документов был получен почтой из Британского института стандартов, продажа (BSI Sales), Linford Wood, Milton Keynes, Bucks MK16 6LE.

¹ Рекомендуется также отечественный учебник: Б.Н. Арзамасов, В.И. Макаров и др. *Материаловедение: Учебник для вузов.* — 3-е изд., переработанное и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001 — 648 с., ил. (*Прим ред перевода*)

Глава первая

Терминология

Определения терминов, характеризующих свойства материалов, используемых в технике, приведены в алфавитном порядке.

Азотирование. Химико-термическая обработка стали, которая заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали атомарным азотом при нагреве стали до 500...650°C в атмосфере аммиака с распадом его на атомарный азот и водород. В результате Аз. среднеуглеродистых легированных сталей образуются нитриды легирующих элементов и стали приобретают особо высокую твердость, износостойкость и увеличивается предел их выносливости не менее чем на 30%. Аз. углеродистых сталей приводит к повышению коррозионной стойкости.

Аморфное состояние вещества. Одно из состояний твердого вещества (другое — кристаллическое), в котором центральные атомы твердого вещества и ближайшие к ним будут располагаться в определенном порядке, но по мере удаления от них этот порядок нарушается и расположение атомов становится случайным, т.е. присутствует ближний порядок расположения атомов и отсутствует дальний. Кроме того, вещество в А. с. не имеет определенной точки плавления/отвердевания при нагревании/остывании. Примерами служат стекло, каучук.

Анодирование. Электрохимический процесс образования оксидных пленок или покрытий в соответствующем растворе, при котором металл служит анодом. Поверхностная оксидная пленка покрывает металл и составляет с ним одно целое. Ан. повышает такие свойства металлов, как коррозионную стойкость, сопротивление истиранию, твердость, изменяет отражательные и излучательные характеристики. Улучшается внешний вид подвергнутого Ан. металла.

Атактическая структура. Это полимерная структура (полимер), у которой расположение боковых групп молекулярной цепи, таких как CH_3 , относительно плоскости основной цепи нерегулярно, хаотично. Атактический полимер не способен кристаллизоваться, является аморфным.

Аустенизация. Процесс, происходящий тогда, когда железный сплав нагреет до температуры, при которой его структура превращается в аустенит.

Аустенит. Принято обозначать A или γ . Твердый раствор внедрения углерода в Fe_γ , имеющий гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку с высокой растворимостью углерода в Fe_γ , достигающей 2.14% из-за достаточных размеров межатомных пор размещения углерода в решетке, составляющих сферы радиусами от 0.41 атомного радиуса железа.

Бейнит. Структура стали, образующаяся в результате промежуточного превращения аустенита. Состоит из высокодисперсной смеси частиц пересыщенного углеродом феррита и карбида железа. В стали с бейнитной структурой имеется остаточный аустенит. Эта структура тверже, чем полученная при отжиге, но мягче, чем мартенсит.

Вязкость разрушения. Критерий трещиностойкости для наиболее жесткого нагружения — плоской деформации нагружением — при достижении критического значения перехода стабильной трещины в нестабильную и обозначаемый K_{Ic} . Он показывает значение напряжения вблизи вершины трещины, имеющей тупой раскрывающийся вид в момент разрушения, и связывает приложенное среднее напряжение с критической длиной трещины. Единица измерения K_{Ic} — $MPa \cdot m^{1/2}$. Критерий K_{Ic} позволяет определить безопасный размер трещины при известном рабочем напряжении и характеризует сопротивление развитию вязкой трещины.

Гомополимер. Полимер, макромолекулы которого построены из одинаковых по химическому строению многочисленных элементарных звеньев молекул (мономеров).

График S/N . График амплитуды напряжения S , деленной на число циклов N испытаний на усталость. Амплитуда напряжения — это половина алгебраической разности между максимальным и минимальным напряжениями, при которых испытывался материал. (См. Испытание на усталость в Гл. 2.)

График напряжение—деформация. График напряжение—деформация обычного растяжения, применяемый в технике напряжений (см. Напряжение) и технике деформаций (см. Деформация). На Рис. 1.5 показан пример формы одного такого графика для металла, подобного стали. (См. Испытание на растяжение в Гл. 2.)

Деформационное упрочнение, наклеп. При холодном пластическом деформировании изменяются физические свойства наклепанного металла и тем сильнее, чем больше степень деформации. В результате $D. y.$ увеличивается твердость, повышается электросопротивление, но понижаются пластичность, ударная вязкость и коррозийностойкость.

Деформация. В технике деформацию определяют как отношение: (изменение длины материала)/(начальная длина), когда материал подвергается растяжению или сжатию. Деформация сдвига — это отношение: (смещение, при котором один слой материала скользит по другому)/(смещение, при котором слои разделены). Деформация не имеет размерности, однако ее часто выражают в процентах. Деформацию сдвига обычно указывают как угловую меру в радианах.

Деформация при закалке. Повышение твердости материала вследствие обработки, подвергающей материал пластической деформации при температурах ниже его температуры рекристаллизации.

Диэлектрическая проницаемость относительная ϵ_r . Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , или диэлектрическая постоянная материала может быть определена как отношение емкости конденсатора с материалом между его пластинами C к емкости того же конденсатора C_0 , когда между пластинами вместо диэлектрика находится вакуум:

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}.$$

Диэлектрическая проницаемость абсолютная ϵ . Величина, характеризующая во сколько раз взаимодействие двух зарядов в среде меньше, чем в вакууме. Определяется как произведение относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r на диэлектрическую постоянную (вакуума) ϵ_0 : $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$. Величина $\epsilon_0 = 8,853 \times 10^{-12}$ Ф/м. Единица измерения — Ф/м (фарад на метр).

Долговечность, циклическая долговечность. Число циклов напряжения до появления разрушения. (См. Испытание на усталость в Гл. 2.)

Дюрометр Шора. Прибор для определения твердости полимеров и резины. Применяется числовая шкала. (См. Гл. 2.)

Емкость демпфирования. Параметр, являющийся индикатором способности материала к подавлению вибраций.

Жесткость, модуль сдвига. Жесткость — характеристика материала для определения способности сопротивляться любому виду деформации (сдвигу, растяжению, изгибу и т.д.). В условиях малых и умеренных напряжений (1 условие) большинство твердых материалов следует закону Гука при сдвиге. Если построить график зависимости напряжения сдвига от деформации сдвига, то на начальном участке получим прямую (следствие 1 условия). Модуль сдвига — отношение: напряжение сдвига/деформация сдвига или тангенс угла наклона этой прямой. Угол наклона этой прямой характеризует сдвиговую жесткость материала. А так как из тригонометрии (при малых углах — 2 усло-

вие) tg угла равен самому углу (следствие 2 условия), то приходим (в этих двух условиях) к идентичности понятий «жесткость» и «модуль сдвига».

Закалка. Термическая обработка материалов с быстрым охлаждением.

Закалка с последующим отпуском. Нагрев предварительно закаленного материала для увеличения его пластичности или твердости.

Изгиб, угол изгиба. Результат, указанный в угловой мере, статических испытаний на изгиб до соприкосновения сторон, которые проводятся на материалах в форме листов, стержней и проволоки, а также на трубах с загибом до 90° . Углом изгиба называют угол, в пределах которого материал может быть изогнут без обнаружения нарушения целостности (Рис. 1.1). См. Испытание на изгиб в Гл. 2.



Рис. 1.1. Изгиб образца

Износостойкость. Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию (разрушение поверхности ввиду отделения его частиц) в определенных условиях трения. И. оценивается величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания, и определяется при испытаниях на трение и изнашивание в лабораторных или натуральных условиях по определенным методикам.

Изотактическая структура. Полимерная структура, в которой боковые группы молекул расположены упорядоченно все на одной боковой стороне молекулярной цепочки.

Изотермическая закалка с выдержкой в бейнитовой области, аустемперинг. Тепловая обработка, применяемая к железным сплавам, для повышения их вязкости и прочности. Материал нагревают до аустенизирующей температуры и закаляют до температуры M_3 с такой скоростью, что не формируются ни феррит, ни перлит. Затем выдерживают при температуре M_3 , пока не закончится превращение его в бейнит.

Изохронный график напряжение—деформация. См. вступление к термину Модуль ползучести.

Испытание Джомени. Испытание применяется для получения информации о прокаливаемости сплавов. (См. Гл. 2 для более полной информации.)

Испытание Изода. Испытание (см. Испытание на удар в Гл. 2.) применяют для определения чувствительности материала к нагрузке, прикладываемой с высокой скоростью. Оно состоит в нанесении резкого удара по образцу. Результаты испытания выражаются количеством энергии, поглощенной образцом при разрушении. Чем выше измеренная величина Изода, тем больше вязкость материала.

Испытание Роквелла. Метод Роквелла применяется для оценки твердости материала. Имеются числовые шкалы Роквелла, по которым можно определять непосредственно результаты испытаний. (См. Испытание на удар в Гл. 2.)

Испытание Шарпи. Испытание (см. Испытание на удар в Гл. 2) для определения чувствительности материала к нагрузке, прикладываемой с высокой скоростью. Оно состоит в нанесении резкого удара по образцу. Результаты испытания выражаются количеством энергии, поглощенной образцом при разрушении. Чем выше величина Шарпи, тем больше гибкость материала.

Коррозионная стойкость. Способность материала к сопротивлению ухудшению его свойств при химической или электрохимической реакции в непосредственном контакте с окружающей средой. Существует много видов коррозии, и для каждого из них имеется свой метод защиты материала.

Коэффициент пропускания, нормальный. Нормальный коэффициент пропускания — это отношение: (прошедший поток света)/(падающий поток). Он, как правило, выражается в процентах. Коэффициент пропускания зависит от толщины материала, поэтому результаты обычно приводятся к толщине в 1 мм. Для некоторых материалов это значение коэффициента пропускания может быть равно нулю, если они совершенно непрозрачны при малой толщине.

Кристаллическая структура. Структура с упорядоченным периодическим (регулярным) расположением атомов или молекул.

Линовка профиля. Предельная линовка профиля — это максимальный диаметр круглого проката, в середине которого могут быть получены требуемые свойства материала.

Мартенсит. Основной термин, применяемый для описания формы структуры железных сплавов, когда скорость охлаждения от аустенитового состояния слишком высокая и допускает диффузию атомов углерода из гранцентрированной кубической формы аустенита и превращение ее в объемно-центрированную форму феррита. Результатом является более высокая деформационная жесткость структуры.

Мер. См. Мономер.

Модуль ползучести. Напряжение, деленное на деформацию для определенного момента времени. Начальные результаты испытания на ползучесть обычно представлены серией графиков деформации в зависимости от времени для различных уровней напряжения. Из этих графиков для определенного времени могут быть получены величины деформаций при различных напряжениях. Результирующие величины напряжение—деформация могут быть использованы к данным графика напряжение—деформация для определенного времени. Такой график называется *изохронным графиком* напряжение—деформация. Модуль ползучести не равен модулю растяжения. (См. Испытание на ползучесть в Гл. 2.)

Модуль упругости, модуль Юнга. Коэффициент, характеризующий упругие свойства твердых тел и являющийся коэффициентом пропорциональности E между деформацией и приложенными механическими напряжениями и наоборот. Модуль упругости E — отношение растягивающего напряжения σ к относительному удлинению ϵ : $E = \sigma/\epsilon$. Графически модуль упругости, или модуль Юнга, это тангенс угла наклона в графике напряжение—деформация на его начальном прямолинейном участке (**Рис. 1.2**). См. Испытание на растяжение в Гл. 2.

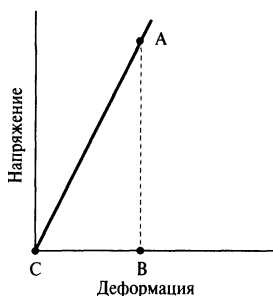


Рис. 1.2. Модуль растяжения AB/BC

Модуль сечения. Для большинства полимерных материалов нет линейного участка графика напряжение—деформация, поэтому невозможно оценить их модуль растяжения. В таких случаях используется модуль сечения. Этот модуль определяется как напряжение при величине деформации в 0.2%, деленное на эту деформацию (**Рис. 1.3**).

Модуль Юнга. См. Модуль упругости.

Мономер. Низкомолекулярное соединение вещества, молекулы которого способны реагировать между собой или с молекулами других веществ с образованием полимера.

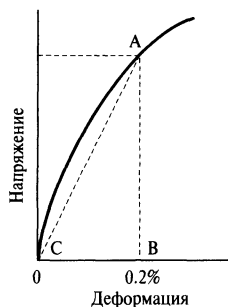


Рис. 1.3. Модуль сечения AB/BC

Наполнители. Пластмассы и резины, а также полимеры почти всегда содержат в себе другие материалы. Их вводят для изменения свойств и удешевления материала.

Напряжение (механическое). В технике механическое напряжение растяжения и сжатия обычно определяется как отношение: (сила)/(начальная площадь поперечного сечения образца). Истинное напряжение — это отношение: (сила)/(площадь поперечного сечения образца, которую образец имеет в этот момент). Сдвигающее напряжение — это отношение: (сдвигающая сила)/(площадь образца, сопротивляющаяся сдвигу). Механическое напряжение имеет размерность Па (паскаль), или $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$, причем $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$.

Науглероживание. Состояние затвердевания, в результате которого на поверхности железных сплавов образуется твердый слой. Обработка включает в себя нагрев сплава до состояния аустенизации в атмосфере, обогащенной углеродом, благодаря чему углерод диффундирует внутрь поверхностных слоев, закаливая их к тому же до превращения в мартенсит.

Нормализация. Тепловая обработка, включающая в себя нагрев железного сплава до температуры, при которой происходит полная аустенизация структуры с последующим охлаждением на воздухе. В результате этого появляется более мягкий материал, но мягкий не сам по себе, а вследствие проведения отжига.

Обрабатываемость на станках. Не существует общепринятого стандарта испытания на обрабатываемость. Она базируется на эмпирических данных испытания и потому субъективна. Обрабатываемость измеряется на различных встречающихся в механической обработке материалах.

Ориентация. Метод повышения механических свойств полимеров. Любой из видов полимеров — кристаллических или стеклообразных — может быть ориентирован при медленном

растяжении, если он находится в высокоэластичном или вязкотекучем состоянии. Макромолекулы ориентируются при действии высоких температур и механических напряжений — вытяжки вдоль ориентированных вытянутых молекул, приобретают упорядоченную структуру по сравнению с неориентированными. После достижения нужной степени ориентации температура снижается и полученная структура фиксируется. Прочность при разрыве и модуль упругости в направлении ориентации увеличиваются. Различают одно- и многоосную ориентацию в одном и нескольких направлениях.

Остаточные напряжения. Напряжения, остающиеся в материале, который был подвергнут пластической деформации, после снятия нагрузки.

Отжиг. Процесс, включающий нагрев и выдержку материала при достаточно высокой температуре для приведения его в конечном итоге к пластическому состоянию после охлаждения с соответствующей скоростью, как правило, медленной. В случае железных сплавов требующаяся температура отжига выше критической температуры. Цель отжига может заключаться в том, чтобы облегчить холодную обработку материала, улучшить эффективность инструмента, механические свойства материала и т. п.

Относительная магнитная проницаемость. Ее определяют как отношение индукции в материале к индукции в положении, когда материал помещен в вакуум, и измеряют по магнитным свойствам материала.

Относительное удлинение тела. Эта величина определяется так:

$$\begin{aligned} \text{относительное удлинение} &= \\ &= \frac{\text{начальная длина} - \text{конечная длина}}{\text{начальная длина}} \times 100\%. \end{aligned}$$

Измеряется у пластичных материалов. Более высокий процент удлинения получается у материалов с большей пластичностью. (См. Испытание на растяжение в Гл. 2.)

Относительное уменьшение площади поперечного сечения тела. Эта величина определяется так:

$$\begin{aligned} \text{относительное уменьшение площади поперечного сечения} &= \\ &= \frac{\text{начальная площадь} - \text{конечная площадь}}{\text{начальная площадь}} \times 100\%. \end{aligned}$$

Также является мерой пластичности материала. Более высокий процент получается у материалов с большей пластичностью. (См. Испытание на растяжение в Гл. 2.)

Перлит. Слоистая структура феррита и карбида железа.

Пластическая деформация. Вид деформации, при которой снятие нагрузки с деформируемого образца не вызывает полного восстановления его свойств и геометрических характеристик. См. также Упругая деформация.

Пластические материалы. Материалы, показывающие до разрушения значительную величину пластической деформации.

Пластический разрыв. Процесс, в котором до разрушения наблюдается значительная величина пластической деформации. У металлов излом представляет типичный конус и образование в форме чашки, а поверхность излома грубая и по виду волокнистая.

Плоская деформация нагружением. См. Вязкость разрушения.

Плотность¹. Масса, содержащаяся в единице объема.

Поверхностное упрочнение. Основной термин, применяемый для описания ряда процессов, после проведения которых поверхность сплава на железной основе становится тверже, чем его сердцевина.

Повышение твердости выделением вторичных фаз. Процесс тепловой обработки, в результате которого выделяются вторичные фазы (преципитаты, дисперсионное твердение) таким путем, что происходит твердение материала.

Поглощение воды. Процентный прирост массы полимерного материала после погружения его в воду на определенное время при контролируемых условиях.

Показатель преломления. Отношение: (скорость света в вакууме)/(скорость света в материале). Для материала скорость света зависит от направления прохождения света через материал, и поэтому показатель преломления изменяется с изменением направления прохождения света.

Ползучесть. Непрерывная деформация материала с течением времени, когда его подвергают постоянному напряжению. Для определенного материала ползучесть зависит от режима работы, т. е. от температуры и начального напряжения, а режим работы, в свою очередь, зависит также от свойств материала. (См. Испытание на ползучесть в Гл. 2.)

Полностью твердый. Термин применяется для описания степени твердости сплавов. Это есть состояние наклепанного материала. Вне этого состояния материал недолго будет работоспособным.

Полутвердый. Термин применяется для описания степени твердости сплавов. Это есть состояние наклепанного материала на половине пути между мягким и полностью твердым.

¹ Единица плотности в СИ — кг/м³. (Прим. ред.)

Правило Хукса. Если материал подчиняется правилу Хукса, то его удлинение прямо пропорционально прикладываемой силе. (См. Испытание на растяжение в Гл. 2.)

Предел долговечности. Это величина напряжения, при котором испытуемый образец имеет срок долговечности, равный N циклам напряжения. (См. Испытание на усталость в Гл. 2.)

Предел ползучести. Напряжение, требующееся для создания данной деформации, под действием которой материал деформируется на определенную величину за определенное время при заданной температуре.

Предел пропорциональности. Вплоть до предела пропорциональности удлинение образца прямо пропорционально растягивающим силам, т. е. деформация пропорциональна прикладываемому напряжению (**Рис. 1.4**).

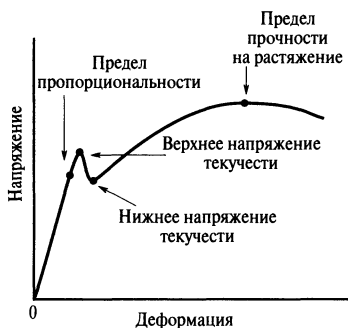


Рис. 1.4. График напряжение—деформация

Предел прочности на растяжение, временное сопротивление. Показатель прочности материала, предшествующей разрушению. Его определяют как отношение: (максимальная сила до разрушения)/(начальная площадь поперечного сечения образца). (См. **Рис. 1.4**, Испытание на растяжение в Гл. 2.)

Предел прочности на сжатие. Это максимальное сжимающее напряжение, выдерживаемое материалом до разрушения.

Предел упругости. Характеристика пружинных материалов, используемых для упругих приборов и машин. Максимальная сила (или напряжение), при которой, когда она снята, материал возвращается к своим первоначальным размерам. Для многих материалов предел упругости и предел пропорциональности один и тот же: это предельная максимальная сила, до которой растяжение пропорционально силе, или максималь-

ное напряжение, до которого деформация пропорциональна напряжению. (См. Испытание на растяжение в Гл. 2.)

Предел усталости (выносливости). Это величина наибольшего напряжения, которое материал будет выдерживать без разрушения за заданное число циклов N . (См. Испытание на усталость в Гл. 2.)

Пробное напряжение. Пробное напряжение в 0.2% определяют как такое напряжение, которое смещает результаты испытания на 0.2%, т. е. напряжение задается на кривой растяжения на графике напряжение—деформация при пересечении прямой, параллельными линейной части графика, проходящими через 0.2%-ное значение деформации (**Рис. 1.5**). Пробное напряжение в 0.1% определяется аналогичным образом. Пробные напряжения указываются, когда материал имеет не вполне определенную точку текучести. (См. Испытание на растяжение в Гл. 2.)

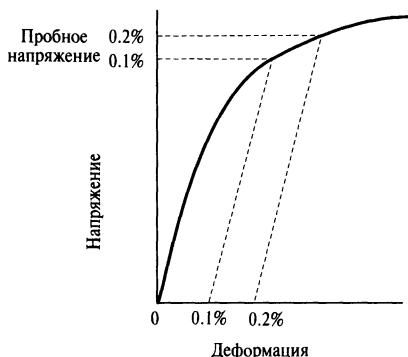


Рис. 1.5. Деформация пробным напряжением

Прокаливаемость. Термин «прокаливаемость материала» применяется для описания меры глубины повышенной твердости, распространяющейся внутрь материала при закалке. (См. Прокаливаемость в Гл. 2.)

Проницаемость. Термин описывает скорость, с которой газы или пары проходят сквозь материал. Скорость прохождения через единицу площади поверхности материала определяется так:

$$\frac{\text{скорость прохождения}}{\text{площадь}} = \frac{P(p_1 - p_2)}{L},$$

где P — коэффициент проницаемости, p_1 и p_2 — давление соответственно на каждой стороне материала и L — толщина материала. Применяют разнообразные единицы для обозначения

проницаемости: то же давление одни исследователи дают в сантиметрах ртутного столба, другие в Па или Н·м⁻¹; время может быть дано в днях или секундах; скорость — в терминах объема в кубических сантиметрах (см³) или массы в молях или килограммах (кг), или граммах (г).

Прочность¹. См. Предел прочности на сжатие. Сопротивление срезу. Предел прочности на растяжение.

Равновесная диаграмма. Это диаграмма для металлов, построенная на большом числе экспериментальных данных, у которой кривые охлаждения известны для всего диапазона какой-нибудь группы сплавов. По диаграмме можно также предсказать состояние сплава определенного состава, если он нагрет или охлажден до некоторой температуры.

Разрывное напряжение при растяжении. Предельное растягивающее напряжение после наступления предела прочности, вызывающее разрыв материала в наиболее тонком месте образца — шейке, где сосредотачивается пластическая деформация. См. Предел прочности на растяжение.

Расширение, температурный коэффициент линейного расширения. Это величина, характеризующая увеличение единицы длины материала, когда его температура возрастает на один градус. Его определяют по формуле

$$\begin{aligned} \text{Температурный коэффициент линейного расширения} &= \\ &= \frac{\text{изменение длины}}{\text{длина} \times \text{изменение температуры}} \end{aligned}$$

Размерность: °С⁻¹ или К⁻¹.

Расширение линейное. Альтернативное название температурного коэффициента линейного расширения.

Результаты испытания Виккерса. Испытание Виккерса применяется для измерения твердости материала. Чем больше число твердости по Виккерсу, тем больше твердость материала. (См. Измерение твердости в Гл. 2.)

Рекристаллизация. Описывает в основном процесс обновления, освобождения нагретом зернистой структуры от деформации, созданной в наклепанном металле.

Синдиотактическая структура. Полимерная структура, в которой молекулы боковых групп регулярно чередуются по обеим сторонам молекулярной цепочки.

Снятие напряжения. Обработка по снижению остаточных напряжений при нагреве материала до нужной температуры с последующим медленным охлаждением.

¹ Прочность — способность материала сопротивляться тем или иным воздействиям без разрушения. Единица измерения П. в СИ — Н·м/кг. (Прим ред)

Соотношение Пуассона. Отношение: (поперечная деформация)/(продольная деформация).

Сополимер. Полимерный материал, состоящий из комбинации двух или трех мономеров в простой полимерной цепочке.

Сопrotивление срезу. Срезающее напряжение, требующееся для получения излома.

Спекание. Процесс, при котором порошки связываются молекулярным или атомным притяжением в результате нагрева до температуры ниже точки плавления этих порошков.

Сплав. Металлический материал, полученный при затвердевании расплавов компонентов, из которых по крайней мере один является металлом.

Способность к сварке. Способность к сварке определенной комбинации материалов указывает на легкость, с какой может быть выполнена качественная сварка.

Срез. Разрушение при сдвиге одной части материала относительно другой под действием касательных напряжений.

Старение. Термин применяется для описания изменения свойств у некоторых металлов и сплавов при окружающей (комнатной) температуре (естественное С), после горячей или холодной обработки (искусственное С). Это изменение вызвано в основном имеющимися выделениями вторичных фаз (преципитатным, или так называемым дисперсионным, твердением), не изменяющими химических свойств соединения.

Старение мартенсита. Обработка путем повышения твердости выделением вторичных фаз, применяемая к тем же самым железным сплавам. (См. Повышение твердости выделением вторичных фаз.)

Степень твердости. Термин применяется к цветным сплавам как индикатор степени твердость/прочность со следующей градацией: твердый, полутвердый, три четверти твердости.

Сфероидизация. Обработка для создания сферических или шаровидных форм карбида в стали.

Твердость. Твердость материала может быть охарактеризована в тех же самых терминах стандартного испытания, включающего в себя вдавливание индентора (образца материала), например по Бринеллю, Виккерсу или Роквеллу, или царапание поверхности материала, применяемого в испытании по Моосу. (См. Измерение твердости в Гл. 2.)

Температура перехода. Температура, при которой материал изменяется от состояния вязкого до состояния хрупкого разрушения.

Температура перехода в стеклообразное состояние. Температура, при которой полимер изменяется от гибкого до жесткого состояния. Модуль растяжения при этом показывает резкое изменение от низкого значения, свойственного резине, до высокого, свойственного стеклообразному материалу.

Тепловое коробление/прогибание температурой. Определенная величина относительного прогиба, которую показывает узкая полоска полимерного материала под специальной нагрузкой при определенной температуре.

Тепловое расширение. См. Расширение, коэффициент линейного расширения.

Теплопроводность. Это скорость переноса энергии в форме тепла через материал, зависящая пропорционально от коэффициента теплопроводности. Коэффициент теплопроводности определяется так:

$$\text{коэффициент теплопроводности} = \frac{\text{скорость переноса тепла}}{\text{площадь поперечного сечения} \times \text{температурный градиент}}$$

Коэффициент теплопроводности имеет размерность Вт·м⁻¹·К⁻¹. Более высокая теплопроводность определяет большую скорость передачи тепла от более нагретого участка образца к менее нагретому, что приводит к выравниванию температуры образца.

Теплостойкий сплав. Сплав, разработанный для применения при высоких температурах.

Термическая обработка на твердый раствор. Тепловая обработка, включающая в себя нагрев сплава до необходимой температуры, выдержка его при этой температуре в течение промежутка времени, достаточного для перехода в твердый раствор одного или более входящих в него элементов, и охлаждение со скоростью, достаточной для перехода его в твердый раствор.

Точка плавления. Температура, при которой материал переходит из твердого состояния в жидкое.

Точка размягчения. Для многих металлов, когда растягивающая сила, прикладываемая к испытываемому образцу, устойчиво растет, наступит момент, когда длина начнет увеличиваться не пропорционально прикладываемой силе, а быстрее до тех пор, пока сила не достигнет максимума. Это значение называют верхней точкой размягчения. Затем сила падает до значения, называемого нижней точкой размягчения, и вновь увеличивается, когда вытягивание опять будет непрерывным. (См. **Рис. 1.5**, Испытание на растяжение в Гл. 2.)

Транс-структура. Один из двух видов изомерии (пространственное расположение) одинаковых групп относительно углеродной цепи полимера. Это полимерная структура, в которой одинаковые группы, например Н и СН₃, соединенные с двойной связью углеродной цепи, расположены по разные стороны от двойной связи. Дан пример транс-бутена. См. также Цис-структура.

Трение, коэффициент трения. Коэффициент трения — это максимальное значение силы трения, градуированной к нормальной силе. В ситуации, когда объект начинает движение, максимальная сила трения равна силе, требующейся для старта скользящего объекта. Когда объект находится уже в движении, сила трения — это такая сила, которая требуется для поддержания движения с постоянной скоростью. Она меньше, чем сила трения, необходимая для старта скользящей части механизма. Следовательно, есть два коэффициента трения — статический и динамический, причем статический коэффициент больше динамического.

Ударные свойства. См. Испытание Шарпи и Испытание Изода, а также Испытание на удар в Гл. 2.

Удельная теплоемкость. Ее определяют так:

$$\text{удельная теплоемкость} = \frac{\text{поглощенное тепло}}{\text{масса} \times \text{изменение температуры}}.$$

Количество поглощенного тепла, когда растёт температура материала при нагревании, зависит от его удельной теплоемкости. Чем выше удельная теплоемкость материала, тем меньше рост температуры на единицу массы для данного количества поглощенного тепла. Удельная теплоемкость имеет размерность Дж·кг⁻¹·К⁻¹.

Удельная электропроводность. Определяют по величине электропроводности цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади сечения по формуле:

$$\text{удельная электропроводность} = \frac{\text{электропроводность} \times \text{длина}}{\text{площадь поперечного сечения}},$$

$$\text{электропроводность (проводимость)} = \frac{1}{\text{сопротивление}}.$$

Электропроводность имеет размерность Ом⁻¹, или См (сименс), а удельная электропроводность — Ом⁻¹·м⁻¹. Удельная электропроводность измеряется на проводящем электричество материале. Чем больше электропроводность, тем больше ток при определенной разности потенциалов. Эталоном удельной электропроводности, согласно Международному стандарту на отожженную медную проволоку (IACS), принята удельная электропроводность 100%-ной отожженной меди при 20°C. Удельная электропроводность всех других материалов выражается в процентном отношении к этому значению.

Удельное электрическое сопротивление. Величина, обратная удельной электропроводности. Ее измеряют на материале соответственно данному определению:

$$\text{удельное сопротивление} = \frac{\text{сопротивление} \times \text{площадь поперечного сечения}}{\text{длина}}$$

Удельное сопротивление имеет размерность Ом·м.

Удельный вес¹. Удельным весом материала γ называется отношение его плотности к плотности воды:

$$\text{удельный вес } \gamma = \frac{\text{Плотность материала}}{\text{Плотность воды}}$$

Единица удельного веса в СИ — Н·м⁻³.

Упругое восстановление формы после деформации, частичное. Определяется как деформация, вернувшаяся в исходное состояние, деленная на ползучую деформацию, когда нагрузка снята.

Упругая деформация. Вид деформации, при которой снятие нагрузки с деформируемого образца полностью возвращает его в исходное состояние. Объем и форма образца полностью восстанавливаются. См. также Пластическая деформация.

Усталостная прочность. Усталостная прочность при N циклах напряжения — это величина напряжения, ниже которой испытываемый образец имеет срок службы, равный N циклам. (См. Испытание на усталость в Гл. 2.)

Феррит. Твердый раствор из одного или более элементов в форме центрированной кубической решетки железа. В него обычно входит углерод.

Хрупкий материал. Материал, имеющий незначительную пластическую деформацию до его излома. Например, применяемый для фарфоровых чашек материал является хрупким, он имеет незначительную пластическую деформацию, до того как разрушится. Сломанная чайная чашка может быть склеена, что даст чашку тех же размера и формы, как и оригинал.

Хрупкое разрушение. Разрушение, при котором трещина зарождается и распространяется до некоторой значительной пластической деформации. Поверхность металла при хрупком разрушении блестит, а ее зернистость обусловлена отражением света от отдельных кристаллов. В полимерных материалах поверхность излома может быть гладкой и зеркальной или отчасти расколотой и неровной.

Цементация. Термин применяется для описания процессов изменения состава поверхностных слоев железных сплавов с об-

¹ Удельный вес — вес единицы объема материала. В отечественной технической

разованием твердого поверхностного слоя. (См. Науглероживание и азотирование.)

Цементит. Соединение, образованное из железа и углерода, часто называется карбид железа.

Цис-структура. Один из двух видов изомерии (пространственное расположение) одинаковых групп относительно углеродной цепи полимера. Это полимерная структура, в которой одинаковые группы, например Н и СН₃, соединенные с двойной связью углеродной цепи, расположены по одну сторону от двойной связи. Дан пример цис-бутена. См. также Транс-структура.

Число твердости по Бринеллю (НВ). Число, которое присваивается материалу по результатам испытания Бринелля (см. Измерение на твердость в Гл. 2), т. е. измерения твердости материала. Чем больше число, тем тверже материал. Оно определяется как отношение нагрузки на индентор (стальной шарик) к площади поверхности отпечатка на материале.

Шкала по Моосу. Шкала твердости для определения твердости материала методом царапания набором из 10 минералов, расположенных в порядке возрастания твердости. Это 10-балльная числовая шкала относительной твердости минералов, более высокое число для более твердого материала. (См. Испытание на удар в Гл. 2.)

Эластичность. Термин характеризует упругие свойства полимеров. Способность материала к большим обратимым изменениям формы при малых нагрузках из-за колебания звеньев, и поэтому макромолекула способна изгибаться.

Электрическая прочность диэлектрика. Параметр диэлектрика для определения его способности противостоять пробой. Это напряженность электрического поля в диэлектрике $E_{ПР}$, при которой происходит пробой. Измеряется как отношение напряжения пробоя $V_{ПР}$ (минимальной разности потенциалов на диэлектрике, вызывающей пробой) к толщине диэлектрика d в месте пробоя и равна:

$$E_{ПР} = \frac{V_{ПР}}{d}.$$

Измеряется в СИ в МВ/м (мегавольт на метр). Удобнее использовать эквивалентную размерность — кВ/мм (киловольт на миллиметр).

Глава вторая

Методы испытаний

Рассмотрим несколько обычных методов испытаний, применяемых для определения свойств материалов, используемых в технике.

Испытание на изгиб

Изгиб — это результат испытания образца, когда в образце возникают растягивающие и сжимающие напряжения. На изгиб испытываются материалы с малой пластичностью: чугуны, стали инструментальные, стали после поверхностного упрочнения, керамики.

Используют 2 схемы нагружения сосредоточенной силой. Образец помещают на 2 опоры — нагрузка дается по центру. 2-я схема — двумя симметричными силами (испытание на чистый изгиб), каждая составляет $1/2$ общей нагрузки симметрично на полусумме расстояний от центра до каждой опоры. Характеристиками, которые определяют, служат предел прочности при изгибе и угол изгиба (см. **Рис. 1.1**).

Испытание на ползучесть

Для металлов, исключая очень мягкие, подобные свинцу, при нормальных температурах испытаниями на ползучесть пренебрегают. Но они становятся важными при повышенных температурах. По этой причине испытания на ползучесть проводят в основном при высоких температурах. На **Рис. 2.1** схематически показан такой вид испытания. Температура образца поддерживается постоянной с помощью управляющего устройства, имеющего термодатчик, присоединенный к образцу. Удлинение образца измеряется в зависимости от времени. Испытания могут продолжаться довольно долго. Для полимерных материалов ползучесть, как правило, весьма значительна и при нормальных температурах.

Результаты испытания на ползучесть могут быть представлены графиком деформации в зависимости от времени при определенном напряжении до разрыва образца в какой-то момент времени (см. Разрывное напряжение, Гл. 1) или, в частности для по-

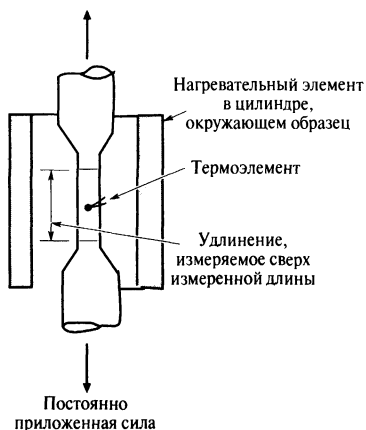


Рис. 2.1. Испытание материала на ползучесть

лимерных материалов, изохронным графиком напряжение — деформация (см. Модуль ползучести, Гл. 1), или характеристикой модуля ползучести (см. Гл. 1).

Испытание на усталость

Различные виды испытания на усталость имитируют изменения напряжений, которым подвергаются материалы различных деталей, когда они находятся в эксплуатации. Изгибно-нагрузочная машина, например, применяется для изгибания образца относительно точки опоры поочередно в двух направлениях (Рис. 2.2а), тогда как машина для испытания на усталость при скручивании свивает его поочередно в одном направлении и затем в противоположном (Рис. 2.2б). Третий тип машины используется для проведения чередующихся операций растяжения и сжатия при прямом напряжении на образец (Рис. 2.2в). Испытания могут проводиться с механическим напряжением, которое периодически изменяется от нуля в положительном и отрицательном направлениях (Рис. 2.2г), повторяется от нуля до максимального значения (Рис. 2.2д) или изменяется в обоих направлениях около некоторой величины, не достигая нуля за все время испытания (Рис. 2.2е). Цель испытания: подвергнуть материал типичному напряжению, при котором он будет эксплуатироваться.

Результаты испытания на усталость могут быть выражены в виде графика S/N , характеристикой предельной усталости или пределом долговечности для N циклов (см. Гл. 1).

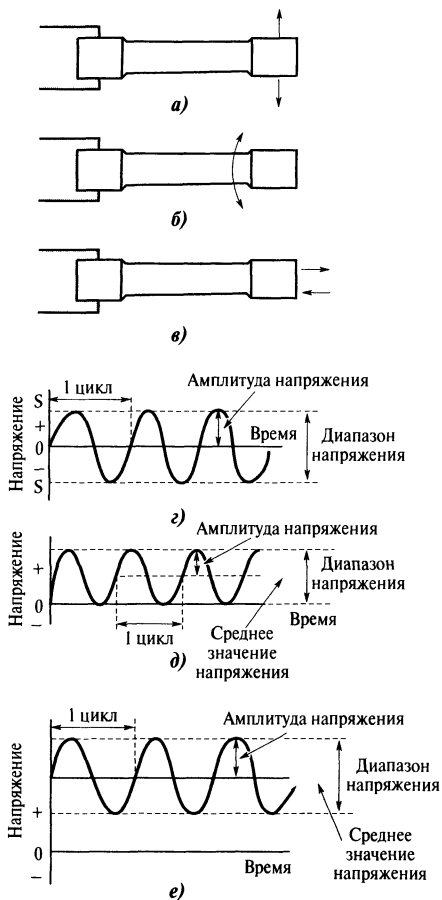


Рис. 2.2. Испытание на усталость

Прокаливаемость

Прокаливаемость измеряется при реакции стандартного образца для испытания на стандартное испытание, называемое испытанием Джоуни. Оно включает в себя нагрев стального образца до состояния аустенизации, выдержку в вертикальном положении и закалку его нижнего конца с помощью струи воды (Рис. 2.3). Это метод закалки при различных скоростях охлаждения по длине образца. Когда образец охлажден после закалки,

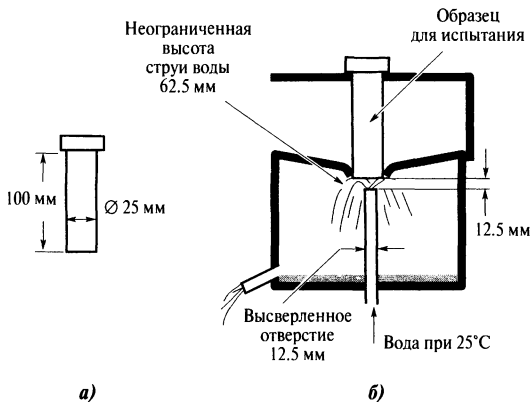


Рис. 2.3. Испытание Джоменни:

а — образец для испытания;

б — аппаратура для испытания.

плоскую часть его вдоль одной стороны шлифуют на глубину около 0.4 мм и проводят измерения твердости по длине образца. Важным моментом испытания Джоменни является не то, что измеряется твердость в разных точках по длине образца, а то, что твердость определяется при различных скоростях охлаждения, так как каждой точке по длине образца соответствует своя скорость охлаждения (**Рис. 2.4**). Если скорости охлаждения известны в точках как на поверхности, так и внутри образца стали, то результаты испытания Джоменни могут быть использованы для индикации твердости в этих точках.



Рис. 2.4. Скорости охлаждения на различных расстояниях от закаливаемого конца образца для испытания Джоменни

Измерение твердости

Большинство обычных методов измерения твердости металлов включает стандартный индентор, вдавливаемый в поверхность материала. Измерения, связанные с углублением на поверхности, принимают как измерения твердости материалов, особенно металлов. Испытания Бринелля, Виккерса и Роквелла являются наиболее серьезными. (См. Испытания Бринелля, Виккерса и Роквелла в Гл. 1.)

В *испытании Бринелля* твердость определяют надавливанием стального шара с заданной силой в течение 10...15 с на поверхность материала. Сняв нагрузку и отведя шар от образца, измеряют диаметр углубления. Число твердости Бринелля, обычно указываемое как НВ, получается при делении величины прикладываемой силы на площадь сферического углубления. Эта площадь может быть вычислена или взята из таблиц, в которых она дана в зависимости от диаметра шара и диаметра углубления:

$$\text{твердость} = \frac{\text{приложенная сила}}{\text{площадь сферической поверхности от индентора}}$$

Размерность площади дается в мм², а силы — в кгс (1 кгс = 9.8 Н). Диаметр D применяемого шара и величина прикладываемой силы F , связанные соотношением F/D^2 , дают значения 1, 5, 10 или 30; диаметры шаров бывают 1, 2, 5 или 10 мм. В принципе равным значениям F/D^2 будут соответствовать равные значения твердости независимо от диаметра применяемого шара.

Испытание Бринелля не может применяться к очень мягким или очень твердым материалам. В первом случае размер углубления будет равен диаметру шара, а во втором — углубления либо не будет, либо оно будет настолько малым, что невозможно будет провести на нем измерения. Если измерения не были эффективны при толщине испытуемого образца, то толщина материалов, подвергающихся испытанию, должна быть по крайней мере в десять раз больше углубления.

В *испытании Виккерса* употребляется алмазный резец, который прижимается к поверхности материала на время от 10 до 15 с. В результате образуется отпечаток квадратной формы. После снятия нагрузки и отвода резца от поверхности материала измеряются диагонали углубления для определения площади поверхности отпечатка. Число твердости по Виккерсу, указываемое как НV, получается при делении величины прикладываемой силы на площадь поверхности углубления. Площадь поверхности может быть рассчитана. Предполагается, что углубление имеет форму правильной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине 136°. Это угол вершины алмазно-

го реза. При желании можно пользоваться таблицами отношения размеров диагоналей к площади.

Испытание Виккерса¹ более точно по сравнению с испытанием Бринелля, так как диагонали квадрата измеряются с меньшей ошибкой, чем диаметр круга. С другой стороны, его применение имеет некоторые ограничения по сравнению с испытанием Бринелля.

В испытании Роквелла в качестве индентора употребляется алмазный конус или закаленный стальной шар. При контакте с поверхностью материала прикладывается сила давления индентора в 90.8 Н. Затем добавляется дополнительная сила и происходит увеличение проникновения индентора в глубь материала. После этого дополнительная сила снимается и уменьшается глубина проникновения индентора из-за не совсем пластической деформации материала. Определяется разность между конечной глубиной проникновения индентора в материал и глубиной до приложения дополнительной силы. Это остаточное увеличение в проникновении (e) индентора обусловлено дополнительной силой:

$$\text{твердость} = E - e ,$$

где E — константа, определяемая по форме индентора. Для конусного алмазного индентора $E = 100$, для стального шара $E = 130$.

Шкалы Роквелла даются для определенного индентора и прикладываемой дополнительной силы. В Табл. 2.1 приведены шкалы и типы используемых материалов, с которыми проводится испытание Роквелла. Что касается результатов испытания Роквелла, обозначаемых как HR, то шкала помечает их буквами при оценке. Шкалы В и С, как правило, применяются для металлов.

Табл. 2.1. Шкалы Роквелла и типичные применения

Шкала	Индентор	Сила [кН]	Типичные применения
A	Алмаз	0.59	Тонкая сталь и поверхностно цементированная сталь
B	Шар Ø 1.588 мм	0.98	Медные сплавы, алюминиевые сплавы, мягкие стали
C	Алмаз	1.47	Сталь, твердые литейные чугуны, глубоко цементированная сталь
D	Алмаз	0.98	Тонкая сталь и среднецементированная сталь
E	Шар Ø 3.175 мм	0.98	Литейный чугун, алюминиевые, магниевые и подшипниковые сплавы
F	Шар Ø 1.588 мм	0.59	Отожженные медные сплавы, мягкие тонколистовые металлы, латунь
G	Шар Ø 1.588 мм	1.47	Ковкие чугуны, пушечные бронзы, бронзы, медно-никелевые сплавы
H	Шар Ø 3.175 мм	0.59	Алюминий, свинец, цинк
K	Шар Ø 3.175 мм	1.47	Алюминий и магниевые сплавы
L	Шар Ø 6.350 мм	0.59	Пластмассы

¹ Применяется для измерения твердости очень твердых материалов. (Прим. ред.)

Табл. 2.1 (окончание)

Шкала	Индентор	Сила [кН]	Типичные применения
M	Шар Ø 6.350 мм	0.98	То же
P	Шар Ø 6.350 мм	1.47	—
R	Шар Ø 12.70 мм	0.59	Пластмассы
S	Шар Ø 12.70 мм	0.98	—
V	Шар Ø 12.70 мм	1.47	—

Для большинства обычных инденторов в испытании Роквелла размер проникновения лучше иметь малым. Это локализует изменение структуры, так как состав может влиять на результаты испытания. Однако в отличие от испытаний Бринелля и Виккерса здесь не требуются полированные поверхности для точных измерений.

Стандартное испытание Роквелла не может применяться к тонколистовому материалу. Тем не менее существует вариант этого испытания, известный как испытание поверхностной твердости Роквелла. Чем больше прикладываемая сила и глубина проникновения, определенная более чувствительным прибором, тем меньше может быть воздействие индентора на материал. При этом взамен начальной силы в 90.8 Н применяется сила в 29.4 Н. В Табл. 2.2 перечислены шкалы для этих испытаний.

Табл. 2.2. Шкалы Роквелла для испытания поверхностной твердости тонколистового материала

Шкала	Индентор	Прикладываемая сила [кН]
15-N	Алмаз	0.14
30-N	То же	0.29
45-N	То же	0.44
15-T	Шар Ø 1.588 мм	0.14
30-T	То же	0.29
45-T	То же	0.44

Испытания Бринелля, Виккерса и Роквелла могут применяться к полимерным материалам. Испытание Роквелла предпочтительнее, так как измерение проникновения в глубь материала удобнее, чем проникновения по площади поверхности, и оно употребляется более широко. Шкала R является наиболее часто используемой шкалой.

Дюрометр Шора для измерения твердости полимеров и эластомеров дает значения твердости по числовой шкале Шора. Для шкалы А усеченный конус индентора придавливается к поверхности материала при нагрузке в 0.8 Н. Измеряется глубина проникновения индентора. Это может быть сделано немедленно

при приложенной нагрузке, а затем при нагрузке, изменяющейся во времени. Для шкалы D применяется индентор с круглым кончиком конуса, нагрузка 44.5 Н.

В испытании Мооса твердость оценивается по сопротивлению материала царапанию. За эталоны шкалы Мооса приняты 10 сортов минералов: каждый может царапать предшествующий ему в шкале материал, но не будет царапать следующий за ним.

Материалы: 1 — тальк; 2 — гипс; 3 — кальциевый шпат; 4 — флюорит; 5 — апатит; 6 — полевой шпат; 7 — кварц; 8 — топаз; 9 — корунд; 10 — алмаз.

Твердость материала по Моосу при испытании на единицу меньше номера того минерала, который царапал его.

На Рис. 2.5 показан основной диапазон значений твердости по Виккерсу, Бринеллю, Роквеллу и Моосу. Это приблизительная связь между значениями твердости и пределами прочности на растяжение. Так, для отожженных сталей предел прочности на растяжение в МПа ($\text{МН}\cdot\text{м}^{-2}$) примерно равен 3.54 значения твердости по Бринеллю, а для закаленных и отпущенных сталей — 3.24. Для латуни коэффициент примерно равен 5.6, а для алюминиевых сплавов около 4.2.

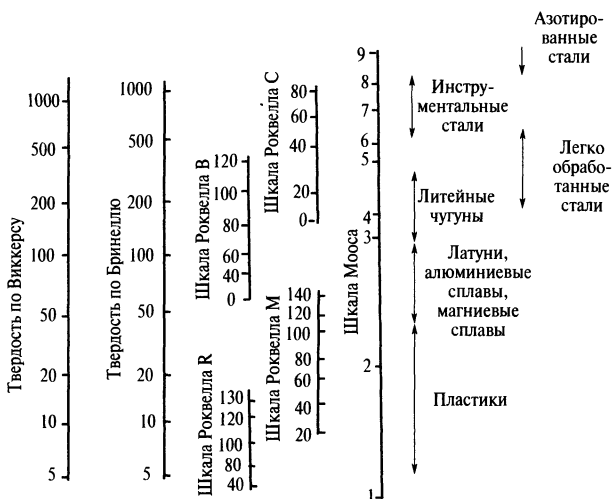


Рис. 2.5. Шкалы твердости и ее типичные значения

Испытание на удар

Есть два основных вида испытаний на удар: Изода и Шарпи (см. Испытания Изода и Шарпи, Гл. 1). Оба испытания включают похожие типы измерений, но различные по форме образцы. Оба имеют маятник, движущийся вниз от определенной высоты до удара по образцу (Рис. 2.6). Высота, до которой маятник поднимается после поражения и перелома образца, определяет измеряемую энергию, израсходованную на разрушение. Если энергия не использована, то маятник откатнется на ту же самую высоту, которая была у него до старта. Чем больше энергии затрачено на перелом образца, тем ниже высота, до которой поднимется маятник. Американские и британские технические условия требуют применения стандартных образцов для испытания.

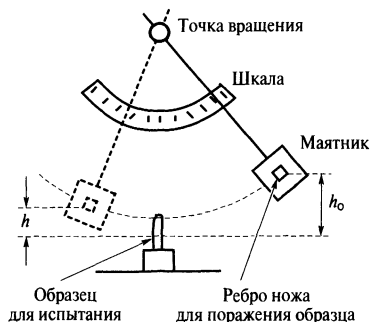


Рис. 2.6. Принцип действия испытания на удар

В испытании Изода измеряется энергия, поглощенная консолью при переломе образца для испытания (Рис. 2.7). Удар производится по лицевой стороне образца на фиксированной высоте. На этой же стороне ниже сделана зарубка. Образцы для испытания из металлов по британским стандартам имеют в сечении квадрат со стороной 10 мм или круг $\varnothing 11.4$ мм. На Рис. 2.8 детально показан образец для испытания с квадратным сечением в 10 мм. Для полимерных материалов стандартные образцы для испытания имеют квадрат со стороной 12.7 мм (Рис. 2.9) или от 6.4 до 12.7 мм в зависимости от толщины испытуемого материала. Металлические образцы для испытания маятник поражает со скоростью $3...4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, полимерные материалы — со скоростью $2.44 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

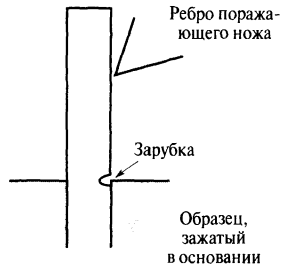


Рис. 2.7. Схема испытания образца по Изоду

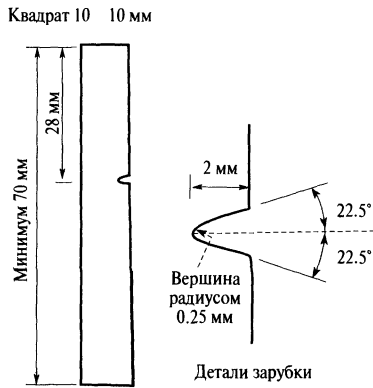


Рис. 2.8. Стандартный металлический образец для испытания по Изоду

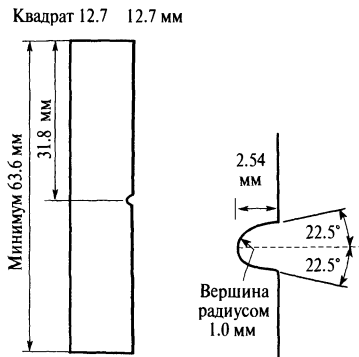


Рис. 2.9. Стандартный полимерный образец для испытания по Изоду

В испытании Шарпи измеряется энергия, поглощенная бруском при переломе образца для испытания (Рис. 2.10).

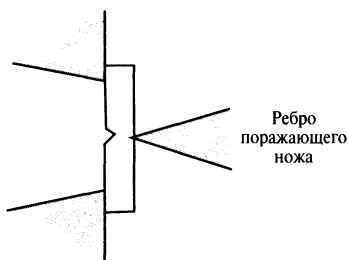


Рис. 2.10. Форма образца для испытания по Шарпи

Образец опирается на оба конца и имеет зарубку в середине. Зарубка нанесена на его лицевой стороне непосредственно напротив места, в которое попадает маятник. Британский стандарт предписывает для испытания металлов образец квадратного сечения со стороной 10 мм и длиной 55 мм. На Рис. 2.11 показаны детали такого стандартного образца и три возможные формы зарубок.

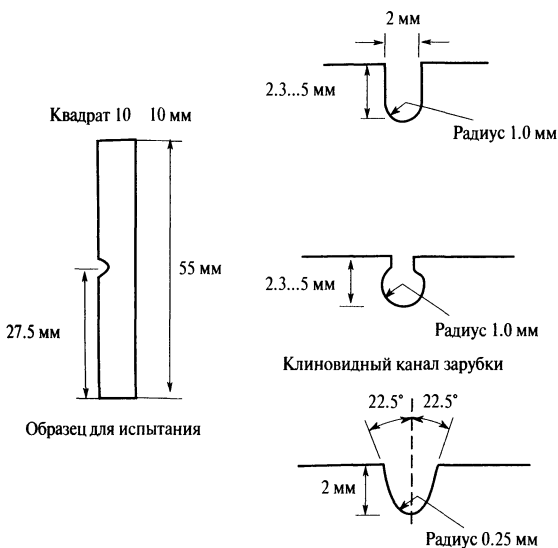


Рис. 2.11. Стандартный металлический образец для испытания по Шарпи

Нельзя сравнивать результаты, полученные с разными формами зарубок, так как для адекватного сравнения результатов испытаний на металлах должна применяться зарубка одного типа. Образцы для испытания полимерных материалов используются с зарубками и без них. В случае отлитых в форму полимерных материалов стандартный образец имеет длину 120 мм, ширину 15 мм и толщину 10 мм. С тонкостенными полимерными материалами применяются образцы другой ширины и толщины. Зарубка наносится вальцовкой желобка поперек одной поверхности. Желобок имеет ширину 2 мм и радиус меньше 0.2 мм при вершинах основания и стенках желобка. Металлические образцы для испытания маятник поражает со скоростью $3 \dots 5.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, образцы из полимерных материалов — $2.9 \dots 3.8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Результаты испытания на удар определяются не только характеристикой типа испытания, т.е. Изода или Шарпи, но и формой применяемой зарубки. В случае металлов результаты испытания выражают в количестве энергии, поглощенной образцом при переломе. Для полимерных материалов результаты испытания часто указывают в виде поглощенной энергии, деленной на площадь поперечного сечения образца позади зарубки, если она у него имеется.

Испытание на растяжение

При испытании на растяжение, когда растяжение производится силой, достаточной для вытягивания с постоянной скоростью образца стандартных размеров, удлинение образца измеряется прибором для измерения удлинения — экстензометром. Следует применять образцы стандартного вида и размеров, для того чтобы исключить какие-либо погрешности в данных, полученных при испытании, обусловленные различными конфигурациями образцов для испытания. На **Рис. 2.12** показаны формы двух образцов для испытания: круглый (**а**) и плоский (**б**), которые применяются в испытаниях на растяжение по американскому стандарту. Размеры таких стандартных образцов даны в **Табл. 2.3**. Эти формы применимы ко всем металлам, кроме отливок из литейного чугуна. Важным отличительным признаком размеров является радиус r , задаваемый для буртиков образца. Отклонения в радиусе могут влиять на данные, полученные при испытании.

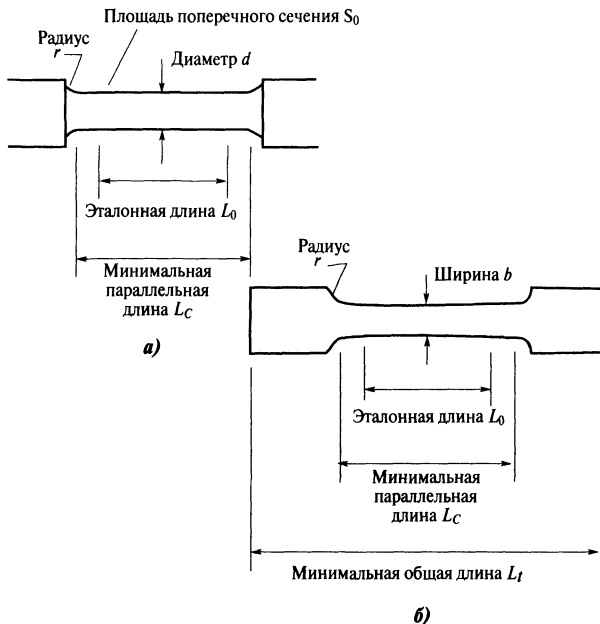


Рис. 2.12. Образцы для испытания на растяжение

Табл. 2.3. Размеры образцов для испытания на растяжение по американскому стандарту

Плоские образцы для испытания				
b [мм]	L_0 [мм]	L_c [мм]	L_t [мм]	r [мм]
40	200	225	450	25
12.5	50	60	200	13
6.25	25	32	100	6
Круглые образцы для испытания				
d [мм]	L_0 [мм]	L_c [мм]	r [мм]	
12.50	50	60	10	
8.75	35	45	6	
6.25	25	32	5	
4.00	16	20	4	
2.50	10	16	2	

Примечание:

Длина $L_0 = 4 d$.

По европейским стандартам пропорциональные образцы для испытания на растяжение подчиняются соотношению

$$L_0 = k\sqrt{S_0},$$

где S_0 — площадь поперечного сечения образца. Поперечное сечение может быть круглым, квадратным, прямоугольным, кольцеобразным или иной формы. Коэффициент k равен 5.65. Если площадь поперечного сечения мала, то может применяться более высокое значение $k = 11.3$. Для непропорциональных образцов при испытаниях листового материала употребляется узкая полоска или плоская толщиной от 0.1 до 0.3 мм:

Табл. 2.4. Размеры образцов для испытания по европейскому стандарту

Тип образца для испытания	Ширина b [мм]	L_0 [мм]	L_c [мм]	L_t [мм]
1	12.5±0.150	75	87.5	—
2	20±1	80	120	140

При испытаниях тонколистового и полосового проката с толщиной, равной 3 мм или более, используются следующие соотношения:

для образцов круглого сечения

$$L_c \geq L_0 = d/2;$$

для образцов призматического сечения

$$L_c \geq L_0 = 1.5\sqrt{S_0};$$

для пропорциональных образцов для испытания

$$L_0 = 5.65\sqrt{S_0}.$$

Эти формулы дают для образцов круглого сечения $L_0 = 5d$. Данные для таких образцов см. в Табл. 2.5, 2.6.

Табл. 2.5. Размеры круглых образцов для испытания по европейскому стандарту

d [мм]	S_0 [мм ²]	L_0 [мм]	L_c [мм]
20±0.150	314.2	100±1.0	110
10±0.075	78.5	50±0.5	55
5±0.040	19.6	25±0.25	28

Примечание:

$$L_t > L_c = 2d.$$

Табл. 2.6. Скорость напряжения для образцов для испытания по европейскому стандарту

Модуль растяжения [ГПа]	Скорость [МПа/с]	
	минимальная	максимальная
<150	2	10
>150	6	30

Глава третья

Железные сплавы

3.1. МАТЕРИАЛЫ

Сплавы

Термин «железоуглеродистые сплавы» применяется для сплавов железа с углеродом и классифицируются по содержанию в них углерода, как показано в Табл. 3.1. Чистое железо¹ — относительно мягкий материал, и его трудно использовать в каких-либо коммерческих целях.

Табл. 3.1. Сплавы железа с углеродом

Материал	Процентное содержание углерода
Сталь	0.05...2.14
Ковкий чугун	2.4...2.9
Литейный чугун	2.2...4.3

Термин «углеродистая сталь» употребляется для таких сталей, у которых, по существу, присутствуют только железо и углерод, а термин «легированная сталь» — для сплава, в который входят другие элементы. Нержавеющие стали относятся к сплавам, имеющим высокое процентное содержание хрома, а следовательно, высокое сопротивление коррозии. Термин «инструментальная сталь» определяет углеродистые стали или сплавы, которые были закалены и подвергнуты отпуску и обладают необходимыми свойствами для применения их в качестве инструментального материала.

Далее перечислены различные типы железоуглеродистых сплавов.

Легированные стали

Термин «низколегированная сталь» используется для сплавов сталей, имеющих легирующие добавки меньше 2%, «среднелегированная сталь» содержит добавки от 2% до 10%, а «высоколегированная сталь» имеет добавки выше 10%. Во всех случаях количество углерода в сплавах меньше 1%. К сталям добавляются такие простые элементы, как алюминий, хром, кобальт,

¹ Содержит 99.9917% Fe, имеет твердость НВ 490 МПа, плотность 7.874 г·м⁻³. (Прим. ред.)

медь, свинец, марганец, молибден, никель, фосфор, кремний, сера, титан, вольфрам, ниобий, бор и ванадий.

Имеется целый ряд технологических способов, при использовании которых легирующие элементы могут влиять на свойства стали. Основные из них следующие: 1. Условие затвердевания стали. 2. Форма карбидов. 3. Форма графита. 4. Стабильность аустенита или железа. 5. Изменение критической скорости охлаждения. 6. Улучшение коррозионного сопротивления. 7. Изменение условий роста зерна. 8. Улучшение обрабатываемости на станках.

(См. Система кодирования сталей, Составы легированных сталей, Параметры ползучести, Обрабатываемость на станках, Сопротивление окислению, Механические свойства легированных сталей, Термические свойства, Применение легированных сталей.)

Углеродистые стали

Как уже отмечалось, в углеродистых сталях присутствуют только железо и углерод. Такие стали с содержанием углерода меньше 0.80% называются доэвтектоидными, с содержанием углерода между 0.80% и 2.14% — заэвтектоидными относительно эвтектоидного состава 0.8% С. Стали с содержанием углерода между 0.10% и 0.25% обозначают как мягкие, между 0.20% и 0.50% — как среднеуглеродистые, а при содержании углерода более чем 0.50% — как стали с повышенным содержанием углерода. Равновесная диаграмма состояния железо—углерод показана на **Рис. 3.1**.

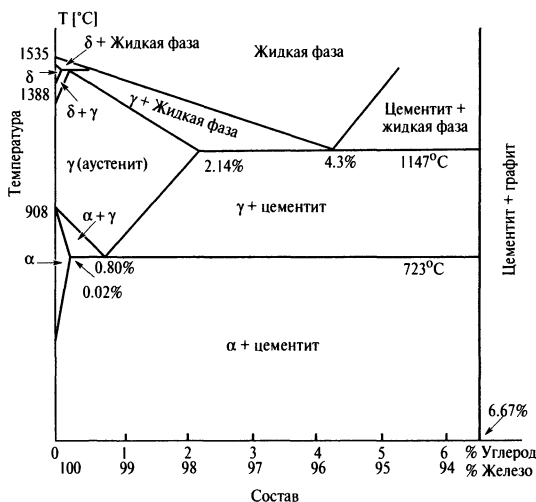


Рис. 3.1. Равновесная диаграмма состояния железо—углерод

(См. Система кодирования сталей, Составы углеродистых сталей, Параметры ползучести, Твердость, Ударные свойства, Обрабатываемость на станках, Механические свойства углеродистых сталей, Термические свойства, Применение углеродистых сталей.)

Литейные чугуны

Литейные чугуны могут быть разделены на 5 основных категорий:

1. *Серые чугуны.*

Содержат углерод (графит) в пластинчатой форме. Большинство типов серого чугуна имеют графит в перлитовой структуре.

2. *Пластичные чугуны, или чугуны с шаровидным графитом.*

Содержат графит в форме шаровидных включений, образовавшихся во время литья при добавлении к расплавам магния или церия. Материал имеет большую пластичность, чем серые чугуны.

3. *Белые чугуны*¹.

В них нет графита, содержат твердый цементит.

4. *Ковкие чугуны.*

Получаются при тепловой обработке белых чугунов. Их иногда разделяют на две категории, ферритовый и перлитовый, или рассматривают как три группы: белосердечный, черносердечный и перлитовый. Ковкие чугуны имеют лучшую тягучесть, чем серые литейные чугуны, и это, в сочетании с их высоким пределом на растяжение, способствует их широкому применению.

5. *Высоколегированные чугуны.*

Сплавы, которые содержат соответствующие добавки таких элементов, как кремний, хром, никель или алюминий. Их можно рассматривать как две категории чугунов: безграфитные белые чугуны и чугуны, содержащие графит. Безграфитные белые чугуны имеют очень высокое сопротивление истиранию. В содержащих графит чугунах он находится в форме чешуек или шаровидных включений, и к ним применимы определения теплового сопротивления серых и пластичных чугунов. Такие типы чугунов имеют весьма высокое коррозионное сопротивление и называются коррозионностойкими.

(См. Система кодирования литейных чугунов, Составы литейных чугунов, Ударные свойства, Механические свойства литейных чугунов, Тепловые свойства, Применение литейных чугунов.)

¹ Название получили за специфический белый (светлый) блеск в изломе.
(Прим ред.)

Автоматные стали

Эти стали имеют улучшенную обрабатываемость на станках (резанием) как следствие добавки серы, свинца, селена и/или кальция. Такие стали называются соответственно сернистыми, свинцовосодержащими, селеносодержащими и/или кальцийсодержащими автоматными. Фосфор может тоже улучшать обрабатываемость стали, способствуя образованию самоломающейся стружки во время механической обработки.

(См. Кодирование сталей, Составы автоматных сталей, Обрабатываемость на станках, Механические свойства автоматных сталей.)

Мартенситно-стареющие высокопрочные стали

Мартенситно-стареющие высоколегированные стали обладают значительной прочностью, которая может быть увеличена выделением вторичных фаз (преципитатов). Это сплавы железа с никелем (8...22%), иногда с кобальтом и очень малым содержанием углерода (меньше 0.03%). Для старения в мартенсите сплавы легируют титаном, молибденом, вольфрамом. Никель и кобальт уменьшают растворимость легирующих добавок в α -железе (Fe_{α}), что приводит к упрочнению при старении и повышает сопротивление хрупкому разрушению. Содержание углерода небольшое, поскольку относительно высокое содержание никеля приводит к образованию графита в структуре, что может вызвать снижение прочности и твердости стали.

Типичная тепловая обработка состоит в нагреве стали выше 830°C и охлаждении на воздухе. В результате получается безуглеродистый мартенсит. Последующая механическая обработка и деформация стали приводят к увеличению ее твердости путем выделения преципитатов при нагреве выше 500°C в течение двух или трех часов. До обработки материал имеет типичный предел прочности на растяжение около 700 МПа, или $MH \cdot m^{-2}$, и твердость 300 HV, в то время как после обработки соответственно около 1700 МПа, или $MH \cdot m^{-2}$, и 550 HV.

(См. Составы мартенситно-стареющих сталей и Механические свойства мартенситно-стареющих сталей.)

Нержавеющие стали

Есть несколько типов нержавеющей сталей: ферритные, мартенситные и аустенитные. В их состав входит хром, повышающий сопротивление коррозии.

Ферритные стали содержат хрома 12...25% и меньше 0.1% углерода. Такие стали после охлаждения жидкого состояния только изменяются к ферриту и таким образом, поскольку не образу-

ется аустенит, затвердевают при закалке и не могут дать мартенсит. Тем не менее они могут твердеть при холодной обработке.

Мартенситные стали содержат хрома 12...18% и углерода 0.1...1.2%. После охлаждения жидкого состояния они образуют аустенит и, таким образом, могут твердеть путем закалки до заданного состояния структуры мартенсита с частицами карбида хрома. Мартенситные стали подразделяются на три группы: нержавеющие чугуны, нержавеющие стали и высокохромистые стали. Нержавеющие чугуны содержат около 0.1% углерода и 12...13% хрома, нержавеющие стали — 0.25...0.30% углерода и 11...13% хрома, а высокохромистые стали — 0.05...0.15% углерода, 16...18% хрома и 2% никеля.

Аустенитные стали содержат хрома 16...26%, более 6% никеля и очень мало углерода, 0.1% или менее. Такие сплавы полностью аустенитные при всех температурах. Они могут твердеть и при закалке, и при холодной обработке.

Во время сварки у нержавеющих сталей могут происходить структурные изменения, которые снижают коррозионную стойкость материала. Этот эффект, известный как разрушение сварного соединения, является результатом выделения преципитатов хрома, богатого карбидами на границах зерен. Единственный путь к преодолению его заключается в стабилизации стали путем добавки к ней других элементов, таких как ниобий и титан, которые имеют большее сходство с углеродом, чем хром, и таким образом формируются карбиды во включениях преципитатов в хrome.

(См. Система кодирования нержавеющих сталей, Составы нержавеющих сталей, Параметры ползучести, Сопrotивление окислению, Механические свойства нержавеющих сталей, Тепловые свойства, Применение нержавеющих сталей.)

Инструментальные стали

Не имеющие примесей углеродистые стали обладают твердостью благодаря высокому содержанию в них углерода. Эти стали нуждаются в закалке в холодной воде для получения максимальной твердости. К сожалению, они немного хрупкие и им не хватает пластичности. Там, где требуется материал с умеренной пластичностью, может применяться углеродистая сталь с содержанием углерода около 0.7%. А там, где твердость является основным требованием, а ударная вязкость не важна, могут применяться углеродистые стали с содержанием углерода около 1.2%.

Сплавы инструментальных сталей делаются более твердыми и более износостойкими при добавлении к ним элементов, способствующих появлению стойких твердых карбидов. В качестве таких элементов применяются марганец, хром, молибден, вольф-

рам и ванадий. Марганцевая инструментальная сталь содержит примерно 0.7...1% углерода и 1.0...2.0% марганца. Такая сталь закалена в масле от температуры 780...800°C и затем отпущена. Марганец может быть частично заменен хромом, что только улучшает вязкость стали. Сопротивление ударной нагрузке у инструментальных сталей предназначается для улучшения вязкости при воздействии на них ударами. Для этого необходимо мелкое зерно, которое получают при добавлении ванадия. Инструментальные стали, рассчитанные на применение в процессах с деформированием в горячем состоянии, требуют сохранения своих свойств при рабочих температурах. Хром и вольфрам, если они добавлены к сталям в форме карбидов, которые имеют и стойкость, и твердость, сохраняют свойства стали до высоких температур.

Стали, используемые для обработки с высокой скоростью на станках, называются быстрорежущими инструментальными сталями. В результате обработки материал нагревается. Такие стали не должны отпусаться при высоких температурах, которые появляются во время обработки на станках. Считается, что комбинация вольфрама и хрома в виде карбидов, сформированных при этих элементах, дает требуемые свойства стали. Они будут особенно прочны при высоких температурах.

(См. Кодирование инструментальных сталей, Составы инструментальных сталей, Свойства инструментальных сталей, Применение инструментальных сталей.)

3.2. КОДЫ И СОСТАВЫ СПЛАВОВ

Системы кодирования углеродистых сталей

См. Система кодирования сталей.

Системы кодирования литейных чугунов

Коды, принятые для литейных чугунов, относятся к их механическим свойствам. Так, серые литейные чугуны, согласно британским стандартам (BS), имеют 7 марок: 150, 180, 220, 260, 300, 350 и 400. Это значения минимальных пределов прочности на растяжение в МПа, или $\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$, или $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ для контрольных образцов диаметром в 30 мм. Американское общество по испытанию материалов (ASTM) использует значения минимальных напряжений в $\text{k.s.i. (klb}\cdot\text{in}^{-2})$ [кфунт-дюйм⁻²].

Согласно британским стандартам ковкие литейные чугуны определяются буквами В, Р или А, что означает черносердечный, перлитовый или белосердечный; следующее за буквой число указывает минимальный требуемый предел прочности на растяжение в МПа, или $\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$ для размеров профилей проката меньше

15 мм, далее после косой черты число, обозначающее относительное удлинение в процентах. Так, для примера, В340/12 — черносердечный литейный чугун с минимальным пределом прочности на растяжение в 340 МПа и относительным удлинением в 12%. В американских стандартах технические условия на ковкие литейные чугуны даны двумя числами: первое — для обозначения предела текучести в 10^2 p.s.i. [фунт силы·дюйм⁻²] и второе — относительного удлинения, выраженного в процентах.

Тягучие чугуны, согласно британским стандартам, обозначаются двумя числами: первое указывает минимальный предел прочности на растяжение в МПа, или МН·м⁻², или Н·мм⁻², а второе — относительное удлинение в процентах, например 420/12. В американских стандартах тягучие чугуны определяются тремя числами: первое представляет минимальный предел прочности на растяжение в k.s.i. [кфунт·дюйм⁻²], второе — предел текучести в k.s.i. и третье — относительное удлинение в процентах, например 60—40—18.

Сплавы литейных чугунов, согласно британским стандартам, для безграфитных белых чугунов имеют номера 1, 2 или 3 для указания типа чугуна или сплава (1 — низколегированный, 2 — хромоникелевый, 3 — высокохромированный), следующая за цифрой буква показывает характеристику сплава. Для содержащих графит чугунов, аустенитных чугунов, буквой L обозначается чугун с чешуйками графита, а S — чугун с частицами сфероидального графита. Далее следуют номера и буквы, обозначающие в процентах состав основных элементов сплавов. Высококремниевый феррит и содержащие графит сплавы определяются по основным сплавляемым элементам и их содержанию в процентах, например Si10.

Системы кодирования нержавеющей сталей

Британская система стандартов кодирования этих сталей связана с системой кодирования Американского института черной металлургии (AISI). В основном первые три цифры британской системы совпадают с тремя цифрами, используемыми американской системой. В британской системе, кроме того, за этими тремя цифрами следует буква S, а также два числа в интервале от 11 до 99. Это обозначения вариантов стали, специфицированные по первым трем числам, которые находятся в интервале 300...499. (См. Составы нержавеющей сталей для прямых эквивалентов.)

Американская система кодирования сталей

В системе кодов Американского института черной металлургии—Общества инженеров автомобильного транспорта (AISI—SAE) применяется кодирование четырьмя цифрами. Первые две

цифры обозначают тип стали: с помощью первой цифры указывается группирующий основной сплавленный элемент, а вторая в некоторой степени служит указанием на приблизительное процентное содержание этого элемента. Третья и четвертая цифры показывают содержание углерода, умноженное на коэффициент 100. В Табл. 3.2 в общих чертах дана система кодов AISI—SAE.

Табл. 3.2. Система кодов Американского института черной металлургии—Общества инженеров автомобильного транспорта (AISI-SAE)

Номер серии	Тип стали	Примеры разбиения на серии
1000	Углеродистая	10XX — легированная углеродом с максимумом 1% марганца 11XX — резульфицированная 12XX — резульфицированная и рефосфорированная 15XX — не легированная углеродом, 1.00...1.65% Mn
	Марганцевые	13XX — 1.75% Mn
2000	Никелевые	23XX — 3.5% Ni 25XX — 5.0% Ni
		31XX — 1.25% Ni, 0.65 или 0.80% Cr 32XX — 1.75% Ni, 1.07% Cr 33XX — 3.50% Ni, 1.50 или 1.57% Cr 34XX — 3.00% Ni, 0.77% Cr
4000	Молибденовые	40XX — 0.20 или 0.25% Mo 44XX — 0.40 или 0.52% Mo
	Хромомолибденовые	41XX — 0.50, 0.80 или 0.95% Cr, 0.12, 0.20, 0.25 или 0.30% Mo
	Никель-хромомолибденовые	43XX — 1.82% Ni, 0.50 или 0.80% Cr, 0.25% Mo S47XX — 1.05% Ni, 0.45% Cr, 0.20 или 0.35% Mo
	Никель-молибденовые	46XX — 0.85 или 1.82% Ni, 0.20 или 0.25% Mo 48XX — 3.5% Ni, 0.25% Mo
5000	Хромистые	50XX — 0.27, 0.40, 0.50 или 0.65% Cr 51XX — 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00 или 1.05% Cr
		61XX — 0.60, 0.80 или 0.95% Cr, минимум 0.10 или 0.15% V
7000	Вольфрамохромистые	72XX — 1.75% W, 0.75% Cr
8000	Никель-хромомолибденовые	81XX — 0.30% Ni, 0.40% Cr, 0.12% Mo 86XX — 0.55% Ni, 0.50% Cr, 0.20% Mo 87XX — 0.55% Ni, 0.50% Cr, 0.25% Mo 88XX — 0.55% Ni, 0.50% Cr, 0.35% Mo
		92XX — 1.40 или 2.00% Si, 0.65, 0.82 или 0.85% Mn, 0.00 или 0.65% Cr
		93XX — 3.25% Ni, 1.20% Cr, 0.12% Mo 94XX — 0.45% Ni, 0.40% Cr, 0.12% Mo 97XX — 0.55% Ni, 0.20% Cr, 0.20% Mo 98XX — 1.00% Ni, 0.80% Cr, 0.25% Mo

Для иллюстрации применения кодов Табл. 3.2 рассмотрим сталь 1040. Первая цифра 1 указывает на серию — это углеродистая сталь. Номер 10 сообщает, что это нелегированная углеродистая сталь с содержанием марганца максимум 1.00%. Последняя пара цифр 40, следовательно, сталь содержит 0.40% углерода.

Есть также некоторые спецификации особых сталей, которые имеют модифицированные номера Общества инженеров автомобильного транспорта (SAE), включающие буквы между первой и второй парой цифр (Табл. 3.3).

Табл. 3.3. Кодирование основных сталей буквами, добавленными в код Общества инженеров автомобильного транспорта

Код	Значение букв
XXVXX	V — усиленные бором стали
XXLXX	L — свинцовые стали

В добавление к четырем цифрам Общество инженеров автомобильного транспорта дает дополнительную информацию о сталях и их сплавах при помощи буквенных приставок и окончаний (Табл. 3.4).

Табл. 3.4. Кодирование сталей и их сплавов буквенными приставками и окончаниями в кодах Общества инженеров автомобильного транспорта

Приставка/окончание	Значение приставок/окончаний
A	Сплав стали, изготовленный в кислой печи
B	Углеродистая сталь, изготовленная в печи Бессемера
C	Углеродистая сталь, изготовленная в основной мартеновской печи
D	Углеродистая сталь, изготовленная в кислой мартеновской печи
E	Изготовленная в электропечи
X	Отклонения состава от нормальных пределов
H (окончание)	Сталь будет оказывать влияние на условия прокаливаемости

Американское общество по испытанию материалов (ASTM) и Американское общество инженеров-механиков (ASME) издают также стандарты сталей с нанесенным покрытием. Многие эти марки базируются на марках AISI—SAE. (См. Система кодирования нержавеющей сталей.)

Британская система кодирования сталей

В Великобритании стандартные коды для спецификации сталей заданы Британским институтом стандартов. Ниже следуют коды для рафинированных сталей.

1. Первые три цифры кода обозначают тип стали:

От 000 до 199	Углеродистые и углеродистомарганцевые типы; номер обозначает содержание марганца в процентах, умноженное на коэффициент 100
От 200 до 240	Автоматные стали; вторая и третья цифры обозначают приблизительное содержание серы в процентах, умноженное на 100
250	Кремнемарганцевые пружинные стали
От 300 до 499	Нержавеющие и окалиностойкие клапанные стали
От 500 до 999	Легированные стали

2. Четвертым символом является буква:

A	Сталь, поставляемая по ее химическому составу, определенному химическим анализом
H	Сталь, поставляемая по стандартам, исходя из ее закаливаемости
M	Сталь, поставляемая по стандартам, исходя из ее механических свойств
S	Сталь нержавеющей

3. Пятая и шестая цифры обозначают среднее содержание углерода в стали в процентах, умноженных на 100.

Для иллюстрации системы кодов, изложенной выше, рассмотрим сталь с кодом 070M20. Первые три цифры 070 находятся между 000 и 199, и, таким образом, сталь углеродистая или углеродистомарганцевого типа. Код 070 обозначает, что сталь содержит 0.70% марганца. Четвертый символ M, и следовательно, сталь поставляется по техническим условиям исходя из ее механических свойств. Пятая и шестая цифры 20, т.е. сталь содержит 0.20% углерода.

Первые три знака обозначают принадлежность к легированным сталям, подразделяющимся, как показано в Табл. 3.5, согласно основным легирующим элементам.

Табл. 3.5. Система кодов легированных сталей по британскому стандарту

Цифры	Основные легирующие элементы
500...519	Ni
520...539	Cr
540...549	Mo
550...569	V, Ti, Al, Nb
570...579	Si—Ni, Si—Cr, Si—Mo, Si—V
580...589	Mn—Si, Mn—Ni
590...599	Mn—Cr
600...609	Mn—Mo
610...619	Mn—V
620...629	Ni—Si, Ni—Mn
630...659	Ni—Cr
660...669	Ni—Mo
670...679	Ni—V, Ni—X
680...689	Cr—Si, Cr—Mn

Табл. 3.5 (окончание)

Цифры	Основные легирующие элементы
690...699	Cr—Ni
700...729	Cr—Mo
730...739	Cr—V
740...749	Cr—X
750...759	Mo—Cr, Mo—V, Mo—X
760...769	Si—Mn—Cr
770...779	Mn—Ni—Cr
780...789	Mn—Ni—Mo
790...799	—
800...839	Ni—Cr—Mo
840...849	Ni—Cr—V, Ni—Cr—X
850...859	Ni—Mo—V, Ni—Cr—X
860...869	—
870...879	Cr—Ni—Mo
880...889	—
890...899	Cr—Mo—V
900...909	Cr—Al—Mo
910...919	—
920...929	Si—Mn—Cr—Mo
930...939	—
940...949	Mn—Ni—Cr—Mo
950...969	—
970...979	Ni—Cr—Mo—V
980...999	—

Примечание:

Элементы, данные через тире, например Mo—Cr, являются основными легирующими элементами. Элементы или группы элементов, разделенные запятой, например Mo—Cr, Mo—V, Mo—X, имеют каждый в отдельности номер в спецификационном диапазоне знаков. Символ X — это некий средний элемент, иной, чем уже указанный в паспорте.

Прокомментируем пример из Табл. 3.5: 805M20 есть сплав Ni—Cr—Mo, первые три знака попадают внутрь диапазона 800...839.

Стали, как правило, имеют механические свойства, соответствующие техническим условиям. Это обычно предел прочности на растяжение в упрочненном и отпущенном состояниях. Для определения предела прочности на растяжение (Табл. 3.6) может использоваться код, обозначающий диапазон предела прочности на растяжение, который соответствовал нагруженному состоянию стали. Буква как бы указывает это состояние.

Табл. 3.6. Коды состояний стали

Код состояния	Диапазон предела прочности на растяжение (МПа, или МН·м ⁻²)
P	550...700
Q	629...770
R	700...850
S	770...930
T	850...1000
U	930...1080
V	1000...1150
W	1080...1240
X	1150...1300
Y	12400...1400
Z	1540 минимум

(См. Система кодирования нержавеющей сталей.)

Системы кодирования инструментальных сталей

Британское кодирование инструментальных сталей базируется на той же основе, что и кодирование Американского института черной металлургии (AISI); различие состоит в том, что британские коды получаются при добавлении к американским буквы В (Табл. 3.7).

Табл. 3.7. Американская (AISI) и британская (BS) системы кодирования инструментальных сталей

AISI	BS	Материал
W	BW	Инструментальная сталь, закаленная в воде
O	BO	Инструментальная сталь, закаленная в масле, для холодной обработки
A	AB	Среднелегированная, закаленная для холодной обработки
D	BD	Высокоуглеродистая и высокохромистая сталь для холодной обработки
H	BH	Сплав на основе хрома или вольфрама для горячей обработки
M	BM	Сплав на основе молибдена, быстрорежущая сталь
T	BT	Сплав на основе вольфрама, быстрорежущая сталь
S	BS	Ударостойкая инструментальная сталь
P	BP	Стали для пресс-форм
L	BL	Низколегированная инструментальная сталь для специальных применений
F	BF	Вольфрамуглеродистые стали

Примечание:

Буквы кода инструментальной стали следуют перед номером, обозначающим маркировку состава стали.

Составы легированных сталей

В Табл. 3.8 и 3.9 даны составы обычно применяемых легированных сталей. В Табл. 3.8 даны составы в соответствии со спецификацией легированных сталей Американского института черной металлургии—Общества инженеров автомобильного транспорта и имеющиеся эквиваленты британских стандартов. В Табл. 3.9 приведены составы сталей в соответствии с британским стандартом (BS) и имеющиеся эквиваленты сталей Американского института черной металлургии (AISI).

Табл. 3.8. Составы обычно применяемых легированных сталей по спецификации Американского института черной металлургии—Общества инженеров автомобильного транспорта

AISI	BS	Среднее процентное содержание элемента					
		C	Mn	Cr	Mo	Ni	Другие
Марганцевые стали							
1330	—	0.30	1.75	—	—	—	—
1340	—	0.40	1.75	—	—	—	—
Молибденовые стали							
4037	—	0.38	0.80	—	0.25	—	—
Хромомолибденовые стали							
4130	—	0.30	0.50	0.95	0.20	—	—
4140	708/9M40	0.40	0.88	0.95	0.20	—	—
Никель-хромомолибденовые стали							
4320	—	0.20	0.55	0.50	0.25	1.83	—
4340	817M40	0.40	0.70	0.80	0.25	1.83	—
Никель-молибденовые стали							
4620	—	0.19	0.53	—	0.25	1.83	—
4820	—	0.19	0.60	—	0.25	3.50	—
Хромистые стали							
5130	530A30	0.30	0.80	0.95	—	—	—
5140	530M40	0.40	0.80	0.80	—	—	—
5160	—	0.60	0.88	0.80	—	—	—
Хромованадиевые стали							
6150	735A50	0.50	0.80	0.95	—	—	0.15V
Никель-хромомолибденовые стали							
8620	805M20	0.20	0.75	0.50	0.20	0.55	—
8630	—	0.30	0.75	0.50	0.20	0.55	—
8640	—	0.40	0.88	0.50	0.20	0.55	—
8650	—	0.50	0.88	0.50	0.20	0.55	—
8660	—	0.60	0.88	0.50	0.20	0.55	—
Кремнистые стали							
9260	250A58	0.60	0.88	—	—	—	2.0Si

Примечание:

Большинство сталей содержит от 0.15 до 0.30% Si и менее 0.035% P и 0.040% S.

Табл. 3.9. Составы легированных сталей по британскому стандарту

BS	AISI	Среднее процентное содержание элемента					
		C	Mn	Cr	Mo	Ni	Другие
Марганцевые стали							
120M19	—	0.19	1.20	—	—	—	—
120M28	—	0.28	1.20	—	—	—	—
120M36	1039	0.36	1.20	—	—	—	—
150M19	—	0.19	1.50	—	—	—	—
150M28	—	0.28	1.50	—	—	—	—
150M36	1039	0.36	1.50	—	—	—	—
Кремнемарганцевые стали							
250A53	—	0.53	0.85	—	—	—	1.9 Si
250A58	9260	0.58	0.85	—	—	—	1.9 Si
Хромистые стали							
526M60	—	0.60	0.65	0.65	—	—	—
530M40	5140	0.40	0.75	1.05	—	—	—
Марганцево-молибденовые стали							
605M36	—	0.36	1.50	—	0.27	—	—
606M36	—	0.36	1.50	—	0.27	—	P < 0.06, 0.15...0.25 S
608M38	—	0.38	1.50	—	0.50	—	—
Никель-хромистые стали							
653M31	—	0.31	0.60	1.00	—	3.00	—
Хромолибденовые стали							
708M40	4137/40	0.40	0.70	0.90	0.20	—	—
709M40	4140	0.40	0.60	0.90	0.30	<0.40	—
722M24	—	0.24	0.45	3.00	0.55	—	—
Никель-хромолибденовые стали							
817M40	4340	0.40	0.55	1.20	0.30	1.50	—
826M40	—	0.40	0.55	0.65	0.50	2.55	—
835M30	—	0.30	0.55	1.25	0.27	4.10	—
Марганцево-никель-хромолибденовые стали							
945M38	—	0.38	1.40	0.50	0.20	0.75	—

Составы углеродистых сталей

В Табл. 3.10 и 3.11 приведены составы обычно применяемых углеродистых сталей. В Табл. 3.10 даны их составы в соответствии со спецификацией Американского института черной металлургии и имеющиеся эквиваленты составов британского стандарта. В Табл. 3.11 приведены составы в соответствии с британским стандартом и имеющиеся эквиваленты Американского института черной металлургии.

Табл. 3.10. Составы обычных углеродистых сталей по спецификации Американского института черной металлургии—Общества инженеров автомобильного транспорта

AISI	BS	Процентное содержание элемента	
		С	Мn
1006	—	0.08 макс	0.25...0.40
1010	—	0.08...0.13	0.30...0.60
1015	—	0.13...0.18	0.30...0.60
1020	070M20	0.18...0.23	0.30...0.60
1025	—	0.22...0.28	0.30...0.60
1030	—	0.28...0.34	0.60...0.90
1035	080M36	0.32...0.38	0.60...0.90
1040	080A40	0.37...0.44	0.60...0.90
1045	—	0.43...0.50	0.60...0.90
1050	—	0.48...0.55	0.60...0.90
1055	—	0.50...0.60	0.60...0.90
1060	060A62	0.55...0.66	0.60...0.90
1065	—	0.60...0.70	0.60...0.90
1070	—	0.65...0.75	0.60...0.90
1075	—	0.70...0.80	0.40...0.70
1080	—	0.75...0.88	0.60...0.90
1085	—	0.80...0.93	0.70...1.00
1090	—	0.85...0.98	0.60...0.90
1095	060A96	0.90...1.03	0.30...0.50

Примечание:

Максимальное содержание фосфора 0.040% и серы 0.05%.

Табл. 3.11. Составы углеродистых сталей по британскому стандарту

BS	AISI	Среднее процентное содержание элемента	
		С	Мn
070M20	1020	0.20	0.70
070M26	—	0.26	0.70
080M30	—	0.30	0.80
080M36	1035	0.36	0.80
080M40	1043	0.40	0.80
080M46	1043	0.46	0.80
080M50	—	0.50	0.80
070M56	—	0.55	0.70

Составы литейных чугунов

В Табл. 3.12 показаны составы различных типов нелегированных чугунов с основными присадками.

Табл. 3.12. Типы нелегированных литейных чугунов с основными присадками

Литейный чугун	Процентное содержание элемента				
	C	Si	Mn	S	P
Серый	2.5...4.0	1.0...3.0	0.25...1.00	0.02...0.25	0.05...1.00
Тягучий	3.0...4.0	1.8...2.8	0.10...1.00	0.03 макс	0.10 макс
Белый	1.8...3.6	0.5...1.9	0.25...0.80	0.06...0.20	0.06...0.18
Ковкий	2.0...2.6	1.1...1.6	0.20...1.00	0.04...0.18	0.18 макс

Присадки таких элементов, как никель, хром или молибден, в нелегированный белый литейный чугун могут изменять его перлитовую структуру к мартенситу, бейниту или аустениту, что часто приводит к получению износостойкого белого чугуна. Коррозионностойкие чугуны получают при высоком процентном содержании кремния, хрома или никеля. Жаростойкие серые и тягучие литейные чугуны получают, когда добавляют кремний, хром, никель, молибден или алюминий. В **Табл. 3.13** приведен подбор составов этих литейных чугунов.

Табл. 3.13. Составы легированных литейных чугунов

Материал	Состав присадок [%]
Износостойкие белые	
BS низколегированный, 1А, 1В, 1С	C 2.4...3.4, Si 0.5...1.5, Mn 0.2...0.8, Cr < 2.0
BS хромоникелевый, 2А-Е	C 2.7...3.6, Si 0.3...2.2, Mn 0.2...0.6, Cr 1.5...10.0, Ni 3.0...6.0
BS высокохромистый, 3А-Е	C 2.4...3.2, Si < 1.0, Mn 0.5...1.5, Cr 14.0...17.0, Mo < 3.0, Ni < 1.0, Cu < 1.2
Мартенситный хромоникелевый	C 3.00...3.60, Si 0.40...0.70, Mn 0.40...0.70, Cr 1.40...3.50, Ni 4.00...4.75, P < 0.40, S < 0.15.
Высокохромистый белый	C 2.25...2.85, Si 0.25...1.00, Mn 0.50...1.25, Cr 24.0...30.0, P < 0.40, S < 0.15.
Ni-твердый, 3.5 Ni Cr	C 2.8...3.6, Ni 2.5...4.75, Cr 1.2...1.35, Si 0.4...0.7, Mn 0.2...0.7
Коррозионностойкие	
BS ферритный высококремнистый Si 10	Si 10
BS ферритный высококремнистый Si 14	Si 14
BS ферритный высококремнистый Si Cr 14 4	Si 14, Cr 4
BS ферритный высококремнистый Si 16	Si 16
Высококремнистый	C 0.40...1.1, Si 14...17, Mn < 1.5, Cr < 5.0, Mo < 1.0, Cu < 0.5, P < 0.15, S < 0.15
Высокохромистый	C 1.2...4.0, Si 0.5...3.0, Mn 0.3...1.5, Cr 12...35, Mo < 4.0, Cu < 3.0, Ni < 5.0, P < 0.15, S < 0.15
Ni-стойкий аустенитный	C < 3.0, Si 1.2...2.8, Mn 0.5...1.5, Cr 1.5...6.0, Mo < 1.0, Cu < 7.0, Ni 13.5...36, P < 0.08, S < 0.12

Табл. 3.13 (окончание)

Материал	Состав присадок [%]
Теплостойкие серые	
BS аустенитный L—Ni Mn 13 7	C < 3,0, Ni 12...14, Mn 6.0...7.0, Si 1.5...3.0
BS аустенитный L—Ni Cu Cr 15 6 2	C < 3,0, Ni 13.5...17.5, Cu 5.5...7.5, Cr 1.0...2.5, Si 2.0...2.8, Mn 1.0...1.5
BS аустенитный L—Ni Cu Cr 15 6 3	C < 3,0, Ni 13.5...17.5, Cu 5.5...7.5, Cr 2.5...3.5, Si 1.0...2.8, Mn 1.0...1.5
BS аустенитный L—Ni Cr 20 2	C < 3,0, Ni 18...22, Cr 1.0...2.5, Si 1.0...2.8, Mn 1.0...1.5
BS аустенитный L—Ni Cr 20 3	C < 3,0, Ni 18...22, Cr 2.5...3.5, Si 1.0...2.8, Mn 1.0...1.5
BS аустенитный L—Ni Si Cr 30 5 5	Ni 30, Si 5, Cr 5
BS аустенитный L—Ni 35	C < 2,4, Ni 34...36, Si 1.0...2.0, Mn 0.4...0.8
Среднекремнистый	C 1.6...2.5, Mn 0.4...0.8, Si 4.0...7.0, P < 0.30, S < 0.10
Высокохромистый	C 1.8...3.0, Mn 0.3...1.5, Si 0.5...2.5, Ni < 5.0, Cr 15...35, P < 0.15, S < 0.15
Хромоникелевый	C 1.8...3.0, Mn 0.4...1.5, Si 1.0...2.75, Ni 13.5...36, Cr 1.8...6.0, Mo < 1.0, Cu < 7.0, P < 0.15, S < 0.15
Хромоникель-кремнистый	C 1.8...2.6, Mn 0.4...1.0, Si 5.0...6.0, Ni 13...43, Cr 1.8...5.5, Mo < 1.0, Cu < 10.0, P < 0.10, S < 0.10
Высокоалюминиевый	C 1.3...2.0, Mn 0.4...1.0, Si 1.3...6.0, Al 20...25, P < 0.15, S < 0.15
Теплостойкие тягучие	
BS аустенитный S—Ni Mn 13 7	C < 3,0, Ni 12...14, Mn 6...7, Si 2...3
BS аустенитный S—Ni Cr 20 2	C < 3,0, Ni 18...22, Cr 1.0...2.5, Si 1.0...2.8, Mn 0.7...1.5, P < 0.08
BS аустенитный S—Ni Cr 20 3	C < 3,0, Ni 18...22, Cr 2.5...3.5, Si 1.0...2.8, Mn 0.7...1.5, P < 0.08
BS аустенитный S—Ni Si Cr 20 5 2	C < 3,0, Ni 18...22, Si 4.5...5.5, Cr 1.0...2.5, Mn 1.0...1.5, P < 0.08
BS аустенитный S—Ni 22	C < 3,0, Ni 21...24, Si 1.0...2.8, Mn 1.8...2.4, P < 0.08
BS аустенитный S—Ni Mn 23 4	C < 2,6, Ni 22...24, Mn 4.0...4.4, Si 1.9...2.6
BS аустенитный S—Ni Cr 30 1	Ni 30, Cr 1
BS аустенитный S—Ni Cr 30 3	C < 2,6, Ni 28...32, Cr 2.5...3.5, Si 1.5...2.8, Mn < 0,5, P < 0.08
BS аустенитный S—Ni Si Cr 30 5 5	Ni 30, Si 5, Cr 5
BS аустенитный S—Ni 35	C < 2,4, Ni 34...36, Si 1.5...2.8, Mn < 0,5
BS аустенитный S—Ni Cr 35 3	C < 2,4, Ni 34...36, Cr 2...3, Si 1.5...2.8, Mn < 0,5
Среднекремнистый	C 2.8...3.8, Mn 0.2...0.6, Si 2.5...6.0, Ni < 1,5, P < 0,08, S < 0.12
Хромоникелевый	C < 3,0, Mn 0.7...2.4, Ni 18...36, Si 1.75...5.5, Cr 1.75...3.5, Mo < 1,0, P < 0,08, S < 0.12

Примечание:

Указано общее содержание углерода, а не только свободного.

Составы автоматных сталей

Автоматные стали часто относят к рессульфированным сталям, так как сера является основным элементом присадки, придающей стали высокие режущие свойства. В Табл. 3.14 и 3.15 даны составы обычно применяемых автоматных сталей.

Табл. 3.14. Составы автоматных сталей по классификации Американского института черной металлургии

AISI	Процентное содержание элемента		
	C	Mn	S
1110	0.08...0.13	0.30...0.60	0.08...0.13
1117	0.14...0.20	1.00...1.30	0.08...0.13
1118	0.14...0.20	1.30...1.60	0.08...0.13
1137	0.32...0.43	1.35...1.65	0.13...0.20
1140	0.37...0.44	0.70...1.00	0.08...0.13
1141	0.37...0.45	1.35...1.65	0.08...0.13
1144	0.40...0.48	1.35...1.65	0.24...0.33
1146	0.42...0.49	0.70...1.00	0.08...0.13
1151	0.48...0.55	0.70...1.00	0.08...0.13

Табл. 3.15. Составы автоматных сталей по британскому стандарту

BS	Процентное содержание элемента		
	C	Mn	S
210M15	0.12...0.18	0.90...1.30	0.10...0.18
212M36	0.32...0.40	1.00...1.40	0.12...0.20
214M15	0.12...0.18	1.20...1.60	0.10...0.18
216M36	0.32...0.40	1.30...1.70	0.12...0.20
216M44	0.40...0.48	1.20...1.50	0.12...0.20
220M07	0.15	0.90...1.30	0.20...0.30
226M44	0.40...0.48	1.30...1.70	0.22...0.30
230M07	0.15	0.90...1.30	0.20...0.30

Составы мартенситно-старееющих сталей

В Табл. 3.16 показаны составы типичных мартенситно-старееющих сталей. (См. Мартенситно-старееющие стали.)

Табл. 3.16. Составы мартенситно-старееющих сталей

AISI	Процентное содержание элемента					
	Ni	Co	Mo	Al	Ti	C (макс)
200	18	8	3.2	0.1	0.2	0.03
250	18	8	5.0	0.1	0.4	0.03
300	18	9	5.0	0.1	0.6	0.03
350	18	12	4.0	0.1	1.8	0.01

Составы нержавеющей сталей

В Табл. 3.17 и 3.18 даны составы типичных нержавеющей и высокопрочных сталей. Нержавеющие стали обладают высоким сопротивлением коррозии благодаря наличию в составе высокого содержания хрома (минимум 12%). Эти стали разделяются на три основные категории согласно их микроструктуре: аустенит, феррит и мартенсит. В Табл. 3.17 даны составы нержавеющей сталей в обозначениях кодов Американского института черной металлургии и имеющиеся эквиваленты кодов по британскому стандарту. В Табл. 3.18 даны коды сталей по британскому стандарту и эквивалентные коды Американского института черной металлургии.

Табл. 3.17. Составы нержавеющей сталей по классификации Американского института черной металлургии

AISI	BS	Процентное содержание элемента				
		C	Cr	Ni	Mn	Другие
Аустенит						
201	—	0.15	17	4.5	6.0	—
301	—	0.15	17	7	2.0	—
302	302S31	0.15	18	9	2.0	—
304	304S15	0.08	19	9.5	2.0	—
	304S16, S18, S25, S40					
309	—	0.20	23	13.5	2.0	—
316	316S16	0.08	17	12	2.0	—
	316S18, S25, S26, S30, S33, S40, S41					
321	321S12	0.08	18	10.5	2.0	—
	321S18, S22, S27, S31, S40, S49, S50, S59, S87					5 Ti, %C
Феррит						
405	405S17	0.08	13	—	1.0	0.20 Al
409	—	0.08	11	—	1.0	6 Ti, %C
430	430S15	0.12	17	—	1.0	—
442	—	0.20	20.5	—	1.0	—
446	—	0.20	25.0	—	1.5	—
Мартенсит						
403	420S29	0.15	12.2	—	1.0	—
410	410S21	0.15	12.5	—	1.0	—
	410S27					
420	420S37	> 0.15	12	—	1.0	—
431	431S29	0.20	16	1.8	1.0	—
440C	—	1.07	17	—	1.0	—

Примечание:

Широко распространен также предельный состав: 0.030% S, 0.040% P и 1.00% Si.

Табл. 3.18. Составы нержавеющей стали по британскому стандарту

BS	AISI	Процентное содержание элемента				
		C	Cr	Ni	Mn	Другие
Аустенит						
302S31	302	0.12	18	9	2.0	—
303S31	303	0.12	18	9	2.0	—
304S31	304	0.07	18	9.5	2.0	—
310S31	—	0.15	25	20.5	2.0	—
316S33	316	0.07	17	12.5	2.0	2.8 Mo
321S31	321	0.08	18	10.5	2.0	5 C, Ti
Феррит						
403S17	—	0.08	13	0.5	1.0	—
430S17	430	0.08	17	0.5	1.0	—
Мартенсит						
410S21	410	0.12	12.5	1.0	1.0	—
416S21	416	0.12	12.5	1.0	1.5	—
420S29	403	0.17	12.5	1.0	1.0	—
420S37	420	0.24	13	1.0	1.0	—
431S29	431	0.16	16.5	2.5	1.0	—

Примечание:

В основном стали содержат около 0.05% P, 0.03% S и 1.0% Si.

Составы инструментальных сталей

В Табл. 3.19 даны составы обычно применяемых инструментальных сталей. В присадках к сталям используются спеченные карбиды (см. Гл. 10), керамики (см. Гл. 10) и кобальтохромовольфрамомолибденовые сплавы. Обозначение кодов Американского института черной металлургии то же, к кодам британского стандарта прибавляется буква В.

Табл. 3.19. Составы инструментальных сплавов

AISI	Процентное содержание элемента					
	C	W	Mo	Cr	V	Другие
Закаленные в воде						
W1	0.6...1.4	—	—	—	—	—
W2	0.6...1.4	—	—	—	0.25	—
W5	1.10	—	—	0.50	—	—
Стойкие к удару						
S1	0.50	2.50	—	1.50	—	—
S2	0.50	—	0.50	—	—	1.00 Si
S5	0.55	—	0.40	—	—	0.80 Mn, 2.0 Si
S7	0.50	—	1.40	3.25	—	—
Закаленные в масле						
O1	0.90	0.50	—	0.50	—	1.00 Mn
O2	0.90	—	—	—	—	1.60 Mn
O6	1.45	—	0.25	—	—	0.80 Mn, 1.00 Si
O7	1.20	—	—	1.75	0.75	—

Табл. 3.19 (продолжение)

AISI	Процентное содержание элемента					
	C	W	Mo	Cr	V	Другие
Закаленные на воздухе						
A2	1.00	—	1.00	5.00	—	—
A3	1.25	—	1.00	5.00	1.00	—
A4	1.00	—	1.00	1.00	—	2.00 Mn
A6	0.70	—	1.25	1.00	—	2.00 Mn
A7	2.25	1.00	1.00	5.25	4.75	W оптимально
A8	0.55	1.25	1.25	5.00	—	—
A9	0.50	—	1.40	5.00	1.00	1.50 Ni
A10	1.35	—	1.50	—	—	1.80 Mn, 1.25 Si, 1.80 Ni
Высокоуглеродистые высокохромистые стали						
D2	1.50	—	1.00	12.00	1.00	—
D3	2.25	—	—	12.00	—	—
D4	2.25	—	1.00	12.00	—	—
D5	1.50	—	1.00	12.00	—	3.00 Co
D7	2.35	—	1.00	12.00	4.00	—
Стали для работы при высоких температурах (хромистые)						
H10	0.40	—	2.50	3.25	0.40	—
H11	0.35	—	1.50	5.00	0.40	—
H12	0.35	1.50	1.50	5.00	0.40	—
H13	0.35	—	1.50	5.00	1.00	—
H14	0.40	5.00	—	5.00	—	—
H19	0.40	4.25	—	4.25	2.00	4.25 Co
Стали для работы при высоких температурах (вольфрамовые)						
H21	0.35	9.00	—	3.50	—	—
H22	0.35	11.00	—	2.00	—	—
H23	0.30	12.00	—	12.00	—	—
H24	0.45	15.00	—	3.00	—	—
H25	0.25	15.00	—	4.00	—	—
H26	0.50	18.00	—	4.00	1.00	—
Стали для работы при высоких температурах (молибденовые)						
H42	0.60	6.00	5.00	4.00	2.00	—
Быстрорежущие вольфрамовые стали						
T1	0.75	18.00	—	4.00	1.00	—
T2	0.80	18.00	—	4.00	2.00	—
T4	0.75	18.00	—	4.00	1.00	5.00 Co
T5	0.80	18.00	—	4.00	2.00	8.00 Co
T6	0.80	20.00	—	4.50	1.50	12.00 Co
Быстрорежущие молибденовые стали						
M1	0.85	1.50	8.50	4.00	1.00	—
M2	0.85/1.00	6.00	5.00	4.00	2.00	—
M4	1.30	5.50	4.50	4.00	4.00	—
M6	0.80	4.00	5.00	4.00	1.50	12.0 Co
M7	1.00	1.75	8.75	4.00	2.00	—

Табл. 3.19 (окончание)

AISI	Процентное содержание элемента					
	C	W	Mo	Cr	V	Другие
M10	0.85/1.00	—	8.00	4.00	2.00	—
M30	0.80	2.00	8.00	4.00	1.25	5.00 Co
M33	0.90	1.50	9.50	4.00	1.15	8.00 Co
M34	0.90	2.00	8.00	4.00	2.00	8.00 Co
M36	0.80	6.00	5.00	4.00	2.00	8.00 Co
M41	1.10	6.75	3.75	4.25	2.00	5.00 Co
M42	1.10	1.50	9.50	3.75	1.15	8.00 Co
M43	1.20	2.75	8.00	3.75	1.60	8.25 Co
M44	1.15	5.25	6.25	4.25	2.00	12.00 Co
M46	1.25	2.00	8.25	4.00	3.20	8.25 Co
M47	1.10	1.50	9.50	3.75	1.25	5.00 Co

3.3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Отжиг

В Табл. 3.20 и 3.21 приведено кодирование сталей по температуре отжига, подходящее для ряда углеродистых и легированных сталей по классификации Американского института черной металлургии и британского стандарта. В Табл. 3.22 указаны температуры отжига для нержавеющей сталей. А в разделе «Механические свойства» приводятся спецификации марок сталей вместе с их свойствами.

Табл. 3.20. Кодирование сталей по температуре отжига углеродистых и легированных сталей (классификация Американского института черной металлургии)

AISI	Температура отжига [°C]	AISI	Температура отжига [°C]
Углеродистые стали		Легированные стали	
1020	855...900	1330	845...900
1025	855...900	1340	845...900
1030	845...885	4037	815...855
1035	845...885	4130	790...845
1040	790...970	4140	790...845
1045	790...870	4340	790...845
1050	790...870	5130	790...845
1060	790...845	5140	815...870
1070	790...845	5160	815...870
1080	790...845	6150	845...900
1090	790...830	8630	790...845
1095	790...830	8640	815...870
		8650	815...870
		8660	815...870
		9260	815...870

Табл. 3.21. Кодирование сталей по температуре отжига для углеродистых и легированных сталей (британский стандарт)

BS	Температура отжига [°C]
Углеродистые стали	
070M20	880...910
080M30	860...890
080M40	830...860
080M50	810...840
070M55	810...840
Легированные стали	
120M36	840...870
150M19	840...900
150M36	840...870
530M40	810...830
605M36	830...860
606M36	830...860
708M40	850...880
817M40	820...850
826M40	820...850
835M30	810...830

Табл. 3.22. Кодирование нержавеющей сталей по температуре отжига по классификации Американского института черной металлургии

AISI	Температура отжига [°C]
Аустенит	
201, 301, 302, 304	1010...1120
309, 316	1040...1120
321	955...1065
Феррит	
405	650...815
409	870...900
431	705...790
Мартенсит	
403, 410, 420	830...885
431	Нет рекомендации
440C	845...900

Примечание:

Кодирование нержавеющей сталей для эквивалентных кодов британского стандарта см. Кодирование систем нержавеющей сталей и Составы нержавеющей сталей.

Науглероживание

См. Поверхностное упрочнение для конкретных процессов, применяемых к сплавам на основе железа.

Азотирование

См. Поверхностное упрочнение для конкретных процессов, применяемых к сплавам на основе железа.

Поверхностное упрочнение

Твердость поверхности сталей можно изменить при обработке поверхностной закалкой. В Табл. 3.23 показаны эффекты такой обработки. Некоторые стали разрабатывались изначально для науглероживания с целью получить поверхность с высоким сопротивлением износу, а сердцевину — с адекватной прочностью и ударной вязкостью для требуемой нагрузки. Такие стали называют науглероженными, или сталями с упрочненным поверхностным слоем, как, например, приведенные из британских стандартов: углеродистые стали 045M10, 080M15, 130M15, 210M15; боросодержащие стали 170H15, 173H16, 174H20, 175H23; легированные стали 523H15, 527H17, 590H17, 635H15, 637H17, 655H13, 665H17, 665H20, 665H23, 708H20, 805H29, 805H22, 808H17, 815H17, 820H17, 822H17, 832H13, 835H15. Стали по британскому стандарту, годные для проведения азотирования: 708M40, 709M40, 720M32, 722M24, 897M39, 905M39.

Табл. 3.23. Эффекты поверхностной закалки

Процесс	Температура [°C]	Науглероженный слой		Основные материалы
		Глубина [мм]	Твердость [HRC]	
Твердая цементация	810...1100	0.25...3	45...65	Малоуглеродистые и науглероженные легированные стали
Газовая цементация	810...980	0.07...3	45...65	То же
Жидкое цианирование	760...870	0.02...0.7	50...60	Малоуглеродистые и легированные стали
Азотирование	500...530	0.07...0.7	50...70	Легированные стали
Газовое цианирование	700...900	0.02...0.7	50...60	Малоуглеродистые и легированные стали
Пламенная закалка	850...1000	Свыше 0.8	55...65	Стали с 0.4...0.7% углерода
Индукционная закалка	850...1000	0.5...5	55...65	То же

Закалка с последующим отпуском

Закалка с последующим отпуском — это процесс, в котором сталь, упрочненная в результате резкого охлаждения, доводится по-

вторно до температуры A_1 ниже критической для того, чтобы прийти к модификации мартенситной структуры. После закалки предел прочности на растяжение будет максимальным, а ударная вязкость минимальна. Вообще, чем выше температура закалки с последующим отпуском, тем ниже предел прочности на растяжение и выше ударная вязкость. На Рис. 3.2 показаны типичные изменения свойств, полученные для легированной стали (0.40% углерода, 0.70% марганца, 1.8% никеля, 0.80% хрома и 0.25% молибдена).



Рис. 3.2. Влияние эффекта закалки с последующим отпуском на свойства стали

(См. данные о свойствах ряда сталей, полученные при испытании их на растяжение для определения эффектов закалки и последующего отпуска.)

3.4. СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

Параметры ползучести

Приближенные значения высокотемпературных пределов ползучести используемых сплавов на основе железа при падении

разрывного напряжения ниже примерно 50 МПа, или $\text{МН}\cdot\text{м}^{-2}$, за 100000 ч приведены в Табл. 3.24. В Табл. 3.25 показаны значения разрывных напряжений при различных температурах для некоторых типичных сталей.

Табл. 3.24. *Высокотемпературные пределы ползучести сплавов на основе железа*

Материал	Высокотемпературный предел [°C]
Литейный чугун	350
Углеродистые стали	450
Хромомолибденовые стали	550
Сталь с 18% хрома и 10% никеля	600
Сталь с 25% хрома и 20% никеля	750

Табл. 3.25. *Разрывные напряжения для сталей*

Состав (% основного элемента)	Время обработки [ч]	Разрывное напряжение [МПа, или $\text{МН}\cdot\text{м}^{-2}$] после тепловой обработки				
		400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
0.2 С, 0.75 Мп (нормализована 920°C, отпущена 600°C)	1000	295	118	—	—	—
	10000	225	59	—	—	—
	100000	147	30	—	—	—
0.17 С, 1.3 Мп (нормализована 920°C, отпущена 600°C)	1000	310	118	—	—	—
	10000	235	67	—	—	—
	100000	167	30	—	—	—
5 Сг, 0.5 Мо (отожжена)	1000	230	130	—	—	—
	10000	200	100	—	—	—
	100000	170	75	—	—	—
9 Сг, 1 Мо (нормализована 990°C, отпущена 750°C)	1000	275	200	100	—	—
	10000	260	170	75	—	—
	100000	240	130	54	—	—
18 Сг, 8 Ni (охлаждена воздухом, 1050°C)	1000	354	262	146	54	—
	10000	336	231	100	31	—
	100000	323	200	70	20	—
18 Сг, 12 Ni, 2 Мо (нормализована 1050°C, охлаждена воздухом)	1000	477	385	230	108	35
	10000	462	338	185	70	22
	100000	430	293	139	46	11
25 Сг, 20 Ni (1000/1150°C, охлаждена воздухом, закалена)	1000	—	—	175	88	39
	10000	—	—	135	58	20
	100000	—	—	42	17	6

Удельное электрическое сопротивление

В Табл. 3.26 приведены удельные электрические сопротивления, которые имеют различные типичные сорта железных сплавов при 20°C.

Табл. 3.26. Удельные электрические сопротивления железных сплавов

Материал	Удельное сопротивление [мкОм·м]
Малоуглеродистая сталь	0.16
Среднеуглеродистая сталь	0.17
Марганцевая сталь	0.23
Автоматная сталь	0.17
Никель-марганцевая сталь	0.23...0.39
Хромистая сталь	0.22
Хромомолибденовая сталь	0.22
Никель-хромомолибденовая сталь	0.25...0.27
Нержавеющая, аустенит	0.69...0.78
Нержавеющая, феррит	0.60
Нержавеющая, мартенсит	0.55...0.70

Примечание:

Удельные сопротивления уменьшались при тепловой обработке, которой подвергались металлы.

Усталость

Предел усталости для большинства материалов на основе железа составляет приблизительно 0.4...0.6 предела прочности на растяжение. На практике, однако, эти значения во многом зависят от условий на поверхности, связанных с составом.

Твердость

Значения твердости сталей см. в таблицах в разделах этой главы Механические свойства материалов или, в случае инструментальных сталей, Свойства инструментальных сталей.

Ударные свойства

См. в разделе Механические свойства таблицы значений энергии ударов для различных сталей при температуре порядка 20°C. Однако большинство сталей становятся хрупкими при низких температурах, и это заметно в уменьшении энергии удара, разрушающего материал. Для некоторых сталей переход тягучесть—хрупкость происходит при температуре около 0°C, для других она может быть ниже, до -60 или -80°C.

Обрабатываемость на станках

На обрабатываемость стали на станках влияет ее состав, микроструктура и твердость. Обрабатываемость сплава улучшается при добавлении к нему серы и/или свинца, в то же время такие элементы, как алюминий и кремний, могут ухудшать ее. Свинцовосодержащие и ресульфированные стали известны как автоматные стали из-за их хорошей обрабатываемости. Добавка серы и/или свинца к сплаву дает некоторое незначительное ухудшение его механических свойств, и сварку производить, вообще говоря, не рекомендуется. На обрабатываемость влияет также микроструктура. Например, ферритные стали имеют обрабатываемость лучше, чем мартенситные.

Показатель обрабатываемости дается по определению легкости, с какой материал обрабатывается на станках. В системе Американского института черной металлургии показателем обрабатываемости в 100% (эталоном) взята сталь 1212, а показатели всех других сталей определены по отношению к ней. В системе британских стандартов эталонную роль выполняет сталь 070M20. Сталь 1212 — рефосфорированная, а 070M20 — углеродистая. В Табл. 3.27 и 3.28 даны типичные значения показателя обрабатываемости для различных материалов на основе железа.

Табл. 3.27. Показатели обрабатываемости сталей по классификации Американского института черной металлургии

AISI	Показатель обрабатываемости [%]
Углеродистые стали	
1010	55
1015	60
1020	65
1030	70
1040	60
1050	45
Ресульфированные и рефосфорированные стали	
1211	94
1212	100
1213	136
Легированные стали	
1340	50
4130	70
4320	60
5140	65
6150	55
8640	65
8660	55

Табл. 3.28. Показатели обрабатываемости сталей по британскому стандарту

BS	Показатель обрабатываемости [%]
Углеродистые стали	
070M20	100
080M30	70
080M40	70
080M50	50
070M55	50
Легированные стали	
120M36	65
150M19	70
150M36	65
530M40	40
605M36	50
708M40	40
722M24	35
817M40	35
Автоматные стали	
210M15	200
212M36	70
214M15	140
220M07	200

Механические свойства легированных сталей

В Табл. 3.29 и 3.30 приведены параметры прочности на растяжение типичных легированных сталей. Данные Табл. 3.29 соответствуют классификации сталей Америки, а Табл. 3.30 — британским стандартам. Составы этих сталей приведены в этой главе, в разделе Составы легированных сталей. Туда же включены, вместе с параметрами на растяжение и твердостью сталей, и энергии ударов, разрушающих материал. Модули растяжения для всех сталей находятся в пределах 200...207 ГПа, или ГН·м⁻².

Табл. 3.29. Механические свойства легированных сталей по классификации Американского института черной металлургии

AISI	Условия	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
Марганцевые стали						
1330	Q,T 200°C	1600	1450	9	460	—
	Q,T 650°C	730	570	23	216	—
1340	Q,T 200°C	1800	1600	11	500	—
	Q,T 650°C	800	620	22	250	—
	N 870°C	840	560	22	250	90
	A 800°C	700	440	26	200	70

Табл. 3.29 (продолжение)

AISI	Условия	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
Молибденовые стали						
4037	Q,T 200°C	1030	760	6	310	—
	Q,T 650°C	700	420	29	220	—
Хромомолибденовые стали						
4130	Q,T 200°C	1630	1460	10	470	—
	Q,T 650°C	810	700	22	245	—
	N 870°C	670	440	26	200	85
	A 860°C	560	360	28	155	60
4140	Q,T 200°C	1770	1640	8	510	—
	Q,T 650°C	760	650	22	230	—
	N 870°C	1020	660	18	300	23
	A 815°C	660	420	26	200	54
Никель-хромомолибденовые стали						
4320	N 895°C	790	460	21	235	73
	A 850°C	580	610	29	160	110
4340	Q,T 200°C	1880	1680	10	520	28
	Q,T 650°C	970	860	19	280	50
	N 870°C	1280	860	12	360	8
	A 810°C	745	470	22	220	50
Никель-молибденовые стали						
4620	N 900°C	575	365	29	175	130
	A 855°C	510	370	31	150	94
4820	N 860°C	750	485	24	230	110
	A 815°C	680	465	22	200	93
Хромистые стали						
5130	Q,T 200°C	1610	1520	10	475	—
	Q,T 650°C	795	690	20	245	—
5140	Q,T 200°C	1790	1640	9	490	—
	Q,T 650°C	760	660	25	235	—
	N 870°C	790	470	23	230	38
	A 830°C	570	290	29	170	40
5160	Q,T 200°C	2200	1790	4	630	—
	Q,T 650°C	900	800	20	270	—
	N 855°C	960	530	18	270	11
	A 812°C	720	275	17	200	10
Хромованадиевые стали						
6150	Q,T 200°C	1930	1690	8	540	—
	Q,T 650°C	945	840	17	280	—
	N 870°C	940	615	22	270	36
	A 815°C	670	410	23	200	27

Табл. 3.29 (окончание)

AISI	Условия	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
Никель-хромомolibденовые стали						
8620	N 915°C	630	360	26	185	100
	A 870°C	535	385	31	150	110
8630	Q,T 200°C	1640	1500	9	465	—
	Q,T 650°C	770	690	23	240	73
	N 870°C	650	430	24	190	95
	A 840°C	560	370	29	155	95
8640	Q,T 200°C	1860	1670	10	505	—
	Q,T 650°C	900	800	20	280	90
8650	Q,T 200°C	1940	1680	10	525	—
	Q,T 650°C	970	830	20	280	—
	N 870°C	1020	690	14	300	13
	A 800°C	720	390	23	210	30
8660	Q,T 425°C	1630	1550	13	460	22
	Q,T 650°C	965	830	20	280	81
Кремнистые стали						
9260	Q,T 425°C	1780	1500	8	470	—
	Q,T 650°C	980	815	20	295	—

Примечание:

Q — закаленная, T — отпущенная, N — нормально цементованная,
A — отожженная.

Табл. 3.30. Механические свойства легированных сталей по британскому стандарту

BS	Условия	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
Марганцевые стали						
120M19	Q,T	550...700	355	18	150...210	40
	N	460	265	19	140...190	34
120M28	Q,T	620...770	415	16	180...230	40
	N	530	330	16	150...210	34
120M36	Q,T	620...770	415	18	180...230	40
	N	570	340	16	170...220	—
150M19	Q,T	550...700	340	18	150...210	54
	N	510	295	17	150...210	40
150M28	Q,T	620...770	400	16	180...230	47
	N	560	325	16	170...220	34
150M36	Q,T	620...770	400	18	180...230	47
	N	600	355	15	180...230	—

Табл. 3.30 (окончание)

BS	Условия	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
Хромистые стали						
526M60	Q,T	850...1000	620	11	250...300	—
530M40	Q,T	700...850	525	17	200...260	54
Марганцеволибденовые стали						
605M36	Q,T	700...900	585	15	200...255	40
606M36	Q,T	700...850	525	15	200...255	40
608M38	Q,T	770...930	555	13	220...280	34
Никель-хромистые стали						
653M31	Q,T	770...930	585	15	220...280	20
Хромолибденовые стали						
708M40	Q,T	700...850	525	17	200...260	54
709M40	Q,T	770...930	555	13	220...280	27
722M24	Q,T	850...1000	650	13	250...300	27
Никель-хромолибденовые стали						
817M40	Q,T	850...1000	650	13	250...300	40
826M40	Q,T	930...1250	740	12	270...330	34
835M30	Q,T	1540	1235	7	440	20
Марганцево-никель-хромолибденовые стали						
945M38	Q,T	700...850	495	15	200...260	34

Примечание:

Все свойства указаны для круглого сечения порядка 260 мм и более.

Q — закаленная, T — отпущенная, N — нормально цементованная.

Механические свойства углеродистых сталей

В Табл. 3.31 и 3.32 приведены механические свойства углеродистых сталей. Модули растяжения у этих сталей равны примерно 200...207 ГПа, или ГН·м⁻². На Рис. 3.3 показано, как зависит механические свойства сплава от процентного содержания углерода в нем и, следовательно, от его микроструктуры.

Табл. 3.31. Механические свойства углеродистых сталей по классификации Американского института черной металлургии

AISI	Условия получения	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
1015	Прокат	420	315	39	125	110
	N 925°C	420	325	37	120	115
	A 870°C	385	285	37	110	115

Табл. 3.31 (окончание)

AISI	Условия получения	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
1020	Прокат	450	330	36	145	85
	N 925°C	440	345	36	130	115
	A 870°C	395	295	37	110	120
1030	Прокат	550	345	32	180	75
	N 925°C	520	345	32	150	95
	A 840°C	465	340	31	125	70
	WQ, T 200°C	850	650	17	495	—
	WQ, T 650°C	585	440	32	210	—
1040	Прокат	620	415	25	200	50
	N 900°C	590	375	28	170	65
	A 790°C	520	355	30	150	45
	WQ, T 200°C	900	660	16	515	—
	WQ, T 650°C	670	495	28	200	—
1050	Прокат	725	415	20	230	30
	N 900°C	750	430	20	220	25
	A 790°C	635	365	24	185	16
	WQ, T 200°C	1120	810	9	515	—
	WQ, T 650°C	720	540	28	235	—
1060	Прокат	815	480	17	240	18
	N 900°C	775	420	18	230	13
	A 790°C	625	370	23	180	11
	Q, T 200°C	1100	780	13	320	—
	Q, T 650°C	800	525	23	230	—
1080	Прокат	965	585	12	290	7
	N 900°C	1010	525	11	290	7
	A 790°C	615	375	25	175	6
	Q, T 200°C	1310	980	12	390	—
	Q, T 650°C	890	600	21	255	—
1095	Прокат	965	570	9	295	4
	N 900°C	1015	500	10	295	5
	A 790°C	655	380	13	190	3
	Q, T 200°C	1290	830	10	400	—
	Q, T 650°C	895	550	21	270	—

Примечание:

WQ — закаленная в воде, Q — закаленная, N — нормально цементованная, A — отожженная, T — отпущенная.

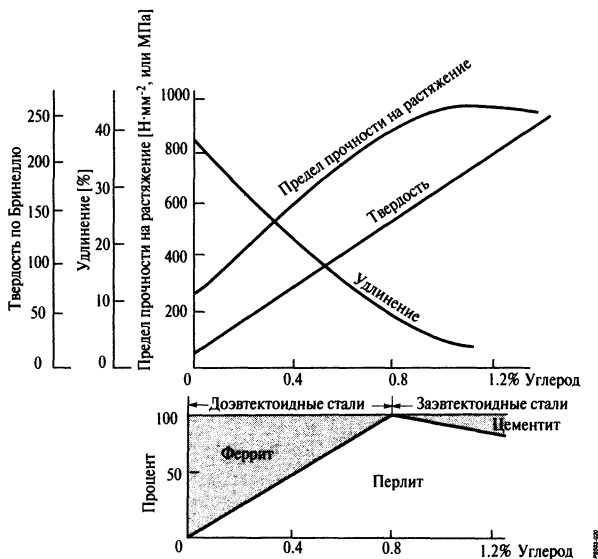


Рис. 3.3. Влияние содержания углерода на свойства углеродистых сталей

Табл. 3.32. Механические свойства углеродистых сталей по британскому стандарту

BS	Условия получения	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
070M20	N 880...910°C	400	200	21	125...180	—
	Q, T	550...700	355	20	150...210	40
070M26	N 870...900°C	430	215	20	140...190	—
	Q, T	550...700	355	20	150...210	40
080M30	N 860...890°C	460	230	19	140...190	—
	Q, T 550...660°C	550...700	340	18	150...210	40
080M36	N 840...870°C	490	245	18	140...190	—
	Q, T 550...660°C	620...780	400	16	180...230	25
080M46	N 810...840°C	550	280	15	150...210	—
	Q, T 550...660°C	625...775	370	16	180...230	—
080M50	N 810...840°C	570	280	14	180...230	—
	Q, T 550...660°C	700...850	430	14	200...255	—
070M55	N 810...840°C	600	310	13	200...250	—
	Q, T 550...660°C	700...850	415	14	200...255	—

Примечание:

Все данные указаны для большого круглого сечения проката. N — нормально цементованная, Q — закаленная, T — отпущенная.

Механические свойства литейных чугунов

В Табл. 3.33 приведены общие свойства чугунов, а в Табл. 3.34 даны значения механических свойств особых литейных чугунов. Напряжение пластического течения белого и серого чугунов есть, в сущности, то же самое, что и предел прочности на растяжение. Для тягучих и ковких чугунов напряжение пластического течения составляет около трех четвертей предела прочности на растяжение.

Табл. 3.33. Механические свойства литейных чугунов

Чугун	Условия получения	Модуль растяжения [ГПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Ударные свойства [Дж]
Белый	Литье	170	275	0	500	4*
Серый	Литье	100...145	150...400	0.2...0.7	130...300	8...50 ⁺
Черносердечный	Отожжен	170	290...340	6...12	125...140	13...17**
Белосердечный	Отожжен	170	270...410	3...10	120...180	2...5**
Перлитный ковкий	Нормализован	170	440...570	3...7	140...240	2...10**
Тягучий ферритный	Литье	165	370...500	7...17	115...215	5...15**
Тягучий перлитный	Литье	165	600...800	2...3	215...305	2...5**
Стойкий к истиранию	Литье или обработан теплом	180...200	230...460	—	400...650	6...12 ⁺
Стойкий к коррозии	Литье или отожжен	124	90...150	—	450...520	5...8 ⁺
Жаростойкий серый сплав	То же	70...110	140...240	1...3	110...740	40...80 ⁺
Жаростойкий тягучий сплав	То же	90...140	370...490	7...40	130...250	4...30 ⁺⁺

Примечание:

Для ударной вязкости, * — испытание Шарпи, образец не надрезан,
 ** — испытание Шарпи, образец с надрезом, + — испытание Изода, образец не надрезан, ++ — испытание Изода, образец с надрезом.

Табл. 3.34. Механические свойства особых литейных чугунов

Материал, марка	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на сжатие [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ
Серые чугуны					
BS 150	150	98	600	0.6	136...167
BS 180	180	117	670	0.5	150...183
BS 220	220	143	770	0.5	167...204
BS 260	260	170	860	0.4	185...226
BS 300	300	195	960	0.3	202...247
BS 350	350	228	1080	0.3	227...278

Табл. 3.34 (продолжение)

Материал, марка	Предел проч- ности на рас- тяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на сжатие [МПа]	Удлине- ние [%]	Твер- дость НВ
BS 400	400	260	1200	0.2	251...307
ASTM 20	152	—	572	—	156
ASTM 25	179	—	669	—	174
ASTM 30	214	—	752	—	210
ASTM 35	252	—	855	—	212
ASTM 40	293	—	965	—	235
ASTM 50	362	—	1130	—	262
ASTM 60	431	—	1293	—	302
Ковкие чугуны					
Черносердечный В30-06	300	—	—	6	<150
Черносердечный В32-10	320	190	—	10	<150
Черносердечный В35-12	350	200	—	12	<150
Ферритный ASTM 32510	345	224	—	10	<156
Ферритный ASTM 35018	365	241	—	18	<156
Белосердечный W35-04	350	—	—	4	<230
Белосердечный W38-12	380	200	—	12	<200
Белосердечный W40-05	400	220	—	5	<220
Белосердечный W45-07	450	260	—	7	<220
Перлитный P45-06	450	270	—	6	150...200
Перлитный P50-06	500	300	—	5	160...220
Перлитный P55-04	550	340	—	4	180...230
Перлитный P60-03	600	390	—	3	200...250
Перлитный P65-02	650	430	—	2	210...260
Перлитный P70-02	700	530	—	2	240...290
Перлитный ASTM 40010	414	276	—	10	149...197
Перлитный ASTM 45008	448	310	—	8	156...197
Перлитный ASTM 45006	448	310	—	6	156...207
Перлитный ASTM 50005	483	345	—	5	179...229
Перлитный ASTM 60004	552	414	—	4	197...241
Перлитный ASTM 70003	586	483	—	3	217...269
Перлитный ASTM 80002	655	552	—	2	241...285
Перлитный ASTM 90001	724	621	—	1	269...321
Тягучие чугуны					
ASTM 60-40-18	414	276	—	18	143...187
ASTM 80-60-03	552	414	—	3	>200
ASTM 65-45-12	448	310	—	12	167
ASTM 80-55-06	552	379	—	6	192
ASTM 100-70-03	689	483	—	3	—
ASTM 120-90-02	827	621	—	2	331

Табл. 3.34 (продолжение)

Материал, марка	Предел проч- ности на рас- тяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Предел проч- ности на сжа- тие [МПа]	Удлине- ние [%]	Твер- дость НВ
Абразивостойкие белые чугуны					
BS низколегированный сплав, 1А, 1В	230...460	—	—	—	400
BS никель-хромистый, 2А-Е	250...450	—	—	—	550
BS высокохромистый, 3А-Е	300...450	—	—	—	400...650
Мартенситный никель-хромистый	—	—	—	—	550...650
Высокохромистый белый	—	—	—	—	450...600
Ni-твердый, Ni 3.5%, Cr	280...510	—	—	—	—
Коррозионностойкие сплавы					
BS ферритные высококремниевый	93...154	—	—	—	450...520
Высококремниевый	90...180	—	690	—	480...520
Высокохромистый	205...830	—	690	—	250...740
Высоконикелевый серый	170...310	—	690...1100	—	120...250
Высоконикелевый тягучий	380...480	—	1240...1380	—	130...240
Жаропрочные серые сплавы					
BS аустениты					
L—Ni Mn 13 7	140...220	—	—	—	120...150
L—Ni Cu Cr 15 6 2	170...210	—	—	2	140...200
L—Ni Cu Cr 15 6 3	190...240	—	—	1...2	150...250
L—Ni Cr 20 2	170...210	—	—	2...3	120...215
L—Ni Cr 20 3	190...240	—	—	1...2	160...250
L—Ni Si Cr 20 5 3	190...280	—	—	2...3	140...250
L—Ni Cr 30 3	190...240	—	—	1...3	120...215
L—Ni Si Cr 30 5 5	170...240	—	—	—	150...210
L—Ni 35	120...180	—	—	1...3	120...140
Среднекремнистый серый	170...310	—	620...1040	—	170...250
Высокохромистый серый	210...620	—	690	—	250...500
Высоконикелевый серый	170...310	—	690...1100	—	130...250
Ni—Cr—Si серый	140...310	—	480...690	—	110...210
Высокоглиноземистый	235...620	—	—	—	180...350
Жаропрочные тягучие сплавы					
BS аустениты					
S—Ni Mn 13 7	390...460	210...260	—	15...25	130...170
S—Ni Cr 20 2	370...470	210...250	—	7...20	140...200
S—Ni Cr 20 3	390...490	210...260	—	7...15	150...255
S—Ni Si Cr 20 5 2	370...430	210...260	—	10...18	180...230

Табл. 3.34 (окончание)

Материал, марка	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на сжатие [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ
S—Ni 22	370...440	170...250	—	20...40	130...170
S—Ni Mn 23 4	440...470	210...240	—	25...45	150...180
S—Ni Cr 30 1	370...440	210...270	—	13...18	130...190
S—Ni Cr 30 3	370...470	210...260	—	7...18	140...200
S—Ni Si Cr 30 5 5	390...490	240...310	—	1...4	170...250
S—Ni 35	370...410	210...240	—	20...40	130...180
S—Ni Cr 35 3	370...440	210...290	—	7...10	140...190
Среднекремнистый тягучий	415...690	—	—	—	140...300
С высоким содержанием Ni (20) тягучий	380...415	—	1240...1380	—	140...200

Примечание:

Значения пределов текучести для серых чугунов установлены по 0.1% пробного напряжения от предела текучести; для всех других чугунов эти значения составляют 0.2%.

Механические свойства автоматных сталей

В Табл. 3.35 и 3.36 приведены механические свойства автоматных ресульфированных и рефосфорированных сталей.

Табл. 3.35. Механические свойства ресульфированных и рефосфорированных сталей по классификации Американского института черной металлургии

AISI	Условия получения	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
1117	Прокат	490	305	33	140	80
	N 900°C	470	300	34	140	85
	A 855°C	430	280	33	120	94
1118	Прокат	520	320	32	150	110
	N 925°C	480	320	34	140	103
	A 790°C	450	285	35	130	106
1137	Прокат	630	380	28	190	83
	N 900°C	670	400	23	200	64
	A 790°C	585	345	27	170	50
	WQ, T 200°C	1500	1165	5	415	—
1141	WQ, T 650°C	650	530	25	190	—
	Прокат	675	360	22	190	11
	N 900°C	710	405	23	200	53
	A 790°C	600	350	26	160	34
	Q, T 200°C	1630	1210	6	460	—
Q, T 650°C	710	590	23	220	—	

Табл. 3.35 (окончание)

AISI	Условия получения	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
1144	Прокат	700	420	21	210	53
	N 900°C	670	400	21	200	43
	Q, T 200°C	880	630	17	280	—
	Q, T 650°C	720	500	23	220	—

Примечание:

Q — закаленный в масле, WQ — закаленный в воде, T — отпущенный, N — нормально цементованный, A — отожженный.

Табл. 3.36. Механические свойства автоматных сталей по британскому стандарту

BS	Условия получения	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
212M36	Q, T 550...660°C	550...700	340	20	150...210	25
214M15	Q	590	—	13	—	35
216M36	Q, T 550...660°C	550...700	380	15	150...210	25
216M44	Q, T 550...660°C	700...850	450	15	200...255	15
220M07	N 900...930°C	360	215	22	>103	—
226M44	Q, T 550...660°C	700...850	450	16	200...255	20
230M07	N 900...930°C	360	215	22	>103	—

Примечание:

Q — закаленный в масле, T — отпущенный, N — нормально цементованный.

Механические свойства мартенситно-старееющих сталей

В Табл. 3.37 приведены механические свойства мартенситно-старееющих сталей. (См. Составы мартенситно-старееющих сталей для очищенных от примесей марок.)

Табл. 3.37. Механические свойства мартенситно-старееющих сталей по классификации Американского института черной металлургии

AISI	Предел прочности [МПа]	0.2% пробного напряжения [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ
200	1390	1340	11	450
250	1700	1620	9	520
300	1930	1810	7	570

Механические свойства нержавеющей сталей

В Табл. 3.38 и 3.39 приведены механические свойства типичных нержавеющей и жаростойких сталей. Модули растяжения для всех сталей составляют примерно 200...207 ГПа, или ГН·м⁻².

Табл. 3.38. *Механические свойства нержавеющей сталей по классификации Американского института черной металлургии*

AISI	Условие получения	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]
Аустенитная				
201	A	790	380	55
301	A	760	280	60
	H	1450	1310	15
302	A	620	310	50
304	A	580	290	55
	H	1100	1000	10
309	A	620	310	45
316	A	580	290	50
321	A	620	240	45
Ферритная				
405	A	480	275	20
409	A	470	275	20
430	A	520	345	25
442	A	550	310	20
446	A	550	345	20
Мартенситная				
403	A	520	275	30
410	A	520	275	30
420	A	655	345	25
	T 200°C	1760	1380	10
	T 650°C	790	585	20
431	A	860	655	20
	T 200°C	1410	1070	15
	T 650°C	870	655	20
440C	A	760	480	13
	T 300°C	1970	1900	2

Примечание:

Предел текучести установлен по величине 0.2% пробного напряжения.

A — отожженная, H — половина твердости как результат холодной обработки,

T — отпущенная.

Табл. 3.39. *Механические свойства нержавеющей сталей по британскому стандарту*

BS	Условие получения	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
Аустенитная						
302S31	Мягкая	510	190	40	183	—
303S31	Мягкая	510	190	40	183	—
304S31	Мягкая	490	195	40	183	—

Табл. 3.39 (окончание)

BS	Условие получения	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость НВ	Удар при испытании Изода [Дж]
310S31	Мягкая	510	205	40	207	—
316S33	Мягкая	510	205	40	183	—
321S31	Мягкая	510	200	35	183	—
Ферритная						
403S17	АС 740°C	415	280	20	170	—
430S15	АС 780°C	430	280	20	170	—
Мартенситная						
410S21	OQ	1850	1190	3	350	7
	OQ,T 750°C	570	370	33	170	130
416S21	OQ,T 750°C	700	370	15	205	25
	OQ,T 400°C	1500	1360	18	455	16
420S29	OQ,T 700°C	760	630	26	220	95
	OQ,T 650°C	880	695	22	260	34

Примечание:

Мягкая — размягчена при нагреве примерно до 1000...1100°C, OQ — закаленная в масле, АС — охлажденная на воздухе, Т — отпущенная.

Сопротивление коррозии

Фактором, ограничивающим применение материалов при высоких температурах, является коррозия поверхности, т.е. образование окалины, ведущее к окислению. Материалы с хорошим сопротивлением коррозии — это те, которые образуют непроницаемый окисный слой, способный сопротивляться дальнейшему проникновению кислорода в материал. В **Табл. 3.40** приведена общая схема пределов окисления для различных сталей.

Табл. 3.40. Пределы окисления сталей

Материал	Предел окисления [°C]
Углеродистые стали	450
Сталь 0.5% Мо	500
Сталь 1.0% Cr, 0.5% Мо	550
Сталь 12% Cr, Мо, V	575
Сталь 18% Cr, 8% Ni	650
Сталь 19% Cr, 11% Ni, 2% Si	900
Сталь 23% Cr, 20% Ni	1100

Критическое сечение

Критическим сечением называется такое, которое обеспечивает равномерную прокаливаемость при заданной скорости охлаждения. Механические свойства сталей зависят от размера по-

перечного сечения материала. На этом основании свойства материалов часто указывают в терминах размера поперечного сечения. Предельное очертание профиля — это максимальный диаметр круглого сортового проката, в центре которого можно получить требуемые свойства. Причиной различия механических свойств, получающихся при различных размерах круглого проката у одной и той же марки стали, является то, что во время тепловой обработки скорости охлаждения в центре проката, как правило, различные, что приводит к изменению его размеров. В результате получаются различия и в микроструктуре, а отсюда следует также наблюдаемое различие в механических свойствах. Вообще, чем больше критическое сечение, тем меньше предел прочности на растяжение и больше относительное удлинение. В Табл. 3.41 приведено несколько типичных значений критического сечения.

Табл. 3.41. Эффект влияния критического сечения на свойства материала

Материал	Критическое сечение [мм]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Удар при испытании Изода [Дж]
Углеродистая сталь	29	770	590	25	60
	152	700	490	25	40
Сталь Ni—Cr—Mo	29	1100	930	20	68
	152	1000	850	20	68

Плотность

Плотность беспримесного чугуна равна $7.88 \cdot 10^3$ кг·м⁻³ при 20°C. Добавки легирующих элементов при относительно малых их количествах изменяют это значение. Например, углерод, марганец, хром и алюминий уменьшают плотность, тогда как никель, молибден, кобальт и вольфрам увеличивают ее. Таким образом, углеродистые стали имеют плотность около $7.80 \cdot 10^3$ кг·м⁻³, легированные стали — около $7.81 \cdot 10^3$, ферритные и мартенситные нержавеющие — около $7.7 \cdot 10^3$, а аустенитные нержавеющие — около $8.0 \cdot 10^3$ кг·м⁻³.

Тепловые свойства

Тепловые свойства, т.е. удельная теплоемкость, тепловое сопротивление и температурный коэффициент линейного расширения изменяются с температурой. В Табл. 3.42 приведены средние значения этих параметров для температур в области 20°C.

Табл. 3.42. Тепловые свойства железоуглеродистых сплавов

Материал	Удельная теплоемкость [Дж·кг ⁻¹ ·°C ⁻¹]	Удельная теплопроводность [Вт·м ⁻¹ ·°C ⁻¹]	Температурный коэфф. линейного расширения [10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹]
Легированная сталь	510	37	12
Углеродистая сталь	480	47	15
Литейный чугун, серый	265...460	53...44	11
Нержавеющая, ферритная	510	26	11
Нержавеющая, мартенситная	510	25	11
Нержавеющая, аустенитная	510	16	16

Примечание:

Преобразование Дж·кг⁻¹·°C⁻¹ в кал·г⁻¹·°C⁻¹ умножением на 2.39·10⁻⁴. Преобразование Вт·м⁻¹·°C⁻¹ в кал·см⁻¹·°C⁻¹·с⁻¹ умножением на 2.39·10⁻³.

Свойства инструментальных сталей

Инструментальные стали можно сравнивать по их твердости и эксплуатационным характеристикам. Характеристиками твердости являются глубина закалки (как мера прокаливаемости), опасность растрескивания во время операции закалки, величина коробления и сопротивление обезуглероживанию (сталь, нагретая до температуры закалки, может терять углерод из поверхностных слоев, что ведет к нагреву поверхности). Изменение в эксплуатации таких характеристик, как износостойкость, ударная вязкость и обрабатываемость на станках, противодействует размягчающему нагреву при температурах, появляющихся во время применения инструмента. В Табл. 3.43 производится сравнение этих свойств для инструментальных сталей. В Табл. 3.44 даны значения твердости инструментальных сталей при их охлаждении и нагреве, типичные для каждой марки. Инструментальные стали марок D и O подвержены в основном меньшему короблению, чем другие марки, особенно коробление может сохраняться низким у марки O. Стали марки S обладают прочностью в условиях эксплуатации при наличии ударов. Стали марки H разработаны для использования при повышенных температурах. Быстрорежущие стали обладают твердостью, указанной в таблице; они сохраняют ее, хотя режущая кромка при резании с высокой скоростью разогревается.

(См. Система кодирования инструментальных сталей, Составы инструментальных сталей, Применение инструментальных сталей.)

Табл. 3.43. Сравнение свойств инструментальных сталей

АISI	Среда закалки	Глубина затвердевания	Риск растрескивания	Коробление	Сопротивление обезуглероживанию	Сопротивление размягчению	Износостойкость	Прочность	Обрабатываемость на станках
Закалка в воде									
W1	W	P	H	H	VH	L	F	H	VG
W2	W	P	H	H	VH	L	F	H	VG
W5	W	P	H	H	VH	L	F	H	VG
Сопротивление ударной нагрузке									
S1	O	M	L	M	M	M	F	VG	F
S2	W	M	H	H	L	L	F	VG	F
S5	O	M	L	M	L	L	F	VG	F
S7	A	G	VL	L	M	H	F	VG	F
Закалка в масле									
O1	O	M	L	L	H	L	M	M	G
O2	O	M	L	L	H	L	M	M	G
O6	O	M	L	L	H	L	M	M	VG
O7	O	M	L	L	H	L	M	M	G
Закалка на воздухе									
A2	A	G	VL	VL	M	H	G	M	F
A3	A	G	VL	VL	M	H	VG	M	F
A4	A	G	VL	VL	M/H	M	G	M	P/F
A6	A	G	VL	VL	M/H	M	G	M	P/F
A7	A	G	VL	VL	M	H	VG	L	P
A8	A	G	VL	VL	M	H	F/G	H	F
A9	A	G	VL	VL	M	H	F/G	H	F
A10	A	G	VL	VL	M/H	M	G	M	F/G
Высокоуглеродистые высокохромистые стали									
D2	A	G	VL	VL	M	H	VG	L	P
D3	O	G	L	VL	M	H	VG	L	P
D4	A	G	VL	VL	M	H	VG	L	P
D5	A	G	VL	VL	M	H	VG	L	P
D7	A	G	VL	VL	M	H	VG	L	P
Хромистые стали для работы при высоких температурах									
H10	A	G	VL	VL	M	H	F	G	F/G
H11	A	G	VL	VL	M	H	F	VG	F/G
H12	A	G	VL	VL	M	H	F	VG	F/G
H13	A	G	VL	VL	M	H	F	VG	F/G
H14	A	G	VL	L	M	H	F	G	G
H19	A	G	L	L	M	H	F/G	G	G

Табл. 3.43 (продолжение)

АISI	Среды заковки	Глубина затвердевания	Риск растрескивания	Коробление	Сопротивление обезуглероживанию	Сопротивление размягчению	Износостойкость	Прочность	Обрабатываемость на станках
Вольфрамовые стали для работы при высоких температурах									
H21	A/O	G	L	L	M	H	F/G	G	G
H22	A/O	G	L	L	M	H	F/G	G	G
H23	A/O	G	L	L	M	VH	F/G	F	G
H24	A/O	G	L	L	M	VH	G	F	G
H25	A/O	G	L	L	M	VH	F	G	G
H26	A/O	G	L	L	M	VH	G	F	G
Молибденовые стали для работы при высоких температурах									
H42	A/O	G	L	L	M	VH	G	F	G
Вольфрамовые быстрорежущие стали									
T1	O	G	L	M	H	VH	VG	L	F
T1	A/S	G	L	L	H	VH	VG	L	F
T2	O	G	L	M	H	VH	VG	L	F
T2	A/S	G	L	L	H	VH	VG	L	F
T4	O	G	M	M	M	VH	VG	L	F
T4	A/S	G	M	L	M	VH	VG	L	F
T5	O	G	M	M	L	VH	VG	L	F
T5	A/S	G	M	L	L	VH	VG	L	F
T6	O	G	M	M	L	VH	VG	L	P/F
T6	A/S	G	M	L	L	VH	VG	L	P/F
Молибденовые быстрорежущие стали									
M1	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M1	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M2	O	G	M/H	M	M	VH	VG	L	F
M2	A/S	G	M/H	L	M	VH	VG	L	F
M4	O	G	M/H	M	M	VH	VG	L	P/F
M4	A/S	G	M/H	L	M	VH	VG	L	P/F
M6	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M6	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M7	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M7	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M10	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M10	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M30	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M30	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M33	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M33	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M34	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M34	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F

Табл. 3.43 (окончание)

AISI	Среда закалки	Глубина за­твердевания	Риск рас­трескивания	Коробление	Со­противление обезуглероживанию	Со­противление раз­мягчению	Износостойкость	Прочность	Обра­батываемость на станках
M36	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M36	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M41	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M41	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M42	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M42	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M43	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M43	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M44	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M44	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M46	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M46	A/S	G	M/H	L	L	VH	VG	L	F
M47	O	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F
M47	A/S	G	M/H	M	L	VH	VG	L	F

Примечание:

Среда закалки: W — вода, O — масло, A — воздух, S — соль.

Глубина за­твердевания: G — большая, M — средняя, P — маленькая.

Риск рас­трескивания: H — высокий, M — средний, L — низкий.

Коробление во время закалки: H — высокая степень, M — средняя,

L — низкая, VL — очень низкая.

Со­противление обезуглероживанию: VH — очень высокое, H — высокое, M — среднее, L — низкое или несущественное.

Со­противление эффектам раз­мягчения при нагреве: VH — очень высокое, H — высокое, M — среднее, L — низкое.

Со­противление износу: VG — очень хорошее, G — хорошее, M — среднее, F — порядочное, L — низкое или несущественное.

Прочность: VH — очень высокая, H — высокая, M — средняя, L — низкая.

Обра­батываемость на станках: VG — очень хорошая, G — хорошая,

F — порядочная, P — низкая.

Табл. 3.44. Значения твердости инструментальных сталей

Тип инструментальной стали	AISI	Твердость HRC	
		при 20°C	при 560°C
Закаленная в воде	W1	63	10
Со­противление ударной нагрузке	S1	60	20
Закаленная в масле	O1	63	20
Закаленная на воздухе	A2	63	30
Высокоуглеродистая высокохромистая	D1	62	35
Быстрорежущая вольфрамовая	T1	66	52
Быстрорежущая молибденовая	M10	65	52

3.5. ПРИМЕНЕНИЕ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

Применение легированных сталей

В Табл. 3.45 и 3.46 приведены некоторые типичные области применения легированных сталей.

Табл. 3.45. Применение легированных сталей по британскому стандарту

BS	Применение
Марганцевые стали	
150M19	Поддается качественной сварке, растягивающие напряжения свыше 540 МПа. Для большого диаметра валов, подъемных зубчатых колес
150M36	Хуже свариваемая, чем сталь 150M19, но с растягивающими напряжениями свыше 1000 Па при малых сечениях материала. Для осей, рычагов, частей пушек
Хромистые стали	
530M40	Растягивающие напряжения меньше 700 МПа. Для кривошипных валов, осей, соединяющих стержней
Марганцево-молибденовые стали	
605M36	Растягивающие напряжения свыше 850 МПа. Для массивных мощных валов, высокого растяжения стержней и болтов, соединительных стержней
608M38	Растягивающие напряжения свыше 1000 МПа. Для дифференциальных валов, соединительных стержней, высокого растяжения стержней и болтов
Никель-хромистые стали	
653M31	Растягивающие напряжения свыше 900 МПа. Для дифференциальных валов, высокого растяжения стержней и болтов, соединительных стержней
Хромолибденовые	
708M40	Растягивающие напряжения свыше 850 МПа при больших сечениях деталей и 930 МПа для малых сечений. Широкое применение
709M40	Применение, подобное стали 605M36, но незначительное, для деталей больших сечений. Обладает хорошим сопротивлением износу. Для болтов с высоким растяжением, путевых штырей
722M24	Может быть азотирована для получения поверхностной твердости 900 НV. Вязкая. Для массивных мощных кривошипных валов, деталей режущего инструмента
Никель-хромолибденовые стали	
817M40	Растягивающие напряжения свыше 1000 МПа для большого сечения профилей проката и 1500 МПа для малого и где необходимо выдерживать удары и иметь хорошие усталостные свойства, например у зубчатых колес
826M40	Для изделий, требующих растягивающих напряжений свыше 1400 МПа
835M30	Для изделий, требующих растягивающих напряжений свыше 1500 МПа
Марганцево-никель-хромолибденовые стали	
945M38	Подобно стали 817M40

Табл. 3.46. Применение легированных сталей по классификации Американского института черной металлургии

AISI	Применение
Марганцевые стали	
1330	Оси, валы, связывающие стержни, т.е. где требуются напряжения выше, чем для углеродистых сталей
1340	Подобно стали 1330
Молибденовые	
4037	Для задних осей приводов шестеренок и зубчатых передач
Хромомолибденовые	
4130	Имеет повышенную твердость, а также прочность и сопротивление износу по сравнению с аналогичной углеродистой сталью. Может быть закалена в масле вместо воды. Для деталей воздушных судов, осей автомобилей, резервуаров высокого давления
4140	Подобно стали 4130
Никель-молибденовые	
4620	Для трансмиссионных приводов, валов, роликовых подшипников
4820	Подобно стали 4620
Хромистые стали	
5130	Науглероженная сталь
5140	Имеет повышенные твердость, прочность и сопротивление износу по сравнению с подобной углеродистой сталью
5160	Как пружинная сталь
Никель-хромомолибденовые	
4340	Имеет предел эластичности, ударную прочность, сопротивление усталости и твердость выше по сравнению с углеродистой сталью. Для тяжелых режимов работы и деталей высокой прочности, например шасси
8620	Науглероженная сталь
8630	Для валов и штампованных поковок, требующих высокой прочности
8650	Подобно стали 8630
Кремнистые стали	
9260	Для тонколистовых пружин

Применение углеродистых сталей

Листовая сталь с низким содержанием углерода (0.06...0.12%) широко применяется для конструкций корпусов автомобилей и изделий из белой жести. Она формуется, легко сваривается и относительно дешевая, имеет достаточную прочность для областей, где не требуется высокая прочность. Такие стали обрабатываются без нагрева, и конечной их обработкой является холодная прокатка листового материала с обжатием на 3...5%.

По твердости углеродистые стали можно разделить на три группы: с низким содержанием углерода (0.10...0.25%), средним (0.25...0.55%) и высоким содержанием (0.55...1.00%). Стали с низким содержанием углерода обычно не закалены и отпущены,

но они могут быть науглерожены до состояния твердости. Такие стали применяются для лопастей двигателей, шкивов маховиков и других легко нагружаемых деталей. Среднеуглеродистые стали обладают после закалки и отпуска целым диапазоном свойств. Они имеют широкую сферу применения, например как валы или детали в автомобильных трансмиссиях, подвесках и штурвалах. Использование высокоуглеродистых сталей более ограничено, так как они имеют низкую формуемость и свариваемость, а также являются более дорогими. Они применяются в отожженном и отпущенном состояниях, например для зажимных кулачков.

Применение литейных чугунов

В Табл. 3.47 приведены некоторые области применения литейных чугунов. Серые чугуны имеют очень хорошую обрабатываемость на станках и стабильность, хорошее сопротивление износу, но низкий предел прочности на растяжение, а также низкую пластичность. Они обладают хорошей прочностью на сжатие, но низкими ударными свойствами. Белый чугун показывает великолепное сопротивление абразивному износу и высокую твердость. Он, однако, почти не поддается обработке на станках и из-за этого может быть получен в конечной форме только литьем. Ковкие чугуны хорошо обрабатываются на станках и стабильны, имеют более высокие предел на растяжение и пластичность, чем серые чугуны, а также лучшие ударные свойства. У пластичных чугунов высокий предел прочности на растяжение с приемлемой пластичностью. Их обрабатываемость на станках и характеристики износа приемлемые, но не такие хорошие, как у серых чугунов.

Табл. 3.47. Применение литейных чугунов

Материал	Применение
Серые чугуны	Водопроводные трубы, цилиндры двигателей и поршней, машинное литье, оболочки коленчатых рычагов, машинные инструментальные матрицы дыропробивных прессов, колпаки люков
Белый чугун	Закаленные водой детали, такие как измельчающие дроблением предметы и оборудование дробилок
Ковкие чугуны	Зубчатые втулки, педали, рычаги, основной скобяной товар, велосипедные и мотоциклетные рамы
Вязкие чугуны	Трубопроводы, кривошипные валы для тяжелого режима работы
Белый абразивно стойкий чугун	Оборудование переработки абразивных материалов и дробильные кулачки
Коррозионностойкий сплав	Изделия, обладающие кислотоупорностью. Сплав с повышенным содержанием кремния, из-за чего очень хрупкий и трудно обрабатывается на станках
Теплостойкий серый сплав	Высокостойкий к теплу, а также к коррозии. Ni Mn 13 7 немагнитный
Теплостойкий пластичный сплав	Упругий и пластичный при низких температурах. Высокопластичные никелевые сплавы имеют низкое тепловое расширение

Применение нержавеющей сталей

В Табл. 3.48 даны типичные области применения нержавеющей сталей. В основном это аустенитные стали, широко используемые и при нормальной, и при высокой температурах благодаря их высокой стойкости против коррозии и формовости. Ферритные стали большей частью применяются как основные конструкционные материалы, где могут играть роль их хорошие коррозионные и тепловые свойства. Они, однако, применяются меньше, чем аустенитные стали, так как имеют плохую свариваемость, недостаточную пластичность и чувствительность к надрезу. Мартенситные стали менее коррозионностойкие, чем аустенитные или ферритные. Их параметры на растяжение контролируются при тепловой обработке, которой они подвергаются.

Табл. 3.48. Применение нержавеющей сталей

AISI	BS	Применение
Аустенитная		
201	—	Сталь с низким содержанием никеля, эквивалентная стали 301. Для покрытий шестеренок и внутренних отделок автомобилей
301	—	Когда требуются высокая прочность и высокая пластичность. Для покрытий шестеренок и внутренних отделок автомобилей, рельсовых вагонов, зажимов
302	302S31	Для холодной обработки давлением, в бытовых целях, декоративного назначения, например бытовых и домашних электроприборов, ручного оборудования для пищевых продуктов, пружин, баков, вывесок
304	304S31	Для химического и пищевого оборудования, желобов водосточных труб и разбрызгивателей
309	—	Имеет высокий температурный предел прочности и сопротивление окислению. Для оборудования тепловой обработки, теплообменников, облицовочного материала печей
—	310S31	Для высокотемпературных изделий, таких как компоненты печей и катоды электронных трубок
316	316S33	Имеет высокое сопротивление коррозии и ползучести. Для ручного химического оборудования
321	321S31	Титан в этом сплаве стабилизирует его свойства, отсюда использование его там, где сварные конструкции подвержены различным коррозионным условиям и/или высоким температурам, например самолетные выхлопные патрубки, обшивки паровых котлов, резервуары высокого давления
Ферритная		
—	403S17	Мягкая и вязкая сталь. Для бытовых целей, прессования, тянутых компонентов, компонентов прядильного производства
405	—	Для структур, требующих сварки, закаленных штативов
409	—	Сталь основного назначения. Для автомобильных выхлопных систем и емкостей для сельскохозяйственных культур и удобрений
430	430S17	Сталь основного назначения. Для декоративной отделки, ванн моечных машин, нагревателей, баков для кислот
442	—	Для высокотемпературных целей, например для деталей печей
446	—	Для высокотемпературных изделий, например камер сгорания, изложниц для стекла, нагревателей, клапанов

Табл. 3.48 (окончание)

AISI	BS	Применение
Мартенситные		
403	420S29	Для лопаток турбин
410	410S21	Сталь основного назначения. Для деталей машин, резаков, шурупов, болтов, клапанов
—	416S21	Подобно стали 410
420	420S37	Для пружин, деталей машин, ножниц, болтов
431	431S29	Там, где необходимы очень высокие механические свойства, например в самолетных приборах
440C	—	Имеет повышенную твердость способных упрочняться нержавеющей сталей. Для подшипников, циркуляторов, сопел, деталей клапанов

Применение инструментальных сталей

В Табл. 3.49 даны области применения большинства обычно используемых инструментальных сталей.

Табл. 3.49. Применение инструментальных сталей

AISI	% C	Применение
Закаленные в воде		
W1	(0.9 C)	Калибры, зубила, пробойники, лезвия ножниц, клепочные штампы, объемные штампы, вырубной инструмент
—	(1.0 C)	Большие сверла, резаки, развертки, лезвия ножниц, столярные инструменты, инструменты холодной высадки головок заклепок, пробойники, счетчики сливных труб, вырубные штампы
—	(1.2 C)	Крученые сверла, резаки, развертки, столярные инструменты, метчики, напильники, токарные инструменты
W2	—	Большие сверла, резаки, развертки, столярные инструменты, лезвия ножниц, инструменты холодной высадки головок заклепок
W5	—	Тяжелые штампы и вытяжные штампы, развертки, большие пробойники, бритвенные лезвия, холодные гибочные ролики и штампы
Устойчивые к ударам		
S1	—	Дрели для бетона, пневматический инструмент, лезвия ножниц, штампы ковочных машин для высадки головок болтов, раскатки, резаки трубок, объемные штампы
S2	—	Ручные и пневматические зубила, лезвия ножниц, инструменты штамповки, раскатки, штампы, шпиндели, винты приводов зевов валков, хвостовики инструментов
S5	—	Ручные и пневматические зубила, лезвия ножниц, инструменты штамповки, раскатки, штампы, шпиндели, пробойники, вращающиеся ножницы, резаки трубок
S7	—	Лезвия ножниц, пробойники, зубила, матрицы гибки листового металла, вырубные матрицы, кулачки подушек валков, резаки трубок
Закаленные в масле		
O1	—	Вырубные, волочильные и обрезные матрицы, пресс-формы для пластмасс, лезвия ножниц, метчики, развертки, калибры, вкладыши подшипников, пробойники, кондукторы, ножи для резки бумаги

Табл. 3.49 (продолжение)

AISI	% C	Применение
O2	—	Вырубные, штампующие, обрезные и гибочные матрицы и пробойники, метчики, развертки, калибры, вкладыши подшипников, кондукторы, циркулярные резак и пилы
O6	—	Вырубные и гибочные матрицы, вырубные и гибочные пробойники, раскатки, гибочные ролики холодной штамповки, калибры, метчики, хвостовики, кондукторы
O7	—	Вырубные и гибочные матрицы, раскатки, калибры, метчики, дрели, ножи для резки бумаги, столярные инструменты
Закаленные на воздухе		
A2	—	Ободы колес намотки прокатанных периодических профилей, прессы выдавливания, обрезные, вырубные и чеканящие матрицы, раскатки, лезвия ножниц, вытягивающие и гибочные ролики, калибры, полирующие инструменты, пресс-формы для пластмасс, вкладыши подшипников, пробойники
A3	—	Подобно стали A2
A4	—	Вырубные, гибочные и обрезные штампы, пробойники, лезвия ножниц, раскатки, гибочные ролики, калибры, пробойники
A6	—	Вырубные, гибочные, чеканящие и обрезные штампы, пробойники, лезвия ножниц, раскатки, пресс-формы для пластмасс
A7	—	Вкладыши для установок дробеструйной очистки, гибочные штампы, калибры, волочильные штампы
A8	—	Вырубные, чеканящие и гибочные матрицы, лезвия ножниц
A9	—	Штампы для холодной высадки головок заклепок, чеканящие штампы, гибочные штампы и ролики, инструменты для деформирования в горячем состоянии, такие, как пробойники, раскатки, инструменты прессования, молоты
A10	—	Вырубные и гибочные штампы, калибры, пробойники, гибочные ролики, футеровочные плиты
Высокоуглеродистые высокохромистые стали		
D2	—	Вырубные, волочильные и холодной гибки штампы, ободы колес намотки прокатанных периодических профилей, лезвия ножниц, полирующие инструменты, пробойники, калибры, сверла, раскатки, резак
D3	—	Вырубные, волочильные и холодной гибки штампы, ободы колес намотки прокатанных периодических профилей, лезвия ножниц, полирующие инструменты, пробойники, калибры, гофрирующие штампы
D4	—	Вырубные машины, ободы колес намотки прокатанных периодических профилей, штампы для волочения проволоки, гибочные инструменты и ролики, пробойники, штампы для глубокой вытяжки
D5	—	Вырубные, чеканящие и обрезные штампы, лезвия ножниц, штампы для холодной гибки, пробойники, качественные резак
D7	—	Штампы для волочения проволоки, штампы глубокой вытяжки, керамические инструменты и штампы, вкладыши для пескоструйной очистки
Хромистые стали для работы при высоких температурах		
H10	—	Штампы для горячего прессования и горячей объемной штамповки, раскатки, пробойники, ножницы для горячей резки, штампы для штативов и стаканов
H11	—	Литейные штампы для легких сплавов, штампы для горячей объемной штамповки, пробойники, инструменты для прошивки, гильзы, раскатки

Табл. 3.49 (продолжение)

AISI	% C	Применение
H12	—	Штампы для прессования, пробойники, раскатки, штампы для горячей штамповки стаканов
H13	—	Литейные штампы и стаканы, штампы для прессования, штампы для горячей штамповки и стаканы
H14	—	Штампы для прессования алюминия и латуни, штампы для горячей штамповки и стаканы, пробойники для горячего прессования
H19	—	Штампы для прессования и стаканы, штампы для горячей объемной штамповки и стаканы, раскатки, инструменты для горячего пробоа
Вольфрамовые стали для работы при высоких температурах		
H21	—	Раскатки, штампы для горячей вырубки, пробойники для горячей прошивки, штампы для прессования и литейные штампы для латуни, клещи для штампов, ковочные машины для горячей высадки
H22	—	Раскатки, штампы для горячей вырубки, пробойники для горячей прошивки, штампы для прессования, клещи для штампов
H23	—	Штампы для прессования и литья латуни
H24	—	Штампы для горячей вырубки и вытяжки, обрезающие штампы, штампы горячей прессовки, штампы горячей гибки, штампы горячейковки, штампы для прессования
H25	—	Штампы для горячей гибки, штампы для литья под давлением и горячей объемной штамповки, лезвия ножниц, клещи для штампов, раскатки, пробойники, штампы для обжатия труб на меньший диаметр
H26	—	Штампы для горячей вырубки, пробойники для горячей прошивки, штампы для горячей обрезки, клещи для штампов, штампы для прессования латуни и меди
Молибденовые стали для работы при высоких температурах		
H82	—	Штампы для холодной обрезки, холодные ковочные машины для высадки и штампы для прессования, штампы стаканов, штампы горячей высадки, пробойники для горячей прошивки, раскатки
Быстрорежущие вольфрамовые стали		
T1	—	Дрели, метчики, пуансоны для мощных прессов, сверла, инструмент для токарных и продольно-строгальных станков, пробойники, выплавляющие штампы, резак для размельчения
T2	—	Инструмент для токарных и продольно-строгальных станков, резак для размельчения, сверла, развертки
T4	—	Инструмент для токарных и продольно-строгальных станков, инструмент для расточки, дрели, резак для размельчения, сверла
T5	—	Инструмент для токарных и продольно-строгальных станков, инструмент для тяжелых режимов работы, требующих соответствующей твердости
T6	—	Инструмент для мощных токарных и продольно-строгальных станков, дрели, резак для размельчения
Быстрорежущие молибденовые стали		
M1	—	Дрели, метчики, развертки, резак для размельчения, пуансоны мощного пресса, пробойники, инструмент для токарных и продольно-строгальных станков, формирующие инструменты, сверла, пилы, фрезы, столярный инструмент
M2	—	Дрели, метчики, резак для размельчения, пуансоны, инструмент для токарных и продольно-строгальных станков, формирующие резак, сверла, пилы, инструмент для холодной формовки

Табл. 3.49 (окончание)

AISI	% C	Применение
M4	—	Сверла для тяжелых режимов работы, развертки, резак для размельчения, инструмент для токарных и продольно-строгальных станков, формирующие резак, вырубные штампы и пробойники, штампы для обжатия труб на меньший диаметр
M6	—	Инструмент для токарных и продольно-строгальных станков, формирующий инструмент, резак для размельчения, инструмент для расточки
M7	—	Дрели, метчики, развертки, тракты, пилы, резак для размельчения, инструмент для токарных и продольно-строгальных станков, столярный инструмент, пробойники, пуансоны
M10	—	Подобно стали M7
M30	—	Инструмент для токарных станков, резак для размельчения, формирующий инструмент
M33	—	Дрели, метчики, инструмент для токарных станков, резак для размельчения
M34	—	Подобно стали M33
M36	—	Инструмент для мощных токарных и продольно-строгальных станков, резак для размельчения, дрели
M41	—	Дрели, резак для размельчения, инструмент для токарных станков, пуансоны, сверла, формирующие резак
M42	—	Подобно стали M41
M43	—	То же
M44	—	То же
M46	—	То же
M47	—	То же

Глава четвертая

Алюминиевые сплавы

4.1. МАТЕРИАЛЫ

Алюминий

Чистый алюминий — мягкий, очень вязкий материал. Его механические свойства зависят не только от его чистоты, но также и от суммарной обработки, которой он был подвергнут. С ее повышением твердость увеличивается. Алюминий имеет удельную электрическую проводимость, составляющую 65% от проводимости меди, но при равной массе он лучше проводит ток. Материал обладает малой плотностью ($2.7 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$), хорошими теплопроводностью и коррозионнотойкостью (из-за образования на поверхности тонкого слоя окисла, препятствующего проникновению кислорода в глубь материала), высокой пластичностью.

Сплавы алюминия

Алюминиевые сплавы можно разделить на две группы: ковкие и литейные. Каждый из этих сплавов можно разделить еще на две следующие группы: сплавы, не упрочняемые термообработкой, и те, которые можно упрочнять термообработкой. Неупрочняемые термической обработкой алюминиевые сплавы имеют высокую пластичность и коррозионнотойкость, хорошо свариваются. Пластическая деформация упрочняет их почти в 2 раза. Алюминиевые сплавы 2-й группы также обладают хорошей пластичностью и более высокой прочностью, стойки к образованию трещин при горячей пластической деформации, имеют более высокую вязкость разрушения.

Сплавы на основе алюминия обладают низкой плотностью, хорошими электрической и тепловой проводимостями и высокой коррозионной стойкостью. Коррозионная стойкость тонколистового сплава улучшается при плакировании его со слоями нелегированного алюминия.

Основные элементы, сплавляемые с алюминием, это медь, железо, марганец, магний, кремний и цинк. В Табл. 4.1 перечис-

Табл. 4.1. Изменение свойств алюминия при легировании

Элемент	Основные эффекты
Медь	Предел прочности возрастает примерно на 12%. Возможно преципитатное затвердевание. Обрабатываемость на станках улучшается
Железо	Предел прочности и твердость сплавов увеличиваются при малом процентном содержании, тепловые растрескивания в отливках уменьшаются
Марганец	Пластичность увеличивается. В комбинации марганца с железом жидкотекучесть сплава увеличивается
Магний	Предел прочности увеличивается. Возможно преципитатное затвердевание при содержании магния более 6%. Коррозионная стойкость увеличивается
Кремний	Способность металла заполнять литейную форму улучшается, великопленные отливки сплава. Коррозионная стойкость сплавов увеличивается
Цинк	Способность металла заполнять литейную форму ухудшается. Предел прочности при комбинации цинка с другими сплавляемыми элементами увеличивается

лены наиболее существенные эффекты, появляющиеся у сплавов при легировании.

Литейные сплавы

Сплав, применяемый в литейном процессе, должен легко заполнять все части литейной формы и затвердевать без слишком большой усадки. Некоторая неизбежная усадка не должна приводить к разрывам затвердевшего сплава. Выбор сплава влияет на процесс литья. В песочном литье скорость охлаждения относительно малая, а с литьем в пресс-форму, когда металл вводится под давлением, она намного больше. Скорость охлаждения влияет на предел прочности конечного литья. Следовательно, алюминиевый сплав, который подходит для песочного литья, может не подходить для такого же литья в пресс-форму.

Группа сплавов, которые применяются в условиях «как литье», т. е. с негорячей обработкой, имеют кремний в качестве основного сплавляемого элемента (см. на Рис. 4.1 равновесную диаграмму). Добавка кремния улучшает текучесть жидкого металла. Эвтектика сплавов алюминий—кремний находится при содержании кремния 11.6%. Сплав этого состава изменяется от жидкого состояния к твердому без какого-либо изменения температуры, а сплавы, близкие к этому составу, затвердевают в узком температурном диапазоне. Благодаря этому они более всего подходят для литья в пресс-форму, когда требуется быстрое изменение от жидкого состояния к твердому, что позволяет выталкивать их из пресс-формы с высокой скоростью. Микроструктура эвтектического состава имеет крупные кристаллы кремния, что вызывает снижение прочности и пластичности. Структуру можно сделать мельче путем модификации при добавке пример-

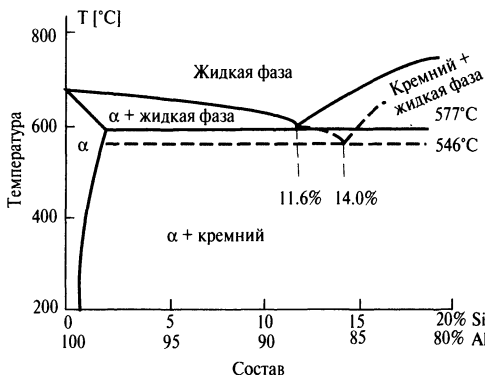


Рис. 4.1. Равновесная диаграмма алюминий—кремний

но 0.005...0.15% натрия и этим повысить механические свойства сплава. Такое же изменение эвтектического состава вызовет добавка около 14% кремния (см. штриховую линию на Рис. 4.1).

Другие литейные сплавы, которые не обрабатываются в горячем виде, — это сплавы алюминий—кремний—медь и алюминий—магний—марганец. Сплавы алюминий—кремний—медь могут быть отлиты как в песок, так и в формы, сплавы алюминий—магний—марганец подходят только для песочного литья.

Добавка меди к сплавам алюминий—кремний позволяет подвергать литье горячей обработке. Добавка малого количества магния к сплавам алюминий—кремний также дает возможность проводить горячую обработку материала.

(См. Система кодирования составов литейных сплавов, Система кодирования отпусков, Составы литейных сплавов, Отжиг, Горячая обработка литейных сплавов, Электрические свойства, Механические свойства, Применения литейных сплавов.)

Ковкие сплавы

Обычно применяемые не обрабатываемые в горячем виде ковкие алюминиевые сплавы — это сплавы алюминий—марганец и алюминий—магний (на Рис. 4.2 показана необходимая нам часть равновесной диаграммы). Широко применяемая группа обрабатываемых в горячем виде сплавов базируется на основе сплава алюминий—медь (на Рис. 4.3 показана часть относящейся к этим сплавам равновесной диаграммы). Когда такой сплав, как известно из научной литературы, с 3% меди немного охлажден, структура при 540°C твердого раствора α -фазы дает преципитаты соединения медь—алюминий, если температура

уменьшается ниже линии солидуса. В результате при комнатной температуре будет твердый раствор α -фазы с этими преципитатами. Преципитаты скорее крупные, но их можно изменить нагревом сплава выше 500°C , выдержать при этой температуре, и тогда при затвердевании получится пересыщенный твердый раствор как раз α -фазы без преципитатов. Эта обработка, известная как обработка на твердый раствор, дает устойчивое состояние. Со временем образуются тонкие преципитаты. Нагрев вы-

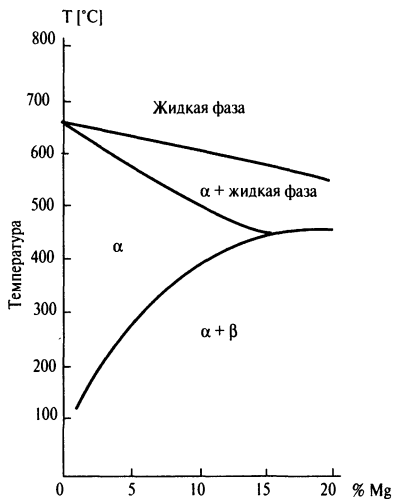


Рис. 4.2. Равновесная диаграмма сплавов алюминий—магний

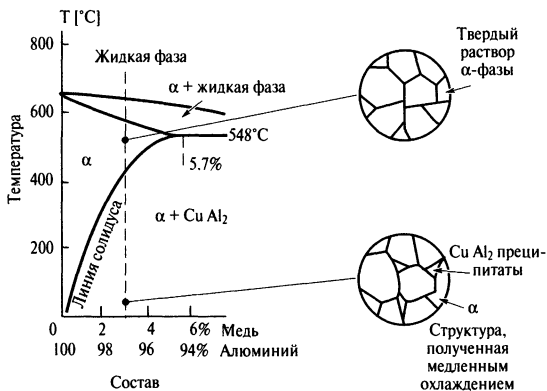


Рис. 4.3. Равновесная диаграмма сплавов алюминий—медь

ше примерно 165°C ускоряет на 10 ч этот процесс, вызывая старение и полный процесс преципитатного затвердевания, так что в результате получается прочный и твердый материал.

Другими обрабатываемыми в горячем виде ковкими сплавами алюминия являются алюминий—магний—кремний сплавы с преципитатами, формирующимися из соединений алюминий—медь и алюминий—медь—магний. Некоторые сплавы основаны на твердых растворах алюминий—магний—кремний и алюминий—цинк—магний—медь.

(См. Система кодирования составов ковких сплавов, Система кодирования отпуска сплавов, Отжиг, Горячая обработка ковких сплавов, Электрические свойства, Производственные свойства, Механические свойства, Тепловые свойства, Формовка материала, Применение ковких сплавов.)

4.2. КОДЫ И СОСТАВЫ СПЛАВОВ

Системы кодирования составов литейных сплавов

Для кодирования литейных алюминиевых сплавов Алюминиевая ассоциация (АА) США применяет систему в виде четырех цифр с последней цифрой, отделенной от других трех десятичной точкой. Первая цифра указывает основной сплавляемый элемент (см. Табл. 4.2). Вторая и третья цифры идентифицируют специфику сплава внутри группы. Четвертая цифра определяет произведенную форму изделия: 0 — литейный сплав, а 1 — слиток. Модификация исходного состава указывается буквой перед числовым кодом.

Табл. 4.2. Система кодирования составов литейных сплавов Алюминиевой ассоциации

АА	Основные сплавляемые элементы
1XX.X	Алюминий минимальной чистоты 99.00%
2XX.X	Медь
3XX.X	Кремний плюс медь или магний
4XX.X	Кремний
5XX.X	Магний
6XX.X	Неиспользованные серии цифр
7XX.X	Цинк
8XX.X	Олово
9XX.X	Другие элементы

В соответствии с британским стандартом BS1490 код составов литейных сплавов включает буквы LM перед числом. Число указывает спецификацию сплава. В Табл. 4.3 приведены соотношения между литейными сплавами по британскому

Табл. 4.3. Эквивалентные номера литейных сплавов по британскому стандарту и системе Алюминиевой ассоциации

BS	AA
LM4	319.0
LM5	514.0
LM9	A360.0
LM10	520.0
LM12	222.0
LM13	336.0
LM16	355.0
LM18	443.0
LM20	413.0
LM21	319.0
LM24	A380.0
LM25	356.0
LM30	390.0

стандарту (BS) и теми же обычно применяемыми сплавами Алюминиевой ассоциации (AA), которые обсуждаются далее в этой главе.

Системы кодирования составов ковких сплавов

Система кодирования, применяемая для составов ковких алюминиевых сплавов, является той же, что и для литейных сплавов. Она использует четыре цифры. Первая указывает основной сплавляемый элемент (см. Табл. 4.4). Вторая характеризует модификации пределов примеси. Последние две цифры для сплавов 1XXX дают содержание алюминия выше 99.00% в сотых долях процента. Для сплавов в других сериях цифр последние две цифры просто идентифицируют их.

Табл. 4.4. Система кодирования составов ковких сплавов

AA	Основной сплавляемый элемент
1XXX	Алюминий минимальной чистоты 99.00%
2XXX	Медь
3XXX	Марганец
4XXX	Кремний
5XXX	Магний
6XXX	Магний и кремний
7XXX	Цинк
8XXX	Другие элементы
9XXX	Неиспользованные серии цифр

Системы кодирования твердости сплавов

Полная спецификация сплава, литейного или ковкого, требует характеристики его твердости, т. е. степени холодной или горячей обработки, связанной со спецификацией состава. В Табл. 4.5 даны основные обозначения, применяемые по американской системе. Британская система является видоизменением американской и приведена в Табл. 4.7. Основными обозначениями служат буквы, число после них указывает степень холодной или горячей обработки, как видно из Табл. 4.6 для большинства обычных кодов. Полная спецификация содержит код состава сплава и следующее через черту обозначение его степени твердости, например 1060-H14.

Табл. 4.5. Основные американские коды степени твердости сплавов

AA код	Степень твердости сплава
F	Соответствует только изготовленному
O	Отожжен
H	Упрочнен деформированием, только обработан ковкой
T	Обработан теплом для получения стабильной степени твердости, иной, чем по спецификациям O или H
W	Обработан теплом. Применяется только для сплавов, которые прошли естественный путь затвердевания

Табл. 4.6. Подразделение кодов степени твердости сплавов

AA код	Степень твердости сплава
Упрочнение деформированием	
H1	Только что упрочнен деформацией, но нет тепловой обработки. Уменьшение твердости определяется второй цифрой (1...8). Единица указывает наименьшее суммарное затвердевание, а 8 — наибольшее. H12 обозначает четверть твердости, H14 — половину, H16 — три четверти, H18 — полностью твердый
H2	Упрочнен деформацией и частично отожжен. Уменьшение твердости после отжига указывается второй цифрой (1...8), как и у H1
H3	Упрочнен деформацией и стабилизирован тепловой обработкой при низкой температуре. Уменьшение твердости до стабилизации указывается второй цифрой (1...8), как и у H1
Тепловая обработка	
T1	Охлажден от повышенной температуры процесса формовки и подвергнут естественному старению
T2	Охлажден от повышенной температуры процесса формовки, подвергнут холодной обработке, деформирован в холодном состоянии и подвергнут естественному старению
T3	Тепловая обработка на твердый раствор, деформирован в холодном состоянии и подвергнут естественному старению
T4	Тепловая обработка на твердый раствор, подвергнут естественному старению. T42 указывает, что материалу разрешена обработка от O или F отпуска
T5	Охлажден от повышенной температуры процесса формовки и затем искусственно подвергнут старению

Табл. 4.6 (окончание)

AA код	Степень твердости сплава
T51	Снято напряжение при правке растяжением после тепловой обработки на твердый раствор и охлаждения от повышенной температуры формования. T510 — сплав, у которого не было дальнейшей обработки после правки растяжением. T511 — сплав, у которого имела место некоторая незначительная правка
T52	Снято напряжение при сжатии после тепловой обработки на твердый раствор или охлаждения от повышенной температуры формования
T54	Снято напряжение при комбинации правкой растяжением и сжатием
T6	Тепловая обработка на твердый раствор и затем искусственное старение. T62 — материал с тепловой обработкой на твердый раствор из O или F отпуска
T7	Тепловая обработка на твердый раствор и стабилизация
T8	Тепловая обработка на твердый раствор, холодная обработка и искусственное старение
T9	Тепловая обработка на твердый раствор, искусственное старение и затем холодная обработка
T10	Охлажден от повышенной температуры процесса формования, холодная обработка и затем искусственное старение

Табл. 4.7. Британские коды степени твердости сплавов

BS код	AA код	Степень твердости сплава
M	F	Соответствует только изготовленному
O	O	Отожжен
H	H	Закален деформацией. Следующие номера (1...8) указывают степень твердости, как и у американских кодов
TB	T4	Тепловая обработка на твердый раствор и естественное старение. Нет холодной обработки после тепловой, возможно некоторое легкое разглаживание или правка
TB7	T7	Тепловая обработка на твердый раствор и стабилизация
TD	T3	Тепловая обработка на твердый раствор, холодная обработка и естественное старение
TE	T10	Охлаждение от повышенной температуры процесса формовки и преципитатное упрочнение
TF	T6	Тепловая обработка на твердый раствор и преципитатное упрочнение
TF7	—	Тепловая обработка на твердый раствор, преципитатное упрочнение и стабилизация
TH	T8	Тепловая обработка на твердый раствор, холодная обработка и затем преципитатное упрочнение
TS	T	Термическая обработка до повышенной размерной стабилизации

Составы литейных сплавов

В **Табл. 4.8** показаны составы обычно применяемых алюминиевых сплавов по системе Алюминиевой ассоциации, а в **Табл. 4.9** — те же составы по британским стандартам.

Табл. 4.8. Составы литейных сплавов по системе Алюминиевой ассоциации

AA	Процесс	Состав содержания элементов в процентах				
		Si	Cu	Mg	Mn	Другие
Без тепловой обработки						
Сплавы алюминий—медь						
208.0	S*	3.0	4.0	—	—	—
213.0	S, P	2.0	7.0	—	—	—
Сплавы алюминий—кремний—медь/магний						
308.0	S, P	5.5	4.5	—	—	—
319.0	S, P*	6.0	3.5	—	—	—
360.0	D	9.5	—	0.50	—	<2.0 Fe
A360.0	D	9.5	—	0.50	—	<1.3 Fe
380.0	D	8.5	3.5	—	—	<2.0 Fe
Сплавы алюминий—кремний						
413.0	D	12.0	—	—	—	<2.0 Fe
C443.0	D	5.2	<0.6	—	—	<2.0 Fe
Термообработанные						
Сплавы алюминий—медь						
222.0	S, P	—	10.0	0.25	—	—
242.0	S, P	—	4.0	1.5	—	2.0 Ni
295.0	P	0.8	4.5	—	—	—
Сплавы алюминий—кремний—магний						
355.0	S, P	5.0	1.2	<0.50	—	<0.60 Fe, <0.35 Zn
356.0	S, P	7.0	<0.25	0.32	<0.35	—
357.0	S, P	7.0	—	0.50	—	—

Примечание:

Процесс S — песочное литье, P — литье в постоянную пресс-форму, D — литье в пресс-форму. В процессах S и P металл разливается в пресс-форму под собственным весом, в процессе D разливка идет под давлением. Процесс D дает фиксированную скорость охлаждения, S — замедленную скорость.

* — оптимальная тепловая обработка.

Табл. 4.9. Составы литейных сплавов по британскому стандарту

BS	Процесс	Средний состав элементов в процентах				
		Si	Cu	Mg	Mn	Другие
LM4	S, C	5.0	3.0	<0.15	0.4	<1.0 Fe, <0.3 Ni, <0.5 Zn
LM5	S, C	<0.3	<0.1	4.5	0.5	<0.6 Fe, <0.3 Ni, <0.1 Zn
LM6	S, C	11.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.6 Fe, <0.1 Ni, <0.1 Zn
LM9	S, C	11.5	<0.1	0.4	0.5	<0.6 Fe, <0.1 Ni, <0.1 Zn
LM10	S, C	<0.25	<0.1	10.2	<0.1	<0.35 Fe, <0.1 Ni, <0.1 Zn
LM12	C	<2.5	10.0	0.3	<0.6	<1.0 Fe, <0.5 Ni, <0.8 Zn
LM13	S, C	11.0	0.9	1.2	<0.5	<1.0 Fe, <1.5 Ni, <0.5 Zn

Табл. 4.9 (окончание)

BS	Процесс	Средний состав элементов в процентах				
		Si	Cu	Mg	Mn	Другие
LM16	S, C	5.0	1.3	0.5	<0.5	<0.6 Fe, <0.1 Zn, <0.25 Ni
LM18	S, C	5.3	0.1	<0.1	0.5	0.6 Fe, <0.1 Ni, <0.1 Zn
LM20	C	11.5	<0.4	<0.2	<0.5	<1.0 Fe, <0.1 Ni, <0.2 Zn
LM21	S, C	6.0	4.5	0.2	0.4	<1.0 Fe, <0.3 Ni, <2.0 Zn
LM24	C	8.0	3.5	<0.3	<0.5	<1.3 Fe, <0.5 Ni, <0.1 Zn
LM25	S, C	7.0	<0.1	0.4	<0.3	<0.5 Fe, <0.1 Ni, <0.1 Zn
LM30	C	17.0	4.5	0.6	<0.3	<1.1 Fe, <0.1 Ni, <0.2 Zn

Примечание:

Все составы содержат также около 0.1...0.3% Pb, 0.05...0.10% Sn и 0.2% Ti.
S — песочное литье, C — кокильная отливка.

Составы ковких сплавов

В Табл. 4.10 показаны составы обычно применяемых ковких сплавов по системе Алюминиевой ассоциации.

Табл. 4.10. Составы ковких сплавов

AA	Состав содержания элементов в процентах						
	Al	Mn	Mg	Cu	Si	Cr	Другие
Без тепловой обработки							
Нелегированный алюминий							
1050	>99.50	—	—	—	—	—	Cu, Si, Fe
1060	>99.60	—	—	—	—	—	Cu, Si, Fe
1100	>99.00	—	—	0.12	—	—	Si, Fe
1200	>99.00	—	—	—	—	—	Cu, Si, Fe
Сплавы алюминий—марганец							
3003	98.6	1.2	—	0.12	—	—	—
3004	97.8	1.2	1.0	—	—	—	—
3105	99.0	0.55	0.50	—	—	—	—
Сплавы алюминий—магний							
5005	99.2	—	0.8	—	—	—	—
5050	98.6	—	1.4	—	—	—	—
5052	97.2	—	2.5	—	—	0.25	—
5083	94.7	0.7	4.4	—	—	0.15	—
5086	95.4	0.4	4.0	—	—	0.15	—
5154	96.2	—	3.5	—	—	0.25	—
5252	97.5	—	2.5	—	—	—	—
5454	96.3	0.8	2.7	—	—	0.12	—
5456	93.9	0.8	5.1	—	—	0.12	—

Табл. 4.10 (окончание)

AA		Состав содержания элементов в процентах					
Термообработанные							
Сплавы алюминий—медь							
2011	93.7	—	—	5.5	—	—	0.4 Bi, 0.4 Pb
2014	93.5	0.8	0.5	4.4	0.8	—	—
2024	93.5	0.6	1.5	4.4	—	—	—
2219	93.0	0.3	—	6.3	—	—	0.06 Ti, 0.1 V, 0.18 Zr
2618	93.7	—	1.6	2.3	0.18	—	1.1 Fe, 1.0 Ni, 0.07 Ti
Сплавы алюминий—магний—кремний							
6061	97.9	—	1.0	0.28	0.6	0.2	—
6063	98.9	—	0.7	—	0.4	—	—
6151	98.2	—	0.6	—	0.9	0.25	—
6262	96.8	—	1.0	0.28	0.6	0.09	0.6 Bi, 0.6 Pb
Сплавы алюминий—цинк—магний—медь							
7075	90.0	—	2.5	1.6	—	0.23	5.6 Zn
7178	88.1	—	2.7	2.0	—	0.26	6.8 Zn

4.3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Отжиг

Типичные температуры и процедуры отжига для спецификации Алюминиевой ассоциации ковких сплавов приводят их к О степени твердости, как следует ниже. Для серии сплавов 1XXX, 3XXX, 5XXX эта температура 345°C, а время выдержки и скорость охлаждения не важны. Сплав 3003 является исключением, ему требуется температура отжига 415°C. Серии сплавов 2XXX и 6XXX требуют температуру отжига 415°C с выдержкой от 2 до 3 ч и охлаждение до 260°C со скоростью около 30°C/ч. Исключением является сплав 2036 с температурой отжига 385°C. Серии сплавов 7XXX требуют температуру 415°C и выдержку от 2 до 3 ч. В этом случае допускается неконтролируемое охлаждение примерно до 200°C с последующим повторным нагревом до 230°C на 4 ч. Исключением является сплав 7005, требующий температуру отжига 345°C и выдержку от 2 до 3 ч с последующим охлаждением до 200°C со скоростью 30°C/ч или менее.

Термическая обработка литейных сплавов

В Табл. 4.11 приведены параметры типичных видов термической обработки, термической обработки на твердый раствор и старение для обычно применяемых литейных сплавов Алюминиевой ассоциации. Термическая обработка на твердый раствор,

как правило, следует с закалкой в воде от 65 до 100°C. В Табл. 4.12 приведены аналогичные данные для литейных сплавов по британскому стандарту.

Табл. 4.11. Термическая обработка для литейных сплавов
Алюминиевой ассоциации

Сплав AA	Тип литья	Термическая обработка на твердый раствор		Термическая обработка на старение		Степень твердости
		Температура [°C]	Время [ч]	Температура [°C]	Время [ч]	
222.0	S	—	—	315	3	O
	S	510	12	155	11	T61
	P	—	—	170	16...22	T551
242.0	S	—	—	345	3	O
	S	—	—	205	8	T571
	S/P	515	4...12	205...230	3...5	T61
295.0	S	515	12	—	—	T4
	S	515	12	155	3...6	T6
	S	515	12	260	4...6	T7
355.0	S/P	—	—	225	7...9	T51
	S	525	12	155	3...5	T6
	P	525	4...12	155	2...5	T6
	S	525	12	225	3...5	T7
	P	525	4...12	225	3...9	T7
356.0	S/P	—	—	225	7...9	T51
	S	540	12	155	3...5	T6
	P	540	4...12	155	2...5	T6
	S	540	12	205	3...5	T7
	P	540	4...12	225	7...9	T7
357.0	S	540	10...12	155	10...12	T61
	P	540	8	175	6	T6

Примечание:

S — песочное литье, P — литье в постоянную пресс-форму.

Табл. 4.12. Термическая обработка для литейных сплавов
по британскому стандарту

BS	Термическая обработка на твердый раствор		Среда закалки	Преципитатная термическая обработка		Степень твердости
	Температура [°C]	Время [ч]		Температура [°C]	Время [ч]	
LM4	505...520	6...16	W 70...80	150...170	6...18	TF(T10)
LM9	—	—	—	150...170	16	TE(T6)
	520...535	2...8	W	150...170	16	TF(T6)
LM10	425...435	8	O 160m	—	—	TB(T4)
LM13	—	—	—	160...180	4...16	TE(T10)
	515...525	8	W 70...80	160...180	4...16	TF(T6)
	515...525	8	W 70...80	200...250	4...16	TF7

Табл. 4.12 (окончание)

BS	Термическая обработка на твердый раствор		Среда заковки	Преципитатная термическая обработка		Степень твердости
	Температура [°C]	Время [ч]		Температура [°C]	Время [ч]	
LM16	520...530	12	W 70...80	—	—	TB(T4)
	520...530	12	W 70...80	160...170	8...10	TF(T6)
LM25	525...545	4...12	W 70...80	250	2...4	TB7(T7)
	—	—	—	155...175	8...12	TE(T10)
	525...545	4...12	W 70...80	155...175	8...12	TF(T6)
LM30	—	—	—	175...225	8	TS(T)

Примечание:

Среда заковки: W — вода, W 70...80 — вода от 70 до 80°C, O 160m — масло при максимальной температуре 160°C.

Термическая обработка ковких сплавов

В Табл. 4.13 приведены параметры термической обработки на твердый раствор и преципитатной термической обработки с конечной закалкой для обычно применяемых ковких сплавов по спецификации Алюминиевой ассоциации. Условия заковки зависят от формы материала, например плоский лист или тянутый пруток, и от режимов обработок между обработками на твердый раствор и преципитатной. Таблица дает только указание на возможные последствия обработок. После термической обработки на твердый раствор сплавы закаляются в воде до комнатной температуры.

Табл. 4.13. Термическая обработка на твердый раствор и преципитатная термическая обработка

AA	Термическая обработка на твердый раствор		Преципитатная термическая обработка		
	Температура [°C]	Степень твердости	Температура [°C]	Время [ч]	Степень твердости
Сплавы алюминий—медь					
2011	525	T4(TB)	—	—	—
		+CW	—	—	—
2014	500	T3(TD)	160	14	T8(TH)
		T4(TB)	160	10/18	T6(TF)
		+CW	—	—	—
2024	495	T3(TD)	160	18	T6(TF)
		T4(TB)	—	—	—
		+CW	—	—	—
2219	535	T3(TD)	190	12	+CW T81(TH)
		+CW	—	—	—
		T31(TD)	190	18	+CW T81(TH)
		T42(TB)	190	36	T62(TF)

Табл. 4.13 (окончание)

AA	Термическая обработка на твердый раствор		Преципитатная термическая обработка		
	Температура [°C]	Степень твердости	Температура [°C]	Время [ч]	Степень твердости
Сплавы алюминий—магний—кремний					
6061	530	T4(TB)	160	18	T6(TF)
		T42(TB)	160	18	T62(TF)
6063	520	T4(TB)	175	8	T6(TF)
		T42(TB)	175	8	T62(TF)
6151	515	T4(TB)	170	10	T6(TF)
6262	540	T4(TB)	170	8	T6(TF)
		T42(TB)	170	8	T62(TF)
Сплавы алюминий—цинк—магний—медь					
7075	480	W	120	24	T6(TF)
		+SR W51	120	24	T651

Примечание:

СW — холодная обработка, SR — снято напряжение. Где возможно, ближайшие эквиваленты сплавам по британскому стандарту для степеней твердости даны в круглых скобках.

4.4. СВОЙСТВА СПЛАВОВ**Плотность**

Плотность алюминия при 20°C равна $2.69 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а сплавы имеют плотность примерно $2.6 \dots 2.8 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Электрические свойства

В Табл. 4.14 и 4.15 приведены для температуры 20°C удельные электрические сопротивления сплавов в единицах Ом·м и электропроводности по шкале Международного стандарта на отожженную медную проволоку (IACS). Эта шкала выражает проводимость в процентах по отношению к проводимости отожженной меди при 20°C, удельное сопротивление которой равно $1.7241 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (стандарт удельного сопротивления).

Табл. 4.14. Электрические параметры литейных алюминиевых сплавов

BS/AA	Степень твердости	Проводимость [% IACS]	Удельное электрическое сопротивление [мкОм·м]
LM4/319.0	M, TF (F, T6)	32	0.054
LM5/514.0	M (F)	31	0.056
LM6	M	37	0.047
LM9/A360.0	M, TE (F, T10)	38	0.045
LM10/520.0	TB (T4)	20	0.086
LM12/222.0	M (F)	33	0.052

Табл. 4.14 (окончание)

BS/AA	Степень твердости	Проводимость [% IACS]	Удельное электрическое сопротивление [мкОм·м]
LM13/A332.0	TE, TF (T10, T6)	29	0.059
LM16/355.0	TB, TF (T4, T6)	36	0.048
LM18/443.0	M (F)	37	0.047
LM20/413.0	M (F)	37	0.047
LM21/319.0	M (F)	32	0.054
LM24/380.0	M (F)	24	0.072
LM25/356.0	M, TE (F, T10)	39	0.044
LM30/390.0	M, TS (F, T)	20	0.086

Примечание:

Закалки даны в обозначениях британского стандарта с указанием в круглых скобках соответствующих им американских эквивалентов.

Табл. 4.15. Электрические параметры ковких алюминиевых сплавов

AA	Степень твердости	Проводимость [% IACS]	Удельное сопротивление [мкОм·м]
Нелегированный алюминий			
1050	O	61	0.028
1060	O	62	0.028
	H18	61	0.028
1100	O	59	0.029
	H18	57	0.030
1200	O, H4, H8	60	0.029
Сплавы алюминий—медь			
2011	T3, T4(TD, TB)	39	0.044
	T8(TH)	45	0.038
2014	O	50	0.034
	T3, T4(TD, TB)	34	0.051
	T6(TF)	40	0.043
2024	O	50	0.034
	T3, T4(TD, TB)	30	0.057
	T6(TF)	37	0.046
	T8(TH)	39	0.044
2219	O	44	0.039
	T31, T37(TD)	28	0.062
	T351	—	—
	T62, T81(TF, TH)	30	0.057
2618	T851	—	—
	T61(TF)	37	0.047
Сплавы алюминий—марганец			
3003	O	47	0.037
	H12	42	0.041
	H14	41	0.042
	H18	40	0.043
3004	Все	42	0.041
3105	Все	45	0.038

Табл. 4.15 (окончание)

AA	Степень твердости	Проводимость [% IACS]	Удельное сопротивление [мкОм·м]
Сплавы алюминий—магний			
5005	O, H38	52	0.033
5050	O, H38	50	0.034
5052	O, H38	35	0.049
5083	Все	29	0.060
5086	Все	31	0.056
5154	Все	32	0.054
5252	Все	35	0.049
5454	Все	34	0.051
5456	Все	29	0.060
Сплавы алюминий—магний—кремний			
6061	O	47	0.037
	T4(TB)	40	0.043
	T6(TF)	43	0.040
6063	O	58	0.030
	T6(TF)	53	0.033
6151	O	54	0.032
	T4(TB)	42	0.041
	T6(TF)	45	0.038
6262	T9	44	0.039
Сплавы алюминий—цинк—магний—медь			
7075	O	43	0.040
	T6(TF)	35	0.049

Примечание:

Степени твердости даны в американских обозначениях, при их отличии от британского стандарта соответствующие обозначения указаны в круглых скобках.

Технологические свойства

В Табл. 4.16 даны основные обозначения для обрабатываемости на станках и свариваемости алюминиевых сплавов.

Табл. 4.16. Технологические свойства алюминиевых сплавов

AA	Степень твердости AA (BS)	Обрабатываемость на станках	Свариваемость
Нелегированный алюминий			
1050	O, H12	P	G
	H14...16	F	G
1060	O, H12	P	G
	H14...18	F	G
1100	O, H12	P	G
	H14...18	F	G
1200	O, H12	P	G
	H14...18	F	G

Табл. 4.16 (продолжение)

AA	Степень твердости AA (BS)	Обрабатываемость на станках	Свариваемость
Сплавы алюминий—медь			
2011	T3,4,8(TD,TE,TH)	VG	No
2014	O	G	F
	T3,4,6(TD,TE,TH)	G/VG	F
2024	T3,4,8(TD,TE,TH)	G/VG	L
2219	T3,8(TD,TH)	G/VG	G
2618	T61(TH)	G/VG	L
Сплавы алюминий—марганец			
3003	O, H12	P	G
	H14...18	F	G
3004	O, H32	F	G
	H34...38	G	G
3105	O, H12	P	G
	H14...18	F	G
Сплавы алюминий—магний			
5005	O, H12	P	G
	H14...18	F	G
5050	O	P	G
	H32...38	F/G	G
5052	O, H32	F	G
	H34...38	G	G
5083	O, H111	F	F
	H323	F	F
5086	O, H32	F	F
	H34...38	G	F
5154	O, H32	F	F
	H34...38	G	F
5252	H24	F	G
	H25...28	G	G
5454	O, H32	F	F
	H34	G	F
5456	O	F	F
	H111,321	F	G
Сплавы алюминий—магний—кремний			
6061	O	F	G
	T4, T6(TB,TF)	G	G
6063	T1, T4(TB)	F	G
	T5, T6(TF)	G	G
6262	T6, T9(TF)	G/VG	G

Табл. 4.16 (окончание)

AA	Степень твердости AA (BS)	Обрабатываемость на станках	Свариваемость
Сплавы алюминий—цинк—магний—медь			
7075	O	F	No
	T6(TF)	G/VG	No

Примечание:

Обрабатываемость на станках: VG — очень хорошая, дающая превосходный конечный вид деталей, G — хорошая, дающая хороший вид деталей, F — неплохая, дающая удовлетворительный конечный вид деталей, P — плохая, детали нуждаются в дополнительной обработке для получения удовлетворительного конечного вида. Свариваемость: G — хорошая, годная для всех технических способов сварки, F — хорошая, годная для большинства технических способов сварки, L — ограниченная свариваемость, No — не рекомендуется для сварки. Степени твердости даны в американских обозначениях, в круглых скобках — эквивалентные им обозначения по британскому стандарту.

Усталостные свойства

Предел усталости, при $50 \cdot 10^6$ циклах, алюминиевых сплавов находится в промежутке 0.3...0.5 от предела прочности на растяжение. Это значение для конкретного сплава зависит от его степени твердости.

Обрабатываемость на станках

См. Технологические свойства.

Механические свойства литейных сплавов

В Табл. 4.17 и 4.18 приведены механические свойства литейных алюминиевых сплавов. Модули упругости для всех сплавов равны примерно 71 ГПа, или $\text{ГН} \cdot \text{м}^{-2}$, за исключением сплавов с высоким процентным содержанием кремния (более 15%), у которых модули составляют 80...88 ГПа, или $\text{ГН} \cdot \text{м}^{-2}$. Чем выше процентное содержание кремния, тем выше модуль упругости сплава.

Табл. 4.17. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов по системе Алюминиевой ассоциации

AA	Процесс	Степень твердости	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]
208.0	S	F(M)	145	97	2.5
	S	T21	185	125	1
242.0	S	T571	220	205	0.5
	S	T77	205	160	2
	P	T571	275	235	1
	P	T61	325	290	0.5

Табл. 4.17 (окончание)

AA	Процесс	Степень твердости	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]
295.0	S	T4(TB)	220	110	8.5
	S	T6(TF)	250	165	5
308.0	P	F(M)	195	110	2
319.0	S	F(M)	185	125	2
	S	T6(TF)	250	165	2
	P	F(M)	235	130	2.5
	P	T6(TF)	280	185	3
355.0	S	T6(TF)	240	175	3
	S	T7	265	250	0.5
	P	T6(TF)	290	190	4
	P	T7	280	210	2
356.0	S	T6(TF)	230	165	3.5
	S	T7	235	210	2
	P	T6(TF)	265	185	5
	P	T7	220	165	6
360.0	D	F(M)	325	170	3
A360.0	D	F(M)	320	165	5
380.0	D	F(M)	330	165	3
413.0	D	F(M)	300	140	2.5
C443.0	S	F(M)	130	55	8

Примечание:

Значения пределов текучести указаны для 0.2% пробного напряжения. Значения степеней твердости даны в американских обозначениях с эквивалентными им обозначениями по британскому стандарту в круглых скобках. S — песочное литье, P — литье в постоянную пресс-форму, D — литье в пресс-форму.

Табл. 4.18. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов по британскому стандарту

BS	Процесс	Степень твердости	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]
LM4	S	M(F)	140	2
	S	TF(T6)	230	—
	C	M(F)	160	2
	C	TF(T6)	280	—
LM5	S	M(F)	140	3
	C	M(F)	170	5
LM6	S	M(F)	160	5
	C	M(F)	190	7
LM9	S	TE(T10)	170	1.5
	S	TF(T6)	240	—
	C	M(F)	190	3
	C	TE(T10)	230	2
	C	TF(T6)	295	—

Табл. 4.18 (окончание)

BS	Процесс	Степень твердости	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]
LM10	S	TB(T4)	280	8
	C	TB(T4)	310	12
LM12	C	M(F)	170	—
LM13	S	TF(T6)	170	—
	S	TF7(T7)	140	—
	C	TE(T10)	210	—
	C	TF(T6)	280	—
	C	TF7	200	—
LM16	S	TB(T4)	170	2
	S	TF(T6)	230	—
	C	TB(T4)	230	3
	C	TF(T6)	280	—
LM18	S	M(F)	120	3
	C	M(F)	140	4
LM20	C	M(F)	190	5
LM21	S	M(F)	150	1
	C	M(F)	170	1
LM24	C	M(F)	180	1.5
LM25	S	M(F)	130	2
	S	TE(T10)	150	1
	S	TB7(T7)	160	2.5
	S	TF(T6)	230	—
	C	M(F)	160	3
	C	TE(T10)	190	2
	C	TB7(T7)	230	5
	C	TF(T6)	280	2
LM30	C	M(F)	150	—

Примечание:

Степени твердости даны в обозначениях британского стандарта с американскими аналогичными обозначениями в круглых скобках. S — песочное литье, C — кожильная отливка, у которой скорость охлаждения выше, чем в песочном литье, например как при литье под давлением.

Механические свойства ковких сплавов

В Табл. 4.19 приведены типичные механические свойства ковких сплавов по системе Алюминиевой ассоциации.

Табл. 4.19. Механические свойства ковких сплавов

AA	Степень твердости	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость [НВ]
Нелегированный алюминий					
1050	O	76	28	—	—
	H14	110	105	—	—
	H18	160	145	—	—
1060	O	69	28	43	19
	H12	83	76	16	23
	H18	130	125	6	35
1100	O	90	34	35	23
	H12	110	105	12	28
	H18	165	150	5	44
1200	O	87	—	30	—
	H12	108	—	8	—
	H18	150	—	4	—
Сплавы алюминий—медь					
2011	T3(TD)	380	295	15*	95
	T8(TH)	405	310	15*	100
2014	O	185	97	18*	45
	T4(TB)	425	290	20*	105
	T6(TF)	485	415	13*	135
2014 плакиро- ванный	O	170	69	21	—
	T4(TB)	420	255	22	—
	T6(TF)	470	415	10	—
2024	O	185	76	20	47
	T3(TD)	485	345	18	120
	T4(TB)	470	325	20	120
2024 плакиро- ванный	O	180	76	20	—
	T4(TB)	440	290	19	—
	T81(TH)	450	415	6	—
2219	O	170	76	18	—
	T42(TB)	360	185	20	—
	T62(TF)	415	290	10	—
	T81(TH)	455	350	10	—
2618	Все	440	370	10	—
Сплавы алюминий—марганец					
3003	O	110	42	30	28
	H12	130	125	10	35
	H18	200	185	4	55
3004	O	180	69	20	45
	H32	215	170	10	52
	H38	285	250	5	77

Табл. 4.19 (продолжение)

AA	Степень твердости	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость [НВ]
3105	O	115	55	24	—
	H12	150	130	7	—
	H18	215	195	3	—
Сплавы алюминий—магний					
5005	O	125	41	25	28
	H12	140	130	10	—
	H18	200	195	4	—
	H34	160	140	8	41
5050	O	145	55	24	36
	H32	170	145	9	46
	H38	220	200	5	63
5083	O	290	145	22*	—
	H112	305	195	16*	—
	H34	345	285	9*	—
5086	O	260	115	22	—
	H32	290	205	12	—
	H34	325	244	10	—
5154	O	240	115	27	—
	H32	270	205	15	67
	H38	330	270	10	80
5252	H25	235	170	11	68
	H28	285	240	5	75
5454	O	250	115	22	62
	H32	275	205	10	73
	H38	370	310	8	—
5456	O	310	160	24*	—
	H111	325	230	18*	—
	H321	350	255	16*	90
Сплавы алюминий—магний—кремний					
6061	O	125	55	25	30
	T4(TB)	240	145	22	65
	T6(TF)	310	275	12	95
6061 плакиро- ванный	O	115	48	25	—
	T4(TB)	230	130	22	—
	T6(TF)	290	255	12	—
6063	O	90	48	25	—
	T4(TB)	170	90	22	—
	T6(TF)	240	215	12	73
6151	T6(TF)	220	195	15	71
6262	T9	400	380	10*	120

Табл. 4.19 (окончание)

АА	Степень твердости	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]	Твердость [НВ]
Сплавы алюминий—цинк—магний—медь					
7075	О	230	105	17	60
	T6(TF)	570	505	11	150
7075 плакиро- ванный	О	220	95	17	—
	T6(TF)	525	460	11	—

Примечание:

* — указывает, что удлинение измерено на образце для испытаний толщиной 12.5 мм. Для всех других сплавов образцы для испытаний имели толщину 1.6 мм. Твердости измерены при нагрузке 500 кг с помощью шара диаметром 10 мм. Степени твердости обозначены соответственно американской системе, отличающиеся британские обозначения даны в круглых скобках.

Тепловые свойства

Температурный коэффициент линейного расширения ковких алюминиевых сплавов имеет тенденцию изменяться примерно от 22 до $24 \cdot 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, для литейных алюминиевых сплавов он в основном ниже, примерно от 18 до $22 \cdot 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Оба значения указаны для температур $20 \dots 100^\circ\text{C}$. Ковкие сплавы имеют при 20°C коэффициент теплопроводности $100 \dots 200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, литейные сплавы — $90 \dots 150 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. В Табл. 4.20 приведены значения этих параметров для некоторых ковких сплавов.

Табл. 4.20. Тепловые свойства ковких алюминиевых сплавов

Сплав	Степень твердости	Температурный коэфф. линейного расширения [$10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]	Коэффициент теплопроводности [$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]
Нелегированный алюминий			
1050	О, Н8	24	230
1060	О, Н18	24	234
1100	О	24	222
	Н18	24	218
1200	О, Н4, Н8	24	226
Сплавы алюминий—медь			
2011	T3, T6(TD, TF)	23	163
2014	T4(TF)	22	142
	T6(TF)	22	159
2024	T3, T4(TD, TB)	23	121
2618	T6(TF)	22	151
3003	О	23	180
	Н18	23	155

Табл. 4.20 (окончание)

Сплав	Степень твердости	Температурный коэфф. линейного расширения [$10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]	Коэффициент теплопроводности [$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]
3105	Все	24	172
Сплавы алюминий—магний			
5005	Все	24	201
5050	Все	24	191
5052	Все	24	137
5083	Все	25	109
5086	Все	24	127
5154	Все	25	138
5454	Все	24	147
5456	Все	24	116
Сплавы алюминий—магний—кремний			
6061	Все	24	156
6063	T4(TB)	24	197
	T6(TF)	24	201
6151	T4(TB)	23	163
	T6(TF)	23	175
Сплавы алюминий—цинк—магний—медь			
7075	T6(TF)	24	130

Примечание:

Степени твердости даны в американской системе, отличающиеся значения по британскому стандарту указаны в круглых скобках.

Свариваемость сплавов

См. Показатели обрабатываемости.

4.5. ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ**Формы материала**

В Табл. 4.21 показаны нормальные произведенные формы ковкого материала согласно спецификации Алюминиевой ассоциации.

Табл. 4.21. Формы ковкого сплава

AA	Тонко-листовой	Толсто-листовой	Подвергнут экструзии			Холодная финишная прямоугольная полоса	Тянутая труба	Поковка
			Прямоугольная полоса	Фасонная	Труба			
Нелегированный алюминий								
1050			*	*	*		*	*
1060			*	*	*		*	

Табл. 4.21 (окончание)

AA	Тонко-листовой	Толсто-листовой	Подвергнут экструзии			Холодная финишная прямоугольная полоса	Тянутая труба	Поковка
			Прямоугольная полоса	Фасонная	Труба			
1100	*	*	*	*	*	*	*	*
1200	*	*	*	*	*	*	*	*
Сплавы алюминий—медь								
2011	*	*		*		*	*	
2014	*	*	*	*	*	*	*	*
2024	*	*	*	*	*	*	*	
2219	*	*	*	*	*	*		*
2618								*
Сплавы алюминий—марганец								
3003	*	*	*	*	*	*	*	*
3004			*	*	*		*	
3105			*					
Сплавы алюминий—магний								
5005			*		*	*		
5050			*		*	*	*	
5052			*		*	*	*	
5083	*	*	*	*	*			*
5086	*	*	*	*	*		*	
5154	*	*	*	*	*	*	*	
5252			*	*				
5454	*	*	*	*	*			*
5456	*	*	*	*	*		*	*
Сплавы алюминий—магний—кремний								
6061	*	*	*	*	*	*	*	*
6063	*	*		*			*	
6151								*
6262	*	*		*		*	*	
Сплавы алюминий—цинк—магний—медь								
7075	*	*	*	*	*	*	*	*
7178			*		*			*

Применение литейных сплавов

В Табл. 4.22 показаны типичные области применения литейных алюминиевых сплавов. Сплавы алюминий—кремний с некоторым количеством меди и/или магния применяются очень широко. Они имеют преимущество перед сплавами алюминий—медь благодаря их лучшим текучести в жидком состоянии и сопротивлению коррозии.

Табл. 4.22. Типичные области применения литейных сплавов

AA/BS		Применение
Сплавы алюминий—медь		
208.0		Песочный литейный сплав основного назначения — для выхлопных патрубков и клапанов станин
213.0		Головки цилиндров автомобилей, мешалки моечных машин
222.0	LM12	Поршни
242.0		Поршни в двигателях с высоким к.п.д.
295.0		Для литья, требующего высокой прочности и сопротивления ударам
Сплавы алюминий—кремний—медь/магний		
308.0		Сплав непрерывного кокильного литья основного назначения
319.0	LM4/21	Сплав основного назначения — для частей двигателей
336.0	LM13	Сплав непрерывного кокильного литья
355.0	LM16	Обладает высокой прочностью и герметичностью под давлением. Станины насосов, кожухи кривошипов, корпуса компрессоров
356.0	LM25	Для сложной формы литья, требующего прочности и пластичности. Кожухи трансмиссий, колеса вагонов, блоки цилиндров, части небортных моторов, лопасти вентиляторов, пневматический режущий инструмент
360.0	LM9	Сплав основного назначения — для литья в пресс-форму. Кожухи инструментов
380.0	LM24	Отлитый в пресс-форму сплав
390.0	LM30	То же
Сплавы алюминий—кремний		
413.0	LM20	Отлитый в пресс-форму сплав, для большого сложного литья с тонкими секциями, например каркасов пишущих машинок
C443.0	LM18	Отлитый в пресс-форму сплав, для отливок, требующих высокого сопротивления коррозии и ударам
Сплавы алюминий—магний		
514.0	LM5	Сплав песочного литья
520.0	LM10	То же

Применение ковких сплавов

В Табл. 4.23 показаны типичные области применения ковких сплавов.

Табл. 4.23. Типичные области применения ковких алюминиевых сплавов

Сплав	Применение
Нелегированный алюминий	
1050	Изготовленные холодным прессованием трубы, химическое оборудование
1060	Химическое оборудование
1100	Тонколистовой обработанный металл, вытянутые в нить пустотелые изделия
1200	Изготовленные холодным прессованием трубы, обработанный тонколистовой металл
Сплавы алюминий—медь	
2011	Изделия с винтовой нарезкой
2014	Авиационные конструкции, рамы для вагонов
2024	Авиационные конструкции, вагонные колеса
2219	Применяется для высокой прочности сварных соединений в конструкциях, работающих при температуре 350°С и выше, например авиационные детали
2618	Части авиационных двигателей
Сплавы алюминий—марганец	
3003	Нерастяжимые сварные соединения, обработанный тонколистовой металл, скобяные изделия, емкости хранилищ, резервуары под давлением, химическое оборудование
3004	Обработанный тонколистовой металл, емкости хранилищ
3105	Скобяные изделия, обработанный тонколистовой металл
Сплавы алюминий—магний	
5005	Электрические проводники, архитектурные детали отделки, в основном нерастяжимые
5050	Скобяные изделия, змеевики труб
5052	Обработанный тонколистовой металл, гидравлические трубы
5083	Резервуары со швами, полученными при сварке давлением, детали морских судов, автомобилей и самолетов
5086	То же
5154	Сварные конструкции, емкости хранилищ, резервуары под давлением
5252	Для отделки автомобилей и приборов
5454	Сварные конструкции, резервуары под давлением, детали для конструкций морских судов
5456	Высокая прочность сварных конструкций. Емкости хранилищ, резервуары под давлением, детали для конструкций морских судов
Сплавы алюминий—магний—кремний	
6061	Хорошее коррозионное сопротивление. Вагоны и морские суда, трубопроводы, арматура
6063	Архитектурные детали (прессованные), трубы, фурнитура
6151	Умеренная прочность, сложная горячая объемная штамповка. Детали автомобилей и других машин
6262	Изделия с винтовой нарезкой
Сплавы алюминий—цинк—магний—медь	
7075	Гидравлическое оборудование, самолетные конструкции
7178	То же

Глава пятая

Медь

5.1. МАТЕРИАЛЫ

Медь

Медь обладает очень высокими электрической и тепловой проводимостями и легко поддается любой горячей или холодной обработке. Чистая медь — очень пластичный и относительно мягкий материал. Обработка деформацией увеличивает ее твердость и предел прочности на растяжение, но уменьшает пластичность. Она имеет большую коррозионную стойкость, обусловленную реакцией на поверхности между металлом и кислородом воздуха, в результате чего получается тонкий защитный окисный слой.

Медь широко применяется в производстве электрических проводов как в виде металла высокой чистоты, так и с очень малыми добавками мышьяка, фосфора, серебра, серы или теллура.

Очень чистая медь получается при электролитическом процессе рафинирования. Она выделяется на катоде электролитической ячейки и поэтому называется катодной медью. Имея чистоту выше 99,99%, применяется главным образом как неочищенный материал для изготовления сплавов, в частности как литейный материал.

Электролитическая, прочная, с высоким уровнем проводимости медь производится из катодной меди, которая расплавляется и разливается в формы квадратного сечения при непрерывной разливке и в любые другие необходимые формы. Она содержит малое количество кислорода, присутствующего в виде окиси меди, которая слабо влияет на ее электрическую проводимость. Полученную таким образом медь не следует нагревать в атмосфере, где она может соединиться с водородом, поскольку водород диффундирует внутрь металла и соединяется с окисью меди, вызывая ее испарение, из-за чего происходит растрескивание.

Отнеупорная, рафинированная, высокой проводимости медь производится из примесной меди в процессе рафинирующего обжига, при котором загрязненная медь плавится в окислитель-

ной атмосфере. Примеси, реагируя с кислородом, дают шлак, который затем удаляют. В результате очистки медь имеет показатели прочности и электрической проводимости почти такие же, как и электролитическая медь.

Бескислородная, высокой проводимости медь может быть изготовлена из катодной меди путем расплавления ее и разлива в формы квадратного сечения в атмосфере, где нет кислорода. Такая медь может применяться в атмосфере с водородом. Другой метод производства бескислородной меди состоит в добавке к ней фосфора во время рафинирования. Эффект малого количества фосфора приводит к очень заметному падению электрической проводимости меди. Эта медь известна как раскисленная фосфором медь, она дает качественные сварные швы в отличие от других типов меди. Добавка малого количества мышьяка в медь увеличивает ее предел прочности на растяжение, но значительно уменьшает электрическую проводимость. Она называется мышьяковистой медью.

(См. Коды составов меди, Коды отпуска, Составы литейных сплавов, Составы ковких сплавов, Отжиг, Параметры ползучести, Твердость, Механические свойства литейных сплавов, Механические свойства ковких сплавов, Паяемость, Тепловые свойства, Свариваемость, Формовка, Применение литейных сплавов, Применение ковких сплавов.)

Медные сплавы

В Табл. 5.1 приведены основные группы медных сплавов и входящие в них сплавляемые элементы. Равновесные диаграммы составов бинарных сплавов, рассматриваемых здесь, показаны на Рис. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 и 5.6. Многим сплавам внутри групп сплавов даны особые наименования.

Табл. 5.1. Основные группы медных сплавов

Наименование группы	Основные сплавляемые элементы	Равновесная диаграмма
Латуни	Медь, цинк	Рис. 5.1
Бронзы	Медь, олово	Рис. 5.2
Фосфористые бронзы	Медь, олово, фосфор	—
Пушечные бронзы*	Медь, олово, цинк	—
Алюминиевые бронзы	Медь, алюминий	Рис. 5.3
Бериллиевые бронзы	Медь, бериллий	Рис. 5.4
Кремнистые бронзы	Медь, кремний	Рис. 5.5
Медно-никелевые сплавы	Медь, никель	Рис. 5.6
Нейзильберы	Медь, никель, цинк	—

* В США эти сплавы в основном называют оловянными латунями.

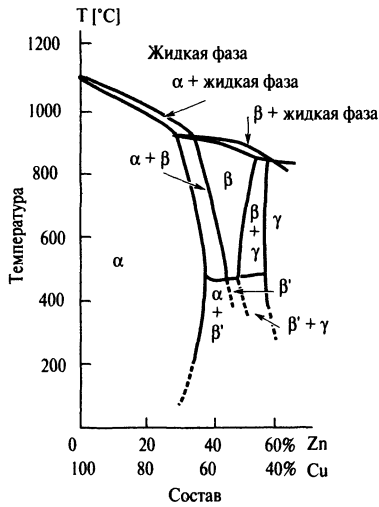


Рис. 5.1. Равновесная диаграмма медь—цинк

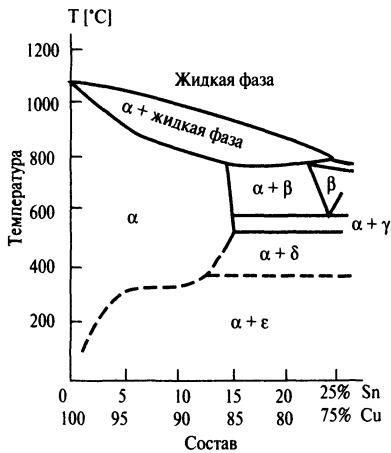


Рис. 5.2. Равновесная диаграмма медь—олово

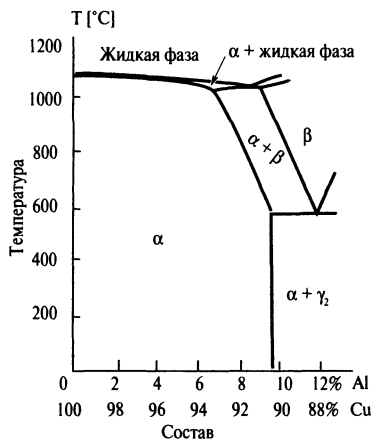


Рис. 5.3. Равновесная диаграмма медь—алюминий

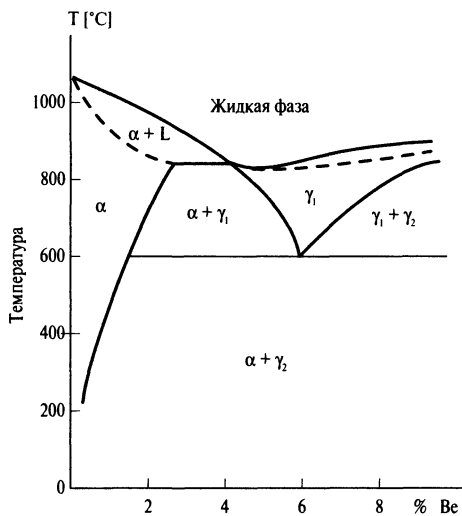


Рис. 5.4. Равновесная диаграмма медь—бериллий

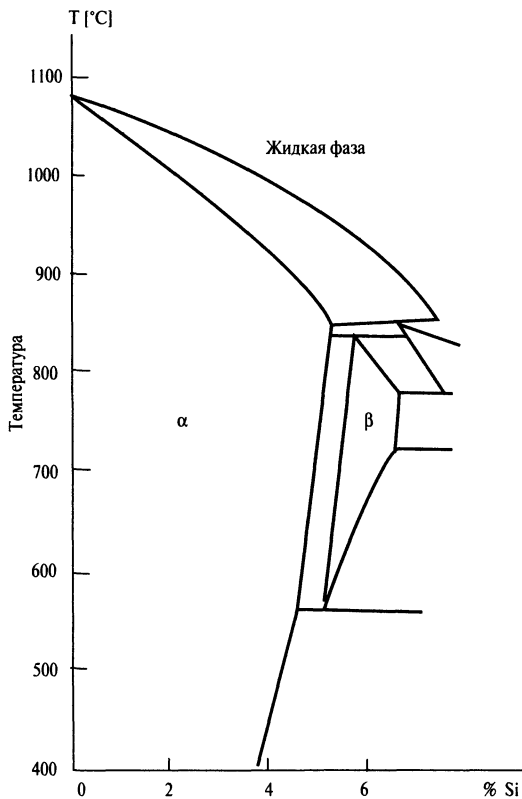


Рис. 5.5. Равновесная диаграмма медь—кремний

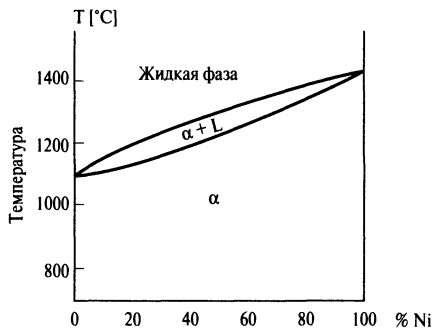


Рис. 5.6. Равновесная диаграмма медь—никель

Латуни

Латуни — это сплавы медь—цинк, содержащие примерно 43% цинка. Латуни с содержанием цинка меньше 35% затвердевают, как простые α -фазы латуни. Эти латуни имеют высокую пластичность и могут легко обрабатываться в холодном состоянии. Латунь с содержанием 15% цинка известна как золоченая латунь, с содержанием цинка 30% — как патронная латунь или латунь 70/30. При содержании цинка между 35 и 45% латуни затвердевают из смеси двух фаз. Эти латуни легче поддаются горячей обработке, но труднее — холодной. Они известны как α — β -фазы, или дуплексные латуни. Название мунц-металл дано латуни с содержанием 40% цинка. Добавка свинца к мунц-металлу значительно улучшает его обрабатываемость на станках. Латуни пригодны в обеих формах — литейной и ковкой.

(См. Коды составов, Коды отпуска сплавов, Составы литейных сплавов, Составы ковких сплавов, Отжиг, Параметры ползучести, Твердость, Механические свойства литейных сплавов, Механические свойства ковких сплавов, Паяемость, Тепловые свойства, Свариваемость, Формовка, Применение литейных сплавов, Применение ковких сплавов.)

Оловянные бронзы

Структура сплава меди с 10%-ным содержанием олова, что встречается при нормальном охлаждении из жидкого состояния, является простой α -структурой, такой фазой, которая дает пластичный материал. Более высокое процентное содержание олова в сплаве приводит к существенному наличию δ -фазы. Получается хрупкая интерметаллическая композиция. α -Бронзы с содержанием олова выше 8% могут обрабатываться в холодном состоянии, давая хорошие механические свойства. Высокое содержание олова, примерно 10% или выше, делает бронзу совершенно неподдающейся обработке, но такие сплавы используются для литья.

Добавка в оловянную бронзу примерно 0.4% фосфора дает сплав, называемый фосфорной бронзой. Термин «пушечный металл» применяется для оловянных бронз, когда присутствует также цинк. Свинец, добавленный к пушечному металлу, дает свинцовый пушечный металл с хорошими механическими свойствами.

Бронзы пригодны в обеих формах — литейной и ковкой.

(См. Коды составов, Коды для отпуска сплавов, Составы литейных сплавов, Составы ковких сплавов, Отжиг, Параметры ползучести, Твердость, Механические свойства литейных сплавов, Механические свойства ковких сплавов, Паяемость, Тепловые свойства, Свариваемость, Формовка, Применение литейных сплавов, Применение ковких сплавов.)

Алюминиевые бронзы

Сплавы алюминий—медь с содержанием алюминия около 9% дают простую α -фазу алюминиевых бронз. Эти сплавы могут легко обрабатываться в холодном состоянии, в частности, если они имеют меньше 7% алюминия. Дуплекс, α — β -сплавы содержат от 9 до 10% алюминия и большей частью применяются для литья. Литейные алюминиевые бронзы и многие ковкие алюминиевые бронзы содержат также железо и некоторое количество никеля и марганца.

Алюминиевые бронзы пригодны для обеих форм — литейной и ковкой.

(См. Коды составов, Коды для отпуска сплавов, Составы литейных сплавов, Составы ковких сплавов, Отжиг, Закалка и отпуск, Параметры ползучести, Твердость, Механические свойства литейных сплавов, Механические свойства ковких сплавов, Паяемость, Тепловые свойства, Свариваемость, Формовка, Применение литейных сплавов, Применение ковких сплавов.)

Бериллиевые бронзы

Это две группы бериллиевых бронз: одна с содержанием бериллия около 0.4% и другая с содержанием его от 1.7 до 2.0%. Обычно присутствует в них также кобальт. Сплавы имеют высокую прочность, но более дорогие.

(См. Коды составов, Коды отпуска сплавов, Составы ковких сплавов, Отжиг, Дисперсионное твердение, Параметры ползучести, Твердость, Механические свойства ковких сплавов, Паяемость, Тепловые свойства, Свариваемость, Формовка, Применение ковких сплавов.)

Кремнистые бронзы

Кремнистые бронзы — это сплавы медь—кремний, содержащие в основном от 1 до 4% кремния и дающие простую α -фазу структуры. Сплавы имеют высокое сопротивление коррозии, очень хорошую свариваемость, могут быть получены литьем и горячей или холодной обработкой.

(См. Коды составов, Коды отпуска сплавов, Составы ковких сплавов, Отжиг, Параметры ползучести, Механические свойства ковких сплавов, Паяемость, Тепловые свойства, Свариваемость, Формовка, Применение ковких сплавов.)

Медно-никелевые сплавы

Медь и никель полностью растворимы в каждом из обоих состояний — жидком и твердом. Они таким образом формируются в

простую структуру α -фазы по всему диапазону составов от 0 до 100% и могут обрабатываться в холодном или горячем состоянии во всем диапазоне составов. Сплавы имеют высокий предел растяжения и высокую пластичность и обладают хорошим сопротивлением коррозии.

Если к сплаву добавлен цинк, то результирующий сплав, называемый нейзильбером, имеет серебристый цвет. Эти сплавы существуют в диапазоне составов от 8 до 18% никеля и от 17 до 27% цинка. Они обладают хорошей формемостью и сопротивлением коррозии. Сплавы имеют в основном простую структуру α -фазы.

Оба сплава, медно-никелевый и нейзильбер, производят большей частью в ковкой форме, хотя выпускается и литейный нейзильбер.

(См. Коды составов, Коды отпуска составов, Составы литейных сплавов, Составы ковких сплавов, Отжиг, Параметры ползучести, Твердость, Механические свойства литейных сплавов, Механические свойства ковких сплавов, Паяемость, Тепловые свойства, Свариваемость, Формовка, Применение литейных сплавов, Применение ковких сплавов.)

5.2. КОДЫ И СОСТАВЫ СПЛАВОВ

Системы кодирования составов

Обычно используемая американская система, разработанная Ассоциацией содействия развитию промышленности медных сплавов (CDA), приведена в Табл. 5.2. В коде применяется буква С, расположенная перед тремя цифрами. Первая указывает группу сплавов, а две другие — сплавы внутри группы. Обозначения от С1XX до С7XX употребляют для ковких сплавов, а С8XX и С9XX — для литейных сплавов. Часто в ссылки букву С не включают, используя только три цифры.

В системе британских стандартов (BS) ковкая медь и медные сплавы специфицированы двумя буквами (в виде исключения одной), стоящими перед тремя цифрами. Буквы указывают группу сплава, а цифры — сплав внутри этой группы. В Табл. 5.3 приведены буквы этой системы кодов. Для определения литейных сплавов употребляются буквы, находящиеся при цифре (Табл. 5.4).

Табл. 5.2. Коды меди и ее сплавов по системе Ассоциации содействия развитию промышленности медных сплавов (CDA)

Код CDA	Сплавляемая группа элементов
Ковкие сплавы	
C1XX	Медь с минимальной чистотой 99.3% Cu, сплавы с высоким содержанием меди между 96 и 99.3%
C2XX	Сплавы медь—цинк, т. е. латуни

Табл. 5.2 (окончание)

Код CDA	Сплавляемая группа элементов
C3XX	Сплавы медь—цинк—свинец, т. е. свинцовые латуни
C4XX	Сплавы медь—цинк—олово, т. е. оловянные латуни
C5XX	Сплавы медь—олово, т. е. бронзы/фосфорные бронзы
C6XX	Сплавы медь—алюминий, т. е. алюминиевые бронзы, сплавы медь—кремний, т. е. кремнистые бронзы, и разнообразные сплавы медь—цинк
C7XX	Сплавы медь—никель, т. е. медно-никелевые, сплавы медь—никель—цинк, т. е. нейзильберы
Литейные сплавы	
C8XX	Литейные меди, сплавы с высоким содержанием меди, латуни различных типов, сплавы марганец—бронза, сплавы медь—цинк—кремний
C9XX	Литейные сплавы медь—олово, сплавы медь—олово—свинец, сплавы медь—олово—никель, сплавы медь—алюминий—железо, сплавы медь—никель—железо, сплавы медь—никель—цинк

Табл. 5.3. Коды ковкой меди и ее сплавов по британскому стандарту

Код BS	Сплавляемая группа элементов
C	Медь и сплавы с низким содержанием меди
CA	Сплавы медь—алюминий, т. е. алюминиевые бронзы
CB	Сплавы медь—бериллий, т. е. бериллиевые бронзы
CN	Сплавы медь—никель, т. е. медно-никелевые сплавы
CS	Сплавы медь—кремний, т. е. кремнистые бронзы
CZ	Сплавы медь—цинк, т. е. латуни
NS	Сплавы медь—цинк—никель, т. е. нейзильберы
PB	Сплавы медь—олово—фосфор, т. е. фосфорные бронзы

Табл. 5.4. Коды литейной меди и ее сплавов по британскому стандарту

Код BS	Слав
AB1, AB2, AB3	Алюминиевые бронзы
CMA1	Медь—марганец—алюминий
CN1	Медь—никель—хром
CN2	Медь—никель—ниобий
CT1	Оловянная бронза для основных назначений
CT2	Оловянная бронза с никелем
DCB1, DCB3	Латунь для кокильного литья
G1	Адмиралтейская пушечная бронза (80—10—2)
G3, G3-TF	Никелевая пушечная бронза
HCC1	Медь высокой проводимости
HTB1, HTB3	Латунь с высоким пределом растяжения
LB1	Свинцовая бронза (79—9—0—15)*
LB2	Свинцовая бронза (80—10—0—10)
LB4	Свинцовая бронза (85—5—0—10)
LB5	Свинцовая бронза (75—5—0—20)

Табл. 5.4 (окончание)

Код BS	Сплав
LG1	Свинцовая пушечная бронза (83—3—9—5)
LG2	Свинцовая пушечная бронза (83—3—9—5)
LG4	Свинцовая пушечная бронза (85—5—5—5)
LPB1	Свинцово-фосфорная бронза (87—7—3—3)
PB1, PB4	Фосфорная бронза для подшипников
PB2	Фосфорная бронза для механизмов
PCB1	Латунь для литья под давлением в форму
SCB1, SCB3	Латунь для основного назначения
SCB4	Судостроительная латунь для песочного литья
SCB6	Качественно паяемая латунь

*В оригинале допущена неточность.

Системы кодирования твердости сплавов

Американское общество металлургов имеет свыше сотни обозначений степени твердости для медных сплавов. Лишь немногие из них совпадают с обозначениями британских стандартов. В Табл. 5.5 показаны основные обозначения обеих систем и их взаимоотношения.

Табл. 5.5. Коды степеней твердости сплавов по системе Американского общества по испытанию материалов (ASTM) и британскому стандарту (BS)

BS		ASTM	
Код	Степень твердости	Код	Степень твердости
O	Отожжен	O10...O82	Отожжен для создания определенных свойств, например:
		O50	слегка отожжен
		O70	полностью размягчающий отжиг
		OS005...	Отожжен для получения определенного размера зерна, например:
		OS200	
		OS005	
OS200	средний размер зерна 0.200 мм		
H	Холодная обработка для затвердевания, например:	H00...H14	Холодная обработка до твердости, например:
		H00	одна восьмая твердости
1/4 H	четверть твердости	H01	четверть твердости
1/2 H	половина твердости	H02	половина твердости
		H03	три четверти твердости
H	твердый	H04	твердый
EH	особо твердый	H06	особо твердый
SH	упругая твердость	H08	упругая твердость

Табл. 5.5 (продолжение)

BS		ASTM	
Код	Степень твердости	Код	Степень твердости
ESH	особо упругая твердость	H10	особая упругость
		H12	специальная упругость
		H13	ультраупругость
		H14	сверхупругость
		H50...H86	Холодная обработка в зависимости от специфики процесса, например:
		H50	подвергнут экструзии и вытяжке
		HR01...HR50	Холодная обработка и снято напряжение, например:
		HR01	H01 и снято напряжение
		HT04...HT08	Холодная обработка и последующее упрочнение, например:
		HT04	H04 и последующая термическая обработка
M	Только изготовлен	M01...M45	Только изготовлен, например:
		M01	песочное литье
		M02	центробежное литье
		M20	горячекатаный
		M30	горячепрессованный
W	Обработка на твердый раствор	TB00	Термическая обработка на твердый раствор
W(xH)	Обработка на твердый раствор и холодная обработка до степени твердости, например:	TD00...TD04	Обработка на твердый раствор и обработка до степени твердости, например:
		TD00	TB00 к $1/8$ твердости
W($1/4$ H)	$1/4$ твердости	TD01	TB00 к $1/4$ твердости
W($1/2$ H)	$1/2$ твердости	TD02	TB00 к $1/2$ твердости
		TD03	TB00 к $3/4$ твердости
W(H)	полностью твердый	TD04	TB00 полностью твердый
WP	Обработка твердого раствора и дисперсионное затвердевание	TF00	TB00 и дисперсионное затвердевание
W(xH)P	Обработка на твердый раствор, холодная обработка и дисперсионное затвердевание	TL00...TL04	Обработка холодного раствора, холодная обработка и дисперсионное затвердевание
		TL00	TF00 холодная обработка к $1/8$ твердости
W($1/4$ H)P	холодная обработка к $1/4$ твердости	TL01	TF00 холодная обработка к $1/4$ твердости
W($1/2$ H)P	холодная обработка к $1/2$ твердости	TL02	TF00 холодная обработка к $1/2$ твердости
W(H)P	холодная обработка к полной твердости	TL04	TF00 холодная обработка к полной твердости

Табл. 5.5 (окончание)

BS		ASTM	
Код	Степень твердости	Код	Степень твердости
W(H)P	холодная обработка к полной твердости	TR01...TR04	TL и снято напряжение
		TR01	TL01 и снято напряжение
		TR02	TL02 и снято напряжение
		TR04	TL04 и снято напряжение
		TH01...TH04	TD и дисперсионное затвердевание
		TH01	TD01 и дисперсионное затвердевание
		TH02	TD02 и дисперсионное затвердевание
		TH03	TD03 и дисперсионное затвердевание
		TH04	TD04 и дисперсионное затвердевание
		TM00...TM08	Упрочнен прокаткой до изменения степени твердости
Wm	Упрочнен прокаткой	TQ00...TQ75	Закалка, упрочняющая степень твердости, например:
		TQ00	упрочнен закалкой
		TQ50	упрочнен закалкой и отпущен отжигом
		TQ75	прервано упрочнение закалкой
		Отпуски сваренных труб	
		WH00...WH01	Сваренный и вытянутый
		WM00...WM50	Сваренный из Hxx полос
		W050	Сварен и слегка отожен
WR00...WR01	WM00/01 вытянутый и снято напряжение		

Составы литейных сплавов

В Табл. 5.6 даны наиболее часто применяемые составы по британскому стандарту (BS), а в Табл. 5.7 — литейные сплавы по классификации Ассоциации содействия развитию промышленности медных сплавов (CDA). Там, где есть обычное наименование сплава, оно дается в добавление к BS или CDA коду. В британских стандартах литейные сплавы сгруппированы в три категории:

Группа А: сплавы для обычного применения и предпочтительно для основных назначений.

Группа В: особого назначения сплавы, от которых требуются определенные свойства.

Группа С: сплавы ограниченного производства.

Эти категории сплавов указаны в таблице британских стандартов для таких сплавов.

Табл. 5.6. Составы литейных сплавов по британскому стандарту

Наименование	Код BS	Группа	Номинальный состав %]				
Медь			Cu				
Высокой проводимости	HCC1	B	>99.9				
Латуни			Cu	Sn	Zn	Другие элементы	
Песочного литья	SCB1	A	70...77	1—3	rem	2...5 Pb	
Песочного литья	SCB3	A	63...66	—	rem	1...3 Pb	
Песочного литья судостроительная	SCB4	C	60...63	1—1.5	rem	—	
Песочной отливки паяемая	SCB6	A	83...88	—	rem	0.05...0.2 As	
Кокильного литья	DCB1	A	59...62	—	rem	0.25...0.5 Al	
Кокильного литья судостроительная	DCB3	A	58...62	—	rem	0.5...2.5 Pb 0.2...0.8 Al	
Отлитая под давлением	PCB1	A	57...60	—	rem	0.5...2.5 Pb	
С высоким пределом растяжения	HTB1	B	>57.0	—	rem	0.7...2.0 Fe 0.1...3.0 Mn 0.5...2.5 Al	
С высоким пределом растяжения	HTB3	B	>55.0	—	rem	1.0 Ni 1.5...4.0 Mn 1.5...3.25 Fe 3.0...6.0 Al	
Бронзы			Cu	Sn	Другие элементы		
Оловянная	CT1	B	90	10	0.05 P		
Фосфорная	PB1	B	89	10...11	0.6...1.0 P		
Фосфорная	PB2	B	88	11...13	0.25...0.60 P		
Фосфорная	PB4	A	89	>9.7	>0.5 P		
Свинцово- фосфорная	LPB1	A	87	7.5	3 Pb, >0.4 P, 1.0 Ni		
Свинцовая (76—9—0—15)	LB1	C	76	9	15 Pb, 0.50 Sb		
Свинцовая (80—10—0—10)	LB2	A	80	10	10 Pb, 0.50 Sb		
Свинцовая (85—5—0—10)	LB4	A	85	5	10 Pb, 0.50 Sb		
Свинцовая (75—5—0—20)	LB5	C	75	5	20 Pb, 0.50 Sb		
Пушечные бронзы			Cu	Sn	Zn	Pb	Другие элементы
Адмиралтейская	G1	C	88	10	2	—	—
Никелевая	G3	C	86	7	2	0.3	5.5 Ni
Свинцовая (83—3—9—5)	LG1	B	83	3	9	5	—
Свинцовая (85—5—5—5)	LG2	A	85	5	5	5	—

Табл. 5.6 (окончание)

Наименование	Код BS	Группа	Номинальный состав [%]				
			Cu	Sn	Zn	Pb	Другие элементы
Пушечные бронзы			Cu	Sn	Zn	Pb	Другие элементы
Свинцовая (87—7—3—3)	LG4	A	87	7	3	3	—
Алюминиевые бронзы			Cu	Al	Fe	Ni	Mn
Алюминиевая	AB1	B	88	9.5	2.5	—	—
Алюминиевая	AB2	B	80	9.5	5	5	—
Cu—Mn—Al	CMA1	B	73	9	3	3	13
Нейзильберы			Cu	Ni	Fe	Mn	Nb
Cu—Ni—Cr	CN1	C	67	31	0.7	0.8	—
Cu—Ni—Nb	CN2	C	66	30	1.2	1.3	1.3

Примечание:

гет — остаток. Для уяснения символов группы см. текст, предшествующий этой таблице.

Табл. 5.7. Составы литейных сплавов по системе Ассоциации действия развитию промышленности медных сплавов

Наименование	CDA	Номинальный состав [%]					
		Cu	Co	Ni	Другие элементы		
Медь		Cu			Другие элементы		
	C801	>99.95			Ag		
	C811	>99.70			Ag		
Сплавы с высоким содержанием меди		Cu	Co	Ni	Другие элементы		
	C817	>94.25	0.9	0.9	1 Ag, Be		
	C821	97.7	0.9	0.9	0.5 Be		
Латуни		Cu	Sn	Zn	Pb	Другие элементы	
Свинцовые бронзы		Cu	Sn	Zn	Pb	Другие элементы	
Свинцовая красная	C836	85	5	5	5	—	
Свинцовая красная	C838	83	4	7	6	—	
Свинцовая полукрасная	C844	81	3	9	7	—	
Свинцовая полукрасная	C848	76	3	15	6	—	
Свинцовая желтая	C852	72	1	24	3	—	
Свинцовая желтая	C854	67	1	29	3	—	
Свинцовая судостроительная	C857	63	1	35	1	0.3 Al	
Свинцовая желтая	C858	58	1	40	1	—	
Марганцевые бронзы		Cu	Zn	Fe	Al	Mn	Pb
Марганцевая	C862	64	26	3	4	3	—
Марганцевая	C863	63	25	3	6	3	—
Оловянные бронзы		Cu	Sn	Zn	Pb	Ni	
Оловянная	C903	88	8	4	—	—	
Оловянная	C905	88	10	2	—	—	
Оловянная	C911	85	14	1	—	—	
Клапанная бронза	C922	88	6	4.5	1.5	—	

Табл. 5.7 (окончание)

Наименование	CDA	Номинальный состав [%]				
		Cu	Sn	Zn	Pb	Ni
Оловянные бронзы		Cu	Sn	Zn	Pb	Ni
Свинцово-оловянная	C923	87	8	4	1	—
С высоким содержанием свинца оловянная	C932	83	7	3	7	—
С высоким содержанием свинца оловянная	C937	80	10	—	10	—
С высоким содержанием свинца оловянная	C938	78	7	—	15	—
С высоким содержанием свинца оловянная	C943	70	5	—	25	—
Никель-оловянная	C947	88	5	2	—	5
Алюминиевые бронзы		Cu	Al	Fe	Ni	Mn
Алюминиевая	C952	88	9	3	—	—
Алюминиевая	C953	89	10	1	—	—
Никель-алюминиевая	C955	81	11	4	4	—
Никель-алюминиевая	C958	81	9	4	5	1
Кремнистые бронзы/латуни		Cu	Zn	Si		
Кремнистая латунь	C875	82	14	4		
Нейзильберы		Cu	Sn	Zn	Pb	Ni
Нейзильбер	C973	56	2	20	10	12
Нейзильбер	C976	64	4	8	4	20
Нейзильбер	C978	66	5	2	2	25

Составы ковких сплавов

В Табл. 5.8 и 5.9 показаны составы обычно применяемых ковких сплавов по британскому стандарту и по классификации Ассоциации содействия развитию промышленности медных сплавов.

Табл. 5.8. Составы ковких сплавов по британскому стандарту

Наименование	BS	Номинальный состав [%]	
		Cu	Другие элементы
Медь		Cu	Другие элементы
Электролитическая высокой проводимости	C101	>99.90	O ₂
Бескислородная высокой проводимости	C103	>99.95	—
Высокой прочности мышьяковистая	C105	>99.20	As
Фосфористая раскисленная	C106	>99.85	P
Фосфористая раскисленная мышьяковистая	C107	>99.20	As, P
Бескислородная высокой проводимости	C110	>99.99	—

Табл. 5.8 (продолжение)

Наименование	BS	Номинальный состав [%]						
		Сплавы с высоким содержанием Cu			Другие элементы			
Медь—кадмий	C108	Cu			Другие элементы			
		99.0			1.0 Cd			
Латуни		Cu	Sn	Zn	Al	Fe	Mn	Другие элементы
Золоченый металл (90—10 бронза)	CZ101	90	—	10	—	—	—	—
Красная (85—15 бронза)	CZ102	85	—	15	—	—	—	—
Мышьяковистая (70—30)	CZ105	72	—	28	—	—	—	As
Глубокого волочения (70—30)	CZ106	70	—	30	—	—	—	—
Основная или обычная	CZ108	63	—	37	—	—	—	—
Мунц-металл (60—40 бронза)	CZ109	60	—	40	—	—	—	—
Алюминиевая	CZ110	76	—	22	2	—	—	As
Адмиралтейская	CZ111	70	1	29	—	—	—	As
Судостроительная	CZ112	62	1	37	—	—	—	—
С высоким пределом растяжения	CZ114	58	0.6	37	<1.5	0.85	1.5	Pb
Паяемая, с высоким пределом растяжения	CZ115	57.5	0.9	38	<0.2	0.85	1.5	Pb
С высоким пределом растяжения	CZ116	66	—	27	4.5	0.75	1.5	—
Свинцовая (для изготовления небольших шестеренок и других часовых деталей)	CZ118	64	—	35	—	—	—	Pb
Свинцовый мунц-металл	CZ123	60	—	39	—	—	—	Pb
Фосфорные бронзы		Cu		Sn	P			
Фосфорная, 4%	PB101	96		4.0	0.02...0.40			
Фосфорная, 5%	PB102	95		5.0	0.02...0.40			
Фосфорная, 7%	PB103	93		7.0	0.02...0.40			
Алюминиевые бронзы		Cu	Al	Fe	Ni	Mn		
Алюминиевая, 7%	CA102	93	7	—	—	—		
Алюминиевая, 9%	CA103	87	9	4.0+Ni	—	—		
Алюминиевая, 10%	CA104	80	10	5	5	—		
Алюминиевая (сплав E)	CA105	81	9	2.0	5.5	1.2		
Алюминиевая (сплав D)	CA106	90	7.2	2.7	—	—		
Кремнистые бронзы		Cu		Si	Mn			
Кремнистая медь	CS101	96		2.7...3.5	0.75...1.25			
Бериллиевые бронзы		Cu		Be	Co+Ni			
Бериллиевая медь	CB101	98		1.7	0.20...0.60			
Медно-никелевые сплавы		Cu		Ni	Fe	Mn		
Медь—никель (95—5)	CN101	93		5.5	1.2	0.5		
Медь—никель (90—10)	CN102	87.5		10.5	1.5	0.75		
Медь—никель (80—20)	CN104	80		20	—	0.30		
Медь—никель (75—25)	CN105	75		25	—	0.2		
Медь—никель (70—30)	CN107	68		31	—	1.0		
Специальный сплав (70—30 Cu—Ni)	CN108	66		30	2.0	2.0		

Табл. 5.8 (окончание)

Наименование	BS	Номинальный состав [%]				
		Cu	Ni	Zn	Pb	Mn
Нейзильберы						
Свинцово-никелевая латунь	NS101	45	10	43	1...2	0.2...0.5
Нейзильбер, 10%	NS103	63	10	27	0.05...0.3	—
Нейзильбер, 12%	NS104	63	12	24	0.05...0.3	—
Нейзильбер, 15%	NS105	63	15	21	0.05...0.5	—
Нейзильбер, 18%	NS106	63	18	19	0.05...0.5	—
Нейзильбер, 18%	NS107	55	18	27	0.05...0.35	—
Свинцово-никелевая латунь, 20%	NS111	60	10	28	1...2	0.1...0.5

Табл. 5.9. Составы ковких сплавов по системе Ассоциации содействия развитию промышленности медных сплавов

Наименование	CDA	Номинальный состав [%]				
		Cu	Другие элементы			
Медь						
Бескислородная электронная	C101	99.99	—			
Бескислородная	C102	99.95	—			
Электролитическая высокой прочности	C110	99.90	0.04 O ₂ , 0.01 Cd			
Фосфорная раскисленная	C122	99.90	0.02 P			
Фосфорная, раскисленная мышьяком	C142	99.68	0.3 As, 0.02 P			
Раскисленная кадмием	C143	99.90	0.1 Cd			
Сплавы с высоким содержанием Cu		Cu	Другие элементы			
Кадмиевая медь	C162	99.0	1.0 Cd			
Хромистая медь	C182	99.1	0.9 Cr			
Латуни		Cu	Sn	Zn	Al	Другие элементы
Золоченый металл	C210	95	—	5	—	—
Коммерческая бронза, 90%	C220	90	—	10	—	—
Красная	C230	85	—	15	—	—
Патронная, 70%	C260	70	—	30	—	—
Желтая	C268-0	65	—	35	—	—
Муниц-металл	C280	60	—	40	—	—
Автоматная	C360	61.5	—	35.5	—	3 Pb
Автоматный муниц-металл	C370	60	—	39	—	1 Pb
Ингибированная адмиралтейская	C443-5	71	1	28	—	—
Судоостроительная	C464-0	60	0.75	39.25	—	—
Марганцовистая	C674	58.5	1	36.5	1.2	2.8 Mn
Алюминиевая, мышьяковистая	C687	77.5	—	20.4	2.0	0.1 As

Табл. 5.9 (окончание)

Наименование	CDA	Номинальный состав [%]				
		Cu	Sn	P		
Фосфорные бронзы		Cu	Sn	P		
Фосфорная, 1.25% E	C505	98.75	1.25	След		
Фосфорная, 5% A	C510	95.0	5.0	След		
Фосфорная	C511	95.6	4.2	0.2		
Фосфорная, 8%	C521	92.0	8.0	След		
Фосфорная, 10%	C524	90.0	10.0	След		
Алюминиевые бронзы		Cu	Al	Fe	Ni	Другие элементы
Алюминиевая, 5%	C608	95	5	—	—	—
Алюминиевая	C613	92.65	7.0	—	—	0.35 Sn
Алюминиевая, D	C614	91	7	2	—	—
Алюминиевая	C623	87	10	3	—	—
Алюминиевая	C630	82	10	3	5	—
Кремнистые бронзы		Cu		Si		
С низким содержанием кремния, B	C651	98.5		1.5		
С высоким содержанием кремния, A	C655	97.0		3.0		
Бериллиевые бронзы		Cu	Be	Co		
Бериллиевая медь	C172	97.9	1.9	0.2		
Медно-никелевые сплавы		Cu	Ni	Fe	Другие элементы	
Медь—никель, 10%	C706	88.7	10	1.3	—	
Медь—никель, 20%	C710	79	21	—	—	
Медь—никель, 30%	C715	70	30	—	—	
Медь—никель	C717	67.8	31	0.7	0.5 Be	
Медь—никель	C725	88.2	9.5	—	2.3 Sn	
Нейзильберы		Cu	Ni	Zn	Другие элементы	
Нейзильбер (65—10)	C745	65	10	25	—	
Нейзильбер (65—18)	C752	65	18	17	—	
Нейзильбер (65—15)	C754	65	15	20	—	
Нейзильбер (65—12)	C757	65	12	23	—	
Нейзильбер (55—18)	C770	55	18	27	—	
Свинцовый нейзильбер (65—8—2)	C782	65	8	25	2 Pb	

5.3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Отжиг

В Табл. 5.10 показаны типичные температуры отжига и снятия напряжения ковкой меди и медных сплавов. Длительность времени выдержки при температуре отжига зависит от суммарной предварительной холодной обработки, но обычно составляет от 1 до 2 ч. Для снятия напряжения, как правило, требуется 1 ч выдержки при заданной температуре.

Табл. 5.10. Типичные температуры отжига и снятия напряжения

Тип сплава	Температура отжига [°C]	Температура снятия напряжения [°C]
Медь		
Бескислородная	425...650	—
Высокой прочности	260...650	—
Раскисленная фосфором	325...650	—
Латуни		
Золоченый металл	425...800	190
Красная	425...725	230
Патронная	425...750	260
Желтая или обыкновенная	425...700	260
Муниц-металл	425...600	205
Автоматная	425...600	245
Фосфорные бронзы		
Фосфорная	475...675	205
Алюминиевые бронзы		
Алюминиевая, 5%, 7%	550...650	—
Алюминиевая, 10%	600...650	—
Алюминиевая, сложных сплавов	>650	345
Кремнистые бронзы		
Кремнистая	475...700	345
Бериллиевые бронзы		
Бериллиевая медь	775...925	—
Медно-никелевые сплавы		
Медно-никелевый сплав	600...825	260
Нейзильберы		
Нейзильбер	600...825	260

Преципитатное упрочнение

Небольшое число медных сплавов затвердевают и имеют прочность, возрастающую в результате образования твердого раствора вследствие выделения вторичных фаз (преципитатов). Это сплавы, которые содержат малое количество бериллия, хрома или циркония, а также никеля в комбинации с кремнием или фосфором. В Табл. 5.11 показаны такие типичные примеры.

Табл. 5.11. Образование твердого раствора и обработка старением

Сплав	Температура твердого раствора [°C]	Обработка старением	
		Температура [°C]	Время [ч]
Бериллиевая медь	780...800	300...350	1...3
Хромистая медь	980...1000	425...500	2...4
Никель-оловянистая литейная бронза	775...800	580...620	5

Закалка и отпуск

Комплексные алюминиевые бронзы, содержащие более 10% алюминия и других элементов, можно закалить примерно от 850°C и затем отпустить за 2 ч при 600...650°C. В результате произойдет уменьшение их твердости и увеличение пластичности по сравнению со значениями в закаленном состоянии.

Снятие напряжения

См. Отжиг.

5.4. СВОЙСТВА СПЛАВОВ

Пайка твердым припоем

См. Паяемость.

Параметры ползучести

Максимальная температура, ограничивающая применение меди и ее сплавов, определяется большей частью значениями ползучести, если она становится слишком резко выраженной. В Табл. 5.12 приведены максимальные допустимые температуры применения медных сплавов.

Табл. 5.12. Максимальные допустимые температуры применения медных сплавов

Сплавы	Максимальная допустимая температура [°C]
Меди	120
Латуни литейные	150

Табл. 5.12 (окончание)

Сплавы	Максимальная допустимая температура [°C]
Латуни ковкие	180...200
Золоченые металлы литейные	180
Алюминиевые бронзы литейные	250...400
Алюминиевые бронзы ковкие	300...350
Марганцевые бронзы	200
Фосфорные бронзы ковкие	150
Кремнистые бронзы	180
Медно-никелевые сплавы ковкие	200
Нейзильберы ковкие	200
Нейзильберы литейные	150

Плотность

Плотность меди составляет $8.96 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ при 20°C . Меди и сплавы с высоким содержанием меди имеют плотность около $8.90 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, плотность латуни изменяется примерно от 8.40 до $8.90 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, например у золоченого металла она равна $8.86 \cdot 10^3$, у желтой бронзы — $8.47 \cdot 10^3$, красной латуни — $8.75 \cdot 10^3$, муниц-металла — $8.39 \cdot 10^3$, судостроительной латуни — $8.41 \cdot 10^3$, фосфорной бронзы — от 8.80 до $8.90 \cdot 10^3$, алюминиевой бронзы — около $7.60 \cdot 10^3$, медно-никелевых сплавов — $8.94 \cdot 10^3$ и у нейзильберов — около $8.70 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Электрическая проводимость

Медь и сплавы с ее высоким содержанием имеют электрическую проводимость порядка 100% по Международному стандарту на отожженную медную проволоку (IACS), несвинцовистые латуни — между 55 и 25% (ниже процентное содержание цинка — выше проводимость, выше твердость закалки — ниже проводимость), свинцовые латуни — от 30 до 25%, фосфорные бронзы — от 17 до 13%, алюминиевые бронзы — от 15 до 7%, кремнистые бронзы — около 7%, медно-никелевые сплавы — от 2 до 4% и нейзильберы — от 10 до 5%.

(См. таблицы Механические свойства литейных сплавов и Механические свойства ковких сплавов для значений удельных проводимостей.)

Усталостные свойства

Предел усталости меди и ее сплавов при 10^7 циклов находится в промежутке 0.4...0.6 от значения предела прочности на растяжение.

Твердость

Твердость и другие механические свойства ковкого сплава зависят от его закалки. В Табл. 5.13 приведены значения твердости для различных условий закалки, которые являются типичными для ряда марок медных сплавов. Поскольку эти значения зависят от формы материала, данные указаны только для тонколистового материала или материала в виде полосы.

Табл. 5.13. Значения твердости для различных условий закалки материалов

Сплав	Значения твердости HV для закалок			
	M	O	1/2H	H
			H02	H04
Медь	50	60	80	90
Латуни	—	80	110	130
Фосфорные бронзы	—	85	160	180
Медно-никелевые сплавы	—	90	—	—
Нейзильберы	—	100	125	160
	W	W(8H)	W(H)	W(P) W(1/2 H)P W(H)P
	TB00	TD02	TD04	TF00 TL02 TL04
Бериллиевые бронзы	110	210	250	380 400 420

Ударные свойства

При 20°C отожженная, высокой прочности медь имеет величину Изода, равную 47 Дж, а отожженная раскисленная медь — 61 Дж. Твердая тянутая 4%-ная фосфорная бронза имеет эту величину в 62 Дж, 7%-ная отожженная алюминиевая бронза — 32 Дж, отожженный 80/20 медно-никелевый сплав — 104 Дж. Отожженная судостроительная латунь имеет величину Шарпи, равную 82 Дж, отожженная кремнистая бронза — 90 Дж, отожженный 70/30 медно-никелевый сплав — 90 Дж, отожженный нейзильбер (30% Ni) — 108 Дж.

Обработываемость на станках

По механической обработываемости медь и ее сплавы можно разделить на три группы.

Группа 1: сплавы, обладающие хорошей обработываемостью (класс обработываемости на станках 70%).

Группа 2: механически легко обработываемые (класс обработываемости на станках 30...70%).

Группа 3: тяжело поддающиеся механической обработке (класс обработываемости на станках ниже 30%).

В системе британских стандартов механически хорошо обработываемая латунь CZ121 принята за класс 100%, в системе Ассоциации содействия развитию промышленности медных

сплавов эту функцию выполняет латунь С360. Классы обрабатываемости на станках указанных выше групп даны в таблицах относительных механических свойств материалов.

(См. Механические свойства литейных сплавов и Механические свойства ковких сплавов.)

Механические свойства литейных сплавов

В Табл. 5.14 и 5.15 приведены типичные свойства обычно применяемых литейной меди и ее сплавов. Модуль растяжения меди и сплавов с высоким содержанием меди равен 120 ГПа, у литейных латуней — 90...100 ГПа, литейных оловянных бронз — 70...80 ГПа, литейных пушечных металлов — 80 ГПа, литейных алюминиевых бронз — 100...120 ГПа (увеличивается с увеличением содержания легирующего элемента), у медно-никелевых сплавов — 120...150 ГПа (увеличивается с увеличением содержания никеля) и у литейных нейзильберов — 120...137 ГПа (увеличивается с увеличением содержания никеля).

Табл. 5.14. Свойства литейных сплавов по британскому стандарту

Наименование	BS код	IACS [%]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]	Группа обрабатываемости на станках
Медь						
Высокой проводимости	HCC1	90	30	155	25	—
Латуни						
Песочного литья	SCB1	18	80...110	170...200	18...40	1
Песочного литья	SCB3	20	70...110	190...220	11...30	1
Песочного литья, судостроительная	SCB4	18	70...110	250...310	18...40	2
Песочного литья, паяемая	SCB6	25	80...110	170...190	18...40	3
Кокильного литья	DCB1	18	90...120	280...370	23...50	2
Кокильного литья, судостроительная	DCB3	18	90...120	300...340	13...40	1
Отлитая под давлением	PCB1	18	90...120	280...370	25...40	1
С высоким пределом растяжения	HTB1	22	170...280	470...570	18...35	2
С высоким пределом растяжения	HTB3	8	400...470	740...810	11...18	2
Бронзы						
Оловянная	CT1	9	130...160	230...310	9...20	3
Фосфорная	PB1	9	130...230	220...420	3...22	3

Табл. 5.14 (окончание)

Наименование	BS код	IACS [%]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]	Группа обрабатываемости на станках
Фосфорная	PB2	9	130...200	220...370	5...15	3
Фосфорная	PB4	9	100...230	190...400	3...20	3
Свинцово-фосфорная	LPB1	11	80...200	190...360	3...18	1
Свинцовая 76—9—0—15	LB1	11	80...190	170...310	4...10	1
Свинцовая 80—10—0—10	LB2	10	80...220	190...390	5...15	1
Свинцовая 85—5—0—10	LB4	13	60...170	160...310	7...20	1
Свинцовая 75—5—0—20	LB5	14	60...160	160...270	5...16	1
Пушечные бронзы						
Адмиралтейская	G1	15	130...170	250...340	5...25	2
Никелевая	G3	12	140...160	280...340	16...25	2
Свинцовая адмиралтейская 83—3—9—5	LG1	16	80...140	180...340	11...35	1
Свинцовая адмиралтейская 85—5—5—5	LG2	15	130...160	250...370	13...25	1
Свинцовая адмиралтейская 87—7—3—3	LG4	13	130...160	250...370	13...30	1
Алюминиевые бронзы						
Алюминиевая	AB1	13	170...200	500...590	18...40	3
Алюминиевая	AB2	8	250...300	640...700	13...20	3
Cu—Mn—Al	CMA1	3	280...340	650...730	18...35	3
Нейзильберы						
Cu—Ni—Cr	CNI	—	—	200...270	10...25	3
Cu—Ni—Nb	CN2	—	—	340...450	15...25	3

Примечание:

Предел текучести получен при 0.1% пробного напряжения, за исключением бронзы АВ1, где он был равен 0.2% пробного напряжения. Для объяснения группы обрабатываемости см. раздел Обрабатываемость на станках.

Табл. 5.15. Свойства литейных сплавов по системе Ассоциации
содействия развитию промышленности медных сплавов

Наименование	CDA	IACS [%]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]	Группа обрабатываемости на станках
Медь						
	C801, C811	—	62	170	40	3
Сплавы с высоким содержанием меди						
	C817, C821	—	470	630	8	2
Латуни						
Свинцовая красная	C836	15	105	240	32	1
Свинцовая красная	C838	—	85...115	205...260	15...27	1
Свинцовая полукрасная	C844	18	90...115	200...270	18...30	1
Свинцовая полукрасная	C848	17	105	260	37	1
Свинцовая желтая	C852	15...22	85...95	240...275	25...40	1
Свинцовая желтая	C854	18...25	75...105	205...260	20...35	1
Свинцовая судостроительная	C857	20...26	95...140	275...310	15...25	1
Свинцовая желтая	C858	—	210	380	15	1
Марганцевые бронзы						
Марганцевая	C862	7...8	315...345	625...670	19...25	2
Марганцевая	C863	9	570	820	18	3
Оловянные бронзы						
Оловянная	C903	12...13	125...150	275...345	25...50	2
Оловянная	C905	10...12	140...160	275...345	24...43	2
Оловянная	C911	—	170	240	2	3
Выпаренная бронза/ клапанная бронза	C922	15	110	280	45	2
Свинцовая оловянная	C923	10...12	110...165	225...295	18...30	2
С высоким содержанием свинца оловянная	C932	—	115...145	205...260	12...20	1
С высоким содержанием свинца оловянная	C937	10	125	270	30	1
С высоким содержанием свинца оловянная	C938	—	95...140	170...225	10...18	1
С высоким содержанием свинца оловянная	C943	—	75...105	160...205	7...16	1
Никель-оловянная	C947	—	140...345	310...515	5...25	2

Табл. 5.15 (окончание)

Наименование	CDA	IACS [%]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]	Группа обрабатываемости на станках
Алюминиевые бронзы						
Алюминиевая	C952	12...14	170...205	480...600	22...38	2
Алюминиевая	C953	12...15	205...380	480...655	12...35	2
Никель-алюминиевая	C955	8...10	275...550	620...855	5...20	2
Никель-алюминиевая	C958		260	655	25	2
Кремнистые бронзы/латуни						
Кремнистая латунь	C875	6	210	470	17	2
Нейзильберы						
Нейзильбер	C973	6	105...140	205...275	10...25	1
Нейзильбер	C976	5	180	325	22	1
Нейзильбер	C978	4...5	180...275	345...450	15...25	2

Примечание:

Предел текучести получен при 0.1% пробного напряжения. Для объяснения группы обрабатываемости см. Обрабатываемость на станках.

Механические свойства ковких сплавов

В Табл. 5.16 и 5.17 приведены типичные свойства ковких медных сплавов. Модуль растяжения меди и сплавов с высоким содержанием меди равен 120 ГПа, для латуней — 100...120 ГПа (убывает с увеличением содержания цинка и возрастает с увеличением параметров холодной обработки), для фосфорных бронз — 100...120 ГПа (убывает с увеличением содержания олова и с увеличением параметров холодной обработки), у алюминиевых бронз он составляет 114...140 ГПа (убывает с увеличением содержания алюминия и с увеличением параметров холодной обработки), у медно-никелевых сплавов — 125...155 ГПа (возрастает с увеличением содержания никеля и убывает с увеличением параметров холодной обработки), у нейзильберов — 120...137 ГПа (возрастает с увеличением содержания никеля и с увеличением параметров холодной обработки), у бериллиевых бронз — 120...125 ГПа, если была обработка твердого раствора, и 135...140 ГПа, когда сплав был дисперсионно упрочнен.

Табл. 5.16. Свойства ковких медных сплавов по британскому стандарту

Наименование	BS	IACS [%]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]	Группа обрабатываемости на станке
Медь						
Электролитическая, высокой прочности, с высокой проводимостью	C101	101	60...325	220...385	4...55	3
Бескислородная, с высокой проводимостью	C103	101	60...325	220...385	4...60	3
Высокой прочности, мышьяковистая	C105	95...89	60...325	220...385	4...55	—
Фосфорная раскисленная	C106	90...70	60...325	220...385	4...60	3
Фосфорная раскисленная мышьяком	C107	50...35	60...325	220...385	4...60	3
Бескислородная, высокой проводимости	C110	101	60...325	220...385	4...60	3
Сплавы с высоким содержанием меди						
Медь—кадмий	C108	75...90	60...460	280...700	4...45	3
Латуни						
Золоченый металл (90—10)	CZ101	40...44	77...385	265...450	4...50	3
Красная (85—15)	CZ102	32...37	90...400	290...460	10...60	3
Мышьяковая (70—30)	CZ105	28	120	330	—	3
Глубокой вытяжки (70—30)	CZ106	22...28	110...450	325...540	15...70	3
Основная или обычная	CZ108	22...26	130...180	340...550	5...55	2
Муниц-металл (60—40)	CZ109	24...28	160...450	380...500	10...30	1
Алюминиевая	CZ110	23	125...155	340...390	50...60	3
Адмиралтейская	CZ111	25	110...420	320...520	10...60	3
Судостроительная	CZ112	26	140...340	370...525	20...40	2
С высоким пределом растяжения	CZ114	21	210	480	20	2
Паяемая, с высоким пределом растяжения	CZ115	18	210	480	20	1
С высоким пределом растяжения	CZ116	12	300	570	18	2
Свинцовая (часовая латунь)	CZ118	26	108...325	325...525	7...50	1
Свинцовый муниц-металл	CZ123	20...27	160...400	380...520	5...40	2
Фосфорные бронзы						
Фосфорная, 4%	PB101	15...25	110...460	320...590	8...55	3

Табл. 5.16 (окончание)

Наименование	BS	IACS [%]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]	Группа обрабатываемости на станке
Фосфорная, 5%	PB102	12...18	120...520	340...700	8...60	3
Фосфорная, 7%	PB103	10...15	140...570	370...650	14...65	3
Алюминиевые бронзы						
Алюминиевая, 7%	CA102	15...18	90...230	420...540	10...50	3
Алюминиевая, 9%	CA103	12...14	260...340	570...650	22...30	3
Алюминиевая, 10%	CA104	7...9	430...600	850...900	15...25	3
Сплав E	CA105	7...9	260...400	660...770	17...22	3
Сплав D	CA106	4...15	230...270	540...670	22...40	3
Кремнистые бронзы						
Кремнистая медь	CS101	6...7	75...305	360...540	35...78	2
Бериллиевые бронзы						
Медь—бериллий (твердая обработка) + дисперсионное упрочнение	CB101	6...78	185...190	480...500	45...50	3
Медно-никелевые сплавы						
Медь—никель (95—5)	CN101	12	115...310	390...430	9...43	3
Медь—никель (90—10)	CN102	9	120...380	320...420	12...42	3
Медь—никель (80—20)	CN104	6	120...390	340...450	15...40	3
Медь—никель (75—25)	CN105	5	140...390	360...450	15...40	3
Медь—никель (70—30)	CN107	5	150...430	390...500	16...42	3
Особый сплав медь—никель (70—30)	CN108	5	170...570	420...660	7...42	3
Нейзильберы						
Свинцово-никелевая латунь	NS101	9	180...280	460...590	10...30	1
Нейзильбер, 10%	NS103	8	100...600	350...690	5...65	3
Нейзильбер, 12%	NS104	8	110...600	350...710	4...60	3
Нейзильбер, 15%	NS105	7	130...630	360...710	4...55	3
Нейзильбер, 18%	NS106	6	120...630	390...710	5...52	3
Нейзильбер, 18%	NS107	6	160...710	390...790	3...48	3
Свинцово-никелевая латунь, 20%	NS111	7	—	—	—	—

Примечание:

Предел текучести получен при 0.1% пробного напряжения, за исключением CZ105, CZ108, CZ109, CZ111 и CB101, где процент был равен 0.2. Диапазон характеристик определяется состоянием материала. Нижние значения предела текучести и предела прочности на растяжение соответствуют состоянию мягкого отжига, верхние значения — упрочненному состоянию. Верхние значения удлинения соответствуют мягкому состоянию, нижние — упрочненному состоянию. Для объяснения групп обрабатываемости см. Обрабатываемость на станках.

Табл. 5.17. Свойства ковких медных сплавов по системе Ассоциации содействия развитию промышленности медных сплавов

Наименование	CDA	IACS [%]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]	Группа обрабатываемости на станке
Медь						
Бескислородная электронная	C101	101	70...365	220...455	4...55	3
Бескислородная	C102	101	70...365	220...455	4...55	3
Электролитическая, высокой прочности	C110	101	70...365	220...455	4...55	3
Фосфорная, раскисленная	C122	—	70...345	220...380	8...45	3
Фосфорная, раскисленная мышьяком	C142	—	70...345	220...380	8...45	3
Раскисленная кадмием	C143	—	75...385	220...400	1...42	3
Сплавы с высоким содержанием меди						
Кадмиевая медь	C162	—	50...475	240...690	1...57	3
Хромистая медь	C182	—	97...530	235...590	4...40	3
Латуни						
Золоченый металл	C210	—	70...400	235...440	4...45	3
Коммерческая бронза, 90%	C220	—	70...427	255...500	3...50	3
Красная	C230	—	70...435	270...725	3...55	2
Для втулок подшипников, 70%	C260	28	75...450	300...900	3...66	2
Желтая	C268-0	27	100...430	320...880	3...65	2
Муниц-металл	C280	—	145...380	375...510	10...52	2
Автоматная	C360	—	125...310	340...470	18...53	1
Автоматный муницип-металл	C370	—	140...415	370...550	6...40	1
Ингибированная адмиралтейская	C443-5	—	125...150	330...380	60...65	2
Судостроительная	C464-7	—	170...455	380...610	17...50	2
Марганцевая	C674	—	235...380	480...630	20...28	3
Алюминиевая, мышьяковая	C687	—	186	414	55	2
Фосфорные бронзы						
Фосфорная, 1.25% E	C505	48	100...345	275...545	4...48	3
Фосфорная, 5% A	C510	—	130...550	325...965	2...64	3
Фосфорная	C511	—	345...550	320...710	2...48	3
Фосфорная, 8%	C521	—	165...550	380...965	24...80	3
Фосфорная, 10%	C524	—	193	455...1014	3...70	3

Табл. 5.17 (окончание)

Наименование	CDA	IACS [%]	Предел текучести [МПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Удлинение [%]	Группа обрабатываемости на станке
Алюминиевые бронзы						
Алюминиевая, 5%	C608	—	186	414	55	3
Алюминиевая	C613	—	210...400	480...585	35...42	2
Алюминиевая, D	C614	—	230...415	526...615	32...45	3
Алюминиевая	C623	—	240...360	520...675	22...35	2
Алюминиевая	C630	—	345...520	620...815	15...20	2
Кремнистые бронзы						
С низким содержанием кремния, В	C651	12	100...475	275...655	11...55	2
С высоким содержанием кремния, А	C655	—	145...485	385...1000	21...70	2
Бериллиевые бронзы						
Бериллиевая медь	C172	22...30	170...1345	470...1460	1...48	3
Медно-никелевые сплавы						
Медь—никель, 10%	C706	—	110...390	300...415	10...42	3
Медь—никель, 20%	C710	—	90...585	340...655	3...40	3
Медь—никель, 30%	C715	—	140...480	370...520	15...45	3
Медь—никель	C717	—	210...1240	480...1380	4...40	3
Медь—никель	C725	—	150...745	380...830	1...35	3
Нейзильберы						
Нейзильбер (65—10)	C745	—	125...525	340...895	1...50	3
Нейзильбер (65—18)	C752	—	170...620	385...710	3...45	3
Нейзильбер (65—15)	C754	—	125...545	365...635	2...43	3
Нейзильбер (65—12)	C757	—	125...545	360...640	2...48	3
Нейзильбер (55—18)	C770	6	185...620	415...1000	2...40	2
Свинцовый нейзильбер (65—8—2)	C782	—	160...525	365...630	3...40	2

Примечание:

Предел текучести получен при 0.1% пробного напряжения. Диапазоны значений соответствуют диапазонам отпуска от мягкого до твердого состояний. Нижние значения предела текучести и предела прочности на растяжение соответствуют мягкому состоянию материала, условию отжига, а верхние значения — упрочненному состоянию. Наоборот, нижние значения удлинения соответствуют упрочненному состоянию, а верхние — мягкому. Для объяснения групп обрабатываемости см. Обрабатываемость на станках.

Паяемость

В Табл. 5.18 указана относительная эффективность пайки твердым припоем меди и ее сплавов.

Табл. 5.18. Пайка медных сплавов твердым и мягким припоями

Сплав	Мягкий припой	Твердый припой	Сплав	Мягкий припой	Твердый припой
Медь			Свинцово-фосфорная	VG	G
Бескислородная	VG	VG	Алюминиевые бронзы		
Раскисленная	VG	VG	Алюминиевая	P	P
Высокой прочности	VG	G	Кремнистые бронзы		
Латуни			Кремнистая	VG	VG
Красная	VG	VG	Бериллиевые бронзы		
Желтая	VG	VG	Бериллиевая медь	G	G
Свинцовая	VG	G	Медно-никелевые сплавы		
Адмиралтейская	VG	VG	Медь—никель	VG	VG
Бронзы			Нейзильберы		
Фосфорная	VG	VG	Нейзильбер	VG	VG

Примечание:

VG — очень хорошая, G — хорошая, P — плохая.

Тепловые свойства

В Табл. 5.19 приведены типичные значения температурного коэффициента линейного расширения и теплопроводности меди и ее сплавов при 20°C.

Табл. 5.19. Тепловые свойства меди и ее сплавов

Материал	Теплопроводность [Вт·м ⁻¹ ·°C ⁻¹]	Температурный коэфф. линейного расширения [10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹]
Ковкие сплавы		
Медь	390	17
Сплав с высоким содержанием меди	340...370	18
Золоченый металл	190	18
Красная латунь	160	19
Латунь для втулок подшипников	120	20
Желтая (обычная) латунь	120	21
Мунц-металл	125	21
Судостроительная латунь	113	21
Высокой прочности на растяжение латунь	88	20
Фосфорная бронза, 7%	60	19
Алюминиевая бронза, 7%	70	17
Алюминиевая бронза, 9%	42	17

Табл. 5.19 (окончание)

Материал	Теплопроводность [Вт·м ⁻¹ ·°С ⁻¹]	Температурный коэфф. линейного расширения [10 ⁻⁶ ·°С ⁻¹]
Алюминиевая бронза, 10%	46	17
Алюминиевая бронза, сплав D	65	16
Медь—бериллий	120	18
Медь—никель (95—10)	67	17
Медь—никель (90—10)	50	17
Медь—никель (80—20)	38	17
Медь—никель (70—30)	29	16
Свинцовая 10%-ная никелевая латунь	46	19
Нейзильбер, 10%	37	16
Нейзильбер, 12%	30	16
Нейзильбер, 15%	27	16
Литейные сплавы		
Медь высокой проводимости	370	18
Латунь	80...90	19...21
Пушечный металл	50	18
Свинцовый пушечный металл	50...80	18
Оловянная бронза	50	18
Фосфорная бронза	47	18...19
Алюминиевая бронза	42...60	16...17

Свариваемость

В Табл. 5.20 приведены относительные значения свариваемости меди и ее сплавов.

Табл. 5.20. Свариваемость меди и ее сплавов

Сплав	Дуговая сварка			Контактная сварка			
	Электродом в среде защитного газа	Под флюсом	Металлическим электродом	Точечная	Роликовая	Рельефная	Стыковая
Медь							
Бескислородная	G	No	No	No	No	No	G
Раскисленная	VG	No	No	No	No	No	G
Высокой прочности	P	No	No	No	No	No	G
Латуни							
Красная	G	No	No	P	No	P	G
Желтая	P	No	No	G	No	G	G
Свинцовая	No	No	No	No	No	No	P
Адмиралтейская	G	No	P	G	P	G	G

Табл. 5.20 (окончание)

Сплав	Дуговая сварка			Контактная сварка			
	Электродом в среде защитного газа	Под флюсом	Металлическим электродом	Точечная	Роликовая	Рельефная	Стыковая
Бронзы							
Фосфорная	G	No	P	G	P	G	VG
Свинцово-фосфорная бронза	No	No	No	No	No	No	P
Алюминиевые бронзы							
Алюминиевая	VG	No	G	G	G	G	G
Кремнистые бронзы							
Кремнистая	VG	No	P	VG	VG	VG	VG
Медно-никелевые сплавы							
Медь—никель, 10%	VG	No	G	G	G	G	VG
Медь—никель, 30%	P	No	P	VG	VG	VG	VG
Нейзильберы	P	No	No	G	P	G	G

Примечание:

VG — очень хорошая, G — хорошая, P — неважная, ограниченного применения, No — не следует применять.

5.5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕДИ И СПЛАВОВ**Формы материала**

В Табл. 5.21 и 5.22 показаны формы ковкой меди и сплавов, которые обычно используются.

Табл. 5.21. Формы меди и сплавов по британскому стандарту

Наименование	BS	Формы					
		Круг	Тонкий лист	Толстый лист	Труба	Проволока	Пруток
Медь							
Электролитическая, прочная, высокой проводимости	C101	*	*	*	*	*	*
Бескислородная, высокой проводимости	C103	*	*	*	*	*	*
Прочная мышьяковая	C105		*	*			
Фосфорная раскисленная	C106	*	*	*	*	*	*
Фосфорная, раскисленная мышьяком	C107		*	*	*		
Бескислородная, высокой проводимости	C110	*	*				*

Табл. 5.21 (продолжение)

Наименование	BS	Формы					
		Круг	Тонкий лист	Толстый лист	Труба	Проволока	Пруток
Сплавы с высоким содержанием меди							
Медь—кадмий	C108	*	*	*		*	
Латуни							
Золоченый металл (90—10)	CZ101		*	*		*	*
Красная (85—15)	CZ102		*	*	*	*	*
Мышьяковая (70—30)	CZ105		*	*	*	*	*
Глубокого волочения (70—30)	CZ106		*	*	*	*	*
Основная или обычная	CZ108		*	*	*	*	*
Муниц-металл (60—40)	CZ109		*	*	*	*	*
Алюминиевая	CZ110		*	*	*		
Адмиралтейская	CZ111				*		
Судостроительная	CZ112		*	*	*		*
Высокой прочности на растяжение	CZ114						*
Высокой прочности на растяжение, паяемая	CZ115						*
Высокой прочности на растяжение	CZ116						*
Свинцовая (для шестеренок и других часовых деталей)	CZ118		*	*			*
Свинцовый муницип-металл	CZ123		*	*			*
Фосфорные бронзы							
Фосфорная, 4%	PB101	*	*	*		*	
Фосфорная, 5%	PB102	*	*	*		*	
Фосфорная, 7%	PB103		*	*		*	*
Алюминиевые бронзы							
Алюминиевая, 7%	CA102			*	*	*	
Алюминиевая, 9%	CA103	*					
Алюминиевая, 10%	CA104	*					
Сплав E	CA105	*	*	*			
Сплав D	CA106	*		*			
Кремнистые бронзы							
Кремнистая медь	CS101		*	*	*	*	*
Бериллиевые бронзы							
Медь—бериллий	CB101		*	*	*	*	*
Медно-никелевые сплавы							
Медь—никель (95—5)	CN101		*	*	*		
Медь—никель (90—10)	CN102		*	*	*		

Табл. 5.21 (окончание)

Наименование	BS	Формы					
		Круг	Тонкий лист	Толстый лист	Труба	Проволока	Пруток
Медь—никель (80—20)	CN104		*	*			
Медь—никель (75—25)	CN105		*				
Медь—никель (70—30)	CN107		*	*	*		
Специальный сплав медь—никель (70—30)	CN108				*		
Нейзильберы							
Свинцово-никелевый	NS101						*
Нейзильбер, 10%	NS103		*	*		*	
Нейзильбер, 12%	NS104		*	*		*	
Нейзильбер, 15%	NS105		*	*		*	
Нейзильбер, 18%	NS106		*	*		*	
Нейзильбер, 18%	NS107		*	*		*	
Свинцовый нейзильбер, 20%	NS111	*					*

Табл. 5.22. Формы меди и сплавов по системе Ассоциации содействия развитию промышленности медных сплавов

Наименование	CDA	Формы					
		Пластина	Пруток	Проволока	Трубка	Труба	Профильная
Медь							
Бескислородная электронная	C101	*	*	*	*	*	*
Бескислородная	C102	*	*	*	*	*	*
Электролитическая прочная	C110	*	*	*	*	*	*
Фосфорная раскисленная	C122	*	*		*	*	
Фосфорная, раскисленная мышьяком	C142	*		*	*		
Раскисленная кадмием	C143	*					
Сплавы с высоким содержанием меди							
Кадмиевая медь	C162	*	*	*			
Хромистая медь	C182	*	*	*	*		*
Латуни							
Золоченый металл	C210	*		*			
Коммерческая бронза, 90%	C220	*	*	*	*		
Красная	C230	*		*	*	*	*
Подшипниковая, 70%	C260	*	*	*	*		
Желтая	C268-0	*	*	*			
Муниц-металл	C280	*	*				
Автоматная	C360	*	*				*

Табл. 5.22 (окончание)

Наименование	CDA	Формы					
		Пластина	Пруток	Проволока	Трубка	Труба	Профильная
Автоматный муноц-металл	C370				*		
Ингибированная адмиралтейская	C443-5	*		*	*		
Судостроительная	C464-7	*	*		*		*
Марганцевая	C674	*	*				
Алюминиевая, мышьяковая	C687				*		
Фосфорные бронзы							
Фосфорная, 1.25% E	C505	*		*			
Фосфорная, 5% A	C510	*	*	*	*		
Фосфорная	C511	*					
Фосфорная, 8%	C521	*	*	*			
Фосфорная, 10%	C524	*	*	*			
Алюминиевые бронзы							
Алюминиевая, 5%	C608				*		
Алюминиевая	C613	*	*		*	*	*
Алюминиевая, D	C614	*	*	*	*	*	*
Алюминиевая	C623	*	*				
Алюминиевая	C630	*	*				
Кремнистые бронзы							
С низким содержанием кремния, B	C651		*	*	*		
С высоким содержанием кремния, A	C655	*	*	*	*		
Бериллиевые бронзы							
Бериллиевая медь	C172	*	*	*	*	*	*
Медно-никелевые сплавы							
Медь—никель, 10%	C706	*				*	
Медь—никель, 20%	C710	*		*	*		
Медь—никель, 30%	C715	*	*		*		
Медь—никель	C717	*	*	*			
Медь—никель	C725	*	*	*	*		
Нейзильберы							
Нейзильбер (65—10)	C745	*		*			
Нейзильбер (65—18)	C752	*	*	*			
Нейзильбер (65—15)	C754	*					
Нейзильбер (65—12)	C757	*		*			
Нейзильбер (55—18)	C770	*	*	*			
Свинцовый нейзильбер (65—8—2)	C782	*					

Применение литейных сплавов

В Табл. 5.23 дано типичное применение литейной меди и сплавов по британскому стандарту и по системе Ассоциации содействия развитию промышленности медных сплавов

Табл. 5.23. Области применения литейных меди и медных сплавов

Наименование	BS/CDA	Литейные	Применение
Медь			
Высокой проводимости	HCC1	S, C	Электрические компоненты
	C801	S, C, T	То же
	C811	S, C, T	То же
Сплавы с высоким содержанием меди			
	C817	S, C, T	Электрические компоненты (прочнее и тверже меди)
	C821	S, C, T	То же
Латуни			
Свинцовая красная	C836	S, C, T	Предметы для слесарно-водопроводных работ, клапаны, фланцы, части насосов
Свинцовая красная	C838	S, C, T	Предметы для слесарно-водопроводных работ, клапаны низкого давления, части насосов
Свинцовая полукрасная	C844	S, C, T	Основной скобяной товар, предметы для слесарно-водопроводных работ, клапаны низкого давления
Свинцовая полукрасная	C848	S, C	То же
Песочного литья	SCB1	S, D	Скобяные изделия, герметичного сжатия клапаны и фитинги
Свинцовая желтая	C852	C, T	Фитинги для слесарно-водопроводных работ, скобяные изделия, клапаны, декоративные предметы
Песочного литья	SCB3	S, D	Предметы для слесарно-водопроводных работ, газовые фитинги, электрические компоненты
Свинцовая желтая	C854	S, C, T	Основного назначения скобяные изделия
Свинцовая судостроительная	C857	S, C	Скобяные изделия, декоративные предметы
Песочного литья судостроительная	SCB4	S	Судовые фитинги, насосы, теплообменники
Паяемая, песочного литья	SCB6	S, D	Предметы для пайки, судовые фитинги
Кокильного литья	DCB1	GD, C	Точное литье для вагонеток, фитинги для слесарно-водопроводных работ и подобные
Кокильного литья судовая	DCB3	GD, C	Изделия, где требуются точное литье, хорошая обрабатываемость на станках
Свинцовая желтая	C858	D	То же
Полученная литьем под давлением	PCB1	D	То же

Табл. 5.23 (продолжение)

Наименование	BS/CDA	Литейные формы	Применение
Марганцевые бронзы			
Высокой прочности латунь	НТВ1	S, GD, C	Компоненты, подверженные высокому напряжению при нормальных температурах, например морские гребные винты, рули, насосы
Высокой прочности латунь	НТВ3	S, C	Компоненты, подверженные высокому напряжению, без усиленной коррозии. Литье для судостроения
Марганцевая	C862	S, D, C, T	Литье для судостроения, подшипники
Марганцевая	C863	S, C	Как сплав НТВ3
Бронзы			
Оловянная	C903	S, C, T	Подшипники, зубчатые колеса, кольца поршней, компоненты клапанов
Оловянная	C905	S, C, T	То же
Оловянная	C911	S	Подшипники, кольца поршней
Оловянная	CT1	S, D, C, T	Основного назначения песочное литье
Фосфорная	PВ1	S, D, C, T	Подшипники, зубчатые колеса, вкладыши подшипников для тяжелого режима работы
Фосфорная	PВ2	S, D, C, T	Подшипники для тяжелого режима работы, зубчатые колеса, подверженные ударным нагрузкам
Фосфорная	PВ4	S, D, C, T	Как и сплав PВ1, но с меньшими нагрузками
Свинцовая фосфорная	LPВ1	S, D, C	При режимах работы легче, чем для PВ1, 2 или 4, лучше выдерживает плохую смазку
Выпаренная /клапанная	C922	S, C, T	Детали, выдерживающие давление при 300°C
Свинцово-оловянная	C923	S, C, T	Клапаны, трубы и литье высокого давления
Оловянная с высоким содержанием Pь	C932	S, C, T	Подшипники и их вкладыши
Свинцовая (76—9—0—15)	LB1	D, C, T	Подшипники и их вкладыши, выдерживающие плохую смазку и коррозию
Свинцовая (80—10—0—10)	LB2	S, D, C, T	То же
Свинцовая (85—5—0—10)	LB4	S, D, C, T	То же
Оловянная с высоким содержанием Pь	C937	S, C, T	Высокоскоростные и высокого давления подшипники, стойкие против коррозии детали
Оловянная с высоким содержанием Pь	C938	S, C, T	Основного срока службы и умеренного давления подшипники

Табл. 5.23 (продолжение)

Наименование	BS/CDA	Литейные формы	Применение
Оловянная с высоким содержанием Pb	C943	S, C	Высокоскоростные подшипники для легких нагрузок
Свинцовая (75—5—0—20)	LB5	T	Стальные подшипники для двигателей
Никель-оловянная	C947	S, C, T	Подшипники, истираемые параллели станков, поршни цилиндров, сопла
Пушечные бронзы			
Адмиралтейская	G1	S, D, C	Основного назначения, например насосы, клапаны, подшипники
Никелевая пушечная	G3	S, D, C	Корпуса подшипников, детали выключателей, клапаны, медленного хода подшипники
Свинцовая пушечная (83—3—9—5)	LG1	S, D, C, T	Основного назначения, где требуется герметичное сжатие, например насосы, клапаны
Свинцовая пушечная (85—5—5—5)	LG2	S, D, C, T	Как LG1, но выше герметичное сжатие
Свинцовая пушечная (87—7—3—3)	LG4	S, D, C, T	Как LG1, но выше предел прочности
Алюминиевые бронзы			
Алюминиевая	AB1	S, GD, C	Там, где требуются высокая прочность, высокое сопротивление коррозии, например насосы, судовые детали. Детали, отлитые в пресс-форму, для автомобилей
Алюминиевая	C952	S, C, T	Подшипники, зубчатые колеса, вкладыши подшипников, гнезда клапанов, кислотоустойчивые насосы
Алюминиевая	C953	S, C, T	Зубчатые колеса, судовое оборудование, гайки, корзины декопирования
Алюминиевая	AB2	S, GD, C, T	Как AB1, но при более высоких температурах
Cu—Mn—Al	CMA1	S, GD, C, T	Детали тяжелого, сложного изготовления, с высоким сопротивлением коррозии и износу
Никель-алюминиевая	C955	S, C, T	Коррозионностойкие детали, мешалки, зубчатые колеса, авиационные направляющие клапанов и седла клапанов
Никель-алюминиевая	C958	S, C, T	Коррозионностойкие детали
Кремнистые бронзы/латуни			
Кремнистая бронза	C875	S, C, D	Подшипники, зубчатые колеса, коромысла качающихся рамок, крыльчатки

Табл. 5.23 (окончание)

Наименование	BS/CDA	Литейные формы	Области применения
Нейзильберы			
Cu—Ni—Cr	CN1	S	Декоративные и скобяные изделия
Нейзильбер	C973	S	То же
Нейзильбер	C976	S	Судовое литье и декоративные детали
Нейзильбер	C978	S	Клапаны и седла клапанов, части музыкальных инструментов, декоративные предметы

Примечание:

S — литье в песчаную форму, C — центробежное литье, D — литье в пресс-форму, GD — кокильное литье, T — непрерывное литье.

Применение ковких сплавов

В Табл. 5.24 приведены типичные области применения ковки меди и сплавов по британскому стандарту и по системе Ассоциации содействия развитию промышленности медных сплавов.

Табл. 5.24. Области применения ковких сплавов

Наименование	BS	CDA	Применение
Медь			
Электролитическая, прочная, высокой проводимости	C101	C110	C/N обработка. Электрические провода, токоподводящие шины, теплообменники, крышки
Бескислородная, высокой проводимости	C103	C102	C/N обработка. Электронные компоненты, волноводы, шины
Прочная мышьяковая	C105		C/N обработка. Конструкторский инструмент
Фосфорная раскисленная	C106	C122	C/N обработка. Трубы для слесарно-водопроводных работ, химические агрегаты, теплообменники
Фосфорная, раскисленная мышьяком	C107	C142	C/N обработка. Теплообменники и трубы холодильников
Бескислородная, высокой проводимости	C110	C101	C/N обработка. Электроника, детали высокой электрической проводимости
Раскисленная кадмием	—	C143	C/N обработка. Электротехника, когда требуется мягкое тепловое сопротивление: контакты, клеммы, сварные детали
Сплавы с высоким содержанием меди			
Медь—кадмий	C108	C162	C/N обработка. Передающие электрические линии высокого напряжения, токопроводящие поверхностные слои на компонентах электронных устройств

Табл. 5.24 (продолжение)

Наименование	BS	CDA	Применение
Хромистая медь	A2/1	C182	С/Н обработка. Точечные сварные электроды, контакты переключателей, соединительные провода
Латуни			
Золоченый металл (90—10 латунь) или коммерческая бронза, 90%	CZ101	C220	С/Н обработка. Декоративные и архитектурные предметы, винты, заклепки
Золоченый металл (95—5)	CZ125	C210	С/Н обработка. Монеты, медали, капсулы боеприпасов
Красная (85—15)	CZ102	C230	С/Н обработка. Трубы для слесарно-водопроводных работ, трубы теплообменников, застежки, паропроводы
Мышьяковая (70—30)	CZ105	—	С обработка. Детали глубокой вытяжки и расхиленной плавки, скобяной товар
Глубокой вытяжки (70—30)	CZ106	C260	С обработка. Детали глубокой вытяжки и расхиленной плавки, замки, шарниры, стержни, заклепки, скобяной товар
Основная (обычная) желтая	CZ108	C268-0	С/Н обработка. Центрифугирование, прессование захоленной плавки. Скобяной товар, зажимы электрических деталей
Муиц-металл (60—40)	CZ109	C280	Н обработка. Горячая ковка, прессование, высадка и осадка (например, головок заклепок). Пластины конденсаторов, трубы теплообменников, прутки твердого припоя
Алюминиевая	CZ110	C687	С/Н обработка. Теплообменники и конденсорные трубы
Адмиралтейская	CZ111	C443-5	То же
Судовая	CZ112	C464-7	Н обработка. Горячая ковка, прессование, вытягивание. Судовые скобяные изделия, заклепки, винты валов, болты, прутки для пайки
Высокой прочности на растяжение	CZ114	—	Н обработка. Части насосов, архитектурного назначения профили, трубы, работающие в условиях повышенного давления
Высокой прочности паяемая	CZ115	—	То же
Высокой прочности	CZ116	—	То же
Свинцовая	CZ118	—	С обработка. Часовое производство, основные, с поверхностным слоем, детали, детали часов и инструментов
Автоматная	CZ121	C360	Н обработка. Превосходная обрабатываемость на станках. Зубчатые колеса, зажимы, винтовые машинные детали
Свинцовый муиц-металл	CZ123	C370	Н обработка. Экструзия, горячая ковка, хорошая обрабатываемость на станках. Детали труб конденсоров
Марганцевая	—	C674	Н обработка. Горячая ковка и прессование. Зубчатые колеса, валы, истираемые пластины

Табл. 5.24 (продолжение)

Наименование	BS	CDA	Применение
Фосфорные бронзы			
Фосфорная, 4%	PB101	—	С обработка. Винты, болты, заклепки, моечные машины, пружины и скобы, сильфоны и диафрагмы
Фосфорная, 5%	PB102	C510	С обработка. Вырубка заготовки из листа, вытяжка, высадка, штамповка. Сильфоны, пружины и скобы, шпонки, стержни, диафрагмы
Фосфорная, 7%	PB103	—	С обработка. Пружины, скобы, моечные аппараты, присадочные прутки и электроды, части насосов
Фосфорная, 1,25% E	—	C505	С/Н обработка. Вырубка заготовки из листа, высадка, штамповка. Электрические контакты, гнущиеся шланги
Фосфорная	—	C511	С обработка. Пружины, плавкие зажимы, детали переключателей, сварочные электроды
Фосфорная, 8%	—	C521	С обработка. Вырезка заготовки из листа, вытяжка, штамповка. Более строгие условия, чем у 5%-ной фосфорной бронзы
Фосфорная, 10%	—	C524	С обработка. Вырезка заготовки из листа, формовка, изгибание. Детали тяжелого режима работы, например пружины, моечные аппараты, зажимные пластины
Алюминиевые бронзы			
Алюминиевая, 5%	CA101	C608	С обработка. Конденсоры и трубы теплообменников
Алюминиевая, 7%	CA102	C613	С обработка. Гайки, болты, коррозионностойкие сосуды, судовые детали
Алюминиевая, 9%	CA103	C623	Н обработка. Горячая ковка и прессование. Корпуса вентилялей и шпинделей, болты, подшипники, червячные зубчатые колеса, кулачки
Алюминиевая, 10%	CA104	C630	Н обработка. Горячая ковка и формовка. Гайки, болты, клапанные гнезда и параллели станков, валы насосов
Сплав E	CA105	—	То же
Сплав D	CA106	C614	То же
Кремнистые бронзы			
Кремнистая медь или с низким содержанием кремния, В	CS101	C651	С/Н обработка. Вырезка заготовки из листа, высадка, горячая ковка и прессование. Химические агрегаты, судовые скобяные изделия, болты, соединительные зажимы, баки для горячей воды и фитинги
С высоким содержанием кремния, А	C655	—	То же

Табл. 5.24 (окончание)

Наименование	BS	CDA	Применение
Бериллиевые бронзы			
Медь—бериллий	CB101	C172	С/Н обработка. Детали высокой прочности, высокой проводимости. Пружины, скобы, зажимы, не искрящийся инструмент
Медно-никелевые сплавы			
Медь—никель (95—5)	CN101	—	С/Н обработка. Детали коррозионностойкие к морской воде, боеприпасы
Медь—никель (90—10)	CN102	C706	То же
Медь—никель (80—20)	CN104	C710	С/Н обработка. Детали глубокого волочения и штамповки
Медь—никель (75—25)	CN105	—	С/Н обработка. Монеты и медали
Медь—никель (70—30)	CN107	C715	С/Н обработка. Трубы для соленой воды, зажимы
Специальный сплав медь—никель (70—30)	CN108	—	С/Н обработка. Очень хорошее сопротивление коррозии и разьеданию морской водой. Кабели пришвартовки, стержни океанских кабелей
Медь—никель	—	C717	То же
Медь—никель	—	C725	С/Н обработка. Вырезка заготовки из листа, вытяжка, формовка, высадка, выдавливание, штамповка. Пружины и реле переключателей, сифоны
Нейзильберы			
Свинцовая никелевая латунь	NS101	—	Н обработка. Части настенных и наручных часов, архитектурные детали
Нейзильбер, 10%	NS103	C745	С обработка. Вырезка заготовки из листа, вытяжка, формовка, высадка, выдавливание. Заклепки, винты, скобы, ползуны зажимов, декоративные детали
Нейзильбер, 12%	NS104	C757	То же
Нейзильбер, 15%	NS105	C754	То же
Нейзильбер, 18%	NS106	C752	То же
Нейзильбер, 18%	NS107	C770	С обработка. Вырезка заготовки из листа, формовка. Хорошие оптические свойства. Пружины и скобы для электрической аппаратуры
Свинцовый нейзильбер, 20%	NS111	C782	С обработка. Детали механизмов, стойкие к воде и коррозии, винты, шарниры, ключи, части наручных часов.

Примечание:

С — холодная обработка, Н — горячая, с относительно хорошими характеристиками обработки.

Глава шестая

Магний

6.1. МАТЕРИАЛЫ

Магний

Плотность магния $1.7 \cdot 10^3$ кг·м⁻³ при 20°C. По сравнению с другими материалами она низкая. Он имеет электрическую проводимость около 60% проводимости меди и высокую теплопроводность. Так как предел прочности на растяжение магния слишком низкий для технических целей, он применяется в конструкциях только в виде сплавов. При нормальных атмосферных условиях магний характеризуется хорошим сопротивлением коррозии благодаря окисному слою, который образуется на его поверхности на воздухе. Однако этот слой частично проницаем на воздухе, если тот содержит соли, и, таким образом, при неблагоприятных условиях сопротивление коррозии может быть низким.

Магниевые сплавы

Из-за низкой плотности магния сплавы на его основе обладают тоже низкой плотностью. Поэтому они находят применение в областях, где основное значение имеет легкость, например, в авиастроении. Алюминиевые сплавы — с большей плотностью, чем магниевые, но могут иметь большую прочность. Отношение прочность/масса для магниевых сплавов, однако, больше, чем для алюминиевых. Магниевые сплавы имеют также преимущество в хорошей обрабатываемости на станках и легко свариваются. Сопротивление коррозии, между тем, у них не такое высокое, как у алюминиевых сплавов.

Магниевые сплавы, как литейные, так и ковкие, в зависимости от состава делятся на три группы.

1. Магниево-марганцевые сплавы.

Они, в основном, применяются для изготовления тонколистового металла, обладающего легкой свариваемостью.

2. Магниево-алюминиево-цинковые сплавы.

Они применяются, главным образом, для песочного, кокильного литья, экструзии и горячей объемной штамповки. Возможна обработка на твердый раствор и дисперсионное твердение.

3. Магниево-ториево-циркониевые/цинковые/серебряные сплавы.

Цирконий приводит к интенсивному уменьшению эффективно-го размера зерна. Сплавы применяются в обеих формах, как литейной так и ковкой. Они имеют высокие пробные напряжения, хорошее сопротивление ударам, коррозии, легко поддаются обработке.

(См. Коды составов, Система кодирования для отпуска сплавов, Составы литейных сплавов, Составы ковких сплавов, Отжиг, Обработка на твердый раствор и старение, Снятие напряжения, Плотность, Электрические свойства, Усталостные свойства, Механические свойства литейных сплавов, Механические свойства ковких сплавов, Тепловые свойства, Свариваемость, Формы сплавов, Применение литейных сплавов, Применение ковких сплавов.)

6.2. КОДЫ И СОСТАВЫ СПЛАВОВ

Системы кодирования составов

Для кодирования составов широко используется система, разработанная Американским обществом по испытанию материалов (ASTM). Для обозначения сплава применяются буквы и цифры. Первые две буквы указывают на основные сплавляемые элементы (см. Табл. 6.1). Следующие за ними два числа указывают номинальное процентное содержание этих двух сплавляемых элементов. Третья часть обозначения — это буквы от А до Z, но исключая I и O, для указания разных сплавов с тем же самым номинальным составом, специфицированным при предшествующих буквах и числах. Последняя часть кода — спецификация закалки, которая аналогична принятой для алюминия. Для детального ознакомления обычно применяемых закалок к магнию см. Коды для закалок сплавов.

Табл. 6.1. Буквенное кодирование магниевых сплавов по системе Американского общества по испытанию материалов

Буква	Элемент	Буква	Элемент
A	Алюминий	M	Марганец
B	Висмут	N	Никель
C	Медь	P	Свинец
D	Кадмий	Q	Мышьяк
E	Редкоземельный	R	Хром
F	Железо	S	Кремний
H	Торий	T	Олово
K	Цирконий	Z	Цинк
L	Бериллий		

В качестве иллюстрации обозначенной выше системы кодирования рассмотрим магниевый сплав AZ81A-T4. Основные сплавляемые элементы — алюминий (A) и цинк (Z). В сплаве

номинальное содержание алюминия 8% и цинка 1%. Характерным сплавом в этом типе является сплав А. Он имеет закалку Т4, т.е. находится в состоянии горячей обработки раствора.

Система кодирования, применяемая в британском стандарте, использует различные коды для литейных и ковких магниевых сплавов. Для литейных сплавов обозначение состоит из букв MAG со следующим числом, которое применяется для индикации литейного сплава. Например, MAG 3 — это литейный сплав. Далее следуют буквы для индикации степени твердости, это те же самые буквы, которые применяют в британском стандарте для системы алюминия (см. Система кодирования степени твердости). Для ковких сплавов обозначение состоит из букв MAG и через черточку следует буква, указывающая форму поставки изделия (S — плита, тонколистовая полоса, E — пруток, профильный прокат и трубы, включая прессованные прокованные заготовки и др.). Далее опять черточка, за которой идет номер выше 100 для указания характеристики сплава. Наконец, имеется еще буква для определения степени твердости; подобные буквы присутствуют и в системе британских стандартов для алюминия (см. Система кодирования степени твердости).

В качестве примера системы британских стандартов рассмотрим магниевый сплав MAG-S-101M. MAG — сплав на основе магния. Буква S указывает, что он в форме тонколистовой плиты или полосы. Число 101 говорит о специфике сплава. Наконец, буква M определяет, что степень твердости его соответствует моменту изготовления. Например, литейный сплав MAG 3 ТВ: цифра 3 раскрывает характеристику сплава, а ТВ — степень твердости, т.е. то, что он был обработан на твердый раствор.

Системы кодирования твердости сплавов

Кодирующая система, применяемая для степени твердости, является той же самой, которая используется для алюминия. Система британских стандартов имеет незначительное отклонение от широко распространенной американской системы Ассоциации содействия развитию промышленности медных сплавов (CDA). В Табл. 6.2 приведены степени твердости, в основном применяемые для магния.

Табл. 6.2. Системы кодирования степени твердости

Система		Степень твердости
американская	британская	
F	M	Соответствует твердости в момент изготовления
O	O	Отожжен
H10, H11	—	Немного деформирован при закалке
H23, H24, H26	—	Деформирован закалкой и частично отожжен
T4	TB	Термически обработан на твердый раствор

Табл. 6.2 (окончание)

Система		Степень твердости
американская	британская	
T5	TE	Дисперсионно обработан, т.е. искусственно состарен
T6	TF	Обработан термически на твердый раствор и дисперсионно, т.е. искусственно состарен

Составы литейных сплавов

В Табл. 6.3 приведены составы литейных магниевых сплавов по системе Американского общества по испытанию материалов и в соответствии с британским стандартом.

Табл. 6.3. Составы литейных магниевых сплавов

BS код	ASTM код	Процесс литья	Номинальный состав элементов [%]						
			Mg	Al	Zn	Mn	Th	Zr	Другие
Магниево-алюминиево-цинковые сплавы									
—	AZ63A	S, P	rem	6.0	3.0	0.2	—	—	—
MAG 1	AZ81A	S, P	rem	7.6	0.7	0.2	—	—	—
MAG 2	—	S, P	rem	8.2	0.7	0.5	—	—	—
MAG 3	AZ91C	S, P	rem	9.0	0.7	0.3	—	—	—
MAG 3	AZ91A	D	rem	9.0	0.7	0.1	—	—	—
—	AZ92A	S, P	rem	9.0	2.0	0.1	—	—	—
MAG 7	—	S, P	rem	8.0	0.9	0.5	—	—	—
Магниево-алюминиево-марганцевые сплавы									
—	AM100A	S, P	rem	10.0	—	0.1	—	—	—
—	AM60A	D	rem	6.0	—	0.1	—	—	—
Магниево-цинково-циркониево-редкоземельные/ториевые сплавы									
MAG 4	ZK51A	S, P	rem	—	4.6	—	—	0.7	—
—	ZK61A	S, P	rem	—	6.0	—	—	0.7	—
MAG 5	ZE41A	S, P	rem	—	4.2	—	—	0.7	1.2 RE
—	ZE63A	S, P	rem	—	5.8	—	—	0.7	2.6 RE
MAG 6	EZ33A	S, P	rem	—	2.7	—	—	0.7	3.3 RE
MAG 8	HZ32A	S, P	rem	—	2.1	—	3.3	0.7	—
MAG 9	ZH62A	S, P	rem	—	5.7	—	1.8	0.7	—
Магниево-циркониево-ториевые сплавы									
—	HK31A	—	rem	—	—	—	3.3	0.7	—
Магниево-циркониево-серебряные сплавы									
—	QE22A	S, P	rem	—	—	—	—	0.7	2.5 Ag, 2.1 RE

Примечание:

rem — остаток, RE — редкоземельные.

Составы ковких сплавов

В Табл. 6.4 приведены составы обычно применяемых ковких магниевых сплавов.

Табл. 6.4. Составы ковких магниевых сплавов

BS код	ASTM код	Номинальный состав элементов [%]					
		Mg	Al	Zn	Mn	Th	Zr
Магниево-алюминиево-марганцевые сплавы							
MAG-101	M1A	rem	—	—	1.2	—	—
Магниево-алюминиево-цинковые сплавы							
—	AZ10A	rem	1.2	0.4	0.2	—	—
MAG-111	AZ31B	rem	3.0	1.0	0.2	—	—
MAG-121	AZ61A	rem	6.0	1.0	0.2	—	—
Магниево-цинково-марганцевые сплавы							
MAG-131	—	rem	—	1.9	1.0	—	—
Магниево-цинково-циркониевые сплавы							
MAG-141	—	rem	—	1.0	—	—	0.6
—	ZK21A	rem	—	2.3	—	—	0.5
MAG-151	—	rem	—	3.3	—	—	0.6
—	ZK40A	rem	—	4.0	—	—	0.5
MAG-161	ZK60A	rem	—	5.5	—	—	0.6
Магниево-ториево-циркониевые/марганцевые сплавы							
—	NK31A	rem	—	—	—	3.0	0.6
—	NM21A	rem	—	—	0.6	2.0	—
—	NM31A	rem	—	—	1.2	3.0	—

Примечание:

rem — остаток.

6.3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Отжиг

Отжиг для ковких магниево-алюминиево-циркониевых сплавов составляет 1 ч или более при температуре 345°C, для ковких магниево-ториево-циркониевых/марганцевых сплавов он проходит при температурах 400...450°C, а ковких магниево-цинково-циркониевых сплавов — около 290°C.

Термическая обработка на твердый раствор и старение

В Табл. 6.5 приведены в общих чертах виды термических обработок, применяемых к литейным сплавам.

Табл. 6.5. Термическая обработка на твердый раствор и старение магниевых литейных сплавов

Сплав		Термическая обработка на твердый раствор		Старение		Отпуск	
Тип	Пример	Температура [°C]	Время [ч]	Температура [°C]	Время [ч]	BS	USA
Mg—Al—Mn	AM100A	—	—	230	5	TE	T5

Табл. 6.5 (окончание)

Сплав			Термическая обработка на твердый раствор		Старение		Отпуск	
Тип	Пример		Температура [°C]	Время [ч]	Температура [°C]	Время [ч]	BS	USA
Mg—Al—Zn	AZ91C	—	—	—	170	16	TE	T5
	AZ91C	MAG 3	415	16—20*	—	—	TB	T4
	AZ81A	MAG 1, MAG 7						
	AZ91C	MAG 3, MAG 7	415	16—20*	170	16	TF	T6
Mg—Zn—X	EZ33A	—	—	—	215	5	TE	T5
	—	MAG 4, MAG 6	—	—	175	10...16	TE	T5
	HZ32A	MAG 8	—	—	315	16	TE	T5
	ZE41A	MAG 5	—	—	330 и 175	2 и 16	TE	T5
	ZH62A	MAG 9	—	—	330 и 175	2 и 16	TE	T5

* указаны альтернативные формы обработки.

Снятие напряжения

Напряжение у ковких магниевых-алюминиево-циркониевых сплавов снимается примерно за 1 ч при температурах 150...200°C для твердoproкатанных тонких листов или за 15 мин при 200...260°C для прессованных выдавливанием или горячей объемной штамповкой. Для ковких магниевых-ториево-циркониевых/марганцевых сплавов этот режим будет составлять 30 мин при температурах 300...400°C. Для ковких магниевых-цинково-циркониевых сплавов напряжение снимается при температуре 150...260°C за время от 15 мин до 1 ч.

6.4. СВОЙСТВА СПЛАВОВ

Плотность

Литейные магниевые сплавы имеют плотность 1800...1817 кг·м⁻³ при 20°C, ковкие металлические сплавы — 1760...1800 кг·м⁻³.

Электрические свойства

Электрическая проводимость литейных магниевых-алюминиево-цинковых сплавов при 20°C равна $7 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Для литейных магниевых-циркониево- и т.д. сплавов она колеблется примерно от 14 до $15 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Ковкие магниевых-алюминиево-марганцевые сплавы имеют электрическую проводимость около $20 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, магниевых-алюминиево-цинковые — $10 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и магниевых-цинково-циркониевые — от 16 до $19 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Усталостные свойства

Для литейных магниевых сплавов с пределом долговечности $50 \cdot 10^6$ циклов нагрузки углового изгиба в цикле составляют

от 70 до 100 МПа, если образец не надрезан, и от 50 до 900 МПа, когда он надрезан.

Механические свойства литейных сплавов

В Табл. 6.6 приведены механические свойства литейных магниевых сплавов при 20°C. Модуль растяжения магниевых сплавов равен примерно 40 ГПа.

Табл. 6.6. Механические свойства литейных магниевых сплавов

BS код	ASTM код	Состояние		Предел прочности на растяжение [МПа]	Текущность		Удлинение [%]	Твердость НВ
		BS	ASTM		Растяжение [МПа]	Сжатие [МПа]		
Магниево-алюминиево-цинковые сплавы								
—	AZ63A	TF	T6	275	130	130	5	73
MAG 1	AZ81A	TB	T4	275	83	83	15	55
MAG 2	—	TB	T4	275	83	83	15	55
MAG 3	AZ91C	TF	T6	275	195	145	6	66
MAG 3	AZ91A	M	F	230	150	165	3	63
—	AZ92A	TF	T6	275	150	150	3	84
MAG 7	—	TB	T4	260	83	83	5	55
Магниево-алюминиево-марганцевые сплавы								
—	AM100A	TF	T6	275	150	150	1	70
—	AM60A	M	F	205	115	115	6	—
Магниево-цинково-циркониево-редкоземельные/ториевые сплавы								
MAG 4	ZK51A	TE	T5	205	165	165	4	65
—	ZK61A	TE	T5	310	185	185	—	68
MAG 5	ZE41A	TE	T5	205	140	140	4	62
—	ZE63A	TF	T6	300	190	195	10	70
MAG 6	EZ33A	TE	T5	160	110	110	3	50
MAG 8	HZ32A	TE	T5	185	90	90	5	55
MAG 9	ZH62A	TE	T5	260	170	170	5	70
Магниево-циркониево-ториевые сплавы								
HK31A	TF	T6	220	105	105	8	55	—
Магниево-циркониево-серебряные сплавы								
—	QE22A	TF	T6	260	195	195	3	80

Примечание:

Величины напряжений пластического течения получены при 0.2% пробного напряжения и даны для обоих напряжений: на растяжение и на сжатие.

Механические свойства ковких сплавов

В Табл. 6.7 даны механические свойства ковких магниевых сплавов при 20°C. Приведены только значения, выбранные для указания порядка величины параметров, поскольку значения механических параметров зависят от формы изготовленного продукта: тонколистовой материал, пруток, труба, а также от их толщины. Модуль напряжения магниевых сплавов составляет около 40 ГПа.

Табл. 6.7. Механические свойства ковких магниевых сплавов

BS код	ASTM код	Состояние		Предел прочности на растяжение [МПа]	Текучесть		Удлинение [%]	Твердость НВ
		BS	ASTM		Растяжение [МПа]	Сжатие [МПа]		
Магниево-алюминиево-марганцевые сплавы								
MAG-101	M1A	M	F	255	180	83	12	40
Магниево-алюминиево-цинковые сплавы								
—	AZ10A	—	F	240	145	70	10	—
MAG-111	AZ31B	M	F	260	200	97	15	50
MAG-121	AZ61A	M	F	310	230	130	12	60
Магниево-цинково-марганцевые сплавы								
MAG-131	—	M	—	260	200	—	>8	—
Магниево-цинково-циркониевые сплавы								
MAG-141	—	M	—	270	205	—	>8	—
—	ZK21A	—	F	260	195	135	4	—
MAG-151	—	M	—	310	225	—	>8	—
—	ZK40A	—	T5	275	255	140	4	—
MAG-161	ZK60A	TE	T5	365	305	250	11	90
Магниево-ториево-циркониевые/марганцевые сплавы								
—	HK31A	—	H24	255	200	160	9	70
—	HM21A	—	T8	235	170	130	11	—
—	HM31A	—	H24	290	220	180	15	70

Примечание:

Значения предела текучести получены при 0.2% пробного напряжения.

Тепловые свойства

Линейное тепловое расширение, т.е. коэффициент линейного расширения, для обоих сплавов, литейных и ковких, составляет около $27 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Для литейных сплавов коэффициент теплопроводности магниево-алюминиево-цинковых сплавов равен примерно $84 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ и для магниево-циркониево- и т.д. сплавов — $100 \dots 113 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Для ковких сплавов — примерно $140 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ для магниево-алюминиево-марганцевых сплавов, около $80 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ для магниево-алюминиево-цинковых сплавов и $120 \dots 130 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ для магниево-циркониево- и т.д. сплавов. Удельная теплоемкость обоих типов сплавов, литейного и ковкого, — примерно $1000 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Свариваемость

Чаще всего с магниевыми сплавами применяется аргодуговая сварка. Газовую сварку не следует применять к сплавам, содержащим цирконий, и необходима специальная процедура сварки для других магниевых сплавов. (См. Таблицы применения литейных сплавов и Применение ковких сплавов для подобной специфики сплавов.)

6.5. ПРИМЕНЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ И КОВКИХ СПЛАВОВ

Формы литья

Формы литья, которые могут применяться с магниевыми сплавами, приведены в Табл. 6.3 вместе с подробным составом сплава. Для большинства сплавов можно применять только песочное и кокильное литье. В Табл. 6.8 приведены формы, пригодные для ковких магниевых сплавов.

Табл. 6.8. Формы ковких магниевых сплавов

BS код	ASTM код	Тонколистовой материал	Прессованный прутки и профили
Магниево-алюминиево-марганцевые сплавы			
MAG-101	M1A	*	*
Магниево-алюминиево-цинковые сплавы			
—	AZ10A		*
MAG-111	AZ31B	*	*
MAG-121	AZ61A		*
Магниево-цинково-марганцевые сплавы			
MAG-131	—	*	*
Магниево-цинково-циркониевые сплавы			
MAG-141	—	*	*
—	ZK21A		*
MAG-151	—	*	*
—	ZK40A		*
MAG-161	ZK60A		*
Магниево-ториево-циркониевые/марганцевые сплавы			
—	HK31A	*	
—	HM21A	*	
—	HM31A		*

Применение литейных сплавов

В Табл. 6.9 показаны типичные области применения литейных магниевых сплавов. Сплавы MAG 1, MAG 3, MAG 4 и MAG 7 могут использоваться для основного назначения, а сплавы MAG 2, MAG 5, MAG 6, MAG 8 и MAG 9 — для специальных приложений.

Табл. 6.9. Области применения литейных магниевых сплавов

BS код	ASTM код	Применение
Магниево-алюминиево-цинковые сплавы		
MAG 1	AZ81A	Основного назначения песочного и кокильного литья сплав, для областей, где требуется пластичность и сопротивление удару с умеренно высокой прочностью. Колеса автомобилей, портативные электрические инструменты, литейные формы для пластмасс

Табл. 6.9 (окончание)

BS код	ASTM код	Применение
MAG 2	—	Высокой степени чистоты модификация сплава MAG 1. Для инструментального литья, фотографического и оптического оборудования
MAG 3	AZ91C, AZ91A	Меньше микропористость, чем у MAG 1. Герметичные под давлением детали, кожухи автомобильных конструкций, разветвленные трубопроводы, мощный инструмент, компоненты электрических моторов
MAG 7	—	Свойства, подобные MAG 3, очень широко используются. Портативные мощные инструментальные принадлежности, части цепных пил, корыта для строительного раствора, тяжелые вагонные конструкции поддонов, разветвленные патрубки и кожухи, колеса автомобилей, штативы камер
Магниево-цинково-циркониево-редкоземельные/ториевые сплавы		
MAG 4	ZK51A	Высокого пробного напряжения сплав с хорошей пластичностью и хорошими механическими свойствами выше 150°C. Не годен для сложного каркасного литья или сварки
MAG 5	ZE41A	Улучшенный MAG 4, используется для сложного каркасного литья, а также при высоких требованиях к прочности и герметичности под давлением. Подвески, шасси, подшипники, многочисленные компоненты для скоростных автомобилей
MAG 6	EZ33A	При высоких требованиях к герметичности под давлением и сопротивлению ползучести выше 250°C; может использоваться аргонодуговая сварка
MAG 8	HZ32A	Улучшенный MAG 6 для применения выше 350°C
MAG 9	ZH62A	Выше прочность, чем у MAG 4, для тяжелого режима работы

Применение ковких сплавов

В Табл. 6.10 показаны типичные области применения ковких магниевых сплавов.

Табл. 6.10. Области применения ковких магниевых сплавов

BS код	ASTM код	Применение
Магниево-алюминиево-марганцевые сплавы		
MAG-101	M1A	Основного назначения сплав с хорошим сопротивлением коррозии, но низкой прочностью, сваривается газовой и аргонодуговой сваркой
Магниево-алюминиево-цинковые сплавы		
MAG-111	AZ31B	Средней прочности сплав с хорошей формруемостью и свариваемостью
MAG-121	AZ61A	Основного назначения сплав, сваривается газовой и аргонодуговой сваркой
Магниево-цинково-марганцевые сплавы		
MAG-131	—	Средней прочности сплав с хорошей формруемостью и свариваемостью аргонодуговой сваркой
Магниево-цинково-циркониевые сплавы		
MAG-141	—	Высокой прочности тонколистовой и экструзионный сплав, полностью сваривается
MAG-151	—	Высокой прочности тонколистовой, экструзионный и кованный сплав, сваривается при хороших условиях
MAG-161	ZK60A	Высокой прочности экструзионный и кованный сплав, не сваривается

Глава седьмая

Никель

7.1. МАТЕРИАЛЫ

Никель

Плотность никеля $8.88 \cdot 10^3$ кг·м⁻³, точка плавления — 1453°C. Он имеет высокий предел прочности на растяжение и сохраняет его до очень высоких температур. Обработка металла может быть и холодной, и горячей. Хорошо поддается механической обработке и может соединяться сваркой, пайкой твердым и мягким припоями. Он обладает превосходным сопротивлением коррозии, поэтому часто применяется для плакирования стали.

Сплавы

Никель употребляется как основной металл для легирования с целью получения сплавов с превосходными сопротивлением коррозии и прочностью при высоких температурах. Его сплавы можно разделить на три основные категории:

1. Никелемедные сплавы.

Никель и медь полностью растворимы один в другом в обоих состояниях: в жидком и твердом (см. Диаграмма состояния. Рис. 5.6). Эти никелемедные сплавы, содержащие около 67% никеля и 33% меди, называют монелями.

2. Твердый раствор никель—хром, травленные сплавы.

Сплавы никель—хром—железо часто с другими сплавляемыми элементами из серии сплавов технических твердых растворов называют инконелями и инколеями. Торговое название «Хастеллой» часто применяют к сплавам твердых растворов никель—хром—молибден—железо.

3. Дисперсионно-упрочненный сплав никель—хром—железо, травленные растворы.

Эти сплавы, основанные именно на никель—хром—железе, упрочняют только при холодной обработке; однако добавка других элементов, таких как алюминий, бериллий, кремний или титан, дает возможность упрочнять их при дисперсионной горячей обработке. Термин «сверхпрочные сплавы» часто применяют

для высокотемпературных, с высоким тепловым сопротивлением сплавов, которые в состоянии поддерживать высокие прочностные, сопротивление ползучести и сопротивление коррозии при высоких температурах. Это сложные сплавы, они могут быть на основе никеля, никеля—железа или кобальта и включают такие элементы, как хром, кобальт, молибден, алюминий, титан и прочие. Они получают в обеих формах: ковкой и литейной. Самым ранним сверхпрочным сплавом на основе никеля был Нимоник 80, твердый раствор 20% никеля и хрома с 2.25% титана и 1.0% алюминия, имеющий преципитаты.

(См. Коды, Составы никеля и сплавов, Отжиг, Обработка на твердый раствор и преципитаты, Снятие напряжения, Параметры ползучести, Плотность, Электрическое сопротивление, Усталостные свойства, Механические свойства литейных сплавов, Механические свойства ковких сплавов, Предел окисления, Тепловые свойства, Формы, Применение никелевых сплавов.)

7.2. КОДЫ И СОСТАВЫ СПЛАВОВ

Системы кодирования никелевых сплавов

В основном большинство никелевых сплавов указывают по их торговым маркам. Британские стандарты имеют систему, характеризующую эти сплавы буквами NA, стоящими перед номером для индикации самой специфики сплава. Сверхпрочным сплавам дают, кроме того, маркировку буквами HR. Американское общество по испытанию материалов (ASTM) и Американское общество инженеров-механиков (ASME) выпускают спецификации для кодов никелевых сплавов, используя букву или буквы, находящиеся перед тремя цифрами. В Табл. 7.1 показана связь сплавов, обозначенных по этим методам, с их торговыми марками.

Табл. 7.1. Торговые марки никелевых сплавов

Торговая марка	BS	ASTM	ASME
Никель			
Никель 200	NA 11	B160	SB160
		B163	SB163
Никель 201	NA 12	B160	SB160
Монель никель—медь сплавы			
Монель 400	NA 13	B127	SB127
		B163-5	SB163-5
		B564	SB395
		F468	SB564
Монель K-500	NA 18	—	—

Табл. 7.1 (окончание)

Торговая марка	BS	ASTM	ASME
Твердые растворы сплавов никель—хром—железо			
Инконель 600	NA 14	B163 B166-8	SB163 SB166-8
Инколой 800	NA 15	B163 B407-9 B564	SB163 SB407-9 SB564
Инколой 800H	NA 15H	B163 B407-9 B564	SB163 SB407-9 SB564
Инколой 825	NA 16	B163 B423-5	SB163 SB423-5
Инколой DS	NA 17	—	—
Нимоник 75	HR5	—	—
	HR203	—	—
	HR403	—	—
	HR504	—	—
Дисперсионно-упрочненные сплавы никель—хром—железо			
Нимоник 80A	HR1, NA 20	A637	—
	HR201	—	—
	HR401	—	—
	HR601	—	—
Нимоник 90	HR2	—	—
	HR202	—	—
	HR402	—	—
	HR501-3	—	—
Нимоник 105	HR3	—	—
Нимоник 115	HR4	—	—
Инко НХ	HR6	B435	—
	HR204	B572	—
		B619	—
		B622	—
		B626	—
Нимоник 263	HR10	—	—
	HR206	—	—
	HR404	—	—
Нимоник 901	HR53	—	—
Нимоник PE 16	HR55	—	—
	HR207	—	—
Инконель X750	HR505	B637	SB637
Литейные сплавы			
Нимокаст 80	ANC9	—	—
Нимокаст 90	ANC10	—	—
Нимокаст 713	HC203, VMA6A, B	—	—
Нимокаст PD21	VMA2	—	—
Нимокаст PK24	HC204, VMA12	—	—

Составы никеля и сплавов

В Табл. 7.2 показаны составы некоторых, обычно применяемых, ковких никелевых сплавов, а в Табл. 7.3 — литейных сплавов.

Табл. 7.2. Составы ковких никелевых сплавов

Торговая марка	Номинальный состав элементов [%]								
	Ni	Cr	Fe	Cu	Co	Mo	Al	Ti	Другие
Никель									
Никель 200	>99,0	—	—	—	—	—	—	—	<0.15 C
Никель 201	>99,0	—	—	—	—	—	—	—	<0.02 C
Монель никель—медь сплавы									
Монель 400	66.5	—	—	31.5	—	—	—	—	—
Монель К-500	66.5	—	—	29.5	—	—	3.0	0.6	—
Твердые растворы сплавов никель—хром—железо									
Инконель 600	75.0	15.5	8.0	—	—	—	—	—	—
Инколой 800	32.5	21.0	45.7	—	—	—	0.4	0.4	—
Инколой 800Н	33.0	21.0	45.7	—	—	—	0.4	0.4	0.07 C
Инколой 825	42.0	21.0	30.0	2.3	—	3.0	—	0.9	—
Инколой DS	38.0	18.0	40.5	—	—	—	—	—	1.2 Mn, 2.3 Si
Нимоник 75	75.0	19.5	<5.0	<0.5	<5.0	—	—	0.4	—
Хастеллой X	49.0	22.0	15.8	—	<1.5	9.0	2.0	—	0.15 C, 0.6 W
Дисперсионно-упрочненные сплавы никель—хром—железо									
Нимоник 80А	73.0	19.5	<1.5	<0.2	<2.0	—	1.4	2.3	0.07 C
Нимоник 90	55.5	19.5	<1.5	<0.2	18.0	—	1.5	2.5	<0.13 C
Нимоник 105	54.0	15.0	<1.0	<0.2	20.0	5.0	4.7	1.2	0.15 C
Нимоник 115	55.0	15.0	<1.0	<0.2	14.8	4.0	5.0	4.0	0.16 C
Нимоник 263	51.0	20.0	<0.7	<0.2	20.0	5.9	0.5	2.2	0.06 C
Нимоник 901	44.0	12.5	32.5	<0.2	<1.0	5.8	—	3.0	0.04 C, 0.015 B
Нимоник PE16	44.0	16.5	23.0	<0.5	<2.0	3.3	1.6	1.2	0.06 C, 0.02 Zr
Астролой	56.5	15.0	<0.3	—	15.0	5.3	4.4	3.5	0.06 C, 0.03 B, 0.06 Zr
Инко НХ	48.5	21.8	18.5	—	1.5	9.0	—	—	0.10 C, 0.60 W
Инконель Х750	73.0	15.5	7.0	<0.3	—	—	0.7	2.5	0.04 C, 1.0 Nb
Рене 41	55.0	19.0	<0.3	—	11.0	10.0	1.5	3.1	0.09 C, 0.01 B
Рене 95	61.0	14.0	<0.3	—	8.0	3.5	3.5	2.5	0.16 C, 0.01 B, 3.5 W, 3.5 Nb, 0.05 Zr
Удимет 500	48.0	19.0	<4.0	—	19.0	4.0	3.0	3.0	0.08 C, 0.005 B
Удимет 700	53.0	15.0	<1.0	—	18.5	5.0	4.3	3.4	0.07 C, 0.03 B
Васпалой	57.0	19.5	<2.0	—	13.5	4.3	1.4	3.0	0.07 C, 0.006 B, 0.09 Zr

Табл. 7.3. Составы литейных никелевых сплавов

Торговая марка	Номинальный состав элементов [%]								
	Ni	Cr	Si	Co	Mo	Al	Ti	C	Другие
Нимокаст 80	70.0	20.0	0.6	<2.0	—	1.2	2.6	0.08	0.6 Mn
Нимокаст 90	57.5	19.5	0.6	16.5	—	1.3	2.4	0.09	0.6 Mn, <2.0 Fe
Нимокаст 713	75	13	—	—	4	6	—	—	2 Nb
Нимокаст PD21	75	5.7	—	—	2	6	—	—	11 W
Нимокаст PK24	61	9.5	—	15	3	5.5	4.7	—	1 V
B-1900	64	8	—	10	6	6	1	0.1	4 Ta
MAR-M 200	59	9	—	10	—	5	2	0.15	1 Fe, 12.5 W, 1 Nb
Рене 77	58	15	—	15	4.2	4.3	3.3	0.07	—
Рене 80	60	14	—	9.5	4	3	5	0.17	4 W

Примечание:

Составы всех названных выше сплавов приводятся почти детально, лишь не указаны некоторые очень малые добавки.

7.3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**Отжиг**

Отжиг для никеля, такого как никель 200, включает нагрев до температуры в диапазоне 815...925°C и время выдержки из расчета около 10 мин на каждый сантиметр толщины материала. Время отжига тонкого листа примерно 3...5 мин. Отжиг монеля (сплава никель—медь) в диапазоне 870...980°C производится за то же время выдержки. Для сплавов твердых растворов никель—хром—железо необходимы температуры отжига 950...1175°C и время выдержки 5...20 мин на каждый сантиметр толщины материала. Для дисперсионно-упрочненных сплавов никель—хром—железо требуются температуры отжига 1010...1135°C и время выдержки 10...90 мин на каждый сантиметр материала.

Обработка на твердый раствор и дисперсионная обработка

Для сплавов никель—хром—железо, которые могут быть упрочнены преципитатами (см. Табл. 7.2), обработка на твердый раствор, в основном, проводится при температуре примерно 1060...1150°C и времени выдержки, зависящего от конкретного сплава (обычно от 1/2 до 4 ч), но некоторым сплавам требуется 8 ч и даже больше. Процесс охлаждения выбирается также для конкретного сплава. Для многих сплавов применяется охлаждение на воздухе, хотя некоторым из них требуется быстрая закалка. Дисперсионная обработка обычно включает нагрев до температуры 620...845°C и выдержку от 2 до 24 ч. Затем следует охлаждение на воздухе.

Снятие напряжения

Обработка на снятие напряжения рекомендуется только для никеля, монеля и для очень небольшого числа других никелевых сплавов. Для никеля, например никеля 200, обработка производится при температуре 400...500°C, для монеля — 550...600°C. Для всех других сплавов полный отжиг будет чаще всего обязательным, если требуется обработка, снимающая напряжение.

7.4. СВОЙСТВА

Параметры ползучести

Никелевые сплавы широко применяются для высокотемпературных приложений. При таких условиях ползучесть может стать значительной проблемой, основным фактором, ограничивающим температуру, до которой может использоваться сплав. В Табл. 7.4 приведены разрывные напряжения при различных температурах для ряда никелевых сплавов.

Табл. 7.4. Разрывные напряжения для никелевых сплавов

Торговая марка	Температура [°C]	Разрывные напряжения [МПа] при	
		100 ч	1000 ч
Твердые растворы сплавов никель—хром—железо			
Инконель 600	815	55	39
	870	37	24
Инколой 800	650	220	145
	870	45	33
Нимоник 75	870	23	15
Дисперсионно-упрочненные сплавы никель—хром—железо			
Нимоник 80А	540	—	825
	815	185	115
	1000	30	—
Нимоник 90	815	240	155
	870	150	69
	1000	40	—
Нимоник 105	815	325	225
	870	210	135
	1000	57	—
Нимоник 115	815	425	315
	925	205	130
	1000	100	—
Нимоник 263	815	170	105
	870	93	46
Инконель Х750	540	—	827
	870	83	45

Табл. 7.4 (окончание)

Торговая марка	Температура [°C]	Разрывные напряжения [МПа] при	
		100 ч	1000 ч
Удимет 500	815	44	32
Удимет 700	650	—	102
	815	58	43
Васполой	650	108	88
	815	40	25
Литейные сплавы			
B-1900	815	73	55
	982	26	15
MAR-M 200	815	76	60
	982	27	19
Рене 80	1000	95	—

Плотность

Плотность никелевых сплавов при 20°C находится в интервале от 7.8 до $8.9 \cdot 10^3$ кг·м⁻³. Например, никель 200 имеет плотность $8.89 \cdot 10^3$ кг·м⁻³, для монеля 400 она равна $8.83 \cdot 10^3$ кг·м⁻³, Инколя 800 — $7.95 \cdot 10^3$, Инколя 825 — $8.14 \cdot 10^3$, Нимоника 90 — $8.18 \cdot 10^3$, Нимоника 115 — $7.85 \cdot 10^3$ кг·м⁻³. Литейные сплавы Нимокаст обладают плотностью около $8.2 \cdot 10^3$ кг·м⁻³.

Электрическое удельное сопротивление

Электрическое удельное сопротивление никеля, например никеля 200, составляет 8...19 мкОм·м при 20°C. Сплавы никель—медь имеют удельное сопротивление около 50 мкОм·м, у сплавов никель—хром—железо оно большей частью 110...130 мкОм·м.

Усталостные свойства

Предел усталости для никелевых сплавов — примерно 0.4 предела прочности на растяжение при рабочей температуре. Тогда, например, Удимет 700 имеет предел прочности на растяжение около 910 МПа при 800°C и предел усталости 340 МПа.

Механические свойства литейных сплавов

В Табл. 7.5 приведены механические свойства литейных никелевых сплавов при повышенных температурах.

Табл. 7.5. Механические свойства литейных сплавов

Торговая марка	Температура [°C]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]
Нимикаст 80	700	970	680	12
	1000	75	40	82
Нимикаст 90	700	540	400	18
	900	154	77	40
Нимикаст 713	760	940	745	6
	980	470	305	20
Нимикаст PD21	700	810	780	2
	1000	560	390	4
Нимикаст РК24	700	965	825	6
	1000	500	380	5
В-1900	870	790	700	4
МА-М 246	870	860	690	5
Рене 80	870	620	550	11

Примечание:

Значения даны при пределе текучести 0.2% пробного напряжения.

Механические свойства ковких сплавов

В Табл. 7.6 приведены механические свойства ковких никелевых сплавов при комнатной и повышенной температурах.

Табл. 7.6. Механические свойства ковких никелевых сплавов

Торговая марка	Условие	Температура [°C]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]
Никель					
Никель 200	CWA	20	380	105	35
	CW	20	535	380	12
Никель 201	CWA	20	350	80	35
Монель сплавы никель—медь					
Монель 400	CWA	20	480	195	35
Монель К-500	CWSP	20	900	620	20
Твердые растворы сплавов никель—хром—железо					
Инконель 600	CWA, HWA	20	550	240	30
		20	830	620	7
	CW	700	365	175	50
		1000	75	40	60
Инколой 800	CWA, HWA	20	520	205	30
		20	450	170	30
	HW	700	300	180	70
Инколой 800H	CWS, HWS	20	450	170	30
		700	300	180	70
Инколой 825	CWA, HWA	20	590	220	30
Инколой DS	—	700	335	210	49
		1000	65	35	75

Табл. 7.6 (продолжение)

Торговая марка	Условие	Температура [°C]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]
Нимоник 75	—	20	750	—	41
		700	420	200	57
		1000	80	50	58
Хастеллой Х	—	20	960	500	43
		650	710	400	37
		870	255	180	50
Дисперсионно-упрочненные сплавы никель—хром—железо					
Нимоник 80А	SP	20	1240	620	24
		650	1000	550	18
		870	400	260	34
Нимоник 90	SP	20	1240	805	23
		650	1030	685	20
		870	430	260	16
Нимоник 105	SP	20	1140	815	12
		650	1080	800	24
		870	605	365	25
Нимоник 115	SP	20	1240	860	25
		650	1120	815	25
		870	825	550	18
Нимоник 263	SP	700	750	460	23
		1000	100	75	68
Нимоник 901	SP	700	910	810	12
		1000	90	75	—
Нимоник PE16	SP	700	560	400	27
		1000	75	60	—
Астролой	SP	20	1410	1050	16
		650	1310	965	18
		870	770	690	25
Инко НХ	SP	700	550	300	44
		1000	150	80	52
Инконель Х750	SP	20	1120	635	24
		650	825	565	9
		870	235	165	47
Рене 41	SP	20	1420	1060	14
		650	1340	1000	14
		870	620	550	19
Рене 95	SP	20	1620	1310	15
		650	1460	1220	14
Удимет 500	SP	20	1310	840	32
		650	1210	760	28
		870	640	495	20

Табл. 7.6 (окончание)

Торговая марка	Условие	Температура [°C]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]
Удимет 700	SP	20	1410	965	17
		650	1240	855	16
		870	690	635	27
Васпалой	SP	20	1280	795	25
		650	1120	690	34
		870	525	515	35

Примечание:

CW — холодная обработка, CWA — холодная обработка и отжиг, CWS — холодная обработка и обработка на твердый раствор, HW — горячая обработка, HWA — горячая обработка и отжиг, HWS — горячая обработка и обработка на твердый раствор, SP — обработка на твердый раствор и преципитатное упрочнение. Значения данных для предела текучести получены по 0.2% пробного напряжения.

Предел окисления

Окисление ограничивает предел применения сплавов никель—хром—железо температурами примерно 900...1100°C.

Тепловые свойства

Удельная теплоемкость никеля и его сплавов — 420...545 Дж·кг⁻¹·°C⁻¹ при 20°C. Для большинства сплавов это значение приблизительно равно 460 Дж·кг⁻¹·°C⁻¹. Линейное тепловое расширение, т.е. коэффициент линейного расширения, изменяется от 11 до 15·10⁻⁶·°C⁻¹. Коэффициент теплопроводности никеля, например никеля 200, составляет 75...80 Вт·м⁻¹·°C⁻¹ при 20°C, сплавов никель—медь — 22 Вт·м⁻¹·°C⁻¹, сплавов никель—хром—железо — 11...12 Вт·м⁻¹·°C⁻¹.

7.5. ПРИМЕНЕНИЕ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**Формы материала**

В Табл. 7.7 показаны формы, пригодные для некоторых никелевых ковких сплавов.

Табл. 7.7. Формы никелевых ковких сплавов

Торговая марка	Форма				
	Тонколистовой материал	Полоса	Труба	Проволока	Прутки, сортовой прокат, поковка
Никель					
Никель 200	*	*	*	*	*
Никель 201	*	*	*	*	*

Табл. 7.7 (окончание)

Торговая марка	Форма				
	Тонколистовой материал	Полоса	Труба	Проволока	Пруток, сортовой прокат, поковка
Монель никель—медь					
Монель 400	*	*	*	*	*
Монель К-500	*	*	*	*	*
Твердые растворы сплавов никель—хром—железо					
Инконель 600	*	*	*	*	*
Инколой 800	*	*	*	*	*
Инколой 800 Н	*		*		*
Инколой 825	*	*	*		*
Инколой DS	*	*	*	*	*
Нимоник 75	*	*	*	*	*
Дисперсионно-упрочненные сплавы никель—хром—железо					
Нимоник 80А	*	*	*	*	*
Нимоник 90	*	*	*	*	*
Нимоник 105					*
Нимоник 115					*
Нимоник 263	*	*	*	*	*
Нимоник 901					*
Нимоник PE16	*	*			
Инко НХ	*	*	*		*

Применение ковких и литейных сплавов

В Табл. 7.8 показаны типичные области применения ковких и литейных никелевых сплавов.

Табл. 7.8. Области применения никелевых ковких и литейных сплавов

Торговая марка	Применение
Никель	
Никель 200	Коммерческий чистый никель. Оборудование для пищевой и электронной промышленности, изделия, работающие с едкой щелочью
Никель 201	Аналогично сплаву 200, но предпочтительно при температурах выше 315°C, например, щелочные испарители, лодочки для отбора проб
Монель никель—медь	
Монель 400	Клапаны и насосы, морские крепления и зажимы, теплообменники, баки для свежей воды
Монель К-500	Упрочнен старением с высокой прочностью и твердостью. Оси насосов и крыльчаток, детали отделки клапанов, пружины, масляные отстойники, переходные втулки сверлильных станков и инструментов

Табл. 7.8 (окончание)

Торговая марка	Применение
Твердые растворы сплавов никель—хром—железо	
Инконель 600	Имеет высокое сопротивление окислению, для высокотемпературных приложений. Муфельные печи, трубопроводы теплообменников, оборудование для химических и пищевых производств
Инколой 800	Устойчив к водороду, сероводородной коррозии и коррозии под сильным воздействием ионов хлоридов. Углеродистые трубы дробилок, кожухи нагревательных элементов
Инколой 800Н	Подобно Инколю 800, но с улучшенной высокотемпературной прочностью
Инколой 825	Имеет высокое сопротивление к окисляющим и восстанавливающим кислотам и морской воде. Испарители фосфорных кислот, при травлении пластин и оснастка для химических процессов
Инколой DS	Основного назначения сплав с высоким тепловым сопротивлением. Муфельные печи, высокотемпературное оборудование
Нимоник 75	Имеет хорошую прочность и сопротивление окислению при высоких температурах. Листовой металл, работающий в газовых турбинах, муфельные печи, высокотемпературное оборудование
Дисперсионно-упрочненные сплавы никель—хром—железо	
Нимоник 80А	Лопатки и части газовых турбин, литые под давлением втулки и сердечников
Нимоник 90	Лопатки и части газовых турбин, горячеобработанный инструмент
Нимоник 105	Лопатки и части газовых турбин, диски и оси
Нимоник 115	Лопатки газовых турбин
Нимоник 263	Кольца газовых турбин, детали из листового металла для эксплуатации до 850°C
Нимоник PE16	Детали, работающие при температурах до 600°C, диски газовых турбин и оси
Астролой	Материал штампованной поковки для высоких температур
Инко НХ	Части газовых турбин, печей и оборудования с высоким тепловым сопротивлением
Инконель Х750	Части газовых турбин, болты
Рене 41	Лопатки и части двигателей
Удимет 500	Части газовых турбин, болты
Удимет 700	Части двигателей
Васпалой	Лопатки двигателей
Литейные сплавы	
В-1900	То же
MAR-M 200	То же
Рене 77	Части двигателей
Рене 80	Лопатки турбин

Глава восьмая

Титан

8.1. МАТЕРИАЛЫ

Титан

Титан имеет относительно низкую плотность $4.5 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, как раз половину плотности стали. Он имеет также относительно низкую прочность, если находится в чистом виде, но в сплаве она значительно возрастает. Кроме того, металл обладает превосходной коррозионной стойкостью. Недостатком его является высокая цена.

Титан может существовать в двух кристаллических формах: в α -форме, которая представляет собой гексагональную плотноупакованную решетку (ГП-решетка), и в β -форме, которая кристаллизуется в виде объемно-центрированной кубической решетки (ОЦК-решетка). В чистом титане α -форма — стабильная фаза выше 883°C и переходит в β -форму ниже этой температуры. Чистота коммерческого чистого титана — $99.5 \dots 99.0\%$; основными примесями являются железо, углерод, кислород, азот и водород. Свойства коммерческого чистого титана в значительной степени определяет содержание в нем кислорода.

(См. Коды составов, Состав, Отжиг, Обработка на твердый раствор и дисперсионная обработка, Снятие напряжения, Параметры ползучести, Плотность, Электрическое сопротивление, Усталостные свойства, Вязкое разрушение, Твердость, Ударные свойства, Обрабатываемость на станках, Механические свойства, Тепловые свойства, Свариваемость, Формы, Применение.)

Титановые сплавы

Титановые сплавы можно объединить соответственно фазам, имеющимся в их структуре. Добавки таких элементов, как алюминий, свинец, кислород или азот, вызывают увеличение области α -фазы на равновесной диаграмме состояния; эти элементы приводят к α -стабилизации. Другие элементы, такие как ванадий, молибден, кремний и медь, увеличивают область β -фазы и известны как β -стабилизаторы. Существуют элементы, которые при добавлении в титан не дают ни α -, ни β -стабилизации. Од-

ним из них является цирконий. Он применяется для увеличения прочности твердого раствора.

Титановые сплавы сгруппированы в четыре категории, каждая из которых имеет свои отличительные свойства:

1. α -титановые сплавы.

Эти сплавы состоят исключительно из α -фазы, к титану добавлено значительное количество элементов для α -стабилизации. Сплавы прочные и сохраняют прочность при высоких температурах. Они имеют хорошую свариваемость, но не обрабатываются в горячем виде.

2. Титановые сплавы вблизи α -фазы.

Такие сплавы состоят почти все из α -фазы с малым количеством β -фазы, рассеянной по α -фазе. Это достигается путем добавления небольшого количества элементов — 1...2%, стабилизирующих β -фазу. Сплавы обладают повышенным сопротивлением ползучести при температуре 450...500°C.

3. α — β -титановые сплавы.

Они содержат достаточное количество β -стабилизаторов для того, чтобы получить заметное количество β -фазы при комнатной температуре. Эти сплавы можно обрабатывать на твердый раствор, закалять и старить для увеличения прочности.

4. β -титановые сплавы.

Если к титану добавить достаточно большое количество β -стабилизаторов, то результирующую структуру можно сделать всецело из α -фазы при комнатной температуре после закалки или в некоторых случаях охлаждением воздухом. Подобно α -сплавам, β -сплавы в холодном виде легко обрабатываются на твердый раствор, доводятся до состояния закалки и могут быть впоследствии состарены, давая при этом очень высокую прочность. В состоянии высокой прочности сплавы имеют низкую пластичность и плохую усталостную характеристику.

(См. Коды составов, Состав, Отжиг, Обработка на твердый раствор и дисперсионная обработка, Снятие напряжения, Параметры ползучести, Плотность, Электрическое сопротивление, Усталостные свойства, Вязкое разрушение, Твердость, Ударные свойства, Обрабатываемость на станках, Механические свойства, Тепловые свойства, Свариваемость, Формы изделий, Применение.)

8.2. КОДЫ И СОСТАВЫ СПЛАВОВ

Системы кодирования составов

Титановые сплавы называют по их структуре, т.е. α -сплав, близкий к α , α — β и β . Характерные сплавы с такими группами часто называют в терминах их номинального состава, например

Ti—5Al—2.5Sn для титанового сплава с 5% алюминия и 2.5% олова. Одна основная система, которая применяется в Великобритании, имеет спецификацию титановых сплавов по названию компании — «IMI Ltd». Эта система приведена в Табл. 8.1. В США имеются спецификации Американского общества по испытанию материалов (ASTM) и спецификации (технические условия) на авиационные материалы (AMS). Добавим: поскольку титановые сплавы в значительной степени применяются для военных целей (например, обшивки надводных кораблей и подводных лодок и т.д.), имеется спецификация военных систем.

Табл. 8.1. Коды IMI для титановых сплавов

Тип сплава	Номинальный состав	Код IMI
α-фазы	Коммерческий чистый	110, 115, 125, 130, 155, 160
	Ti—Pd	260, 262
α-фазы + соединение	Ti—2.5Cu	230
Вблизи α-фазы	Ti—11Sn—5Zr—2.25Al—1Mo—0.2Si	679
	Ti—6Al—5Zr—0.5Mo—0.25Si	685
	Ti—5.5Al—3.5Sn—3Zr—1Nb—0.25Mo—0.3Si	829
α—β-фазы	Ti—6Al—4V	318
	Ti—4Al—4Mo—2Sn—0.5Si	550
	Ti—4Al—4Mo—4Sn—0.5Si	551
β-фазы	Ti—11.5Mo—6Zr—4.5Sn	β-III

Составы

Для характеристики сплавов используется номинальный состав титановых сплавов, свойства которых приведены в таблицах этой главы. (См. Механические свойства для детализации составов обычно применяемых титановых сплавов.)

8.3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Отжиг

В Табл. 8.2 приведены типичные температура отжига и время выдержки для титановых сплавов. Для некоторых сплавов, например Ti—8Al—1Mo—1V, возможны две формы термической обработки: отжиг при прокатке и двойной отжиг. Отжиг при прокатке для указанного выше сплава состоит в прогреве при 790°C в течение 8 ч и последующем охлаждении его в печи. Двойной отжиг включает повторный прогрев уже отожженного при прокатке материала при 790°C в течение четверти часа и затем охлаждение его воздухом.

Табл. 8.2. *Обработка отжигом титановых сплавов*

Сплав	Отжиг		
	Температура [°C]	Время [ч]	Охлаждение
Коммерческий чистый Ti	650...760	0.1...2	Воздух
α -фазы	720...845	0.2...4	То же
Вблизи α -фазы	790...900	0.5...8	То же
α - β -фазы	650...820	0.5...4	Воздух/печь
β -фазы	700...815	0.1...1	Воздух/вода

Обработка на твердый раствор и дисперсионная обработка

В Табл. 8.3 приведены типичная обработка на твердый раствор и процесс старения для титановых сплавов.

Табл. 8.3. *Обработка на твердый раствор и дисперсионная обработка титановых сплавов*

Сплав	Обработка на твердый раствор			Дисперсионная обработка	
	Температура [°C]	Время [ч]	Охлаждение	Температура [°C]	Время [ч]
α-фазы					
Коммерческий чистый Ti	Нет применения				
Ti-2.5Cu	805...815	—	Воздух	475 400	8 и более 8
Вблизи α-фазы					
Ti-8Al-1Mo-1V	980...1010	1	Масло/вода	565...595	—
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	955...980	1	Воздух	595	8
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si	1050	—	Масло	550	24
α-β-фазы					
Ti-6Al-4V	950...970	1	Вода	480...595	4...8
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	900	—	Воздух	500	24
Ti-6Al-6V-2Sn(Cu+Fe)	885...910	1	Вода	480...595	4...8
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	845...890	1	Воздух	580...605	4...8
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	845...870	1	Воздух	580...605	4...8
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si	870...925	1	Вода	480...595	4...8
β или вблизи β-фазы					
Ti-13V-11Cr-3Al	775...800	0.25...1	Воздух/вода	425...480	4...100
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	690...790	0.13...1	Воздух/вода	480...595	8...32
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	815...925	1	Вода	455...540	8...24

Снятие напряжения

В Табл. 8.4 приведены типичные температуры снятия напряжения и время выдержки титановых сплавов.

Табл. 8.4. Снятие напряжения обработкой титановых сплавов

Сплав	Снятие напряжения		
	Температура [°C]	Время [ч]	Охлаждение
Коммерческий чистый Ti	480...600	0.25...1	Воздух
α -фазы	540...650	0.25...4	
Вблизи α -фазы	480...700		
α - β -фазы	480...700		
β -фазы	675...760	0.1...0.5	

8.4. СВОЙСТВА СПЛАВОВ

Параметры ползучести

Ползучесть накладывает ограничение на верхнюю температуру применения ближней α -фазы, α - β -фазы и β -титановых сплавов. Ограничение на применение коммерческого чистого титана и α -сплавов накладывается понижением предела прочности на растяжение. В основном верхняя предельная температура для коммерческого чистого титана равна примерно 200°C, для других α -сплавов — 250...350°C, для ближней α -фазы — около 500°C, для α - β -фазы — 350...400°C и для β -фазы — около 300°C. (См. таблицы в разделе Механические свойства для деталей высокой прочности на растяжение при повышенной температуре.)

В Табл. 8.5 приведены данные о напряжениях ползучего разрыва для коммерческого чистого титана при комнатной и повышенной температурах.

Табл. 8.5. Напряжения ползучего разрыва для коммерческого чистого титана

Титан	Температура [°C]	Напряжение ползучего разрыва [МПа]			
		100 [ч]	1000 [ч]	10000 [ч]	100000 [ч]
99.5 Ti	20	286	269	255	241
	150	190	182	168	161
	300	139	134	128	122
99.2 Ti	20	397	372	352	332
	150	253	250	244	239
	300	215	208	204	199
99.1 Ti	20	455	423	392	357
	150	275	264	250	239
	300	216	215	205	199
99.0 Ti	20	533	497	469	438
	150	321	296	281	269
	300	241	238	218	212

Плотность

Плотность коммерческого чистого титана равна $4.51 \cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ при 20°C , α -сплавы имеют плотность около $4.48 \cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, близкая α -фаза — $4.4 \dots 4.8 \cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ и β -фаза — $4.8 \cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Электрическое удельное сопротивление

Электрическое удельное сопротивление коммерческого чистого титана при 20°C равно $0.49 \text{ мОм}\cdot\text{м}$, а у сплавов оно изменяется от 1.6 до $1.7 \text{ мОм}\cdot\text{м}$.

Усталостные свойства

Предел усталости при 10^7 циклах для титана составляет 0.5 предела прочности на растяжение, а для сплавов — $0.4 \dots 0.65$.

Вязкость разрушения

В Табл. 8.6 приведены типичные значения вязкости разрушения K_{Ic} для ряда титановых сплавов.

Табл. 8.6. Вязкость разрушения титановых сплавов

Сплав	Состояние	K_{Ic} [МПа·м ^{-1/2}]
α-фазы		
Коммерческий чистый Ti	Отожжен	>70
Ti-2.5 Cu	Отожжен	>70
Вблизи α-фазы		
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si	Горячаяковка	60...70
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Обработка на твердый раствор, старение	50...60
α-β-фазы		
Ti-6Al-4V	Отожжен	50...60
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	Горячаяковка	45...55
	Обработка на твердый раствор, старение	40...50
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si	То же	30...40
β-фазы		
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	То же	>50

Твердость

Поглощение кислорода поверхностью титана, когда он нагрет во время обработки, приводит к уменьшению твердости его поверхности. (См. в Табл. 8.7 типичные значения твердости.)

Ударные свойства

В Табл. 8.7 приведены типичные значения энергии ударов при испытании Шарпи и значения твердости для титана и его сплавов при 20°C.

Табл. 8.7. Энергия ударов и твердость титана и сплавов

Сплав	Состояние	Значение величины Шарпи [Дж]	Твердость		
			HV	HB	HRC
α-фазы — коммерческие чистые сплавы					
99.5 Ti	Отожжен	—	—	120	—
99.2 Ti		43	—	200	—
99.1 Ti		38	—	225	—
99.0 Ti		20	—	265	—
99.2 Ti—0.2Pd		43	—	200	—
α-фазы					
Ti—5Al—2.5Sn	Отожжен	26	220	—	36
Ti—5Al—2.5Sn (слабоокисленный)		27	290	—	35
Вблизи α-фазы					
Ti—8Al—1Mo—1V	Двойной отжиг	32	—	—	35
Ti—6Al—2Sn—4Zr—2Mo		—	—	—	32
Ti—6Al—1Mo—2Cb—1Ta	В прокатанном состоянии	31	—	—	30
Ti—6Al—5Zr—0.5Mo—0.2Si	Горячаяковка	—	355	—	—
α-β-фазы					
Ti—6Al—4V	Отожжен	1 ⁽¹⁾	350	—	36
Ti—6Al—6V—2Sn		18	365	—	38
Ti—7Al—4Mo	Твердый раствор + старение	18	—	—	38
Ti—4Al—4Mo—2Sn—0.5Si		—	365	—	—
Ti—4Al—4Mo—4Sn—0.5Si		—	400	—	—
β-фазы					
Ti—11.5Mo—6Zr—4.5Sn	Твердый раствор + старение	—	400	—	—
Ti—13V—11Cr—3Al		11	—	—	40
Ti—8Mo—8V—2Fe—3Al		—	—	—	—
Ti—3Al—8V—6Cr—4Mo—4Zr		10	—	—	42

Обрабатываемость на станках

Коммерческий чистый титан, сплавы α-фазы и ближней α-фазы обладают очень хорошей обрабатываемостью на станках. Некоторые сплавы α—β-фазы тоже имеют хорошую обрабатываемость, например Ti—6Al—4V, но у других она лишь на среднем уровне. Сплавы β-фазы имеют только среднюю обрабатываемость. Так как теплопроводность титана и его сплавов довольно низкая, во время механической обработки могут возникать высокие локальные температуры, что существенно важно, поэтому следует внимательно контролировать скорости резки.

Механические свойства

Модуль растяжения титана и его сплавов равен примерно 110 ГПа, за исключением сплава Ti—6Al—4V с модулем 125 ГПа. Модуль сдвига составляет около 42...55 ГПа, у большинства сплавов — 45 ГПа. В Табл. 8.8 приведены параметры прочности на растяжение титана и его сплавов. (См. Ударные свойства для заданных ударных нагрузок и твердостей.)

Табл. 8.8. Механические свойства титановых сплавов

Сплав	Состояние	Температура обработки [°C]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]
α-фазы — коммерческие чистые сплавы					
99.5 Ti	Отожжен	20	330	240	30
		315	150	95	32
99.2 Ti	Отожжен	20	435	345	28
		315	195	115	35
99.1 Ti	Отожжен	20	515	450	25
		315	235	140	34
99.0 Ti	Отожжен	20	660	585	20
		315	310	170	25
99.2 Ti—0.2Pd	Отожжен	20	435	345	28
		315	185	110	37
α-фазы					
Ti—5Al—2.5Sn	Отожжен	20	860	805	16
		315	565	450	18
Ti—5Al—2.5Sn (слабоокисленный)	Отожжен	20	805	745	16
		—255	1580	1420	15
Вблизи α-фазы					
Ti—8Al—1Mo—1V	Двойной отжиг	20	1000	950	15
		315	795	620	20
		540	620	515	25
Ti—6Al—2Sn—4Zr—2Mo	Двойной отжиг	20	980	895	15
		315	770	585	16
		540	650	490	26
Ti—6Al—1Mo—2Cb—1Ta	В прокатанном состоянии	20	855	760	13
		315	585	460	20
		540	485	380	20
Ti—6Al—5Zr—0.5Mo—0.2Si	Горячая ковка	20	1040	875	10
		300	800	640	17
		500	690	500	19

Табл. 8.8 (окончание)

Сплав	Состояние	Температура обработки [°C]	Предел прочности на растяжение [МПа]	Предел текучести [МПа]	Удлинение [%]
α-β-фазы					
Ti-6Al-4V	Отожжен	20	990	925	14
		315	725	655	14
		540	530	425	35
	Твердый раствор + старение	20	1170	1100	10
		315	860	705	10
		540	655	485	22
Ti-6Al-6V-2Sn	Отожжен	20	1070	1000	14
		315	930	805	18
	Твердый раствор + старение	20	1275	1170	10
		315	980	895	12
Ti-7Al-4Mo	Твердый раствор + старение	20	1105	1035	16
		315	975	745	18
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	Твердый раствор + старение	20	1190	960	17
		300	900	700	18
		500	790	600	21
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si	Твердый раствор + старение	20	1330	1095	11
		300	1030	805	14
		500	900	690	17
β-фазы					
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	Твердый раствор + старение	20	1385	1315	11
		315	905	850	16
Ti-13V-11Cr-3Al	Твердый раствор + старение	20	1220	1170	8
		315	885	795	19
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	Твердый раствор + старение	20	1310	1240	8
		315	1130	980	15
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	Твердый раствор + старение	20	1450	1380	7
		315	1035	895	20

Примечание:

Значения предела текучести определены по 0.2% пробного напряжения.

Тепловые свойства

Линейное тепловое расширение, т.е. коэффициент линейного расширения, для титана находится в пределах $8...9 \cdot 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Удельная теплоемкость при 20°C равна примерно $530 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ для коммерческого чистого титана и изменяется от 400 до 650

Дж·кг⁻¹·°C⁻¹ для титановых сплавов. Теплопроводность равна примерно 16 Вт·м⁻¹·°C⁻¹ для коммерческого чистого титана и изменяется от 5 до 12 Вт·м⁻¹·°C⁻¹ для сплавов.

Свариваемость

Коммерческий чистый титан и сплавы α-фазы и ближней α-фазы, в основном, обладают очень хорошей свариваемостью. Некоторые сплавы α—β-фазы свариваются, но сплав β-фазы — нет. Среди сплавов α—β-фазы хорошую свариваемость имеет сплав Ti—6Al—4V. Однако здесь следует остерегаться загрязнений, в особенности от кислорода и азота при высокой температуре сварки. По этой причине наиболее широко применяется дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG). Могут использоваться также электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварки и сварка трением. Контактная точечная и роликовая сварки применяются только в ситуациях, когда долговечность не имеет значения.

8.5. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ФОРМЫ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

Формы изделий

В Табл. 8.9 приведены основные формы изделий, подходящие для титана и его сплавов.

Табл. 8.9. *Формы изделий из титановых сплавов*

Сплав	Формы изделий						
	Пруток	Штамповка	Тонкий лист	Полоса	Толстый лист	Проволока	Труба
α-фазы — коммерческие чистые сплавы							
99.5 Ti	*	*	*	*	*		
99.2 Ti	*	*	*	*	*		*
99.1 Ti	*	*	*	*	*	*	
99.0 Ti	*	*				*	
99.2 Ti—0.2Pd	*	*	*	*	*	*	
α-фазы							
Ti—5Al—2.5Sn	*	*	*	*	*		
Ti—5Al—2.5S (слабоокисленный)	*	*	*	*	*		
Вблизи α-фазы							
Ti—8Al—1Mo—1V	*	*				*	
Ti—6Al—2Sn—4Zr—2Mo	*	*					

Табл. 8.9 (окончание)

Сплав	Формы изделий						
	Пруток	Штамповка	Тонкий лист	Полоса	Толстый лист	Проволока	Труба
Ti-6Al-1Mo-2Cb-1Ta					*		
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si		*					
α-β-фазы							
Ti-6Al-4V	*	*	*	*	*	*	
Ti-6Al-6V-2Sn	*	*					
Ti-7Al-4Mo	*	*					
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	*	*			*		
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si	*	*					
β-фазы							
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	*					*	
Ti-13V-11Cr-3Al			*		*		
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al		*	*		*	*	
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	*					*	

Примечание:

Термин «проволока» охватывает как проволоку, так и заготовки крепежных деталей.

Применение титана и его сплавов

В Табл. 8.10 приведены типичные применения титана и его сплавов.

Табл. 8.10. Применение титановых сплавов

Сплав	Области применения
α-фазы — коммерческие чистые сплавы	
99.5 Ti	Имеет высокие пластичность и коррозионную стойкость. Очень хорошие свариваемость и формемость, обрабатываемость на станках и горячая объемная штамповка. Судовые детали, корпуса самолетов, части химического оборудования
99.2 Ti	То же
99.1 Ti	То же
99.0 Ti	То же, а также газовые компрессоры, высокоскоростные вентиляторы, конструкционные детали самолетов. Повышенной прочности коммерческий чистый титан
99.2 Ti-0.2Pd	Имеет улучшенное сопротивление коррозии в восстановительной среде

Табл. 8.10 (окончание)

Сплав	Области применения
α-фазы	
Ti—5Al—2.5Sn	Имеет комбинацию очень хорошей формуемости, обрабатываемости на станках, свариваемости и горячей объемной штамповки коммерческого чистого титана с улучшенной прочностью выше 350°C. Конструкции самолетных компрессорных лопастей, системы трубопроводов, лопасти паровых турбин
Ti—5Al—2.5Sn (слабоокисленный)	Специальный сорт для работы при очень низких температурах, ниже -255°C
Вблизи α-фазы	
Ti—8Al—1Mo—1V	Высокая прочность, хорошее сопротивление ползучести и ударной вязкости выше 450°C. Корпуса самолетов и детали форсунок
Ti—6Al—2Sn—4Zr—2Mo	Хорошее сопротивление ползучести выше 475°C. Обшивки компонентов корпусов самолетов, части и кожухи для патрубков компрессоров
Ti—6Al—1Mo—2Cb—1Ta	Имеет высокую ударную вязкость, хорошее сопротивление к воздействию морской воды и коррозии горячих солей, хорошую свариваемость с умеренной прочностью
Ti—6Al—5Zr—0.5Mo—0.2Si	Сплав с сопротивлением ползучести при температуре выше 550°C с хорошей свариваемостью
α-β-фазы	
Ti—6Al—4V	Наиболее используемый сплав. Возможна тепловая обработка для получения различной прочности, хорошо сваривается, штампуется и обрабатывается на станках. Необходима горячая формовка. Лопастей и диски самолетных турбин и компрессоров, корпуса ракетных двигателей, судовые компоненты, лопатки паровых турбин, крепежные детали
Ti—6Al—6V—2Sn	Самолетные части, зубчатые колеса, корпуса ракетных двигателей
Ti—7Al—4Mo	Имеет хорошие свойства при температуре выше 425°C. Самолетные корпуса и части форсунок, горячей поковки реактивные снаряды
Ti—4Al—4Mo—2Sn—0.5Si	Легкокованный сплав с хорошим сопротивлением ползучести при температуре выше 400°C
Ti—4Al—4Mo—4Sn—0.5Si	Горячей штамповки сплав с очень высокой прочностью при комнатной температуре
β-фазы	
Ti—11.5Mo—6Zr—4.5Sn	Может быть формован холодной обработкой или подвергнут тепловой обработке. Высокой прочности зажимы и самолетные тонколистовые части
Ti—13V—11Cr—3Al	Подвергается тепловой обработке. Высокой прочности зажимы, сотовые панели, компоненты космических аппаратов
Ti—8Mo—8V—2Fe—3Al	Высокой прочности зажимы, прокованные компоненты и прочные тонколистовые самолетные корпуса
Ti—3Al—8V—6Cr—4Mo—4Zr	Высокой прочности зажимы, компоненты космических аппаратов, деформированные кручением пружины

Глава девятая

Полимерные материалы

9.1. МАТЕРИАЛЫ

Типичные полимеры

Полимеры можно разделить на три основные группы:

1. Эластомеры (резины).

Эластомеры — это такие полимеры, у которых молекулярная структура допускает значительные и обратимые растяжения. Такие материалы являются легкосшиваемыми полимерами. У них между поперечными связями молекулярных цепочек есть небольшая свобода движения. Если эти поперечные связи вытянуты, то полимерные цепочки стремятся выровняться и стать центрированными, из-за чего происходит уменьшение кристалличности полимера.

2. Термореактивные пластмассы (реактопласты).

Это жесткие материалы, и они не становятся мягкими при нагревании. У таких полимеров молекулярные структуры имеют расширенные поперечные связи. Из-за этого, когда нагрев разрушает эти связи, эффект необратим при охлаждении.

3. Термопластичные пластмассы (термопласты).

Эти материалы могут быть мягкими и неопределенно размягченными под воздействием тепла при не слишком высокой температуре, как в случае расщепления. Термин «термопластик» подразумевает, что материал становится пластичным, когда он нагревается. Такие полимеры имеют линейные или разветвленные молекулярные цепи структур с малым числом связей, если их несколько, между цепями. Линейные и некоторые разветвленные полимерные цепи могут быть в таком состоянии, когда имеет место уменьшение кристалличности.

Эластомеры

Эластомеры можно сгруппировать в соответствии с формой их полимерных цепочек.

1. В основе полимерной цепочки находится только углерод.

В эту группу входят натуральный каучук, бутадиен-стирол, бутадиен-акрилонитрил, бутил-каучуки, полихлоропрен и этилен-пропилен.

2. Полимерные цепочки с кислородом в основе. Например, окись полипропилена .

3. Полимерные цепочки с кремнием в основе. Например, фторкремний.

4. Полимерные цепочки, имеющие в основе серу. Например, полисульфид.

5. Термопластичные эластомеры. Это блок сополимеров с альтернативной твердостью и гибкими блоками. Например, полиуретаны, этиленвинилацетат и стирол-дивинил-стирол. Такие эластомеры могут быть изготовлены термопластическими методами прессования, а также литьем под давлением и выдувным формованием. Они, подобно термопластикам, могут быть неоднократно размягчены при нагреве и не похожи на обычные эластомеры.

(См. Добавки, Кристалличность, Структура полимеров, Структура и свойства, Коды, Состав, Химические свойства, Плотность, Температура перехода в стеклообразное состояние, Твердость, Механические свойства, Проницаемость, Тепловые свойства, Применение.)

Термореактивные пластмассы (реактопласты)

Основными термореактивными пластмассами являются следующие:

1. Феноло-формальдегидные.
2. Аминосмолы (мочевина и меламин-формальдегиды).
3. Эпоксидные.
4. Полиэфирные.
5. Сшиваемые полиуретаны.

(См. Добавки, Кристалличность, Структура полимеров, Структура и свойства, Коды, Состав, Плотность, Электрические свойства, Твердость, Механические свойства, Тепловые свойства, Методы изготовления, Применение.)

Термопластичные пластмассы (термопласты)

Термопластики состоят их двух групп материалов: неполярных и полярных полимеров.

1. Семейство неполярных термопластов основано на этилене. Оно, в свою очередь, может быть подразделено на следующие группы: полиолефины, основанные на полиэтилене и полипропилене, винилы с основой на винилхлориде, винилацетат и различные другие соединения винилов. Все неполярные полимеры строятся на базе только атомов углерода.

2. К семейству полярных термопластов относятся фторопласт-3, оргстекло, полиамиды, полиуретаны, полиацетаты, полкарбонаты, полиарилаты, целлюлозы и т.д. Введение атомов хлора нарушает в фторопласте-3 симметрию звеньев молекул, и материал становится полярным. К такому же эффекту приводит амидная группа в полиамидах и т.д.

(См. Добавки, Кристалличность, Структура полимеров, Структура и свойства, Коды, Состав, Химические свойства, Параметры ползучести, Плотность, Электрические свойства, Усталостные свойства, Температура перехода в стеклообразное состояние, Твердость, Ударные свойства, Механические свойства, Оптические свойства, Проницаемость, Тепловые свойства, Методы изготовления, Применение.)

9.2. ПОЛИМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ

Наполнители

Пластики и каучуки почти всегда содержат не только полимерные материалы, но также наполнители. Они могут быть смешаны также из нескольких полимеров. Основные типы наполнителей следующие:

1. Наполнители, видоизменяющие механические свойства полимеров, уменьшающие, например, хрупкость и увеличивающие модуль растяжения; к ним относятся древесный порошок, пробковая пыль, мел. Применение их приводит к уменьшению стоимости материала.

2. Армирование, например, стеклянными волокнами или сферическими частицами, повышающее модуль растяжения и прочность.

3. Пластификаторы, приводящие к молекулярным изменениям, для облегчения скольжения одной части материала относительно другой, вследствие чего материал становится более гибким.

4. Стабилизаторы, улучшающие сопротивляемость материала деградации.

5. Замедлители горения, увеличивающие сопротивляемость возгоранию.

6. Смазочные вещества и теплостабилизаторы, помогающие в обработке материалов.

7. Пигменты и красители, придающие цвет материалу.

Кристалличность

Кристалличность наиболее вероятна у полимеров, состоящих из простых линейных цепочек молекул. Разветвленные полимерные цепочки не поддаются легко упаковке регулярным способом, в этом им препятствуют разветвления. Если разветвления имеют

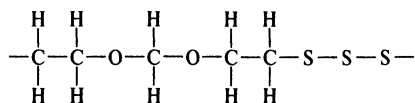


Рис. 9.11. Полисульфид

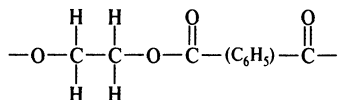


Рис. 9.12. Полиэтилентерефталат

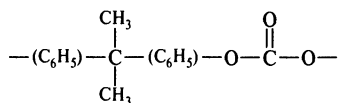


Рис. 9.13. Поликарбонат

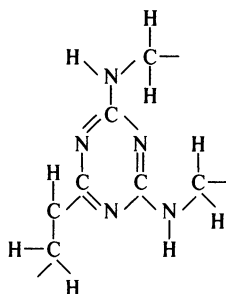


Рис. 9.14. Меламин-формальдегид

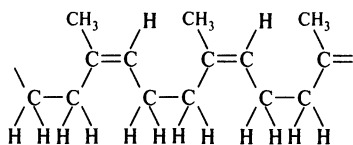


Рис. 9.15. Цис-полиисопрен, цепь натурального каучука до вулканизации

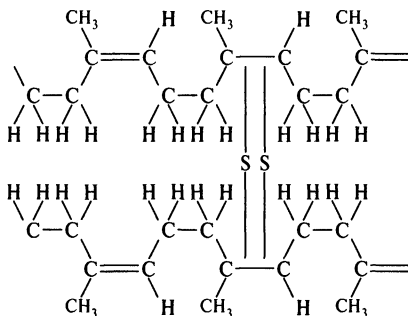


Рис. 9.16. Вулканизированный каучук, связанные серой полиисопреновые цепи

Структура и свойства полимеров

Рассмотрим методы, которыми могут быть изменены свойства полимерных материалов.

1. Увеличение длины молекулярной цепи у линейного полимера. При этом возрастает предел прочности на растяжение и жесткость, поскольку чем длиннее цепи, тем легче становится образование сплетений, и настолько же затрудняется движение цепей.

2. Введение больших боковых ветвей в линейные цепи. Это увеличивает предел прочности на растяжение и жесткость, поскольку боковые ветви препятствуют движению цепей.

3. Создание разветвлений в линейной цепи. Это увеличивает предел прочности на растяжение и жесткость, поскольку разветвления препятствуют движению цепей.

4. Введение больших групп в цепи. Это уменьшает способность цепи к гибкости и тем самым увеличивает жесткость.

5. Сшивание цепей. Большое уменьшение сшивания сильнее препятствует движению цепи, и, следовательно, получается более жесткий материал.

6. Введение жидкости между цепями. Добавка жидкостей, тепловых пластификаторов, которые заполняют некоторое пространство между полимерными цепями, облегчает движение цепей и таким образом увеличивает гибкость.

7. Методы, делающие некоторый материал кристаллическим. У линейных цепей возможно уменьшение кристалличности. Это можно контролировать. Большое уменьшение кристалличности сильнее уплотняет материал и делает выше его предел прочности на растяжение и жесткость.

8. Включение наполнителей. На свойства полимерных материалов можно воздействовать введением наполнителей. Таким

образом, например, могут быть увеличены модули растяжения и напряжения при встраивании в полимеры стеклянных волокон. Графит как наполнитель может уменьшать сцепление цепей.

9. Ориентация. Растяжение или внесение деформации сдвига во время изготовления могут приводить в полимерных материалах к подходящему выстраиванию цепей в линию в особом направлении. Свойства в этом направлении будут тогда отличаться от свойств в поперечном направлении.

10. Сополимеризация. Комбинирование двух или более мономеров в отдельную полимерную цепь будет изменять свойства полимера, которые зависят от соотношения компонентов.

11. Смешивание. Добавление двух или более полимеров в форму материала будет влиять на свойства; свойства нового полимера будут зависеть от соотношения материалов.

9.3. КОДЫ И КОМПОНЕНТЫ ПОЛИМЕРОВ

Системы кодирования полимеров

В Табл. 9.2 приведены обычные аббревиатуры и названия, применяемые для полимеров. Полное название для полимеров давалось с целью описать как можно лучше структуру основной полимерной цепи. Так, для гомополимера, образованного из мономера X, название полимера будет полиX. Если мономер есть XY, тогда полимер будет полиXY. Для сополимеров из мономеров X и Y название полимера будет X—Y сополимер или поли(X—со—Y). Не все полимеры имеют названия, основанные на исходном материале, как указано выше. У некоторых из них они основаны на повторении единицы размерности в полимерной цепи. Так, если название повторяет единицу размерности X, полимер называется полиX. Другие названия базируются на характеристике размерности химической единицы, обычной для группы полимеров, например эпокси.

Табл. 9.2. Аббревиатуры для полимеров

Аббревиатура	Обычное название	Полимер
Термо- и реактопласты		
ABS	—	Акрилонитрил-дивинил-стирол
CA	Ацетат	Ацетат целлюлозы
CAB	—	Ацетатбутират целлюлозы
CN	Целлулоид	Нитрат целлюлозы
CPVC	—	Хлорированный поливинилхлорид
EP	—	Эпоксидная смола
MF	Меламин	Меламин-формальдегид
PA	Нейлон*	Полиамид

Табл. 9.2 (продолжение)

Аббревиатура	Обычное название	Полимер
PAN	—	Полиакрилонитрил
PC	—	Поликарбонат
PE	Полиэтилен	Полиэтилен
PETP	Полиэфир	Полиэтилентерефталат
PF	Фенол	Фенолформальдегид
PIB	—	Полиизобутилен
PMMA	Акрилик	Полиметилметакрилат
POM	Ацетал	Полиоксиметилен
PP	—	Полипропилен
PS	Стирол	Полистирол
PTFE	—	Политетрафторэтилен
PUR	—	Полиуретан
PVAC	—	Поливинилацетат
PVAL	—	Поливиниловый спирт
PVC	Винил	Поливинилхлорид
PVDC	—	Поливинилиденхлорид
PVDF	—	Поливинилиденфлюорид
PVF	—	Поливинилфторид
SAN	—	Стирол-акрилонитрил
SB	—	Стирол-бутадиен
SI	—	Кремний
UF	Мочевина	Мочевина формальдегида
UP	Полиэтилен	Ненасыщенный полиэтилен
Эластомеры		
ACM	Акрилик	Полиакрилат
ANM	—	Акрилат-акрилонитрил сополимер
AU	Полиуретан	Полиэтилен-уретан
BR	—	Полибутадиен
BUTYL	Бутил	Изобутен-изопропен сополимер
CM	—	Хлорированный полиэтилен
CR	Неопрен	Полихлоропрен
EPDM	—	Этилен-пропилен-диен тройной сополимер
EPM	—	Этилен-пропилен сополимер
EVA	—	Этиленвинилацетат
EU	Полиуретан	Полиэфируретан
FKM	Фторуглерод	Углеродная цепь фторполимера
FVMQ	—	Кремнефтористая резина

* Это номер обычных полиамидов: нейлон 6, нейлон 6.6, нейлон 6.10 и нейлон 11. Номера указаны по числу атомов углерода в каждом взаимодействующем веществе, применяемом для изготовления полимера (см., например, Рис. 9.7—9.9).

Табл. 9.2 (окончание)

Аббревиатура	Обычное название	Полимер
GPO	—	Пропиленоксид сополимер
IIR	Бутил	Изобутен-изопропен сополимер
NBR	Буна N, нитрил	Акрилонитрил-бутадиен сополимер
NR	—	Натуральный каучук
SBR	GR-S, Буна S	Стирол-бутадиен сополимер
VMQ	Кремний	Полидиметилсилоксан, обычный сополимер с виниловыми группами
YSBR	—	Термопластичный стирол-бутадиен сополимер

Состав

Большинство технических полимерных материалов включают добавки так же, как и собственно полимер, и некоторые составлены более чем из одного полимера. Поставщики сырых материалов в состоянии предложить большой диапазон полимеров с различными добавками, подбор комбинации зависит от цели, т.е. от требуемых свойств материала. Некоторые образцы совсем изменили цвет в результате различных пигментов, применяемых в качестве добавок. У других различное процентное содержание по весу стеклянных волокон, и вследствие этого они имеют различные механические свойства. В некоторые полимеры введены тонкозернистые замедлители. Какие-то типы предназначены для того, чтобы в результате изменения структуры полимера варьировались ударные свойства.

9.4. СВОЙСТВА

Химические свойства

В Табл. 9.3 приводятся данные о химической стабильности термопластиков при 20°C, когда их выдерживают в различных химикатах. В Табл. 9.4 приведены подобные данные для эластомеров.

Табл. 9.3. Химическая стабильность термопластов

Полимер	Поглощение воды	Кислоты		Спирты		Органические растворители
		слабые	сильные	слабые	сильные	
ABS	M	R	AO	R	R	A
Акрилик	M	R	AO	R	R	A
Ацетат целлюлозы	H	R	A	R	A	A

Табл. 9.3 (окончание)

Полимер	Поглощение воды	Кислоты		Спирты		Органические растворители
		слабые	сильные	слабые	сильные	
Ацетобутират целлюлозы	H	R	A	R	A	A
Нейлон	H	A	A	R	R	R
Полиацеталь сополимер	M	A	A	R	R	R
Полиацеталь гомополимер	M	R	A	R	A	R
Поликарбонат	L	R	A	A	A	A
Полиэфир	L	R	A	R	A	A
Полиэтилен высокой плотности	L	R	AO	R	R	R
Полиэтилен низкой плотности	L	R	AO	R	R	R
Полипропилен	L	R	AO	R	R	R
Полистрол	L	R	AO	R	R	A
PTFE	L	R	R	R	R	R
PVC, непластичный	M	R	R	R	R	A

Примечание:

Для поглощения воды: L — низкое, меньше 0.1% при взвешивании после погружения на 24 ч, M — среднее, между 0.1 и 0.4%, H — высокое, более 0.4% и часто около 1%.

Реакции: R — сопротивляется, A — воздействует, AO — воздействует при окислении кислотами.

Табл. 9.4. Химическая стабильность эластомеров

Полимер	Кислота	Спирт	Углеводороды (нефть, масло)	Хлориро- ванные соли	Окисление	Озон
Бутадиен-акрилонитрил	G	G	E	P	F	P
Бутадиен-стирол	G	G	P	P	G	P
Бутил	E	E	P	P	E	E
Хлорсульфонатный полиэтилен	G	G	G	P	E	E
Этилен-пропилен	E	E	P	P	E	E
Фторкарбон	E	E	E	E	E	E
Натуральный каучук	G	G	P	P	G	P
Полихлоропрен (неопрен)	G	G	G	P	E	E
Полисульфид	F	G	E	G	E	E
Полууретан	F	P	E	P	E	E
Кремний	G	E	F	P	E	E

Примечание:

E — крайне высокое сопротивление, G — высокое, F — среднее, P — плохое.

Свойства ползучести

У полимерных материалов при нормальных температурах ползучесть может быть значительной, ее поведение зависит от напряжения и температуры так же, как от типа материала. В основном гибкие полимерные материалы показывают большую ползучесть, чем некоторые жесткие.

Результаты испытаний на ползучесть зависят от времени для различных напряжений. Из таких данных, как график напряжение—деформация, можно получить для ряда моментов времени график, известный как изохронный график напряжение—деформация. Для какого-либо характерного времени можно получить из этого графика (на втором пологом участке) секанс угла («секанс ползучести») при делении напряжения на деформацию. Эта величина известна как модуль ползучести. Модуль ползучести отличается от модуля растяжения, хотя может быть использован для сравнения жесткости полимерных материалов. Он зависит от времени и деформации. В Табл. 9.5 приведены некоторые типичные значения модуля ползучести для термопластов после одного года испытания под постоянной нагрузкой при 20°C.

Табл. 9.5. Модуль ползучести у термопластов

Материал	Модуль ползучести [ГПа]	Материал	Модуль ползучести [ГПа]
ABS	1.12	Полиэфир	1.30
Акрилик	1.43	Полиэфир со стеклянным наполнителем	2.8
Этилен-пропилен сополимер	0.24	Полиэтилен высокой плотности	0.10
Нейлон 6 (HR 50%)	0.51	Полиэтилен низкой плотности	0.29
Нейлон 66 (сухой)	0.81	Полипропилен	0.36
Нейлон 66 (HR 50%)	0.47	Полипропилен + 20% стеклянных волокон	1.2
Нейлон 66 + 33% стеклянных волокон (HR 50%)	3.5	Полисульфон	2.03
Полиацеталь	0.92	PVC, непластичный	1.51
Поликарбонат	1.48		

Плотность

В Табл. 9.6 приведены диапазоны плотностей полимерных материалов при 20°C.

Табл. 9.6. Плотности полимерных материалов

Материал	Плотность [кг·м ⁻³]
Термопласты	
ABS	1020...1070
Акрилик	1180...1190

Табл. 9.6 (окончание)

Материал	Плотность [кг·м ⁻³]
Ацетат целлюлозы	1220...1340
Ацетобутират целлюлозы	1150...1220
Полиацеталь	1410...1420
Полиамид, нейлон 6 (сухой)	1130...1140
Полиамид, нейлон 66 (сухой)	1140...1150
Поликарбонат	1200
Полиэфир	1300...1350
Полиэтилен высокой плотности	935...970
Полиэтилен низкой плотности	913...970
Полиэтилентерефталат	1300
Полипропилен	900...910
Полистирол	1050...1070
Полистирол улучшенной вязкости	1040...1060
Полисульфон	1240
Политетрафторэтилен	2140...2200
Полиуретан	1050...1250
Поливинилхлорид непластичный	1150...1400
Реактопласты	
Эпоксидная смола, литейная	1150
Эпоксидная смола, 60% стеклянных волокон	1800
Меламин-формальдегид, целлюлоза	1500...1600
Фенол-формальдегид без наполнителя	1250...1300
Фенол-формальдегид с древесной мукой	1320...1450
Фенол-формальдегид с асбестом	1600...1850
Полиэфир без наполнителя	1300
Полиэфир, 30% стеклянных волокон	1500
Мочевина формальдегида, наполненная целлюлозой	1500...1600
Эластомеры	
Бутадиен-акрилонитрил	1000
Бутадиен-стирол	940
Бутил	920
Хлорсульфонатный полиэтилен	1120...1280
Этилен-пропилен	860
Этиленвинилацетат	920...950
Фторкарбон	1850
Натуральный каучук	930
Полихлоропрен (неопрен)	1230
Окись полипропилена	830
Полисульфид	1350
Полиуретан	1100...1250
Кремний	980
Стирол-бутадиен-стирол	940...1030

Электрические свойства

В Табл. 9.7 приведены значения удельного электрического сопротивления (часто указывают как объемное удельное сопротивление) и диэлектрическая постоянная типичных полимерных материалов. Следует, однако, признать, что электрические свойства можно эффективно изменять посредством добавок, используемых с полимером.

Табл. 9.7. Электрические свойства полимеров

Полимер	Удельное сопротивление [мкОм·м]	Диэлектрическая постоянная
Термопласты		
ABS	10^{14}	2.4...2.5
Акрилик	$10^{12} \dots 10^{14}$	2.2...3.2
Ацетат целлюлозы	$10^8 \dots 10^{12}$	3.4...7.0
Ацетобутират целлюлозы	$10^9 \dots 10^{13}$	3.4...6.4
Нейлон 6 (во влажном состоянии)	$10^{10} \dots 10^{13}$	4.0...4.9
Нейлон 66 (во влажном состоянии)	$10^{12} \dots 10^{13}$	3.9...4.5
Полиацеталь	10^{13}	3.7
Поликарбонат	10^{14}	3.0
Полиэтилен	$10^{14} \dots 10^{18}$	2.3
Полипропилен	$10^{13} \dots 10^{15}$	2.0
Полистирол	1015...1019	2.4...2.7
Полисульфон	1014...1017	3.1
PVC, непластичный	10^{14}	3.0...3.3
PVC, пластичный	$10^9 \dots 10^{13}$	4...8
Реактопласты		
Меламин-формальдегид, целлюлоза	10^{10}	7.7...9.2
Фенольная смола, наполненная целлюлозой	$10^7 \dots 10^{11}$	4.4...9.0
Эластомеры		
Бутадиен-акрилонитрил	10^8	13
Бутил	10^{15}	2.1...2.4
Хлорсульфонатный полиэтилен	10^{12}	7...10
Этилен-пропилен	10^{14}	3.0...3.5
Натуральный каучук	$10^{13} \dots 10^{15}$	2.3...3.0
Полихлоропрен (неопрен)	10^9	9
Поллиуретан	10^{10}	5...7
Кремний	$10^9 \dots 10^{15}$	3.0...3.5

Вязкость разрушения

В Табл. 9.8 приведены типичные значения вязкости разрушения K_{Ic} на воздухе некоторых термопластов при 20°C.

Табл. 9.8. Вязкость разрушения термопластов

Материал	K_{Ic} [МПа·м ^{-1/2}]
Акрилик, литейный лист	1.6
Нейлон 6.6	2.5...3.0
Поликарбонат	2.2
Полиэтилен	1...6
Полипропилен	3.0...4.5
Полистирол основного назначения	1.0
Поливинилхлорид	2...4

Температуры стеклования

В Табл. 9.9 приведены температуры перехода в стеклообразное состояние термопластов и эластомеров. Отметим, что нормальным состоянием материала является 20°C.

Табл. 9.9. Температуры стеклования для термопластов

Материал	Состояние	T_g [°C]
Термопласты		
ABS	Аморфный	100
Акрилик		100
Ацетат целлюлозы		120
Ацетобутират целлюлозы		120
Полиацеталь, гомополимер	Полупроводник кристаллический	-76
Полиамид, нейлон 6		50
Полиамид, нейлон 66	Аморфный	66
Поликарбонат		150
Полиэтилен высокой плотности	Полупроводник кристаллический	-120
Полиэтилен низкой плотности		-90
Полиэтилентерефталат		69
Полипропилен		-10
Полистирол	Аморфный	100
Полисульфон		190
Политетрафторэтилен	Полупроводник кристаллический	-120
Поливинилхлорид	Аморфный	87
Поливинилиденхлорид	Полупроводник кристаллический	-17
Эластомеры		
Бутадиен-акрилонитрил	Аморфный	-55
Бутадиен-стирол		-55

Табл. 9.9 (окончание)

Материал	Состояние	T_g [°C]
Бутил	Аморфный	-79
Хлорсульфонатный полиэтилен		-55
Этилен-пропилен		-75
Этиленвинилацетат		-160
Натуральный каучук		-70
Полихлоропрен (неопрен)		-50
Полисульфид		-50
Полиуретан		-60
Кремний		-50

Твердость

В Табл. 9.10 приведены типичные значения твердости при 20°C для полимерных материалов. Главные шкалы твердости, применяемые с такими материалами, — это шкалы Роквелла и Шора. Значения твердости зависят от напряжения, времени под нагрузкой и температуры.

Табл. 9.10. Значения твердости полимерных материалов

Полимер	Твердость	
	по Роквеллу	по Шору
Термопласты		
ABS	R90...115	—
Акрилик	M90	—
Ацетат целлюлозы	R34...125	—
Ацетобутират целлюлозы	R31...116	—
Полиацеталь	M80...92, R115...120	—
Полиамид, нейлон 6 (сухой)	R120	—
Полиамид, нейлон 66 (сухой)	M80, R120	—
Поликарбонат	M85, R120	—
Полиэфир	M70...85	—
Полиэтилен высокой плотности	—	D60...70
Полиэтилен низкой плотности	—	D40...51
Полипропилен	M70...75, R75...95	—
Полистирол	M70...80	—
Полистирол улучшенной вязкости	M40...70	—
Полисульфон	R120	—
Поливинилхлорид непластичный	M115	D65...85
Поливинилхлорид пластичный	—	A40...100

Табл. 9.10 (окончание)

Полимер	Твердость	
	по Роквеллу	по Шору
Реактопласты		
Эпоксидная смола, армированная стеклянным волокном	M100...112	—
Меламин-формальдегид, целлюлоза	M115...125	—
Фенол-формальдегид, целлюлоза	E64...95	—
Эластомеры		
Бутадиен-акрилонитрил	—	A30...100
Бутадиен-стирол	—	A40...100
Бутил	—	A30...100
Хлорсульфонатный полиэтилен	—	A50...100
Этилен-пропилен	—	A30...100
Фторкарбон	—	A60...90
Натуральный каучук	—	A20...100
Полихлоропрен (неопрен)	—	A20...100
Полиуретан	—	A20...100
Кремний	—	A30...80

Ударные свойства

Термопласты могут быть сгруппированы в три группы соответственно их ударным свойствам при 20°C.

1. Хрупкие — образцы для испытания разрушаются даже тогда, когда они без зарубки. К ним относятся акрилик, нейлон, армированный стеклом, полистирол.

2. Хрупкие с зарубкой — образцы для испытания не разрушаются, если нет зарубки, но разрушаются, когда она есть. Это ABS (некоторые формы), ацетали, акрилки (улучшенной вязкости), целлюлозы, нейлон (сухой), поликарбонат (некоторые формы), полиэтилен (высокой плотности), полиэтилентерефталат, полипропилен, полисульфон, поливинилхлорид.

3. Вязкие — образцы для испытания не разрушаются даже тогда, когда имеют острые зарубки. Это ABS (некоторые формы), нейлон (влажный), поликарбонат (некоторые формы), полиэтилен (низкой плотности), этилен-пропилен сополимер, PTFE.

Механические свойства

В Табл. 9.11 приведены механические свойства термопластов, реактопластов и эластомеров при 20°C и максимальные температуры, при которых они могут длительно применяться.

Табл. 9.11. Механические свойства полимеров

Полимер	Предел прочности на растяжение [МПа]	Модуль растяжения [МПа]	Удлинение [%]	Максимальная температура [°C]
Термопласты				
ABS	17...58	1.4...3.1	10...140	70
Акрилик	50...70	2.7...3.5	5...8	100
Ацетат целлюлозы	24...65	1.0...2.0	5...55	70
Ацетобутират целлюлозы	18...48	0.5...1.4	40...90	70
Полиацеталь, гомополимер	70	3.6	15...75	100
Полиамид, нейлон 6	75	1.1...3.1	60...320	110
Полиамид, нейлон 66	80	2.8...3.3	60...300	110
Поликарбонат	55...65	2.1...2.4	60...100	120
Полиэтилен высокой плотности	22...38	0.4...1.3	50...800	125
Полиэтилен низкой плотности	8...16	0.1...0.3	100...600	85
Полиэтилентерефталат	50...70	2.1...4.4	60...100	120
Полипропилен	30...40	1.1...1.6	50...600	150
Полистирол	35...60	2.5...4.1	2...40	70
Полистирол улучшенной вязкости	17...24	1.8...3.1	8...50	70
Полисульфон	70	2.5	50...100	160
Политетрафторэтилен	14...35	0.4	200...600	260
PVC, непластичный	52...58	2.4...4.1	2...40	70
PVC, слабый пластификатор	28...42	—	200...250	100
Реактопласты				
Эпоксидная смола, литейная	60...100	3.2	—	—
Эпоксидная смола, 60% стеклянных волокон	200...420	21...25	—	200
Меламин-формальдегид, целлюлоза	55...85	7.0...10.5	0.5...1	95
Фенол-формальдегид	35...55	5.2...7.0	1...1.5	120
Фенол-формальдегид с древесной мукой	40...55	5.5...8.0	0.5...1	150
Фенол-формальдегид с асбестом	30...55	0.1...11.5	0.1...0.2	180
Полиэфир без наполнителя	55	2.4	—	200
Полиэфир, 30% стеклянных волокон	120	7.7	3	—
Мочевина формальдегида, наполненная целлюлоза	50...80	7.0...13.5	0.5...1	80
Эластомеры				
Бутадиен-акрилонитрил	28	—	700	100
Бутадиен-стирол	24	—	600	80
Бутил	20	—	900	100
Хлорсульфонатный полиэтилен	21	—	500	130

Табл. 9.11 (окончание)

Полимер	Предел прочности на растяжение [МПа]	Модуль растяжения [МПа]	Удлинение [%]	Максимальная температура [°C]
Этилен-пропилен	20	—	300	100
Этиленвинилацетат	19	—	750	120
Фторкарбон	18	—	300	230
Натуральный каучук	20	—	800	80
Полихлоропрен (неопрен)	25	—	1000	100
Окись полипропилена	14	—	300	170
Полисульфид	9	—	500	80
Полиуретан	40	—	650	80
Кремний	10	—	700	300
Стирол-бутадиен-стирол	14	—	700	80

Оптические свойства

В Табл. 9.12 приведены значения показателя преломления и коэффициента пропускания полимерных материалов при нормальном падении света. Коэффициент пропускания выражается в процентах по отношению к интенсивности света, который проходит через материал толщиной в 1 мм. Тонкий материал имеет большее пропускание, толстый материал — меньшее. Поэтому коэффициент пропускания, равный 0% для материала толщиной в 1 мм, не означает, что он полностью непрозрачен при меньшей толщине.

Табл. 9.12. Оптические свойства полимеров

Полимер	Показатель преломления	Коэффициент пропускания [%]
Ацетал сополимер	1.49	0
Акрилик	1.49	>99
Ацетат целлюлозы	1.46...1.50	—
Нейлон 66	1.45	0
Поликарбонат	1.59	—
Полиэтилен низкой плотности	1.52	45
Полиэтилентерефталат	—	>90
Полиметилпентен	1.47	99
Полипропилен	1.49	11-46
Полистирол	1.59...1.60	—
Полисульфон	1.63	—
Поливинилхлорид	1.54	94
Политетрафторэтилен	1.32	0

Проницаемость

Обычно полимерные материалы применяют в качестве барьеров для газов и паров. Измерение скорости, с которой газы или пары могут проникать через материал, определяют по проницаемости: чем выше проницаемость, тем больше скорость потока через полимерную пленку. (См. Проницаемость в Гл. 1.)

В Табл. 9.13 приведены значения проницаемости для ряда газов/паров при 20°C.

Табл. 9.13. Проницаемость полимеров

Полимер	Проницаемость [10^{-18} кг·м·Н ⁻¹ ·с ⁻¹]		
	Кислород	Вода	Двуокись углерода
Нейлон 6	0.48	1350	6.0
Полиэтилен высокой плотности	6.4	40	30
Полиэтилен низкой плотности	17.6	300	171
Полиэтилентерефталат	0.22	600	0.9
Полипропилен	6.4	170	30
Полистирол	9.33	300	120
PVC, непластичный	0.37	400	2.9
Натуральный каучук	112.0	7700	1110
Бутилкаучук	5.9	—	45

Упругость

К иллюстрации термина «упругость»: чем больше упругость резинового мяча, тем выше он будет подпрыгивать от пола после падения с фиксированной высоты. Натуральный каучук, бутадиен-стирол, полихлоропрен и этиленпропилен имеют хорошую упругость; бутадиен-акрилонитрил, бутил, фтористый кремний и полисульфид обладают прекрасной упругостью; полиуретан — достаточно упруг.

Тепловые свойства

В Табл. 9.14 приведены значения температурного коэффициента линейного расширения, удельной теплоемкости и теплопроводности полимерных материалов. Тепловое сопротивление полимера может быть заметно уменьшено, если он сделан пористым или вспененным. Данные для таких материалов даны в конце этой таблицы.

Табл. 9.14. Тепловые свойства полимерных материалов

Полимер	Температурный коэф. линейного расширения [$10^{-5} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]	Удельная теплоемкость [кДж·кг ⁻¹ ·°C ⁻¹]	Коэффициент теплопроводности [Вт·м ⁻¹ ·°C ⁻¹]
Термопласты			
ABS	8...10	1.5	0.13...0.20
Акрилик	6...7	—	0.13...0.15
Ацетат целлюлозы	8...18	1.5	0.13...0.20
Ацетобутират целлюлозы	11...17	1.5	0.13...0.20
Полиацеталь, гомополимер	10	1.5	0.17
Полиамид, нейлон 6 (сухой)	8...10	1.6	0.17...0.21
Полиамид, нейлон 66 (сухой)	8...10	1.7	0.17...0.21
Поликарбонат	4...7	1.3	0.14...0.16
Полиэтилен высокой плотности	11...13	2.3	0.31...0.35
Полиэтилен низкой плотности	13...20	1.9	0.25
Полиэтилентерефталат	—	1.0	0.14
Полипропилен	10...12	1.9	0.16
Полистирол	6...8	1.2	0.12...0.13
Полистирол улучшенной вязкости	7...8	1.4	0.12...0.13
Полисульфон	5	1.3	0.19
Политетрафторэтилен	10	1.1	0.27
PVC, непластичный	5...19	1.1	0.12...0.14
PVC, слабый пластификатор	7...25	1.7	0.15
Реактопласты			
Эпоксидная смола, литейная	6	1.1	0.17
Эпоксидная смола, 60% стеклянных волокон	1...5	0.8	—
Меламин-формальдегид, целлюлоза	4	—	0.27...0.42
Фенол-формальдегид	3...4	—	—
Фенол-формальдегид с целлюлозным наполнителем	3...4	1.5	0.16...0.32
Полиэфир без наполнителя	6	—	—
Эластомеры			
Этилен-пропилен	6	1.1	0.17
Натуральная резина	—	1.9	0.18
Полихлоропрен (неопрен)	24	1.7	0.21
Пористые полимеры			
Полистирол, 16	—	—	0.039
Полистирол, 32	—	—	0.032
Полиуретан, 16	—	—	0.040
Полиуретан, 32	—	—	0.023
Полиуретан, 64	—	—	0.025

Примечание:

Для пористых полимеров в первой колонке после запятой дана плотность полимерного материала [кг·м⁻³].

9.5. ПРИМЕНЕНИЕ И МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Методы изготовления

Подходящие конфигурации для конечной продукции из полимерных материалов зависят от методов изготовления, которые можно использовать для полимеров. Так, литье может употребляться для изготовления тонких листов, прутков, труб и простых профилей. Горячая штамповка выдавливанием — для тонких листов, труб и длинных профилей. Заливка в форму под давлением, прессование в пресс-форму и конвейерная формовка возможны для сложных профилей. Термоформовка применяется для изготовления профилей из тонколистового материала. В Табл. 9.15 приведены методы изготовления, которые подходят для термопластиков, а в Табл. 9.16 — для термореактивов.

Табл. 9.15. Методы изготовления термопластиков

Полимер	Выдавливание	Заливка под давлением	Горячая штамповка	Роторное формование ниже 7 плавления	Термоформовка	Литье	Изгибание и папка	Пленка
ABS	*	*		*	*		*	
Акрилик	*	*			*	*	*	
Целлюлозы	*	*			*			*
Полиацеталь	*	*	*					
Полиамид (нейлон)	*	*		*		*		*
Поликарбонат	*	*	*		*		*	
Полиэфир	*	*						
Полиэтилен высокой плотности	*	*	*	*			*	*
Полиэтилен низкой плотности	*	*	*	*			*	*
Полиэтилентерефталат	*	*	*					*
Полипропилен	*	*	*	*	*		*	*
Полистирол	*	*	*	*	*		*	*
Полисульфон	*	*			*			
PTFE	*							
PVC	*	*	*	*	*		*	*

Табл. 9.16. Методы изготовления образцов из реактопластов

Полимер	С или Т формовка	Литье	Слоистый материал	Пенопласт	Пленка
Эпоксидные смолы		*	*	*	
Меламин-формальдегид	*		*		
Фенол-формальдегид	*	*	*	*	

Табл. 9.16 (окончание)

Полимер	С или Т формовка	Литье	Слоистый материал	Пенопласт	Пленка
Полиэфир	*	*	*		*
Мочевина формальдегида	*		*		

Примечание:

С или Т формовка — прессование в пресс-форму или конвейерная формовка.

Применение полимеров

В Табл. 9.17 приведены примеры изделий, которые возможно получить из полимерных материалов.

Табл. 9.17. Применение полимерных материалов

Полимер	Основные свойства материала и применение
Термопласты	
ABS	Твердый, неупругий и абразивостойкий. Литые детали для телефонов, вакуумных агрегатов очистки, фенов, телевизоров, радиоприемников, письменных принадлежностей, для багажа, оболочек лодок, пищевых контейнеров
Акрилик	Прозрачный, неупругий, прочный и стойкий ко всем погодным условиям. Легкие соединительные детали, зонты вытяжных систем, линзы автомобильных фар, фирменные знаки и пластинки. Непрозрачный тонколистовой. Для домашних баков, душевых кабинок, бассейнов, лабораторных резервуаров
Ацетат целлюлозы	Твердый, неупругий, с плохой стабильностью размеров. Рамки светофильтров, рукоятки инструментов, игрушки, пуговицы
Ацетобутират целлюлозы	Высокое сопротивление к воздействию растворителей, поглощение влаги ниже, ударная прочность выше, чем у ацетата целлюлозы. Для изоляции кабелей, трубопроводов природного газа, уличных знаков, колпаков уличных осветителей, рукояток инструмента, линз для приборных панелей освещения, кожухов упаковки, контейнеров
Полиацеталь, гомополимер	Неупругий, прочный, возможна эксплуатация при относительно высоких температурах. Трубки фитингов, части водяных насосов и мочечных машин, подшипники, шестеренки, шарниры, оконные запоры, хомутики бандажей автомобильных сидений
Полиамид, нейлон	Нейлон 6 и 66 востребованы широко; точка плавления и прочность нейлона 66 выше, чем у нейлона 6, но он больше поглощает влаги и менее упругий. Шестеренки, подшипники, втулки, корпуса мощного инструмента, электрические штепсельные вилки и розетки, волокна в обшивке
Поликарбонат	Твердый, неупругий, прочный. Ударная стойкость и относительно высокие температуры. Колпаки уличных ламп, бутылочки для кормления младенцев, машинные корпуса, защитные каски, посуда
Полиэтилен высокой плотности	Хорошая химическая стойкость, низкое поглощение влаги и высокое электрическое сопротивление. Трубопроводы, игрушки, товары домашнего обихода

Табл. 9.17 (продолжение)

Полимер	Основные свойства материала и применение
Полиэтилен низкой плотности	Хорошая химическая стойкость, низкое поглощение влаги и высокое электрическое сопротивление. Сумки, прессованные бутылки, трубки шариковых ручек, изоляция проводов и кабелей
Полиэтилен-терефталат	Электрические штепсельные вилки и розетки, изоляция проводов, записывающие магнитные ленты, изоляционные ленты, прокладки, контейнеры для напитков
Полипропилен	Тара, контейнеры, вентиляторы, автомобильные полосовые панели, верхние части моечных машин, корпуса радиоприемников и телевизоров, игрушки, каркасы мебели
Полистирол	Хрупкий и прозрачный, смешанный с резиной дает твердую форму, превосходный электрический изолятор. Чашки весов, кожухи камер, прожекторов, радиоприемников, телевизионных блоков и вакуумных фильтров в электрическом оборудовании. Вспененный или растянутый — для изоляции и упаковки
Полисульфид	Прочный, неупругий, с превосходным сопротивлением ползучести. Тяжело возгорается и не дает настоящей дымовой завесы. Пассажирское сервисное оборудование самолетов, сетевые щитки, бобины катушек, детали сетевых выключателей, регулирующие ручки кухонных плит
Политетрафтор-этилен	Твердый и упругий, очень широкий температурный диапазон. Трубопроводы, пропускающие коррозионные химикаты, прокладки, диафрагмы клапанов, масляных колец, сильфонов, фрикционных, сухие и самосмазывающиеся подшипники, облицовка поддонов без ручек, покрытый для валков, обкладок для бункеров и лотков
PVC, непластичный	Негнущийся. Трубопроводы дренажных систем отходов и грязи, трубы дождевой воды, оборудование освещения, карнизы для штор
PVC, пластичный	Упругий. Пластичные дождевые плащи, бутылки, основания лыж, садовые, домашние трубы, прокладки, надувные игрушки
Реактопласты	
Эпоксидная смола	Клейкое вещество. Покрытие для структурной стали, кирпичной кладки и судового оборудования
Эпоксидная, литейная	Герметизация электронных компонентов, небольших литейных форм, моделей
Эпоксидная, со стеклянным наполнителем	Дает твердые, прочные смеси. Для покрытия корпусов лодок, мебели и др.
Меламин-формальдегид	Поставляется в виде формовочного порошка, включающего смолу, наполнители и пигменты. Посуда, штурвалы, ручки, оборудование для освещения, игрушки, строительные панели и электрическое оборудование
Фенол-формальдегид	Также известен как бакелит. Поставляется в виде формовочного порошка, включающего смолу, пигменты и наполнители (50...80% массы формовочного порошка). Древесная мука увеличивает ударную прочность, слюда — электрическое сопротивление, асбестовые волокна улучшают тепловые свойства. Электрические штепсельные вилки и розетки, выключатели, дверные ручки и рукоятки, корпуса камер, шлаковые поддоны. В смеси с пластиковой бумагой — для шестеренок, подшипников и электрических изоляционных деталей

Табл. 9.17 (окончание)

Полимер	Основные свойства материала и применение
Полиэфир	В виде смеси со стеклянными волокнами. Лодочные корпуса, строительные панели, стеллажи
Мочевина формальдегида	Как и меламин-формальдегид
Эластомеры	
Бутадиен-акрилонитрил	Превосходная стойкость к органическим жидкостям. Шланги, прокладки, сальники, для облицовки баков, роликов
Бутадиен-стирол	Более дешевый, чем натуральный каучук. Шины, трубки шлангов, конвейерные ремни, для изоляции кабелей
Бутил	Чрезвычайно непроницаемый для газов. Для внутренней облицовки бескамерных шин, шлангов для пара, диафрагм
Хлорсульфонатный полиэтилен (хайполон)	Превосходное сопротивление озону, хорошая химическая стойкость к абразивам, хорошие усталостные и ударные свойства. Гибкие шланги для масла и химикатов, для облицовки баков, изоляции кабелей, клиновидные ремни, масляные кольца, сальники, прокладки, основания лыж
Этилен-пропилен	Очень высокое сопротивление кислороду, озону, высокое тепловое сопротивление, хорошие электрические свойства и стойкость к износу. Электрическая изоляция, стираемые подошвы, шланги, ремни
Этилен-винилацетат	Гибкий, хорошая ударная прочность, высокая прозрачность. Изоляция кабелей, гибкие трубопроводы, основания лыж, прокладки
Фторкарбонат	Масляные кольца, сальники, прокладки, диафрагмы
Натуральный каучук	Низкое сопротивление синтетикам, маслам, растворителям и кислороду. Нестойкий к воздействию озона. Разрывное сопротивление выше, чем у синтетических резин. Шины, прокладки, шланги
Полихлорпропен	Хорошее сопротивление маслу, стоек к различным погодным условиям. Масляные и нефтяные шланги, прокладки, сальники, диафрагмы, облицовка резервуаров для химических веществ
Окись полипропилена	Превосходная ударная и разрывная прочность, хорошие механические свойства и упругость. Электрическая изоляция
Полисульфид	С неприятным запахом. Превосходное сопротивление маслу и растворителям, низкая проницаемость для газов. Реагирует на микроорганизмы. Валики принтеров, покрытия кабелей, облицовка изделий, материал для уплотнений в строительных работах
Полиуретан	Твердые и упругие пенные покрытия, пружинящий материал, упаковка, строительные и изоляционные панели
Кремний	Широкий температурный диапазон (от -90 до 250°C и выше). Химически инертный, хорошие электрические свойства, дорогой. Для электрической герметичной пайки, в креплениях, подверженных тряске, для амортизаторов вибрации, в клеящих веществах
Стирол-бутадиен-стирол	Известен как термопластичная резина. Свойства контролируются соотношением стирола и бутадиена. Сравним с натуральным каучуком. Для стираемых подошв, защитных слоев подложек и в клейких веществах

Глава десятая

Керамики

10.1. МАТЕРИАЛЫ

Керамики

Термин «керамики» охватывает широкий круг материалов, например кирпич, камень, стекло и огнеупорные материалы. Керамики формируются из комбинации одного или более металлов с неметаллическим элементом, таким как кислород, азот или углерод. Керамики обычно твердые и хрупкие, хорошие электрические и тепловые изоляторы, обладают высоким сопротивлением химическому воздействию. У них низкое сопротивление термическому удару, поскольку они имеют низкие теплопроводность и термическое расширение.

Керамики чаще всего кристаллической структуры, хотя возможны аморфные состояния. Если, например, кварц в расплавленном состоянии охладить очень медленно, то он кристаллизуется в точке застывания. Однако если его охлаждать много быстрее, то его атомы не успевают расположиться в упорядоченном состоянии, как у кристалла, в связи с чем стекла характеризуются неупорядоченностью и неоднородностью внутреннего строения.

Технические керамики

В основе обычных технических керамик — глинозем (окись алюминия), нитрид кремния, карбиды: бора, кремния, тантала, вольфрама и циркония. Из-за повышенной твердости, хорошей износостойкости они, как правило, используются в качестве пластин для режущих инструментов. Они соединены с такими связующими металлами, как никель, кобальт, хром или молибден, в форме композитного материала. Большинство обычных форм — это вольфрамовый карбид, связанный с кобальтом, а большинство комплексных форм включает целый ряд карбидов с кобальтом.

(См. Электрические свойства, Механические свойства алюминиевых керамик, Механические свойства связанных керамик, Применение алюминиевых керамик, Применение связанных керамик.)

Стекла

Главной составной частью большинства стекол является песок, т.е. керамический силикат. Обыкновенное оконное стекло сделано из смеси песка, известняка (углекислый кальций) и кальцинированной соды (углекислый натрий). Теплостойкие стекла, такие как пирекс, получены при замещении кальцинированной соды окисью бора. Предел прочности при растяжении определяют эффективно по микроскопическим дефектам и трещинам на поверхности. Стекла имеют низкую пластичность, обладают хрупкостью, имеют низкое тепловое расширение и низкую теплопроводность, а из-за этого и плохое сопротивление термическому удару. Закалка повышает прочность и термостойкость стекла. Стекла хорошие электрические изоляторы и стойки ко многим кислотам, растворителям и другим химикатам.

(См. Электрические свойства, Механические свойства стекол, Термические свойства стекол, Применение стекол.)

Огнеупоры

Это специальные материалы, применяемые в конструкциях, которые способны выдерживать высокие температуры. Основные широко используемые огнеупорные материалы состоят из кремнезема и глинозема. На **Рис. 10.1** показана их равновесная диаграмма. Способность материала из этих компонентов выдерживать высокие температуры (термин «огнеупоры» применяется для описания этого качества) возрастает с увеличением окиси алюминия выше точки эвтектики.

(См. Механические свойства алюминиевой керамики, Применение алюминиевой керамики.)

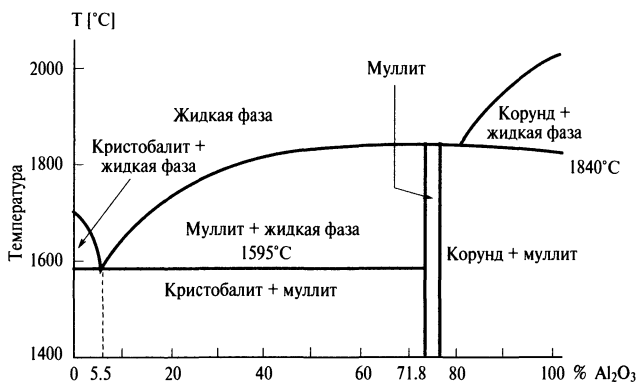


Рис. 10.1. Равновесная диаграмма кремнезем—глинозем

10.2. КОДЫ

Системы кодирования связанных карбидов

Американская кодирующая система для связанных карбидов, применяемых в качестве инструментов при механической обработке, складывается из буквы С, стоящей перед номером, который служит для индикации вида обработки. Код, такой как, например, С-5, раскрывает не число карбидов, но указывает на способность механически обрабатывать углеродистые и легированные стали. В Табл. 10.1 приведены основные составляющие этой системы. Международная организация стандартов (ISO) имеет подобную систему. Из нее, например, ясно, что инструмент из карбида лучше, чем из его соединения. Она применяет буквы Р, М или К, которые ставят перед двумя цифрами. Эта система приведена в Табл. 10.2. Международная организация стандартов приравнивает группу К приблизительно к американским кодам от С-1 до С-4, группу Р — от С-5 до С-8, а М — к промежуточной группе.

Табл. 10.1. Американские коды для связанных карбидов

Код	Применение для механической обработки
Литейный чугун, нежелезные и неметаллические материалы	
С-1	Черновая обработка
С-2	Основное назначение
С-3	Чистовая обработка
С-4	Прецизионная чистовая обработка
Углерод и легированные стали	
С-5	Черновая обработка
С-6	Основное назначение
С-7	Чистовая обработка
С-8	Прецизионная чистовая обработка
Применение с износом поверхности	
С-9	При отсутствии сотрясения
С-10	Легкое сотрясение
С-11	Тяжелое сотрясение
Применение с ударом	
С-12	Легкий удар
С-13	Средний удар
С-14	Тяжелый удар
Смешанное применение	
С-15...С-19	—

Табл. 10.2. Коды Международной организации стандартов для связанных карбидов

Код ISO	Материал для механической обработки	Применение и условия обработки
Металлы на основе железа		
P 01	Сталь, стальные отливки	Чистовая токарная обработка, сверление, высокая скорость резания, тонкая стружка, высокая точность, тонкая чистовая обработка, собственная вибрация

Табл. 10.2 (продолжение)

Код ISO	Материал для механической обработки	Применение и условия обработки
P 10	Сталь, стальные отливки	Токарная обработка, копирование, нарезание резьбы, фрезерование, высокая скорость резания, тонкая стружка при фрезеровании
P 20	Сталь, стальные отливки, ковкий литейный чугун с длинной стружкой	Токарная обработка, копирование, фрезерование, средняя скорость резания, средняя стружка, строгание с тонкой стружкой
P 30	То же	Токарная обработка, фрезерование, строгание, средняя или низкая скорость резания, средняя или большая стружка, возможны неблагоприятные условия*
P 40	Сталь, стальные отливки с песочными включениями и раковинами	Токарная обработка, строгание, прорезание канавок, низкая скорость резания, толстая стружка, большие углы резания в неблагоприятных условиях* и автоматическая механическая обработка
P 50	Сталь среднего или низкого предела прочности на растяжение, стальные отливки с песочными включениями и раковинами	Операции требуют очень твердого карбида, токарная обработка, строгание, прорезание канавок, низкая скорость резания, толстая стружка, большие углы резания в неблагоприятных условиях* и автоматическая механическая обработка
Железные и нежелезные металлы		
M 10	Сталь, стальные отливки, марганцевая сталь, серый литейный чугун, легированный литейный чугун	Токарная обработка, средняя или высокая скорость резания, стружка от тонкой до средней
M 20	Сталь, стальные отливки, аустенитная или марганцевая сталь, серый литейный чугун	Токарная обработка, фрезерование, средняя скорость резания, средняя стружка
M 30	Сталь, стальные отливки, аустенитная сталь, серый литейный чугун, высокотемпературные сплавы	Токарная обработка, фрезерование, средняя скорость резания, средняя или толстая стружка
M 40	Мягкая автоматная сталь, низкой прочности сталь, нежелезные металлы и легкие сплавы	Токарная обработка, резка, в частности, автоматическая машинная обработка
Железные и нежелезные металлы и неметаллы		
K 01	Очень твердый серый литейный чугун, отбеленные отливки, высококремнистые алюминиевые сплавы, закаленная сталь, высокообразивные пластмассы, твердый картон, керамики	Токарная обработка, чистовая токарная обработка, растачивание, фрезерование, шабровка
K 10	Серый литейный чугун до 220 ВН, ковкий литейный чугун с короткой стружкой, закаленная сталь, кремнистые алюминиевые сплавы, медные сплавы, пластмассы, стекла, твердая резина, твердый картон, фарфор, камень	Токарная обработка, фрезерование, сверление, растачивание, развертка, шабровка

Табл. 10.2 (окончание)

Код ISO	Материал для механической обработки	Применение и условия обработки
К 20	Серый литейный чугун выше 220 ВН, нежелезные металлы, медь, алюминиевая латунь	Токарная обработка, фрезерование, строгание, растачивание, развертка
К 30	Низкой твердости серый литейный чугун, низкой прочности сталь, прессованное дерево	Токарная обработка, фрезерование, строгание, прорезание, применение в неблагоприятных условиях* и с большими углами резания
К 40	Мягкое дерево, твердое дерево, нежелезные металлы	Токарная обработка, фрезерование, строгание, прорезание, применение в неблагоприятных условиях* и с большими углами резания

* Неблагоприятные условия подразумевают наличие моделей, механическая обработка которых затруднена, материал имеет литейную или поковочную окалину, переменную твердость, механическая обработка производится с переменной глубиной реза, имеются препятствия резу, возникают умеренные жесткие вибрации.

10.3. СВОЙСТВА

Плотность

(См. Механические свойства для определения значений.)

Электрические свойства

Большинство керамик имеют удельное электрическое сопротивление больше 10^{13} Ом·м, у стекол оно примерно $10^4 \dots 10^{10}$ Ом·м. Диэлектрическая проницаемость, т.е. диэлектрическая постоянная, у алюминиевых керамик составляет примерно от 8 до 10, а у стекол — от 4 до 7.

Механические свойства алюминиевых керамик

В Табл. 10.3 приведены механические свойства глинозем-кремнеземных керамик.

Табл. 10.3. Механические свойства глиноземных керамик

Глинозем [%]	Плотность [$10^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$]	Твердость по Роквеллу HRA	Предел прочности при сжатии [МПа]	Предел прочности при растяжении [МПа]	Модуль упругости [ГПа]
85	3.39	73	1930	155	221
90	3.60	79	2480	220	276
96	3.72	78	2070	190	303
99.9	3.96	90	3790	310	386

Механические свойства связанных карбидов

В Табл. 10.4 приведены механические свойства наиболее часто применяемых связанных карбидов. Свойства зависят от обычно встречающегося размера зерна. Модуль упругости составляет около 640 ГПа для карбида с высоким содержанием вольфрама (97%) и снижается примерно до 480 ГПа при содержании вольфрама 75%.

Табл. 10.4. Механические свойства связанных карбидов

Состав, основные составляющие [%]	Твердость по Роквеллу HRA	Плотность [$10^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$]	Предел прочности при сжатии [МПа]	Напряжение удара [Дж]
97WC—3Co	92...93	15.0	5860	1.1
94WC—6Co	90...93	15.0	5170...5930	1.0...1.4
90WC—10Co	87...91	14.5	4000...5170	1.7...2.0
84WC—16Co	86...89	13.9	3860...4070	2.8...3.1
75WC—25Co	83...85	13.0	3100	3.1
71WC—12.5TiC—12TaC—4.5Co	92...93	12.0	5790	0.8
72WC—8TiC—11.5TaC—8.5Co	90...92	12.6	5170	0.9
64TiC—28WC—2TaC—2Cr ₂ C ₃ —5.0Co*	94...95	6.6	4340	—
57WC—27TaC—16Co	84...86	13.7	3720	2.0

Примечание:

WC — карбид вольфрама, TiC — карбид титана, TaC — карбид тантала, Cr₂C₃ — карбид хрома, Co — кобальт.

* В оригинале допущена неточность.

Механические свойства стекол

На предел прочности на растяжение стекол сильно влияют микроскопические дефекты и царапины на поверхности, и для конструктивных целей в основном применяется стекло с прочностью на растяжение около 50 МПа. Стекла имеют модуль упругости около 70 ГПа.

Тепловые свойства связанных карбидов

В Табл. 10.5 приведены коэффициенты объемного расширения и теплопроводности связанных карбидов. Значения первого указаны для температур 200 и 1000°C. Для конкретной температуры низкие значения коэффициента расширения и коэффициента теплопроводности означают, что материал допускает термический удар, т.е. резкие внезапные изменения температуры.

Табл. 10.5. Тепловые свойства связанных карбидов

Состав, основное содержание [%]	Коэффициент объемного расширения [$10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]		Коэффициент теплопроводности [$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]
	200°C	1000°C	
97WC—3Co	4.0	—	121
94WC—6Co	4.3	5.4...5.9	100...121
90WC—10Co	5.2	—	112
84WC—16Co	5.8	7.0	88
75WC—25Co	6.3	—	71
71WC—12.5TiC—12TaC—4.5Co	5.2	6.5	35
72WC—8TiC—11.5TaC—8.5Co	5.8	6.8	50
57WC—27TaC—16Co	5.9	7.7	—

Примечание:

WC — карбид вольфрама, TiC — карбид титана.

В Табл. 10.6 представлены коэффициент объемного расширения и максимальная температура эксплуатации стекол.

Табл. 10.6. Тепловые свойства стекол

Стекло	Коэффициент объемного расширения [$10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]	Максимальная температура эксплуатации [$^\circ\text{C}$]
Алюмосиликат	42	910
Боросиликат (пирекс)	33	760
Плавленный кремнезем (99.9%)	6	1470
(96%)	8	1500
Свинцовая щелочь (54% кремнезема)	90	650
Натровая известь кремнезема	92	730

10.4. ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Применение алюминиевых керамик

Широко используются огнеупорные материалы, состоящие из глинозема и кремнезема. Огнеупорность возрастает с увеличением содержания глинозема. Изделия с содержанием глинозема 20...40% употребляются в качестве огнеупорного шамотного кирпича. Для более жестких условий применения увеличивается количество глинозема: керамика с глиноземом более 71.8% может работать до 1800 $^\circ\text{C}$. С содержанием глинозема 90% производится прочная, тонко гранулированная керамика для заданных механических условий. С содержанием же 96% выпускается керамика, которая обладает превосходными свойствами для специального назначения в электронике, а с содержанием 99.9% — твердая, прочная керамика для жестких механических условий и агрессивной среды.

Применение связанных карбидов

В Табл. 10.7 приведены типичные инструментальные приложения для связанных карбидов. (См. также Коды связанных карбидов для конкретных применений согласно коду спецификации.)

Табл. 10.7. Применение связанных карбидов

Состав [%]	Размер зерна	Применение как инструмента
97WC—3Co	Средний	Превосходное абразивное сопротивление, низкая ударная стойкость, эксплуатация с острой режущей кромкой. Для механической обработки литейного чугуна, нежелезных металлов и неметаллических материалов
	Тонкий	Для механической обработки нежелезных и высокотемпературных сплавов
94WC—6Co	Средний	Для основной механической обработки металлов, иных чем сталь, а также для маленьких и средних матриц прессования

Табл. 10.7 (окончание)

Состав [%]	Размер зерна	Применение как инструмента
94WC—6Co	Грубый	Для механической обработки литейного чугуна, нежелезных металлов и неметаллических материалов, а также для маленьких штампов, вытягивающих проволоку, и матриц прессования
90WC—10Co	Тонкий	Для механической обработки стали и фрезерования высокотемпературных металлов, для фасонных резцов, цилиндрических фрез, торцевых фрез, отрезных резцов, резьбонарезного инструмента
84WC—16Co	Тонкий	В горном деле для режущих кромок вращающихся буров и вставных резцов, сотрясающихся при бурении
	Грубый	Для средних и больших матриц, где требуется прочность, для вырубных матриц и больших пробойников
75WC—25Co	Средний	Для матриц высадки головок, матриц холодного выдавливания, пуансонов и матриц для вырубки тяжелого проката
71WC—12.5TiC—12TaC—4.5Co	Средний	Для чистовой и легкой черновой обработки плакированных углеродистых, легированных сталей и легированных литейных чугунов
72WC—8TiC—11.5TaC—8.5Co	Средний	Прочный, износостойкий и стойкий к высоким температурам. Для тяжелой механической нагрузки, для фрезерования плакированных углеродистых, легированных сталей и легированных литейных чугунов
64TiC—28WC—2TaC—2Cr ₂ C ₃ —5.0Co*	Средний	Для высокоскоростной чистовой обработки сталей и литейных чугунов
57WC—27TaC—16Co	Грубый	Для срезания горячих подтеков со сварных трубопроводов и матриц для горячего выдавливания алюминия

Примечание:

WC — карбид вольфрама, TiC — карбид титана, TaC — карбид тантала, Cr₂C₃ — карбид хрома, Co — кобальт.

* В оригинале допущена неточность.

Применение стекол

В Табл. 10.8 приведены основные характеристики и область применения обычно используемых стекол.

Табл. 10.8. Область применения стекол

Стекло	Применение
Алюмосиликат	Стойкое к термическим ударам. Для термометров
Боросиликат (пирекс)	Стойкое к термическим ударам и легко формируется. Для стеклянной термостойкой кухонной утвари
Плавяный кремнезем	Стойкое к термическим ударам. Для лабораторного оборудования
Свинцовая щелочь (54% кремнезема)	Высокий показатель преломления. Для режущих стеклянных деталей
Натровая известь кремнезема	Легко формируется. Для стеклянных пластин, оконного стекла и бутылок

Глава одиннадцатая

Композиты

11.1. МАТЕРИАЛЫ

Типы композитов

Композиты можно разделить на три основные группы:

1. Волокнистые композиционные материалы.

Примерами могут служить шины транспортных средств (резина, армированная кордными тканями), армированный бетон, армированные стеклянными волокнами пластики, углеродные волокна в эпоксидных смолах или алюминии, древесина (естественный композит с трубками целлюлозы в матрице лигнина).

2. Армированные частицами материалы.

Примерами могут служить полимерные материалы, связанные такими наполнителями, как стеклянные шарики или утонченные градуированные порошки, придающие полимерам жесткость, в которые включены тонкие резиновые частицы, а также кермет с керамическими частицами в металлической матрице.

3. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы.

Примерами могут служить алюминиевые сплавы, обработанные на твердый раствор и преципитатно-упрочненные, мартенситно-старяющие стали, а также спеченные металлы.

В дополнение к ним имеется целый диапазон слоистых материалов.

В числе примеров можно назвать фанеру, лакированные металлы, пористые металлические структуры, рифленый картон.

Волокнистые композиционные материалы

У армированных волокном композитов основные функции волокон состоят в том, чтобы перенести большую часть прикладываемой нагрузки на композит и таким образом обеспечить прочность. По этой причине волокнистые материалы имеют высокие предел прочности и модуль упругости при растяжении. Предъявляемые к матричному материалу (матрице) требования заключаются в высоком сцеплении его с поверхностью волокон, благодаря чему прикладываемая к композиту сила передается на волокна. Они первыми воспринимают напряжение композита,

который, в свою очередь, предохраняет поверхность волокон от повреждения и разделяет их друг от друга, препятствуя тем самым распространению разрушения. Волокна могут быть сплошными, отрезками в полную длину композита или короткой длины. Они могут быть вытянуты в одном направлении, задавая направленность свойствам композита, или ориентированы случайным образом.

Для сплошных волокон:

$$\text{прочность композита} = \sigma_f f_f + \sigma_m f_m,$$

$$\text{модуль композита} = E_f f_f + E_m f_m,$$

где σ_f — напряжение на волокне, σ_m — напряжение на матрице, f_f — доля волокна в площади поперечного сечения композита, f_m — доля матрицы, E_f — модуль прочности на растяжение волокна, E_m — модуль прочности на растяжение матрицы.

Для прерывистых волокон прочность композита дается таким же выражением, но с заменой σ_f на усредненное напряжение:

$$\text{усредненное напряжение} = \sigma_{fu} \left(1 - \frac{L_c}{2L} \right),$$

где σ_{fu} — максимальная прочность волокна, т.е. предел прочности на растяжение, L — длина волокон и L_c — критическая длина волокон. Необходимая длина волокна равна или больше критической длины, напряжение достигает максимального значения, возможного в волокне. Критическая длина дается соотношением

$$\text{критическая длина} = \frac{\sigma_{fu} D}{2\tau_m},$$

где τ_m — прочность матрицы на срез, D — диаметр волокон.

(См. Свойства волокон армированных материалов и Свойства древесины.)

Армированные частицами материалы

Материалы армируются частицами диаметром 1 мкм или более, рассеянными по всей матрице. Частицы часто вводятся до четверти, до половины или даже более по отношению к общему объему композита. Полимерные материалы содержат наполнители. Эффект от частиц наполнителя в материале матрицы состоит в основном в увеличении модуля упругости при растяжении, предела прочности при растяжении, стойкости к удару и уменьшении ползучести и теплового расширения. Общая стоимость материала ниже, поскольку стоимость полимера больше, чем стоимость наполнителя.

Добавка сферических черных углеродных частиц в резины применяется, среди прочего, для улучшения модуля растяжения. Модуль растяжения композитной резины по отношению к модулю резины без наполнителя E будет выражаться как

$$\text{модуль растяжения композита} = E(1 + 2.5f + 14.1f^2),$$

где f — доля объема композита, занятая углеродом.

Жесткость некоторых полимеров может быть увеличена при введении в полимерную матрицу тонких резиновых частиц. Например, полистирол становится жестче при добавке в него полибутиадена: получается продукт, который называют высокостойким к ударам полистиролом (HIPS). Стирол-акрилонитрил становится жестким с полибутиаденом или стирол-бутиаден сополимером, давая акрилонитрилбутиаденстирол, трехзвенный полимер (ABS). Резина имеет модуль растяжения ниже, чем материал матрицы, и в результате ее добавки модуль растяжения и предел прочности на растяжение получаются меньше, но значительно увеличивается удлинение до разрыва, поскольку возрастает жесткость материала.

Керметы — это композиты, у которых в матрицу металла включены керамические частицы. Керамики обладают высокой прочностью, высоким модулем растяжения, высокой твердостью, но и высокой хрупкостью. По сравнению с ними металлы не имеют столь высоких характеристик, но зато более пластичные. Результирующий же композит крепче, тверже и относительно жестче. (См. Гл. 10 и Связанные керамики для большей детализации этого типа материала.)

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы

Прочность металла может быть увеличена с помощью маленьких частиц, рассеянных по его объему. Один из путей сделать это заключается в обработке на твердый раствор, что следует из преципитатного упрочнения. Такая обработка применяется, например, с мартенситно-старееющими сталями (см. Гл. 3) и сплавами алюминия (см. Гл. 4).

Другой путь, вводящий рассеяние маленькие частицы по всему объему металла, состоит в спекании материала. Этот процесс включает в себя уплотнение измельченного металлического порошка в пресс-форму и затем нагрев его до температуры выше той, которая достаточна для скрепления частиц в порошке. Если это сделать с алюминием, то в результате получится тонкодисперсная окись алюминия, около 10%, повсюду в матрице алюминия. В результате ввиду малого расстояния между частицами увеличиваются прочность, твердость, жаропрочность композиционного материала, но уменьшается его пластичность.

11.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Механические свойства волокнистых композиционных материалов

В Табл. 11.1 приведены механические свойства обычно применяемых в композитах волокон и нитевидных монокристаллов (усов). Нитевидные монокристаллы отличаются от волокон тем, что выращиваются как отдельные кристаллики, прежде чем появляются поликристаллы в виде волокон. В Табл. 11.2 приведены свойства некоторых волокнистых композиционных материалов. А в Табл. 11.3 приведены некоторые данные о критической длине прерывистых волокон в матрице.

Табл. 11.1. Механические свойства волокон

Волокно	Плотность [$10^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$]	Модуль растяжения [ГПа]	Предел прочности при растяжении [МПа]
Стекла			
Е-стекло	2.5	73	2.5
S-стекло	2.5	86	4.6
Кремнезем	2.2	74	5.9
Поликристаллические материалы			
Глинозем	3.2	173	2.1
Бор	2.6	414	2.8
Углерод	1.8	544	2.6
Карбид кремния	4.1	510	2.1
Нитевидные монокристаллы (усы)			
Глинозем	3.9	1550	20.8
Карбид бора	2.5	450	6.9
Графит	2.2	700	20.7
Карбид кремния	3.2	700	21
Нитрид кремния	3.2	380	7.0
Металлы			
Молибден	10.2	335	2.2
Сталь	7.7	200	4.2
Вольфрам	19.3	345	2.9

Табл. 11.2. Механические свойства волокнистых композиционных материалов

Состав	Плотность [$10^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$]	Модуль растяжения [ГПа]	Предел прочности при растяжении [МПа]
Полимерные матрицы			
Эпоксидная смола + 14% алюминия (усы)	1.6	42	800

Табл. 11.2 (окончание)

Состав	Плотность [10 ³ ·кг·м ⁻³]	Модуль растяжения [ГПа]	Предел прочности при растяжении [МПа]
Эпоксидная смола + 35% нитрида кремния (усы)	1.9	105	280
Эпоксидная смола + 58% углерода	1.7	165	1520
Эпоксидная смола + 72% E стекла	2.2	56	1640
Эпоксидная смола + 72% S стекла	2.1	66	1900
Нейлон 66 + 30% стекла	1.4	—	140
Полиацеталь + 20% стекла	1.6	—	75
Поликарбонат + 20% стекла	1.4	—	110
Полиэтилен + 20% стекла	1.1	—	40
Полипропилен + 20% стекла	1.1	—	40
Полиэфир + 65% E стекла	1.8	20	340
Металлические матрицы			
Алюминий + 50% бора	2.7	207	1140
Алюминий + 47% кремнезема	—	—	910
Медь + 50% вольфрама	14.1	262	1210
Медь + 77% вольфрама	—	—	1800
Никель + 8% бора	—	—	2700
Никель + 40% вольфрама	—	—	1100

Табл. 11.3. Критические длины волокон в матрице

Волокно	Диаметр волокна [мм]	Матрица	Критическая длина [мм]
Алюминиевые усы	2	Эпоксидная смола	0.5
Бор	100	Алюминий	1.8
Бор	100	Эпоксидная смола	3.5
Углерод	7	Эпоксидная смола	0.2
Стекло	13	Эпоксидная смола	0.4
Стекло	13	Полиэфир	0.5
Вольфрам	2000	Медь	38

Механические свойства древесины

В Табл. 11.4 приведены приближенные механические свойства обычной древесины.

Табл. 11.4. Механические свойства древесины

Древесина	Плотность [10 ³ ·кг·м ⁻³]	Модуль упругости		Предел прочности при растяжении [МПа]	Прочность при сжатии	
		=	⊥		=	⊥
Ясень	0.58	16	0.9	100	51	11
Бук	0.70	14	1.1	100	—	—
Кедр (красный)	0.47	6	—	60	42	8
Вяз	0.50	9	—	80	38	6
Красное дерево	0.50	12	0.6	100	—	—
Дуб	0.65	11	—	100	49	9
Сосна (белая)	0.36	9	—	60	34	4
Ель	0.40	11	0.6	70	40	5
Тиковое дерево	0.60	13	—	100	—	—

Примечание:

= — параллельно волокнам, ⊥ — перпендикулярно волокнам.

Глава двенадцатая

Электрические свойства

12.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Проводники

Электроны в изолированных атомах занимают дискретные уровни энергии. Однако в твердом теле, представляющем собой совокупность атомов, атом не может уже считаться в изоляции от других атомов и электроны атомов находятся теперь под влиянием не только их собственных ядер, но также и соседних атомов. Таким образом, в твердом теле дискретные уровни энергии атомов расширяются, образуя энергетические зоны. Самая верхняя зона энергии, содержащая занятые уровни при температуре 0 К в твердом теле, называется валентной зоной. Энергетическая зона непосредственно выше валентной зоны, которая содержит вакантные уровни энергии при 0 К, называется зоной проводимости. Параметры энергетической зоны между валентной зоной и зоной проводимости, называемой запрещенной зоной, зависят от элемента или от соответствующего соединения.

Когда к образцу материала приложена разность потенциалов, то внутри этого материала возникает электрическое поле. В случае хорошего проводника эта разность потенциалов создает ток. Электрическое поле является источником силы у носителей заряда, т.е. электронов в случае металла, и они могут свободно двигаться. Так происходит, если электрическое поле способно переводить валентные электроны на свободные уровни энергии. Исходя из этого модель для хорошего проводника характеризуется отсутствием запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости (**Рис. 12.1а**).

В случае изолятора прикладываемая разность потенциалов не вызывает ток. Тогда, хотя электрическое поле приложено и действует на электроны, они не способны двигаться. Модель этого материала представляется валентной зоной и зоной проводимости с запрещенной зоной между ними. Энергетический барьер слишком велик. Электронам необходима большая энергия, чтобы преодолеть его и перейти в зону проводимости (**Рис. 12.1б**).

Алмаз, являясь изолятором, имеет запрещенную зону около 5 эВ (электронвольт (эВ) — единица энергии, это энергия, получаемая электроном при движении в поле с разностью потенциалов в 1 В, т.е. около $1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

Полупроводником считается материал с малым барьером между валентной зоной и зоной проводимости, типичное значение этого барьера около 1 эВ или меньше (Рис. 12.1в). Это достаточно большая величина. Однако некоторые электроны в валентной зоне смогут преодолеть барьер при комнатной температуре, получив тепловую энергию за счет разности температур между 0К и комнатной. В зоне проводимости со свободными уровнями энергии они могут легко двигаться. Итак, в валентной зоне имеется некоторое количество свободных уровней (называемых дырками), из которых электроны перешли в зону проводимости. Оставшиеся в валентной зоне дырки могут там передвигаться.

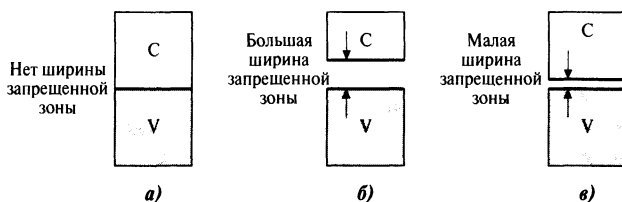


Рис. 12.1. Энергетические зоны для: а — хорошего проводника, б — изолятора, в — полупроводника;
 С — зона проводимости, V — валентная зона

Полупроводники

Полупроводниковые элементы, германий и кремний, относятся к элементам IV группы Периодической таблицы, имеют атомы, которые связаны вместе в твердом состоянии, причем каждый атом образует четыре валентные связи с соседними атомами. В каждой такой связи совместно участвует пара электронов. Когда валентные электроны двигаются, то одна из связей разрывается и в этом месте появляется дырка. Под действием электрического поля, возникающего при приложении разности потенциалов к образцу материала, электрон соседнего атома может разорвать свою связь и заполнить дырку, и таким образом дырка переходит в новое положение. Появляется проводимость как результат коллективного передвижения электронов и дырок. Это подводит нас к пониманию дырок как частиц с положительным зарядом, поскольку под действием электрического поля они двигаются в противоположном направлении по сравнению с электронами. Так как все дырки образуются при освобождении из связей электронов,

т.е. при переходе их из валентной зоны в зону проводимости, в этом случае будет равное число электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, и в таком химически чистом полупроводнике присутствует собственная проводимость.

Свойства полупроводников можно изменять легированием, т.е. добавлением малого количества других элементов. Атомы кремния и германия имеют четыре валентных электрона. Если элементы имеют пять валентных электронов, например элементы V группы Периодической таблицы, такие как мышьяк, сурьма или фосфор, то такие примеси называются донорными, так как они замещают атомы кремния, образуя ковалентные связи четырех из пяти электронов с соседними атомами кремния, а пятый электрон они легко отдают для участия в проводимости. Мы можем представить эту ситуацию на рисунке уровнем энергии, называемым донорным уровнем, расположенным в запрещенной зоне между валентной зоной и зоной проводимости, но ближе к зоне проводимости (Рис. 12.2а). Энергетический барьер между донорным уровнем и зоной проводимости составляет около 0.01 эВ. То есть при комнатной температуре фактически все донорные электроны будут находиться в зоне проводимости. В результате этого получается, что в зоне проводимости больше электронов, чем дырок в валентной зоне. В этом случае электрическая проводимость будет больше при движении электронов, чем дырок. Такой полупроводник, в котором преобладают донорные примеси, называется электронным, или *n*-типа.

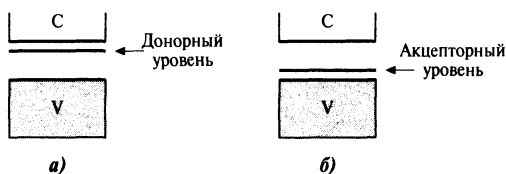


Рис. 12.2. Типы проводимости в полупроводниках:

а — *n*-тип, *б* — *p*-тип

Если элементы, имеющие три валентных электрона, например элементы III группы Периодической таблицы, такие как бор, алюминий, индий или галлий, используются в качестве примеси к кремнию, тогда все три его валентных электрона образуют ковалентные связи с соседними атомами кремния, но теперь недостает одного электрона, т.е. нет одной связи, она не заполнена. Так появляется дырка, перемещаемая как единица положительного заряда, поскольку заполнение дырки электроном из соседней ковалентной связи выглядит как перемещение дырки. Энергетические

зоны для материала тогда показывают уровень энергии, называемый акцепторным, с дырками как раз выше валентной зоны (Рис. 12.26). Энергетический барьер между акцепторным уровнем и валентной зоной составляет около 0.01 эВ. Электроны из валентной зоны легко переходят на акцепторный уровень. Теперь больше дырок в валентной зоне, чем электронов в зоне проводимости, и электрическая проводимость определяется главным образом дырками (дырочная проводимость), поэтому такой полупроводник с преобладанием акцепторных примесей называют дырочным, или *p*-типа, где *p* означает, что проводимость осуществляется главным образом носителями с положительным зарядом.

Полупроводники не ограничиваются только элементами IV группы — кремнием и германием. Полупроводники могут быть получены из соединения элементов III и V групп, например арсенид галлия, из соединения элементов II и VI групп, например сульфид кадмия, и из соединения элементов IV и VI групп, например сульфид свинца.

Диэлектрики

Диэлектрические материалы являются изоляторами. Их изолирующие свойства определяют и их применение, например, для кабелей и конденсаторов. Важным параметром у последних является относительная диэлектрическая проницаемость материала изолятора ϵ_r , определяющая, во сколько раз она больше диэлектрической проницаемости вакуума ϵ_0 . Для плоского конденсатора с площадью обкладок A , разделенных зазором d , емкость конденсатора C дается выражением

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} = \epsilon_r C_0,$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная. Она имеет значение $8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $C_0 = \epsilon_0 A/d$ — емкость конденсатора с вакуумом между пластинами. A относительная диэлектрическая проницаемость является таким фактором, который увеличивает емкость при наличии диэлектрика между обкладками конденсатора.

Когда к конденсатору прикладывается переменное напряжение, там теряется часть энергии из-за переориентации атомов и молекул в диэлектрике. Эти диэлектрические потери выражаются тангенсом угла потерь $\text{tg } \delta$, который дается соотношением

$$\text{tg } \delta = \frac{\text{потери энергии за цикл}}{2\pi + \text{максимум запасенной энергии}}.$$

Чем меньше диэлектрические потери, тем меньше осцилляции зарядов с рассеянием энергии диэлектрика в виде тепловой энергии.

Если напряжение на конденсаторе увеличивать от нуля, то ток между обкладками будет увеличиваться незначительно до некоторого значения, определяемого пробивным напряжением, когда наступает пробой — необратимое разрушение твердого диэлектрика под действием поля и потеря им изолирующих свойств. После этого ток резко увеличивается. Напряженность электрического поля, при которой наступает пробой, называют электрической прочностью. Поскольку напряженность электрического поля равна градиенту напряжения, то электрическая прочность — это напряжение пробоя, деленное на толщину диэлектрика, к которому приложено напряжение.

12.2. СВОЙСТВА

Электропроводность

В Табл. 12.1 приведены удельные сопротивления и проводимости ряда обычно применяемых твердых металлов и сплавов при температуре около 20°C. Отметим, что проводимость — это обратная величина сопротивления, и она имеет единицу размерности сименс (См). Удельная электропроводность — тоже величина, обратная удельному сопротивлению, имеет единицу размерности См/м. В технике удельную проводимость часто выражают в процентах по отношению к удельной проводимости отожженной меди при 20°C. Такие значения указывают как значения IACS. В Табл. 12.2 приведены значения сопротивлений обычно применяемой металлической проволоки, а в Табл. 12.3 — удельные сопротивления изоляторов (см. также Табл. 9.7).

Табл. 12.1. Удельные сопротивления и проводимости металлов и сплавов при 20°C

Материал	Удельное сопротивление [10 ⁸ Ом·м]	IACS проводимость [%]
Алюминий (99,996%)	2.65	64.9
Латунь патронная (70%) желтая	6.2 6.4	28 27
Константан (55% Cu, 45% Ni)	49.9	3.5
Медь (>99.90%, электролитическая)	1.71	101
(>99.95%, бескислородная)	1.71	101
проволока, 1% Cd	2.2	80
сплав, 15% Zn	4.7	37
сплав, 20% Zn	5.4	32
сплав, 2% Ni	5.0	35
сплав, 6% Ni	9.9	17
Золото	2.35	75
Железо (99.99%)	9.7	17.7
углеродистая сталь, 0.65% C	18	9.5

Табл. 12.1 (окончание)

Материал	Удельное сопротивление [10 ⁸ Ом·м]	IACS проводимость [%]
Манганин, 87% Cu, 13% Mn	48.2	3.5
Нихром, 80% Ni, 20% Cu	108	1.6
Никель, 99.8%	8.0	23
Фосфорная бронза, 3%	8.6	20
Платина	10.6	16
сплав, 10% Ir	25	7
сплав, 10% Rb	43	4
Серебро	1.59	106
сплав, 10% Cu	2	85
сплав, 15% Cd	4.9	35
Сталь легированная	56	3.1
17% Co	28	6.3
Вольфрам	5.65	30

Табл. 12.2. Сопротивления проволоки при 20°C

Нормальный сортамент проволоки	Диаметр [мм]	Сопротивление [Ом·м]			
		Медь	Манганин	Константан	Нихром
12	2.642	0.00312	0.076	0.090	0.197
14	2.032	0.00532	0.128	0.151	0.333
16	1.626	0.00831	0.200	0.235	0.520
18	1.219	0.0148	0.355	0.420	0.92
20	0.914	0.0263	0.630	0.745	1.65
22	0.711	0.0434	1.05	1.23	2.72
24	0.559	0.0703	1.69	2.00	4.40
26	0.457	0.105	2.53	3.00	6.60
28	0.376	0.155	3.75	4.40	9.70
30	0.315	0.221	5.30	6.30	13.9

Табл. 12.3. Удельные сопротивления изоляторов при 20°C

Материал	Удельное сопротивление [Ом·м]
Керамика	
глиноземная	10 ⁹ ...10 ¹²
фарфоровая	10 ¹⁰ ...10 ¹²
Алмаз	10 ¹⁰ ...10 ¹¹
Стекло	
натровая известь	10 ⁹ ...10 ¹¹
пирекс	10 ¹²
Эластомеры	
бутил	10 ¹⁵
натуральная резина	10 ¹³ ...10 ¹⁵

Табл. 12.3 (окончание)

Материал	Удельное сопротивление [Ом·м]
натуральная резина	$10^{13} \dots 10^{15}$
полиуретан	10^{10}
Слюда	$10^{11} \dots 10^{15}$
Бумага (сухая)	10^{10}
Полимеры	
акрилик	$10^{12} \dots 10^{14}$
ацетат целлюлозы	$10^8 \dots 10^{12}$
меламин	10^{10}
полиамид (нейлон)	$10^{10} \dots 10^{13}$
полипропилен	$10^{13} \dots 10^{15}$
полиэтилен	
высокой плотности	$10^{14} \dots 10^{15}$
низкой плотности	$10^{14} \dots 10^{18}$
поливинилхлорид	
жесткий	$10^{12} \dots 10^{14}$
гибкий	$10^9 \dots 10^{13}$

Ширина запрещенной зоны полупроводников

В Табл. 12.4 приведены значения ширины запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости для чистых полупроводниковых элементов и соединений.

Табл. 12.4. Значение ширины запрещенной зоны при 300 К чистых полупроводниковых элементов и соединений

Материал	Ширина запрещенной зоны [эВ]
Элементарные полупроводники	
Кремний	1.12
Германий	0.66
Соединения III...V	
Арсенид галлия GaAs	1.43
Фосфид галлия GaP	2.24
Антимонид галлия GaSb	0.72
Арсенид индия InAs	0.33
Фосфид индия InP	1.29
Антимонид индия InSb	0.17
Арсенид алюминия AlAs	2.16
Антимонид алюминия AlSb	1.58
Соединения II...VI	
Сульфид кадмия CdS	2.42
Селенид кадмия CdSe	1.70

Табл. 12.4 (окончание)

Материал	Ширина запрещенной зоны [эВ]
Сульфид цинка ZnS	3.68
Селенид цинка ZnSe	2.7
Соединения IV...VI	
Сульфид свинца PbS	0.41
Селенид свинца PbSe	0.27
Теллурид свинца PbTe	0.31
Теллурид олова SnTe	0.18

Свойства диэлектриков

В Табл. 12.5 приведены типичные значения относительной диэлектрической проницаемости, коэффициентов диэлектрических потерь, а также диэлектрической прочности для обычно применяемых диэлектриков. Относительная диэлектрическая проницаемость и коэффициенты диэлектрических потерь зависят от частоты. Данные значения нормированы для типичных частот 50/60 Гц.

Табл. 12.5. Свойства обычных диэлектриков

Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость	Коэффициент диэлектрических потерь	Электрическая прочность [10 ⁶ В/м]
Глинозем	9...6.5	0.002	6
Акрилик	3.2	0.02	18
Ацетат целлюлозы	3.5...7.5	0.01... 0.1	12...24
Эпоксидная смола	3.6	0.02	18
Стекло, натровая известь	7	0.01	10
Меламин	7	0.04	15
Слюда	7	0.001	40
Бумага	5	0.01	16
Полиамид			
нейлон 6.6	3.6...4.0	0.01	14
нейлон 6.10	4.0...7.6	0.05	—
Поликарбонат	2.8	0.0003	16
Полиэтилен	2.3	0.0001	16
Полипропилен	2.1...2.7	0.005	18...26
Полистирол	2.5...2.7	0.0001	20...28
высокой ударной стойкости	2.5...3.5	0.004	20
Поливинилхлорид			
гибкий	—	0.1	12...40
жесткий	5...9	0.01	17...40
PTFE	3.4	0.0001	16
Каучук натуральный	4...3.2	0.02	20
Вакуум	1	0	—
Воздух (сухой)	1	0	3
Вода	80	~ 0.1	—

Глава тринадцатая

Магнитные свойства

13.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Плотность магнитного потока, или магнитная индукция, B — это величина потока, проходящего через единицу площади; мерой его служит плотность магнитных силовых линий. Напряженность магнитного поля H — это подведенная к системе энергия, которая создает магнитный поток. Ее определяют как

$$H = \frac{NI}{L},$$

где N — число витков соленоида, по которому проходит ток I , и L — длина пути магнитного потока, созданного в соленоиде. В вакууме

$$B = \mu_0 H,$$

где μ_0 — магнитная проницаемость свободного пространства (вакуума), или магнитная постоянная. Она имеет значение $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Когда какой-либо материал находится на пути потока,

$$B = \mu_r \mu_0 H,$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость среды. Относительная магнитная проницаемость, таким образом, определяет, во сколько раз увеличится плотность магнитного потока в материале по сравнению с магнитным потоком в вакууме. Для большинства немагнитных материалов μ_r не зависит от H и равна примерно 1. Произведение $\mu_r \mu_0$ называется абсолютной магнитной проницаемостью μ и измеряется в Гн/м. У разных материалов под действием внешнего магнитного поля магнитный момент атомов, их составляющих, является суммой векторов орбитальных и собственных (спиновых) моментов электронов. Когда накладывается внешнее магнитное поле, они по-разному ориентируются вдоль поля. Существуют вещества с диамагнитным эффектом — диамагнетики, у которых в атомах индуцируется магнитный момент, направленный против поля. В парамагнитных веществах — парамагнетиках, нескомпенсированные спины электронов, наоборот, усиливают намагниченность атомов и возникает парамагнитный эффект. Ферромагнетики обладают большим собственным магнитным полем и при намагничивании способны создавать большие магнитные поля. В отсутствие внешнего магнитного поля каждый домен (область кристалла размером $10^{-4} \dots 10^{-6}$ м, где маг-

нитные моменты атомов ориентированы параллельно определенному кристаллографическому направлению) намагничен до насыщения, но магнитные моменты отдельных доменов направлены хаотично и полный магнитный момент ферромагнетика равен 0. Имеются также антиферромагнетики, у которых магнитные моменты ориентируются антипараллельно, результирующий момент также равен 0. Когда магнитные моменты некомпенсированы, возникает результирующий магнитный момент, а материал с таким эффектом называется ферромагнетиком.

Диамагнитные материалы имеют относительную магнитную проницаемость немного меньше 1, у парамагнитных материалов она немного больше 1, а у ферромагнитных и ферримагнитных (так обозначаются намагничиваемые материалы) она значительно больше 1. Ферромагнитные материалы — это металлы, а ферримагнитные материалы — керамики.

Для намагничиваемых материалов относительная магнитная проницаемость зависит от материала и в основном не одинакова для разных значений H . Отсюда следует, что зависимость B от H , т.е. кривая намагничивания, не является прямолинейной, а похожа на ту, что показана на **Рис. 13.1** для литейной стали.

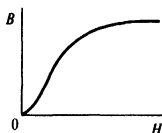


Рис. 13.1. Зависимость B - H для литейной стали

На **Рис. 13.2** показано, как изменяется магнитная индукция B в намагничиваемом материале, начиная с напряженности магнитного поля $H = 0$. При увеличении H магнитная индукция B возрастает и достигает максимального значения $B_{\text{макс}}$. Далее, когда H уменьшается и становится равной 0, B также уменьшается до некоторой величины, называемой остаточной индукцией. При дальнейшем изменении H в отрицательном направлении оси магнитная индукция B становится равной 0, при этом $H \neq 0$ и определяется величиной, называемой коэрцитивной силой. Следуя за изменениями отрицательных значений H , получаем отрицательный максимум магнитной индукции B . Затем H начинает возрастать, проходя через 0. С увеличением H магнитная индукция B увеличивается, проходит через 0 и достигает величины $B_{\text{макс}}$. Таким образом, при перемагничивании от $+H_S$ до $-H_S$ и обратно кривые не совпадают, и мы получаем B - H -петлю, показанную на **Рис. 13.2**. Она называется петлей гистерезиса. Площадь, заключенная внутри петли, равна энергии, рассеянной в единице объема в намагничиваемом материале за один цикл перемагничивания. Она определяет потери на гистерезис или перемагничивание.

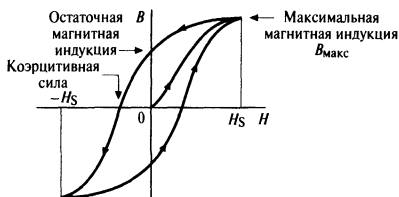


Рис. 13.2. Петля гистерезиса

Термин «магнитомягкий» применяется для таких магнитных материалов, которые обладают низкой коэрцитивной силой, большой магнитной проницаемостью $\mu_{\text{max}} \leq 240 \cdot 10^3$ Гн/м, для их намагничивания или размагничивания требуется слабое магнитное поле, они имеют малую остаточную намагничиваемость. Следовательно, сохраняется лишь незначительный магнитный поток в отсутствие намагничивающего поля и под петлей гистерезиса заключена маленькая площадь, так что за один цикл намагничивания теряется малая энергия. Магнитомягкие материалы употребляются для таких деталей, как сердечники трансформаторов, электромагнитов, катушек и т.д. и, таким образом, эксплуатируются в условиях циклического режима.

Термин «магнитотвердый» используется для магнитных материалов, имеющих высокую остаточную намагничиваемость, поэтому в отсутствие магнитного поля у них сохраняется высокий суммарный магнитный поток, высокая коэрцитивная сила. Вот почему этот материал трудно размагнитить, и площадь, заключенная под петлей гистерезиса, велика, а следовательно, для размагничивания необходима большая суммарная энергия.

Магнитная проницаемость магнитомягких материалов составляет обычно лишь часть максимального значения относительной магнитной проницаемости. Это максимальный градиент линии, которую можно провести к кривой намагничивания. У магнитотвердых материалов, применяемых для постоянных магнитов, нет обычного цикла замкнутой петли гистерезиса при периодических магнитных полях. О пригодности материала для постоянного магнита судят по максимальной величине произведения BH . Подходят только магнитожесткие материалы. Наилучшими характеристиками обладают соединения кобальта с редкоземельными элементами (самарием, празеодимом, иттрием).

13.2. Магнитные свойства магнитных материалов

В Табл. 13.1 приведены свойства некоторых обычно встречающихся магнитомягких материалов, а в Табл. 13.2 приведены эти же свойства для магнитотвердых материалов. Температура Кюри — это температура, при которой тепловая энергия вызывает потерю ферромагнетизма.

Табл. 13.1. Магнитомягкие материалы

Материал	Макс. $B(T)$	Макс. H_c	Коэрцитивная сила [А/м]	Потери энергии/цикл [Дж/м ³]	Температура Кюри [К]	Сопротивление [мкОм·м]
Чистое железо	2.2	200000	4	30	1043	0.1
Мягкая сталь	2.1	2000	143	500	1000	0.1
Кремнистое железо, Fe + 3% Si	2.0	30000	12	30	1030	0.5
Пермаллой, Fe + 78.5% Ni	1.1	100000	4	4	800	0.2
Супермаллой, 79% Ni, 16% Fe, 5% Mo	0.8	800000	0.16	4	620	0.6
Ферроксиб, Mn Zn феррит	0.25	1500	0.8	13	570	10 ⁶

Табл. 13.2. Магнитотвердые материалы

Торговая марка	Остаточная магнитная индукция [Т]	Коэрцитивная сила [кА/м]	Макс. BH [кДж·м ⁻³]	Температура Кюри [К]
Изотропные				
Алпи	—	—	—	—
Маглой 6	0.56	46	10	1030
Алнко	—	—	—	—
Маглой 5	0.72	45	13.5	1070
Фероба 1 *	0.22	135	8	720
Ферроксдур 100 *	—	—	—	—
Неоперм D1 *	—	—	—	—
Анизотропные				
Алкомакс 3	1.26	52	43	1130
Маглой 1	—	—	—	—
Тиконал 600	—	—	—	—
Колумакс	1.35	59	60	1130
Маглой 100X	—	—	—	—
Фероба 2 *	0.39	150	29	720
Ферроксдур 300 *	—	—	—	—
Неоперм E2 *	—	—	—	—
Фероба 3 *	0.37	240	26	720
Ферроксдур 380 *	—	—	—	—
Неоперм E3 *	—	—	—	—
Стали				
6% W	1.05	5.2	2.4	1030
6% Cr	0.95	5.2	2.4	1030
3% Co	0.72	10	2.8	1070
15% Co	0.83	14	4.9	1110

Примечание:

Некоторые торговые марки даны для полноты перечня материалов.

* Это ферриты. Другими изотропными и анизотропными материалами являются железо, кобальт, никель, алюминиевые сплавы.

Глава четырнадцатая

Механические свойства

14.1. СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

Статическая прочность может быть определена как способность к сопротивлению кратковременной термической постоянной нагрузке при умеренных температурах без разрушения, дробления или тяжелых чрезмерных деформаций. Если компонент подвергается воздействию напряжения по одной оси, то за предел текучести принимается обычно измеренная прочность, если материал пластичный, и предел прочности на растяжение, если он хрупкий. Измеренная статическая прочность, таким образом, есть предел текучести, пробное напряжение, предел прочности на растяжение, прочность на сжатие и твердость (твердость материала, отнесенная к пределу прочности на растяжение материала).

Если компонент подвергается воздействию напряжения по двум или трем осям, например корпус подвергается внешнему давлению, в этом случае используются теоретические значения для предсказания разрушения материала. Теория максимальных главных напряжений, которая чаще применяется к хрупким материалам, предсказывает разрушение как неизбежное, если главное максимальное напряжение достигает значения предела прочности на растяжение или значения предела упругости, когда материал подвергается простому растяжению.

Теория максимальных срезающих напряжений применяется для пластичных материалов, при этом предполагается, что разрушение произойдет, если максимальное срезающее напряжение, приложенное по двум или трем осям, достигает значения максимального срезающего напряжения у материала при напряжении предела упругости в случае простого растяжения. В случае напряжения, приложенного по двум осям, разрушение будет тогда, когда разность между двумя главными напряжениями будет равна пределу упругости.

Другая теория, которая применяется к пластичным материалам, предсказывает, что разрушение будет тогда, когда энергия деформации единицы объема будет равна энергии деформации при пределе упругости для элементарного одноосного растяжения.

Следует признать, что на прочность какого-либо составного элемента влияет не только статическая прочность материала, но также тип конструкции. Так, например, при изгибании двутавровая балка (с широкими полками) будет более прочной, чем балка прямоугольного сечения, поскольку материал в двутавровой балке сконцентрирован на верхней и донной поверхностях, где напряжения выше, и не расходует бесполезно там, где напряжения ниже. Тонкую оболочку или поверхностный слой можно упрочнить с помощью ребер жесткости или рифлением.

Для большинства пластичных ковких материалов механические свойства при сжатии достаточно близки к тем же свойствам при растяжении, и для упрощения при оценке свойств используется предел прочности на растяжение в обоих случаях — при растяжении и при сжатии. Металлы в литейном исполнении, однако, могут быть крепче при сжатии, чем при растяжении. Хрупкие материалы, такие как керамики, в основном также крепче при сжатии, чем при растяжении. Есть некоторые материалы, у которых имеется значительная анизотропия, т.е. их свойства зависят от направления измерения. Это можно наблюдать, например, у ковких материалов, у которых имеются вытянутые включения, и в результате обработки они становятся ориентированными в некотором направлении, или в композитных материалах, содержащих одинаково направленные волокна.

Механические свойства металлов претерпевают очень существенные изменения при обработке, будь то тепловая обработка или деформация. Таким образом, невозможно сравнивать сплавы иначе, чем в терминах предела прочности на растяжение. На свойства полимерных материалов сильно влияют добавки, введенные в нормальный состав, и тоже возможно только грубое сравнение механических свойств различных полимеров. Имеется также проблема и с термопластами в том, что даже при 20°C они могут показывать значительную ползучесть. Также их прочность очень сильно зависит от времени. Неармированные термопласты имеют низкую прочность по сравнению с большинством металлов, однако у них низкая плотность, и вследствие этого их прочность по отношению к массе вполне приемлема.

В **Табл. 14.1** приведены пределы прочности на растяжение ряда материалов, все данные указаны для температуры порядка 20°C. В **Табл. 14.2** даны типичные характерные прочности материалов, т.е. прочности на растяжение или пределы текучести,

деленные на плотность материалов (прочность на единицу массы). А в Табл. 14.3 представлены обычно применяемые стали для различных уровней предела прочности на растяжение и соответствующие предельные критические сечения.

Табл. 14.1. Прочность материалов

Материал	Прочность [МПа]
Полимерные пены	<10
Древсины, перпендикулярные структуре	2...12
Эластомеры	2...12
Древсины, параллельные структуре	6...100
Технические полимеры	60...100
Бетон	20...60
Свинцовые сплавы	20...60
Магниеые сплавы	80...300
Цинковые сплавы	160...400
Алюминиевые сплавы	100...600
Медные сплавы	80...1000
Углеродистые и низколегированные стали	250...1300
Никелевые сплавы	250...1500
Высоколегированные стали	500...1800
Технические композиты	100...1800
Технические керамики	1000...10000 и более

Табл. 14.2. Характерная прочность материалов при 20°C

Материал	Плотность [Мг/м ³]	Прочность, отнесенная к плотности [МПа/(Мг·м ⁻³)]
Алюминиевые сплавы	2.6...2.9	40...220
Медные сплавы	7.5...9.0	8...110
Свинцовые сплавы	8.9...11.3	1...3
Магниеые сплавы	1.9	40...160
Никелевые сплавы	7.8...9.2	30...170
Титановые сплавы	4.3...5.1	40...260
Цинковые сплавы	5.2...7.2	30...60
Углеродистые и низколегированные стали	7.8	30...170
Высоколегированные стали	7.8...8.1	60...220
Технические керамики	2.2...3.9	>300
Стекла	2...3	200...800
Термопластики	0.9...1.6	15...70
Полимерные пены	0.04...0.7	0.4...12
Технические композиты	1.4...2	70...900
Бетон	2.4...2.5	8...30
Древесина	0.4...1.8	5...60

Примечание:

Применяемая единица для плотности Мг/м³ равна 1000 кг/м³.

Табл. 14.3. Выбор стали

Предел прочности на растяжение [МПа]	BS код стали	Состав стали (затвердевшая и отпущенная)	Предельное критическое сечение [мм]
620...770	080M40	Среднеуглеродистая	63
	150M36	Марганцево-углеродистая	150
	503M40	1% Ni	250
700...850	150M36	1.5% Mn	63
	708M40	1% Cr—Mo	150
	605M36	1.5% Mn—Mo	250
770...930	708M40	1% Cr—Mo	100
	817M40	1.5% Ni—Cr—Mo	250
850...1000	630M40	1% Cr	63
	709M40	1% Cr—Mo	100
	817M40	1.5% Ni—Cr—Mo	250
930...1080	709M40	1.5% Cr—Mo	63
	817M40	1.5% Ni—Cr—Mo	100
	826M31	2.5% Ni—Cr—Mo	250
1000...1150	817M40	1% Ni—Cr—Mo	63
	826M31	2.5% Ni—Cr—Mo	150
1080...1240	826M31	2.5% Ni—Cr—Mo	100
	826M40	2.5% Ni—Cr—Mo	250
1150...1300	826M40	2.5% Ni—Cr—Mo	150
1240...1400	826M40	2.5% Ni—Cr—Mo	150
>1540	835M30	4% Ni—Cr—Mo	150

14.2. ЖЕСТКОСТЬ

Жесткость можно определить как способность материала сопротивляться прогибанию под действием нагрузки. Так, если мы рассмотрим кронштейн длиной L с точечной нагрузкой F на его свободном конце, то прогиб y на свободном конце будет

$$y = \frac{FL^3}{3EI},$$

где E — модуль растяжения, I — момент инерции поперечного сечения балки относительно нейтральной точки оси. Получаем, для данного профиля и длины кронштейна чем больше модуль растяжения, тем меньше прогиб. Аналогичные соотношения существуют и для других форм балок. Следовательно, можно утверждать, что, чем больше модуль растяжения, тем больше жесткость.

Величина прогиба балки является функцией обоих параметров: E и I . Таким образом, для данного материала балка может быть сделана жестче при увеличении ее момента инерции. Это

происходит при расположении большей части материала, насколько это вообще возможно, подальше от оси изгиба. Так, двутавровый профиль — особенно действенный путь достижения жесткости. Рассуждая подобным образом, приходим к выводу: материал в форме трубы имеет бóльшую жесткость, чем в форме сплошного стержня.

Другая ситуация, которая относится тоже к величине EI , будет при короблении колонн под действием сжимающих нагрузок. Типовое уравнение, применяемое для коробления, справедливо для колонны длиной L , если нагрузка F достигает значения

$$F = \frac{\pi^2 EI}{L^2}.$$

Это уравнение Эйлера. Чем больше значение EI , тем выше нагрузка, требуемая для появления коробления. Следовательно, колонна тем жестче, чем выше значение EI . Заметим, что короткая и толстая колонна скорее окажется раздавленной, когда предел текучести слегка превышен, чем покоробленной. Для тонкой колонны коробление более вероятно.

Модуль упругости при растяжении металла незначительно изменяется при изменении его состава или тепловой обработки. Однако модуль упругости при растяжении композитных материалов очень сильно изменяется при изменении ориентации волокон и относительного их количества. В Табл. 14.4 приведены типичные значения модулей упругости при растяжении для материалов при 20°C.

Табл. 14.4. Модули упругости при растяжении различных материалов

Материал	Модуль упругости при растяжении [ГПа]
Полимерные пены	<0.2
Эластомеры	<0.2
Древесины, параллельные структуре	0.2...10
Технические полимеры	0.2...10
Древесины, перпендикулярные структуре	2...20
Свинцовые сплавы	10...11
Бетон	20...50
Магниеые сплавы	40...45
Стекла	50...80
Алюминиевые сплавы	70...80
Цинковые сплавы	43...96
Титановые сплавы	110...125
Медные сплавы	100...160
Стали	200...210
Технические керамики	80...1000

14.3. СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ

Разрушение элемента, когда он подвержен флуктуирующим нагрузкам, является следствием трещин, которые появляются в результате деформации материала и растут до тех пор, пока не произойдет разрушение. Главные факторы, воздействующие на усталостные свойства, — это концентрация напряжений, обусловленных конструкцией элемента, коррозия, остаточные напряжения, поверхностная финишная обработка, температура, микроструктура сплава и его тепловая обработка. Только при ограниченной длине материала можно выбрать материал с определенным сопротивлением усталости.

В основном для металлов предел усталости, или предел выносливости, составляет примерно $10^7 \dots 10^8$ циклов или 0.33...0.5 статического предела прочности на растяжение. Для сталей предел усталости имеет типичное значение 0.4...0.5 статической прочности. Включения в сталь, такие как сера или свинец, увеличивают ее обрабатываемость на станках, но могут уменьшать предел усталости. Для серого литейного чугуна предел усталости составляет около 0.4 статической прочности, для сфероидальных и ковких чугунов он находится в диапазоне 0.5, для ферритовых сортов — до 0.3, для высокой прочности перлитовых чугунов, для черносердечных, белосердечных и низкой прочности перлитовых ковких чугунов — около 0.4. У алюминиевых сплавов предел выносливости составляет примерно 0.3...0.4 статической прочности, а для медных сплавов — 0.4...0.5.

Эффекты усталости у полимеров осложнены тем обстоятельством, что альтернативой действиям нагрузки в полимере становится нагрев. Он является причиной уменьшения модуля эластичности, а при достаточно высоких температурах может возникнуть также расширение, что вызовет разрушение. Таким образом, усталость в полимерах очень сильно зависит от температуры.

14.4. УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ

Ударную вязкость можно определить как оказание материалом сопротивления разрушению. Вязкий материал сопротивляется распространению трещин. Ударную вязкость измеряют двумя основными методами: при первом — определяют сопротивление материала ударной нагрузке в испытаниях Шарпи или Изода при количестве энергии, достаточной для излома образца, а при втором — определяют сопротивление материала распространению существующей уже трещины при испытании прочности на растяжение. Измерения проводят экспериментально на образце с надрезом с заранее созданной на дне надреза усталостной трещиной. При этом фиксируют усилие в момент подрастания трещины на некоторую

длину и перехода ее к нестабильному распространению и рассчитывают вязкость разрушения для плоской деформации растяжением K_{Ic} : чем ниже это значение, тем меньше вязкость материала. В Табл. 14.5 приведены типичные величины вязкости разрушения K_{Ic} для плоской деформации растяжения при 20°C.

У конкретного типа металлического сплава имеется обратная пропорциональность между пределом текучести и ударной вязкостью: чем выше предел текучести, тем ниже вязкость. Так, например, если предел текучести низколегированного сплава, закаленных и отпущенных сталей поднять выше металлургическими способами, вязкость уменьшится. Стали становятся менее вязкими с увеличением содержания в них углерода и увеличением размера зерна.

Вязкость пластиков возрастает при включении в них каучука или другого более вязкого полимера, при сополимеризации или включении тягучих волокон. Например, стирол-акрилонитрил (SAN) является хрупким и далек от вязкого состояния. Его можно, однако, сделать более вязким с помощью полибутадиенового каучука, получится более вязкий акрилонитрил-бутадиен-стирол (ABS).

Табл. 14.5. Вязкость разрушения для плоской деформации растяжением при 20°C

Материал	Вязкость разрушения для плоской деформации растяжением [МПа·м ^{1/2}]
Полимерные пены	<1.0
Древесины, перпендикулярные структуре	0.07...0.9
Бетон	0.1...3
Стекла	0.3...0.6
Технические полимеры	0.5...10
Древесины, параллельные структуре	1...10
Технические керамики	2...10
Литейные чугуны	7...11
Магниеые сплавы	10...11
Алюминиевые сплавы	10...60
Технические композиты	10...100
Стали	20...150
Медные сплавы	50...110
Титановые сплавы	60...110
Никелевые сплавы	60...110

14.5. ПОЛЗУЧЕСТЬ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Сопротивление ползучести металла может быть улучшено при включении в него тонкодисперсных частиц, препятствующих движению дислокаций. Сплавы серии Нимоник, основанные на сплаве никель—хром 80/20, имеют хорошее сопротивление

ние ползучести как следствие наличия в них тонких преципитатов, сформированных при включении малого количества титана, алюминия, углерода или других элементов. Ползучесть увеличивается, если увеличивается температура, т.е. она является основным фактором в определении температуры, до которой могут эксплуатироваться материалы. Другим фактором, оказывающим влияние на материалы, служит окружающая атмосфера. Она может воздействовать на поверхность и приводить к образованию окалины, которая постепенно сокращает площадь поперечного сечения компонента и, следовательно, ослабляет его способность переносить нагрузки. Эти эффекты усиливаются при увеличении температуры. Сплавы серии Нимоник обладают большим сопротивлением такому воздействию и могут использоваться до 900°C.

Для большинства металлов ползучесть существенна при высоких температурах. У пластиков ползучесть может быть значительной уже при комнатной температуре. Обычно терморезактивы имеют температурное сопротивление выше, чем термопласты, однако добавкой соответствующих волокон и наполнителей можно улучшить температурные свойства и термопластов.

В Табл. 14.6 указаны для ряда материалов типичные температурные диапазоны, в пределах которых они могут применяться.

Табл. 14.6. Температурные диапазоны применения материалов

Предельная температура [°C]	Материал и температурные условия применения
От комнатной до 150	Немногие термопласты рекомендуются для длительного применения при температурах выше 100°C. Нейлон со стеклянными волокнами может, однако, использоваться до 150°C. Техническим металлом, применение которого ограничено этим диапазоном, является только свинец
150...400	Магниево- и алюминиевые сплавы могут, в основном, применяться до 200°C, некоторые жесткие особые сплавы — до более высоких температур. Например, алюминиевый сплав LM13(AA336.0) используется для pistонов в машинах и в экспериментах от 200 до 250°C, в то время как некоторые литейные алюминиевые бронзы употребляются до 400°C, ковкие алюминиевые бронзы — примерно до 300°C. Не содержащие добавок углеродистые и марганцево-углеродистые стали широко применяются в этом же диапазоне температур
400...600	Не содержащие добавок углеродистые и марганцево-углеродистые стали не могут применяться при температурах выше 400...450°C. При таких температурах используются низколегированные стали. Для температур выше 500°C может употребляться сталь с содержанием углерод—0.5% Mo, выше 525°C — сталь 1% Cr—0.5% Mo, выше 550°C — сталь 0.5% Cr—Mo—V и выше 600°C — сталь 5...12% Cr. Титановые сплавы также широко применяются в этом температурном диапазоне. α — β -сплав 6% Al—4% V (IM1318) применяется выше 450°C. Ближний α -сплав — до высоких температур, например сплав IM1 829 при температуре до 600°C

Табл. 14.6 (окончание)

Предельная температура [°C]	Материал и температурные условия применения
600...1000	Широко применяются в этом температурном интервале металлы, аустенитные нержавеющие стали, сплавы Ni—Cr и Ni—Cr—Fe и сплавы на основе кобальта. Аустенитные нержавеющие стали с 18% Cr—8% Ni могут применяться примерно до 750°C. Ряд высокотемпературных сплавов, базирующихся на основе никель—хром, способны сохранять свою прочность, сопротивление ползучести и окислению при высоких температурах, например сплавы серии Нимоник, такие как Нимоник 90, который может использоваться до 900°C, Нимоник 901 — до 1000°C. Другие серии высокотемпературных сплавов — Ni—Cr—Fe, такие как Инконель и Инколой серий. Например, Инконель 600 может работать до 1000°C, а Инколой 800Н — до 700°C. Свыше 1000 материалов, которые могут употребляться при температурах свыше 1000°C, тугоплавкие металлы: молибден, ниобий, тантал и вольфрам, а также керамики. Тугоплавкие металлы и их сплавы могут применяться при температурах свыше 1500°C. Защита поверхности — одна из главных проблем использования этих сплавов при высоких температурах. У керамики возникают проблемы с твердостью, хрупкостью и уязвимостью к термическому удару. Глинозем применяется в печах примерно до 1600°C, нитрид кремния — до 1200°C и карбид кремния — до 1500°C

14.6. КРИТЕРИЙ ОТБОРА МАТЕРИАЛА

Отношения прочность к плотности и модуль упругости к плотности применяются в качестве основных характеристик для материалов при оптимизации этих отношений, чтобы получить наилучшие свойства материалов при наименьшей массе. Они, однако, могут не отражать наилучших свойств во всех случаях нагрузки. В **Табл. 14.7** приведены оптимальные критерии для максимизации отношений прочность к массе и жесткость к массе для ряда различных нагрузок, при этом принято во внимание, что разрушение обусловлено и чрезмерным изгибанием.

Табл. 14.7. Индикация эксплуатационных качеств

Компонент	Максимизация жесткости	Максимизация прочности
Соединительная тяга, т.е. прочная связь	E/ρ	σ_y/ρ
Балка	$E^{1/2}/\rho$	$\sigma_y^{2/3}/\rho$
Колонна, т.е. сжимающая связь	$E^{1/2}/\rho$	σ_y/ρ
Плита, внешняя нагрузка или изгибание под собственным весом	$E^{1/3}/\rho$	σ_y/ρ
Цилиндр с внутренним давлением	E/ρ	σ_y/ρ
Сферическая оболочка с внутренним давлением	$E/[(1-\nu)\rho]$	σ_y/ρ

Примечание:

E — модуль упругости, ρ — плотность, σ_y — предел текучести (иногда применяется предел прочности на растяжение), ν — коэффициент Пуассона.

Глава пятнадцатая

Сопротивление коррозии и износу

15.1. СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРРОЗИИ

Для металлов, подверженных воздействию атмосферной коррозии, наиболее существенным фактором при наличии коррозионного разъедания является присутствие водяного электролита. Это может быть только тогда, когда происходит конденсация влаги как результат действия климатических условий. Количество загрязнений в атмосфере также может влиять на скорость коррозии. Коррозию можно зачастую сильно ослабить подбором подходящих материалов. Для металлов, погруженных в воду, коррозия зависит от веществ, которые растворены или взвешены в воде.

Углеродистые и низколегированные стали не обладают особым сопротивлением коррозии, свидетельством чего является ржавчина. В промышленной атмосфере, в пресной и морской воде не содержащие добавок углеродистые и низколегированные стали имеют низкое сопротивление коррозии. Покраска, нанесенная в виде защитного покрытия на поверхность, может уменьшить такую коррозию. Добавка хрома в сталь может заметно улучшить ее сопротивление коррозии. Стали с содержанием 4...6% хрома имеют высокое сопротивление коррозии в промышленной атмосфере, в пресной и морской воде, тогда как легированные стали имеют весьма высокое сопротивление в промышленной атмосфере и пресной воде, но могут подвергаться некоторой коррозии в морской воде. Серый литейный чугун обладает высоким сопротивлением коррозии в промышленной атмосфере, но не слишком высоким в пресной или морской воде, однако все же лучше, чем не содержащие добавок углеродистые стали.

На поверхности алюминия, когда он находится на воздухе, образуется окисный слой, который защищает нижний слой металла от дальнейшего воздействия окисления. Ковкие сплавы часто покрывают тонкими слоями чистого алюминия или алюминиевого сплава, усиливающего их сопротивление коррозии. Таким образом, на воздухе алюминий и его сплавы имеют высокое сопротивление коррозии. Если же их погрузить в пресную или морскую воду, то большинство алюминиевых сплавов также

оказывают высокое сопротивление коррозии, хотя среди них есть исключения, но на такие сплавы можно нанести защитное покрытие, чтобы улучшить сопротивление коррозии.

Медь на воздухе образует поверхностный слой зеленого цвета, который защищает ее от дальнейшего воздействия кислорода и вследствие этого получается высокое сопротивление коррозии. Медь в пресной и морской воде также имеет высокое сопротивление коррозии, поэтому широко распространено применение медных трубопроводов для водяных распределительных систем и систем центрального отопления. Медные сплавы также обладают высоким сопротивлением коррозии в промышленной атмосфере, в пресной и морской воде, хотя у некоторых из них может наблюдаться потеря легирующего металла, например у латуни с содержанием цинка более 15%.

Никель и его сплавы имеют весьма высокое сопротивление коррозии в промышленной атмосфере, пресной и морской воде.

У титана и его сплавов наивысшее сопротивление коррозии (возможно, наилучшее, чем у всех известных металлов) в промышленной атмосфере, в пресной и морской воде, и благодаря этому они широко применяются там, где коррозия становится проблемой.

Пластики в основном отличаются очень высоким сопротивлением коррозии. Вот почему возрастает использование пластиковых труб, например для пропускания по ним воды и химикатов. Полимеры могут ухудшать свои свойства в результате облучения ультрафиолетовой (УФ) радиацией, например под лучами солнца или при УФ-нагреве, а также под воздействием механических напряжений. Для ослабления этих эффектов в состав пластика вводятся особые добавки.

Большинство керамических материалов показывают весьма высокое сопротивление коррозии. Стекла обладают чрезвычайной стабильностью и сопротивлением к воздействию коррозии, поэтому широко распространено применение стеклянных емкостей. Эмали, изготовленные из кремнезема и боросиликатного стекла, широко употребляются как покрытия для защиты сталей и литейных чугунов от воздействия коррозии.

В **Табл. 15.1** приведена градация сопротивления коррозии материалов в условиях различных окружающих сред.

Табл. 15.1. *Сопротивление коррозии материалов в условиях различных окружающих сред*

Сопротивление коррозии	Материал
Газированная вода	
Высокое	Все керамики
	Стекла
	Свинцовые сплавы
	Сплавы сталей

Табл. 15.1 (продолжение)

Сопrotивление коррозии	Материал
Высокое	Никелевые сплавы
	Медные сплавы
	PTFE, полипропилен, нейлон, эпоксидная смола, полистирол, PVC
Среднее ч	Алюминиевые сплавы
	Полиэтилен, полиэфирь
Низкое	Углеродистые стали
Морская вода	
Высокое	Все керамики
	Свинцовые сплавы
	Нержавеющие стали
	Титановые сплавы
	Никелевые сплавы
	Медные сплавы
	PTFE, полипропилен, нейлон, эпоксидные смолы, полистирол, PVC, полиэтилен
Среднее	Алюминиевые сплавы
	Полиэфирь
Низкое	Низколегированные стали
	Углеродистые стали
Ультрафиолетовая радиация	
Высокое	Все керамики
	Стекла
	Все сплавы
Среднее	Эпоксидные смолы, полиэфирь, полипропилен, полистирол, HD полиэтилен, полимеры с УФ-ингибитором
Низкое	Нейлон, PVC, многие эластомеры
Сильные кислоты	
Высокое	Стекла
	Глинозем, карбиды кремния, кремнезем PTFE, PVC, полиэтилен, эпоксидные смолы, эластомеры
	Свинцовые сплавы
	Титановые сплавы
	Никелевые сплавы
	Нержавеющие стали
Среднее	Магниевые сплавы
	Алюминиевые сплавы
Низкое	Углеродистые стали
	Полистирол, полиуретан, нейлон, полиэфирь
Сильные щелочи	
Высокое	Глинозем
	Никелевые сплавы
	Стали
Титановые сплавы	
Высокое	Нейлон, полиэтилен, полистирол, PTFE, PVC, полипропилен, эпоксидные смолы

Табл. 15.1 (окончание)

Сопротивление коррозии	Материал
Среднее	Карбид кремния
	Медные сплавы
	Цинковые сплавы
	Эластомеры, полиэферы
Низкое	Стекла
	Алюминиевые сплавы
Органические растворители	
Высокое	Все керамики
	Стекла
	Все сплавы
	PTFE, полипропилен
Среднее	Полиэтилен, нейлон, эпоксидные смолы
Низкое	Полистирол, PVC, полиэферы, АВС, многие эластомеры

15.2. КОРРОЗИЯ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В Табл. 15.2 приведены гальванические серии металлов, находящихся в морской воде. Серии будут другими, если внешней средой будет пресная вода или промышленная атмосфера, хотя некоторая грубая корреляция порядка их следования сохранится, но потенциалы, вероятно, будут другими. Перечень металлов по порядку коррозионной стойкости, указывающей свободные потенциалы коррозии, дает возможность предсказать сопротивление коррозии для комбинации необходимых металлов. Чем дальше друг от друга разделены в этой серии некоторые два металла, тем сильнее коррозия, больше активность ее, если переход между парой этих металлов погружен в морскую воду. Металл с более отрицательным потенциалом действует как анод в электрохимической ячейке, а с менее отрицательным или положительным — как катод.

В Табл. 15.3 приведены данные о степени стойкости сплавов к точечной коррозии, коррозии под напряжением и коррозии удаления (потере) металла. В результате точечной коррозии появляются маленькие дырки на поверхности металла. Коррозия под напряжением наблюдается в определенных внешних средах, когда сплав подвергается механическому напряжению. Удаление (потеря) металла — это гальваническая коррозия между составными элементами сплава, в результате чего изменяется состав сплава, а из-за этого уменьшается и его прочность.

Табл. 15.2. Гальванические серии металлов и сплавов

Металл	Свободный потенциал коррозии [В]
Магний	-1.60...-1.63
Цинк	- 0.9...-1.2
Алюминиевые сплавы	- 0.75...-1.0
Мягкие стали	- 0.6...- 0.7
Низколегированные стали	- 0.58...- 0.62
Алюминиевая бронза	- 0.3...- 0.4
Желтая/красная латунь	- 0.3...- 0.4
Олово	- 0.3...- 0.34
Медь	- 0.3...- 0.37
Свинец/олово припой (50/50)	- 0.3...- 0.35
Алюминиевая латунь	- 0.27...- 0.34
Марганцевая бронза	- 0.27...- 0.32
Кремнистая бронза	- 0.25...- 0.29
Оловянная бронза	- 0.24...- 0.31
Нержавеющие стали (410, 416)	- 0.25...- 0.35
Нейзильбер	- 0.22...- 0.27
Медно-никелевый сплав (80/20)	- 0.2...- 0.3
Нержавеющая сталь (430)	- 0.2...- 0.25
Свинец	- 0.2...- 0.22
Медно-никелевый сплав (70/30)	- 0.18...- 0.22
Сплавы никель—хром	- 0.13...- 0.17
Сплавы серебро—латунь	- 0.1...- 0.2
Никель	- 0.1...- 0.2
Серебро	- 0.1...- 0.15
Нержавеющая сталь (302, 304, 321, 347)	- 0.05...- 0.1
Сплавы никель—медь	- 0.02...- 0.12
Нержавеющая сталь (317)	0...- 0.1
Титан	+ 0.05...- 0.05
Платина	+ 0.25...+ 0.20
Графит	+ 0.3...+ 0.2

Табл. 15.3. Коррозионностойкость сплавов

Сплавы	Точечная	Коррозия под напряжением	Удаление (потеря) металла
Магниеые	S	S	No
Алюминиевые	S	S	No
Стали	S	S	S
Никелевые	SA	S	No
Нержавеющие стали	SA	S	No
Медные	No	S	S
Титановые	SA	SA	No

Примечание:

S — некоррозионностойкий, SA — некоррозионностойкий только в агрессивных или особых условиях, No — в основном коррозионностойкий.

15.3. ПОДБОР МАТЕРИАЛОВ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ИЗНОСУ (ИЗНОСОСТОЙКОСТИ)

Износ — это прогрессирующая потеря материала с поверхности в результате контакта с другой поверхностью. Он имеет место вследствие скольжения или прокатки контактирующих поверхностей, при передвижении жидкостей и контактирующих частиц по поверхности. То есть износ является эффектом поверхности, обработка ее и покрытия на ней играют важную роль в улучшении сопротивления износу. В качестве средства защиты поверхности и, следовательно, уменьшения износа можно рассматривать смазку.

Мягкие стали обладают низкой износостойкостью. Однако увеличение содержания углерода увеличивает ее. У поверхности закаленных углеродистых или низколегированных сталей улучшается износостойкость в результате обработок поверхности, таких, как науглероживание или цианирование. Одинаково высокую износостойкость дает азотирование средненауглероженных хромистых или хромоалюминиевых сталей или поверхностное упрочнение высокоуглеродистых, высокохромистых сталей. Серый литейный чугун имеет достаточную износостойкость для многих сфер приложения, наилучшую — дают белые чугуны. Среди нежелезных сплавов наивысшую износостойкость показывают бериллиевые меди и сплавы на основе кобальта, такие, как стеллит.

Металлические материалы, применяемые для рабочих поверхностей подшипников, требуют высоких твердости и сопротивления износу при низком коэффициенте сцепления. Одновременно они должны быть достаточно крепкими. В основном это требование встречается в случае применения мягких или твердых сплавов, в которые вкраплены твердые частицы. Мягкий сплав, обладающий текучестью, приспособляется к некоторому локальному высокому давлению, появляющемуся из-за незначительных смещений от оси при запуске подшипника в ход, в то время как твердые частицы обеспечивают сопротивление износу. К таким материалам относятся белые подшипниковые металлы и подшипниковые металлы на основе меди и алюминия. Основными материалами белых подшипниковых металлов служат олово и свинец. Материалы с оловом в основе известны как баббитовые металлы. Это сплавы олово—сурьма—медь, возможно, с некоторым количеством свинца. Наличие твердых частиц обеспечивают соединения сурьма—олово и медь—олово. Материалы на основе свинца — это сплавы свинец—сурьма—олово с соединениями сурьма—олово, обеспечивающими твердые частицы. Главные подшипниковые металлы на основе меди содержат фосфорные бронзы с 10...15% олова и сплавы медь—олово. Главными алюминиевыми подшипниковыми материалами являются сплавы алюминий—олово.

Самосмазывающиеся пластики, например нейлон 6.6 со смазывающей добавкой 18% PTFE—2% кремния, оказывают очень хорошее сопротивление износу и широко применяются для сфер, где требуется низкий износ, например, таких, как подшипники и зубчатые передачи.

В Табл. 15.4 приведены свойства, главные и необходимые при подборе материалов подшипников обычного применения.

Табл. 15.4. Свойства подшипниковых материалов

Материал	Твердость по Бринеллю НВ	Предел текучести [МПа]	Прочность [МПа]	Модуль упругости [ГПа]
Баббит: олово в основе	17...25	30...65	70...120	51...53
Баббит: свинец в основе	15...20	20...60	40...110	29
Сплавы медь—свинец	20...40	40...60	50...90	75
Фосфорная бронза	70...150	130...230	280...420	80...95
Свинцово-оловянистая бронза	50...80	80...150	160...300	95
Сплавы алюминий—олово	70...75	50...90	140...210	73
Полимеры	5...20	—	20...80	1...10

Материал	Плотность [Мг/м ³]	Предел усталости [МПа]	Удельная теплопроводность [Вт/(м·К)]
Баббит: олово в основе	7.3...7.7	25...35	50
Баббит: свинец в основе	9.6...10	22...30	24
Сплавы медь—олово	9.3...9.5	40...50	42
Фосфорная бронза	8.8	90...120	42
Свинцово-оловянистая бронза	8.8	80	42
Сплавы алюминий—олово	2.9	130...170	160
Полимеры	1.0...1.3	5...40	0.1

Материал	Относительное сопротивление коррозии	Относительное сопротивление износу	Относительная стоимость
Баббит: олово в основе	5	2	7
Баббит: свинец в основе	4	3	1
Сплавы медь—свинец	3	5	1.5
Фосфорная бронза	2	5	2
Свинцово-оловянистая бронза	2	3	2
Сплавы алюминий—олово	3	2	1.5
Полимеры	5	5	0.3

Примечание:

Для относительной коррозии и относительного износа чем выше оценка, тем меньше коррозия и меньше износ. Для относительной стоимости чем выше оценка, тем больше стоимость материала.

Глава шестнадцатая

Тепловые свойства

16.1. ТЕРМИНЫ

Теплоемкость — это энергия, требующаяся для увеличения температуры данного материального тела на один градус. Удельная теплоемкость c — это энергия, требующаяся для увеличения температуры 1 кг материала на 1 градус. Таким образом, если Q есть энергия, увеличивающая температуру тела массой m на T К, то

$$c = \frac{Q}{mT} \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Температурный коэффициент линейного расширения a твердого тела — это изменение единицы длины тела при изменении его температуры на 1 градус. Если длина тела изменяется от L_0 до L_t , когда температура изменяется на T градусов, то

$$a = \frac{L_t - L_0}{L_0 T} \text{ К}^{-1}.$$

Полимеры имеют большие значения коэффициента линейного теплового расширения, приблизительно в 10 раз большие, чем металлы, и почти в 100 раз большие, чем керамики.

Коэффициент теплопроводности λ материала характеризует скорость, с которой тепло переносится через материал. Если Q есть тепло, передаваемое за 1 с через плоскую площадку A материала, и $\Delta T/\Delta x$ есть градиент температуры в материале (Рис. 16.1), то

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}.$$

Коэффициент теплопроводности имеет единицу размерности $[\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}]$.

В случае сложных тел, например пустотелой стены или водяного бака, состоящего из простого металлического листа, но с пограничными слоями неподвижного воздуха и неподвижной воды, часто применяется такой термин, как «общий коэффициент переноса тепла» U , или U -значение.

$$\frac{Q}{A} = U \Delta T.$$

Таким образом, для простого слоя материала мы имеем $U = \frac{\lambda}{\Delta x}$.

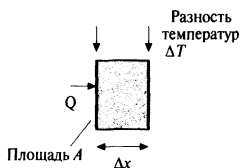


Рис. 16.1. Теплопроводность

16.2. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА

В Табл. 16.1 приведены значения удельной теплоемкости, коэффициента линейного расширения α и коэффициента теплопроводности λ для ряда обычно применяемых конструкционных материалов при 20°C. См. также Табл. 9.14 для большинства полимеров, Табл. 10.5 и 10.6 для керамик.

Табл. 16.1. Тепловые свойства материалов

Материал	α [$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$]	c [$\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	λ [$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Металлы			
Алюминий	24	0.90	220...230
сплавы	20...24	0.84	120...200
Медь	17	0.39	370
сплавы	16...20	0.39	30...160
Железо	12	0.44	81
углеродистая сталь	10...15	0.48	47
линейные чугуны	10...11	0.27...0.46	44...53
легированные стали	12	0.51	13...48
нержавеющая сталь	11...16	0.51	16...26
Магний	25	1.02	156
сплавы	25...27	—	80...140
Никель	13	0.44	92
сплавы	10...19	0.48...0.50	11...30
Олово	23	0.23	67
сплавы	22...24	—	53...67
Титан	8	0.52	22
сплавы	8...9	0.54	5...12
Цинк	40	0.39	116
сплавы	25...35	—	107...116
Полимеры			
Термопласты	40...300	0.8...2.0	0.1...0.4
ABS	80...100	1.5	0.13...0.20
нейлон	6.80...100	1.6	0.17...0.21
полиэтилен	110...200	1.9...2.3	0.25...0.35

Табл. 16.1 (окончание)

Материал	α [$10^6 \cdot \text{K}^{-1}$]	c [$\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	λ [$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
полипропилен	100...120	1.9	0.16
полистирол	60...80	1.2	0.12...0.13
PVC	50...250	1.1...1.7	0.12...0.15
Реактопласты	10...60	1.0...2.0	0.1...0.4
эпоксидная смола	60	1.1	0.17
фенол-формальдегид	30...40	1.6...1.8	0.13...0.25
Эластомеры	50...250	1.3...1.8	0.1...0.3
натуральный каучук	22	1.9	0.18
неопрен	24	1.7	0.21
Пористые полимеры	—	—	0.02...0.04
Керамики			
Глинозем	8...9	0.7	20...40
Связанные карбиды	4...6	0.2...1.0	40...120
Стекла	3...9	0.5...0.7	0.5...2
Композиты			
Технические	7...20	—	0.3...2
Бетон	7...14	3.3	0.1...2
Древесина	—	1.7	0.1...0.2
поперек структуры	35...60	—	—
вдоль структуры	3...6	—	—
Стекловолоконное с защитным слоем	—	0.03...0.07	—

В Табл. 16.2 приведены некоторые U -значения для типичных строительных структур стенок при нормальных условиях, т.е. без особых укрытий или защиты стенок от сильных потоков воздуха.

Табл. 16.2. U -значения типичных строительных структур стенок

Структура	Толщина [мм]	U -значение [$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
Цельный кирпич, неоштукатуренный	105	3.3
	220	2.3
Цельный кирпич с 16 мм штукатурки на внутренней стороне	105	2.5...3.0
	220	1.9...2.1
Полая стенка, 105 мм кирпич с 16 мм штукатурки на внутренней стороне	260	1.3...1.5
Полая стенка, 105 мм кирпич с внешней стороны, 100 мм легковесного бетона внутри и 16 мм штукатурки на внутренней стороне	260	0.96
Литой бетон	150	3.5
	200	3.1
Черепичная крыша с чердаком и оштукатуренной 10 мм панелью перекрытия	—	1.5
Как и выше, но с 50 мм стекловолоконной изоляции между стропилами	—	0.5

Глава семнадцатая

Выбор материалов

17.1. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫБОРУ МАТЕРИАЛА

До принятия решения о выборе материала следует сформулировать требования к спецификации материала, а исходя из этого сделать вывод, какой должен быть оптимальный материал для поставленной задачи. Их можно объединить в четыре группы:

1. Какие требуются свойства материала?
2. Какие требования к переработке материала и их значение для изменения его свойств?
3. Какие подходят материалы?
4. Какова стоимость материала?

Далее указываются вопросы, на которые необходимо ответить, чтобы решить поставленные выше проблемы выбора оптимального материала.

Свойства материалов

1. Какие требуются механические свойства? Это рассмотрение таких свойств, как прочность, жесткость, твердость, тягучесть, упругость, сопротивление усталости, свойства износа и т.д. А также связанных с ними вопросов: требуются ли эти свойства при низких температурах, околокомнатной температуре или при высоких температурах?

2. Какие требуются электрические свойства? Например, нужно ли, чтобы материал обладал хорошей электрической проводимостью или он может быть изолятором?

3. Какие требуются магнитные свойства? Должен материал иметь мягкие или жесткие магнитные свойства или может быть существенно немагнитным?

4. Какие требуются тепловые свойства? Это рассмотрение таких свойств, как удельная теплоемкость, коэффициент линейного расширения и удельная теплопроводность.

5. Какие требуются химические свойства? Это рассмотрение среды, в которой будет находиться материал, и возможная его коррозия.

6. Какие предъявляются требования к размерам? Например, нуждается ли материал в хорошей чистой конечной поверхности, должен ли иметь стабильность размеров, быть гладким, каким должен быть размер частиц и т.д.

Параметры переработки

1. Имеются ли какие-нибудь специальные требования переработки, которые ограничивают изменение материала? Например, сделать ли материал литейным или он может быть штампованным?

2. Имеются ли какие-нибудь требования к обработке материала? Например, должен быть материал отожжен или может быть обработан на твердый раствор?

3. Имеются ли какие-нибудь специальные требования к инструменту? Например, требует ли твердость материала специальных режущих инструментов?

Ассортимент

1. Есть ли материал в распоряжении?

2. Могут ли возникнуть какие-нибудь проблемы после выбора этого материала?

3. Какой формы материал обычно поставляется? Например, материал обычно поставляется в прутках или может быть лист? От этого зависит и возможная эффективная переработка, которая может применяться.

Стоимость материала

1. Какова стоимость необработанного материала?

2. Какова стоимость предполагаемых требований переработки?

3. Сколько будет стоить переработанный материал?

17.2. КРИТЕРИЙ ОТБОРА МАТЕРИАЛА

Приняв во внимание материалы, подходящие к некоторой спецификации, нужно рассмотреть их относительно того, насколько хорошо они удовлетворяют этой спецификации. Из целого ряда материалов, которые имеются в наличии и подходят к поставленной задаче, нужно отобрать пригодные и в таком случае ответить на спорный вопрос, какой материал дает оптимальные свойства при выполнении требований спецификации. Для этого можно применить численные методы по определению оптимального материала.

Идентификация критических свойств

Критические свойства — это такие свойства, при которых материал уже не может быть годным. Так, здесь могло быть, например, требование, чтобы прочность была около некоторого конкретного предела напряжения или чтобы электрическое сопротивление было ниже некоторого конкретного граничного значения. Принимая во внимание, что некоторые такие критические пределы соответствуют поставленным значениям, материалы можно признать подходящими для рассмотрения.

Одним из путей дальнейшего решения проблемы является применение диаграмм материалов — свойства. Так, в данном случае это может быть форма диаграммы, показанная на **Рис. 17.1а**, где материалы указаны напротив двух значений свойств: модуля упругости и плотности. Для выбора материалов, которые имеют модуль упругости, скажем, 10 ГПа, проведем линию А при этом значении через диаграмму и все материалы выше этой линии сформируем в подкомплект, из которого может быть выбран нужный материал. Если необходимо требование, чтобы плотность была, по крайней мере, меньше 2 Мг/м^3 , то проводится линия Б на диаграмме при этом значении и все материалы слева от этой линии сформируются в подкомплект по этому критерию. Подкомплект материалов с обоими критериями находится, таким образом, в верхнем левом углу диаграммы.

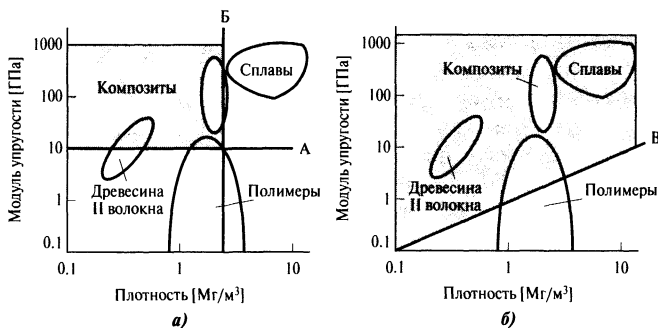


Рис. 17.1. Диаграммы свойств:

а — по критерию плотности, *б* — по критерию жесткости

Подобную диаграмму можно применять, если требуется материал в форме балки с максимизированной жесткостью (см. **Табл. 14.7**). Эти требования определяют материалы со значениями E/r больше некоторого критического значения. Предположим, например, требуются подкомплекты материалов, для которых E/r больше 1000. Это будет линия В на диаграмме с посто-

янным наклоном 1000. На **Рис. 17.16** показаны такая линия и таким образом полученный подкомплект.

Ряд таких диаграмм можно найти в кн.: *Materials Selection in Mechanical Design* (Pergamon Press, 1992) by M.F. Ashby.

Оценка достоинства

При попытке определить оптимальный материал может возникнуть проблема, если хотя и имеется ряд требуемых свойств и ряд материалов стыкуются по различным свойствам, но они находятся в разных областях. Тогда выход состоит в определении материала, который обладает наилучшим балансом свойств. Метод оценки достоинства в целом требует для каждого материала определить относительное значение достоинства каждого из его свойств. Оценки устанавливаются по сравнению с некоторым наилучшим материалом, которому присваивают максимальное значение достоинства, скажем, от 10 до 100. Все другие материалы имеют тогда относительные оценки. Например, для электрической проводимости чистой меди (проводимость $59 \cdot 10^{-10}$ См/м) может быть дана оценка 100, и тогда проводимости других материалов оцениваются соответственно как процент по отношению к проводимости этой меди. На этой шкале алюминий (проводимость $38 \cdot 10^{-10}$ См/м) может иметь оценку $(38/59) \cdot 100 = 64$. Когда оценки достоинств были назначены для каждого материала и каждого свойства, то пришли к полной оценке материала по выбранным суммарным взвешенным оценкам достоинств для каждого свойства. Например, при отборе материалов для нитей электрических ламп накаливания для освещения по их точкам плавления, электрической проводимости, прочности и пластичности мы можем считать такое свойство, как точка плавления, более важным, чем проводимость, которая в свою очередь важнее, чем прочность, а та более важна, чем пластичность. В результате мы имеем взвешенные факторы, такие, как плавление $\times 4$, проводимость $\times 3$, прочность $\times 2$ и пластичность $\times 1$.

Стоимость материала на единицу свойства

Поскольку низкая стоимость часто важна, один из путей сравнения свойств подкомплекта материалов основан на стоимости единицы свойства или группы свойств. В **Табл. 17.1** приведены некоторые относительные величины стоимости материалов.

17.3. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СТОИМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Стоимость материалов изменяется со временем, и нет необходимости в спецификации ее относительно какой-либо частной денежной единицы. Относительная стоимость применяется с

целью провести отбор материалов, когда требуется только определить оптимальный материал. Относительную стоимость указывают для массы материала; ее определяют по отношению к мягкой стали, часто мягкого стального стержня. Таким образом:

$$\text{относительная стоимость} = \frac{\text{стоимость 1 кг материала}}{\text{стоимость 1 кг мягкой стали}}$$

В Табл. 17.1 приведены некоторые типичные значения. Относительная стоимость 1 кг может быть переведена в относительную стоимость за 1 м³ при умножении его на плотность.

Табл. 17.1. Относительная стоимость различных материалов

Материал	Относительная стоимость за 1 кг
Металлы	
Мягкий стальной прут (черный)	1.0
Мягкий стальной прут (блестящий)	1.3
Мягкий стальной лист	1.4
Среднеуглеродистая сталь	1.6
Прут высокоуглеродистой стали	2.3
Отливка литейного чугуна	2.4
Прут марганцевой стали	2.5
Латунный лист	5.1
Медный лист	8.3
Лист нержавеющей стали	8.5
Алюминиевый прут	8.5
Прут никель-хромистой стали	4.6
Латунный прут	6.6
Алюминиевый лист	7.1
Алюминиевая отливка	9.6
Прут нержавеющей стали	9.6
Прут фосфорной бронзы	16.0
Прут сплава монель	20.6
Полимеры	
Полиэтилен	3
Полипропилен	3
Полистирол	3
PVC	6
ABS	12
Фенольные смолы	12
Акрилики	12
Ацетат целлюлозы	15
Ацетали	15
Поликарбонат	36
Нейлоны	45
Полиуретан	60
PTFE	90
Фтористые кремнии	240

17.4. СТОИМОСТЬ ЭНЕРГИИ

В Табл. 17.2 приведены оценки энергии, необходимой для производства 1 кг конечного материала из сырого продукта. Эти оценки включают необходимую энергию для разработки, очистки и придания формы материалам.

Табл. 17.2. Оценки затрат энергии

Материал	Энергия [МДж/кг]
Металлы	
Алюминий и сплавы	230...300
Медь и сплавы	50...120
Магний и сплавы	360...420
Железо	20
углеродистые стали	50...60
нержавеющие стали	100...120
литейные чугуны	50...250
Титан и сплавы	500...550
Полимеры	
Нейлоны	170...180
Полиэтилен	
низкой плотности	80...100
высокой плотности	100...120
Полипропилен	110...115
Полистирол	100...140
PVC	70...90
Синтетические эластомеры	120...140
Керамики	
Стекла	10...25
Цемент	4...8
Бетон	3...6
Композиты	
Волокнистые стеклянные полимеры	90...120
Древесина	2...4
Армированный бетон	8...20

Глава восемнадцатая

Алфавитный указатель материалов

18.1. ЭЛЕМЕНТЫ

В Табл. 18.1 приведены символы, атомные веса (массовое число), атомные номера и плотности элементов при 20°C.

Табл. 18.1. Элементы

Элемент	Символ	Атомный вес (массовое число)	Атомный номер	Плотность [10 ³ ·кг·м ⁻³]
Азот	N	14.007	7	1.25(g)
Актиний	Ac	227	89	10.1
Алюминий	Al	26.98	13	2.7
Америций	Am	243	95	13.7
Аргон	Ar	39.95	18	1.8(g)
Астат	At	210	85	—
Барий	Ba	137.34	56	3.5
Бериллий	Be	9.01	4	1.8
Берклий	Bk	247	97	—
Бор	B	10.81	5	2.5
Бром	Br	79.904	35	3.1
Ванадий	V	50.94	23	6.1
Висмут	Bi	208.98	83	9.8
Водород	H	1.008	1	0.09(g)
Вольфрам	W	183.85	74	19.3
Гадолиний	Gd	157.25	64	7.9
Галлий	Ga	69.72	31	5.9
Гафний	Hf	178.49	72	13.3
Геллий	He	4.00	2	0.18(g)
Германий	Ge	72.59	32	5.3
Гольмий	Ho	164.93	67	8.8
Диспрозий	Dy	162.50	66	8.5
Европий	Eu	152	63	5.3

Табл. 18.1 (продолжение)

Элемент	Символ	Атомный вес (массовое число)	Атомный номер	Плотность [10 ³ кг·м ⁻³]
Железо	Fe	55.85	26	7.9
Золото	Au	196.97	79	19.3
Индий	In	114.82	49	7.4
Иридий	Ir	192.2	77	22.4
Иттербий	Yb	173.04	70	7.0
Иттрий	Y	88.91	39	4.5
Йод	I	126.90	53	4.9
Кадмий	Cd	112.40	48	8.7
Калий	K	39.10	19	0.86
Калифорний	Cf	251	98	—
Кальций	Ca	40.08	20	1.5
Кислород	O	16.0	8	1.43(g)
Кобальт	Co	58.9	27	8.9
Кремний	Si	28.09	14	2.3
Криптон	Kr	83.8	36	3.7(g)
Ксенон	Xe	131.329	54	5.9(g)
Кюрий	Cm	247	96	13.5
Лантан	La	138.91	57	6.2
Литий	Li	6.94	3	0.53
Лютеций	Lu	174.97	71	9.8
Магний	Mg	24.31	12	1.7
Марганец	Mn	54.94	25	7.4
Медь	Cu	63.55	29	8.9
Менделевий	Md	258	101	—
Молибден	Mo	95.94	42	10.2
Мышьяк	As	74.92	33	5.7
Натрий	Na	22.99	11	0.97
Неодим	Nd	144.24	60	7.0
Неон	Ne	20.18	10	0.90(g)
Нептуний	Np	237	93	20.45
Никель	Ni	58.69	28	8.9
Ниобий	Nb	92.91	41	8.6
Олово	Sn	118.71	50	7.3
Осмий	Os	190.2	76	22.5
Палладий	Pd	106.4	46	12.0
Платина	Pt	195.08	78	21.45
Плутоний	Pu	244	94	19.8
Полоний	Po	210	84	9.4
Празеодим	Pr	140.91	59	6.8
Прометий	Pm	147	61	—
Протактиний	Pa	231	91	15.4

Табл. 18.1 (окончание)

Элемент	Символ	Атомный вес (массовое число)	Атомный номер	Плотность [10 ³ кг·м ⁻³]
Радий	Ra	226	88	5.5
Радон	Rn	222	86	9.9(g)
Рений	Re	186.2	75	21.0
Родий	Rh	102.91	45	12.42
Ртуть	Hg	200.59	80	13.5
Рубидий	Rb	85.47	37	1.5
Рутений	Ru	101.1	44	12.37
Самарий	Sm	150.36	62	7.5
Свинец	Pb	207.19	82	11.3
Селен	Se	78.96	34	4.8
Сера	S	32.07	16	2.1(желтая)
Серебро	Ag	107.87	47	10.5
Скандий	Sc	44.96	21	3.02
Стронций	Sr	87.62	38	2.6
Сурьма	Sb	121.75	51	6.7
Таллий	Tl	204.37	81	11.85
Тантал	Ta	180.95	73	16.6
Теллур	Te	127.60	52	6.2
Тербий	Tb	158.92	65	8.3
Технеций	Tc	98	43	11.5
Титан	Ti	47.88	22	4.5
Торий	Th	232.04	90	11.7
Туллий	Tm	168.93	69	9.3
Углерод	C	12.01	6	2.2(графит)
Уран	U	238.03	92	19.1
Фермий	Fm	257	100	—
Фосфор	P	30.97	15	1.8
Франций	Fr	223	87	2.5
Фтор	F	19.0	9	1.7(g)
Хлор	Cl	35.45	17	3.2(g)
Хром	Cr	52.00	24	7.2
Цезий	Cs	132.91	55	1.9
Церий	Ce	140.12	58	6.8
Цинк	Zn	65.39	30	7.1
Цирконий	Zr	91.22	40	6.5
Эйнштейний	Es	254	99	—
Эрбий	Er	167.26	68	9.1

Примечание:

Плотности указаны при 20°C и для твердого состояния элементов, если нет маркировки (g) для газов.

18.2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛЫ

Далее в алфавитном порядке перечислены металлы, каждый из которых записан соответственно своему главному легирующему элементу, и их основные характеристики. Этот перечень охватывает не все металлические элементы, а только те, которые обычно встречаются в технике.

Алюминий. Применяется в чистой форме и в виде сплава с медью, марганцем, кремнием, магнием, оловом и цинком. Сплавы делятся на литейные и ковкие. Некоторые сплавы могут подвергаться тепловой обработке. Алюминий и его сплавы имеют низкую плотность, высокую электрическую и тепловую проводимости и высокое сопротивление коррозии. Его предел прочности на растяжение изменяется от 150 до 400 МПа, а модуль растяжения составляет около 70 ГПа. Материал обладает высокой прочностью. (См. Гл. 4.)

Бериллий. Это очень дорогой металл, применяется только в специальных случаях, чаще всего — в виде легирующего элемента, в частности, с медью, никелем или сталью. Бериллий имеет высокий предел прочности на растяжение и высокий модуль растяжения, но он очень хрупкий.

Ванадий. Применяется, в основном, как легирующий элемент в сталях, например в высокоскоростных инструментальных сталях.

Вольфрам. Плотный металл, отличающийся самой высокой точкой плавления (3410°C) от всех металлов. Он применяется для ламп освещения и катодных нитей электронных трубок, электрических контактов, а также как легирующий элемент в сталях. В виде нитевидных монокристаллов он используется во многих композитах с металлическими нитевидными монокристаллами. (См. Гл. 11.)

Железо. Термин «железоуглеродистые сплавы» употребляется для сплавов железа с углеродом. Эти сплавы включают углеродистые стали (< 2.14% углерода), литейные чугуны (> 2.14% углерода), легированные и нержавеющие стали с добавками, специально вводимыми для повышения определенных физических свойств, в том числе и для повышения коррозионностойкости. (См. Гл. 3.)

Золото. Очень пластичный металл, легко обрабатывается в холодном виде. Имеет хорошую электрическую и тепловую проводимости.

Кобальт. Широко применяется в качестве сплава для магнитов с типичным составом: 5...35% кобальта, 14...30% никеля и 6...13% алюминия. Применяется также для сплавов, которые имеют высокую прочность и твердость при комнатной температуре и при высоких температурах. Они часто называются стеллитами. Служит в качестве легирующего элемента в сталях.

Магний. В технике употребляется магний, сплавленный, в основном, с алюминием, цинком и марганцем. Его сплавы имеют очень низкую плотность, и хотя у них предел прочности на растяжение только порядка 250 МПа, но по отношению к массе они имеют высокую прочность. У сплавов — низкий модуль растяжения, около 40 ГПа. Они хорошо обрабатываются на станках. (См. Гл. 6.)

Медь. Очень широко применяется в чистом виде (с малым, до 0.5%, содержанием примесей) и сплавленная в виде сплавов — латуней, бронз, медно-никелевых сплавов и нейзильберов. Медь и ее сплавы имеют хорошее сопротивление коррозии, высокую электрическую и тепловую проводимости, хорошую обрабатываемость на станках, могут соединяться пайкой мягким и твердым припоем и сваркой, в основном, обладают хорошими свойствами при низких температурах. Пределы прочности на растяжение сплавов — в интервале 180...300 МПа, а модули растяжения — 20...28 ГПа. (См. Гл. 5.)

Молибден. Имеет высокую плотность, высокие удельную электрическую проводимость и теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения. При высоких температурах он окисляется. Применяется для электродов и опорных деталей в электронных трубках, лампах освещения и в нагревательных элементах печей. Молибден, однако, более широко используется как легирующий элемент в сталях. В инструментальных сталях он повышает их твердость, в нержавеющих — сопротивление коррозии, а, в основном, в сталях он улучшает прочность, жесткость и сопротивление износу.

Никель. Основной материал для маркированных сплавов с великолепными сопротивлением коррозии и прочностью при высоких температурах. Его основные сплавы никель—медь и никель—хром—железо. Сплавы имеют предел прочности на растяжение 350...1400 МПа, модуль растяжения — около 220 ГПа. (См. Гл. 7.)

Ниобий. Очень высокая точка плавления, хорошее сопротивление окислению и низкий модуль упругости характеризуют его. Ниобиевые сплавы применяются для высокотемпературных деталей в турбинах и реактивных снарядах. Сам он используется в качестве легирующего элемента в сталях.

Олово. Это довольно мягкий металл, очень легко разрезается, с низким пределом прочности на растяжение. Оловянистое покрытие — тонколистовая сталь, покрытая оловом; олово имеет сравнительно хорошее сопротивление коррозии. Пайки — вот существенное применение олова, сплавленного со свинцом и некоторым количеством сурьмы. Олово, сплавленное с медью и сурьмой, дает материал, широко используемый для трущихся поверхностей. Сплавы медь—олово известны как бронзы.

Палладий. Обладает повышенным сопротивлением коррозии. При сплавлении с золотом, серебром или медью дает металлы, употребляемые главным образом для электрических контактов.

Платина. Имеет высокое сопротивление коррозии, очень тягучий и ковкий, но дорогой металл. Широко применяется в ювелирном деле. Сплавленный с такими элементами, как иридий и родий, он используется в инструментах для деталей, требующих высокого сопротивления коррозии.

Свинец. Широко применяется в свинцовых аккумуляторных батареях, другое употребление находит в виде свинцово-оловянистых сплавов как металлический припой и в сталях для улучшения их обрабатываемости на станках.

Серебро. Имеет высокую теплопроводность и высокую удельную электропроводимость, очень мягкий и тягучий металл.

Тантал. Обладает высокой точкой плавления, высокой кислотной стойкостью, очень тягучий металл. Сплавы тантал—вольфрам имеют высокую точку плавления, высокое сопротивление коррозии и высокий предел прочности на растяжение.

Титан. Как чистый материал или как сплав имеет высокую прочность, связанную с относительно низкой плотностью. Он сохраняет свои свойства в широком температурном диапазоне, в том числе и превосходное сопротивление коррозии. Типичный для него предел прочности на растяжение порядка 1100 Мпа, а модуль растяжения — около 110 ГПа. (См. Гл. 8.)

Хром. Используется главным образом в качестве легирующего элемента в нержавеющей сталях, теплостойких сплавах и высокой прочности легированных сталях. Применение хрома приводит также к повышению у этих сплавов сопротивления коррозии и окислению.

Цинк. Обладает хорошим сопротивлением коррозии и поэтому находит применение как покрытие для стали (получается так называемая гальваническая сталь). Он имеет низкую точку плавления, и поэтому цинковые сплавы используются для таких изделий, как игрушки, оси, дверные ручки и т.п., изготовленные литьем. Цинковые сплавы содержат, в основном, около 96% цинка, около 4% алюминия и небольшое количество других элементов или 95% цинка, около 4% алюминия, 1% меди и небольшое количество других элементов. Предел прочности на растяжение таких сплавов примерно 300 МПа, относительное удлинение 7...10% и твердость около 90 НВ.

Цирконий. Важное назначение этого металла — легирующий элемент с магнием и сталями.

18.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ

Далее в алфавитном порядке перечислены основные полимеры, применяемые в технике, вместе с краткими основными характеристиками. Для более детального ознакомления с ними см. Гл. 9.

Акрилики. Прозрачные термопластики, их торговые марки включают Перспекс и Плексиглас. Они имеют высокий предел прочности на растяжение и модуль растяжения, поэтому жесткие, обладают хорошим сопротивлением удару и химикатам, но с большим коэффициентом расширения.

Акрилонитрил-бутадиен-стирол (ABS). Термопластичный полимер, дающий ряд непрозрачных материалов с высоким сопротивлением ударам, тягучий, имеет средние значения прочностей на растяжение и сжатие, приемлемый модуль растяжения и поэтому является жестким, с хорошим сопротивлением химикатам.

Ацетали. Т.е. полиацетали, являются термопластичными со свойствами и сферами приложения, подобными тем же нейлонам. Высокий предел прочности на растяжение сохраняется у них длительное время в широком диапазоне условий окружающей среды. Они имеют высокий модуль растяжения и поэтому жесткие, высокое сопротивление удару и низкий коэффициент трения. Ультрафиолетовое излучение приводит к разрушению их поверхности.

Бутадиен-акрилонитрил. Эластомер, в основном, называется нитрил или буна-N каучук (NBR). Он имеет превосходное сопротивление горючему топливу и маслам.

Бутадиен-стирол. Эластомер, широко применяется как заменитель натурального каучука, так как дешев. Он имеет хорошее сопротивление износу и стойкость в различных погодных условиях, хороший предел прочности на растяжение, но плохую упругость, плохую усталостную прочность и низкое сопротивление горючему топливу и маслам.

Бутил. Т.е. сополимер изобутен-изопрен. Является эластомером. Максимально непроницаем для газов.

Кремнистые каучуки. Их часто называют кремнийфтористые каучуки, имеют хорошее сопротивление маслам, горючим топливам и растворителям при высоких и низких температурах, но плохое абразивное сопротивление.

Меламин-формальдегид. Это терморезистивная смола (реактопласт) широко применяется для пропитывания бумаги в форме декоративных панелей и как покрытие для отделки поверхностей столов и кухонной мебели. Применяется также с наполнителями для изготовления прессованием маховичков, дверных ручек и т.д. Обладает хорошим сопротивлением химикатам и стойкостью к воде, имеет хорошую окрашиваемость и хорошую механическую прочность.

Мочевина формальдегида. Термореактивный материал (реактопласт). Его применение подобно меламин-формальдегиду и, кроме того, используется как клеящее вещество. Обладает хорошей поверхностной твердостью.

Натуральный каучук. Эластомер. По характеристикам он уступает синтетическим каучукам: по стойкости к маслу и растворителю, по окислению, корродирует в атмосфере озона.

Нейлоны. Термин «нейлон» применяется для ряда термопластичных пластмасс, имеющих химическое название «полиамиды». Нумерация системы используется для отличия их форм; основные из обычных технических нейлонов: нейлон 6, нейлон 66 и нейлон 11. Нейлоны — полупрозрачные материалы с высоким пределом прочности на растяжение и средней жесткостью. Такие добавки, как стеклянные волокна, требуются для увеличения их прочности. Нейлоны имеют низкий коэффициент трения, который можно уменьшить далее подходящими добавками. По этой причине они широко употребляются для изготовления шестерен и роликов. Все нейлоны поглощают влагу.

Окись полипропилена. Эластомер с превосходной ударной прочностью и прочностью на разрыв, имеет хорошую упругость и хорошие механические свойства.

Полиамиды. См. Нейлоны.

Полиацетали. См. Ацетали.

Поливинилы. Это термопласты, они включают поливинилацетат (PVA), поливинилбутираль (PVB), поливинилхлорид (PVC), хлорированный поливинилхлорид и винил сополимеры. Поливинилацетат широко применяется в клеевых веществах и красках. Поливинилбутираль применяется главным образом как покрывающий материал или клеящее вещество. Поливинилхлорид имеет высокую прочность и жесткость, будучи стойким материалом. Он часто комбинируется с пластификаторами, дает пониженную прочность материалу, становится менее жестким. Хлорированный поливинилхлорид является твердым и жестким, с превосходным химическим и тепловым сопротивлением. Винил сополимеры могут изменять ряд свойств при изменении составов и их соотношений. Обычным сополимером является хлористый винил с винилацетатом в соотношении 85/15. Это жесткий материал. Более гибкая форма имеет отношение 95/5.

Поликарбонаты. Прозрачные термопласты с высокой ударной прочностью, высоким пределом прочности на растяжение, высокой стабильностью размеров и хорошей химической стойкостью.

Полипропилен. Термопластичная пластмасса с низкой плотностью, приемлемые предел прочности на растяжение и жесткость. Его свойства подобны свойствам полиэтилена. Для модификации его свойств используют добавки.

Полистирол. Прозрачный термопласт. Он имеет средний предел прочности на растяжение, приемлемую жесткость, но довольно хрупкий, а облучение солнечным светом приводит к пожелтению. Корродирует во многих растворителях. Можно увеличить степень его жесткости путем смешивания с каучуком: улучшаются ударные свойства.

Полисульфид. Эластомер с превосходным сопротивлением различным маслам и растворителям, а также с низкой проницаемостью для газов. Он может, однако, корродировать под воздействием микроорганизмов.

Полисульфон. Крепкий, сравнительно жесткий термопласт, который может применяться при относительно высокой температуре. Он имеет хорошую стабильность размеров и низкую ползучесть.

Политетрафторэтилен (PTFE). Это вязкий и гибкий термопласт, который может использоваться в очень широком температурном диапазоне. Так как другие материалы не вступают с ним в связи, он применяется в качестве покрытия на детали, когда требуются неприлипающие устройства.

Полихлоропрен. Эластомер, обычно его называют неопрен. Имеет хорошее сопротивление маслу и хорошую стойкость в различных погодных условиях.

Полиэтилен. Второе название «политен». Термопластичная пластмасса. Делится на два основных типа: низкой плотности (LDPE), с ветвистой полимерной структурой цепи, и высокой плотности (HDPE), с линейными цепями. Существуют материалы, составленные из смеси двух форм. LDPE имеет достаточно низкий предел прочности на растяжение и модуль растяжения, а HDPE он будет крепче и жестче. Обе формы обладают хорошей непроницаемостью газов и очень низкой скоростью поглощения влаги.

Полиэтилентерефталат (PET). Термопластичный полиэфир, с хорошей прочностью и жесткостью, прозрачный, с хорошей непроницаемостью для газов. Широко применяется при производстве бутылей для газированных напитков.

Полиэфир. Возможны две их формы: термопластичные и термореактивные. Термопластичные полиэфиры имеют хорошую стабильность размеров, превосходное электрическое сопротивление и вязкость. Они изменяют цвет, если были подвержены ультрафиолетовому излучению. Термореактивные полиэфиры применяются в основном со стеклянными волокнами в форме композитных материалов.

Стирол-бутадиен-стирол. Это название термопластичного каучука. Его свойства определяются соотношением стирола к бутадиену и сопоставимы с аналогичными свойствами натурального каучука.

Фторкарбонаты. Полимеры, состоящие из фтора, присоединенного к цепям углерода. (См. Политетрафторэтилен.)

Фтористые кремнии. См. Кремнистые каучуки.

Фенол-формальдегид. Термореактив, применяемый главным образом в качестве армирующего порошка. Он имеет низкую стоимость, хорошее тепловое сопротивление, стабильную форму и устойчивость к влаге.

Хлорсульфонатный полиэтилен. Эластомер, торговая марка — Хайполон, с превосходным сопротивлением озону, хорошими сопротивлениями химикатам, усталостными и ударными свойствами.

Целлюлозы. В это понятие входят: ацетат целлюлозы, ацетатбутадиен целлюлозы, ацетопропионат целлюлозы, нитрат целлюлозы и этилцеллюлозу. Это все термопластики. Ацетат целлюлозы — прозрачный материал. Для улучшения его жесткости и теплостойкости требуются добавки. Ацетатбутадиен целлюлозы подобен ацетату целлюлозы, но менее чувствителен к температуре и с большей ударной прочностью. Нитрат целлюлозы окрашивается и становится хрупким при выдержке на солнце. Он также быстро горит. Этилцеллюлоза жесткая и имеет низкую воспламеняемость.

Эпоксидные смолы. Вулканизированные, они являются реактопластами. Зачастую применяются со стеклянными волокнами в форме композитов. Такие композиты имеют высокие прочность — 200...420 МПа и жесткость 21...25 ГПа.

Этиленпропилен. Эластомер, имеющий две формы: сополимерная форма ЕРМ и форма трехзвенного полимера ЕРДМ, с очень высоким сопротивлением кислороду, озону и большим тепловым сопротивлением.

Этиленвинилацетат. Эластомер, обладающий хорошими гибкостью, ударной прочностью и электрическими изоляционными свойствами.

18.4. ТЕХНИЧЕСКИЕ КЕРАМИКИ

Термин «керамики» включает широкий диапазон материалов. Здесь мы рассмотрим только несколько обычно применяемых технических керамик. (См. Гл. 10 для более детальной информации.)

Глинозем. Это окись алюминия, керамика, которая находит широкое применение в разных сферах. Имеет превосходные электроизоляционные свойства и великолепное сопротивление агрессивной окружающей среде. В комбинации с кремнеземом применяется в качестве огнеупорного кирпича.

Бор. Волокна бора используются для армирования в композитах с такими материалами, как никель. (См. Гл. 11.)

Нитрид бора. Эта керамика употребляется в качестве электроизолятора.

Карбиды. Главное их использование, когда они соединены со связующим металлом в форме композитного материала, — для цементирования наконечников режущих инструментов. Это в основном относится к связанным карбидам, в керамиках применяются обычные карбиды хрома, тантала, титана и вольфрама. (См. Связанные карбиды в Гл. 10.)

Карбид хрома. См. Карбиды.

Окись хрома. Эта керамика применяется как покрытие для увеличения сопротивления износу.

Стекла. Основным ингредиентом большинства стекол служит кремнезем. Стекла, как правило, имеют низкую тягучесть, низкий предел прочности на растяжение, на который влияют микроскопические дефекты и царапины на поверхности, низкие термическое расширение и теплопроводность (и, следовательно, плохое сопротивление термическому удару), хорошее сопротивление химикатам и хорошие электроизоляционные свойства. Стекланные волокна зачастую применяют в смесях с полимерными материалами. (См. Гл. 11.)

Каолинит. Керамика является смесью алюминия и окислов кремния, существующих в виде глины.

Магнезия. Это окись магния, является керамикой и применяется для изготовления кирпича, который называют огнеупорным доломитом.

Пирекс. Боросиликатное жаростойкое стекло с высоким тепловым сопротивлением, изготовленное из кремнезема, известняка и окиси бора. Применяется в качестве колб плазменных источников излучения для терапии многих видов заболеваний и в других целях. (См. Стекла.)

Кремнезем. Его формы служат в качестве основы для разнообразных керамик. Кремнезем, например, комбинируется с глиноземом в форме огнеупорных кирпичей и с ионами магния для формования асбестов. Является основой большинства стекол.

Нитрид кремния. Эта керамика применяется в качестве волокна в армированных материалах, таких, как эпоксидные смолы. (См. Гл. 11.)

Натриевое стекло. Обычное оконное стекло, изготавливается из смеси кремнезема, известняка и кальцинированной соды. (См. Стекла.)

Карбид тантала. См. Карбиды.

Карбид титана. См. Карбиды.

Карбид вольфрама. См. Карбиды.

Глава девятнадцатая

Выбор процессов изготовления

19.1. ПРОЦЕССЫ И ВЫБОР МАТЕРИАЛА

Здесь рассматриваются характеристики различных процессов изготовления, которые могут применяться к образцам изделий. В порядке обсуждения проблемы выбора процесса поставим ряд вопросов, на которые необходимо ответить.

1. Что представляет собой материал?

Исходя из типа материала следует принять во внимание и выбор метода изготовления изделия. Так, например, если будет применяться литье и материал имеет высокую точку плавления, то в таком случае процесс может быть любой: песочное литье или литье по выплавляемым моделям.

2. Что представляет собой конфигурация изделия?

Конфигурация изделия является существенным фактором в определении того, какой тип процесса может применяться. Так, например, изделие в форме трубы может быть изготовлено литьем на центрифуге, волочением или экструзией, но не другими методами.

3. Что включает в себя детализовка изделия?

Необходимо иметь в виду, имеет ли изделие отверстия, ступеньки, втулки, пустотелые секции, тонкие детали и т.д. Так, например, если имеются пустотелые секции, то нельзя применять ковку.

4. Каковы размеры изделия и требуемая точность их выполнения?

Для высокой точности будет предпочтительнее песочное литье, хотя для этого может подходить литье по выплавляемым моделям.

5. Должны ли применяться какие-либо чистовые процессы?

Придают ли применяемые процессы изделию чистовой конечный вид или надо иметь экстрачистовой процесс? Например, если планируется получать изделие не с гладкой поверхностью, а со шлифованной.

6. Какое требование к количеству изделий?

Изделие единичное, малая партия, большая партия или это непрерывное производство? Некоторые процессы экономичны для выпуска малого количества изделий, другие будут экономичными в условиях больших партий.

19.2. КОНЕЧНЫЙ ВИД ПОВЕРХНОСТИ

Шероховатость определяют как нерегулярности структуры поверхности, которые появляются вследствие процесса изготовления, но при этом исключаются волнистость и ошибки формы изделия. Шероховатость имеет вид серии пиков и желобков, которые могут быть различной высоты и протяженности, и служит характеристикой применяемого процесса. Волнистость же может появляться из-за таких факторов, как станочные или рабочие отклонения, вибрации, тепловая обработка или искривляющие напряжения. Шероховатость и волнистость могут налагаться на отклонения поверхности от точной геометрической формы. Конечные виды поверхности представлены на **Рис. 19.1**.

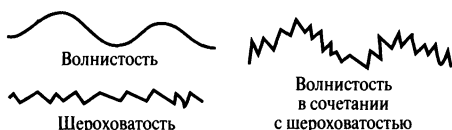


Рис. 19.1. Конечные виды поверхности

Одним из измерений шероховатости является среднеарифметическое отклонение, определяемое символом R_a (**Табл. 19.1, 19.2**). Это арифметическое усреднение изменения профиля выше и ниже эталонной линии по всей заданной контролируемой длине. Эталонная линия может быть центральной линией изделия. Она выбирается так, чтобы были равны суммы площадей, заключенных между ней и теми частями профиля поверхности, которые находятся по ту (А) и другую (В) стороны от этой линии:

$$R_a = 1000 \times \frac{\text{сумма площадей } A + \text{сумма площадей } B}{\text{длина образца}},$$

где длина образца задается в мм, а площади — в мм².

Табл. 19.1. Значения R_a структуры поверхности

Структура поверхности	Шероховатость R_a [мкм]
Очень шероховатая	50
Шероховатая	25
Полушероховатая	12.5
Средняя	6.3
Полутонкая	3.2
Тонкая	1.6
Грубошлифованная	0.8
Среднешлифованная	0.4
Тонкошлифованная	0.2
Суперчистовая	0.1

Табл. 19.2. Типичные значения шероховатости для различных процессов

Процесс	Шероховатость R_a [мкм]
Песочное литье	25...12.5
Горячая прокатка	25...12.5
Резка пилой	25...3.2
Строгание, профилирование	25...0.8
Штампованная поковка	12.5...3.2
Прокатка	6.3...0.8
Сверление	6.3...0.8
Химическое фрезерование	6.3...0.8
Расточка, обточка	6.3...0.4
Литье по выплавляемым моделям	3.2...1.6
Экструзия	3.2...0.8
Холодная прокатка	3.2...0.8
Волочение	3.2...0.8
Литье под давлением	1.6...0.8
Шлифовка	1.6...0.1
Хонингование	0.8...0.1
Электролитическая доводка	0.6...0.2
Полирование	0.4...0.1

19.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ МЕТАЛЛА

Литье металлов

Литье можно применять для деталей массой приблизительно от 10^{-3} кг до 10^4 кг, с толщиной стенок примерно от 0.5 мм до 1 м. Для отливок нужны закругленные ребра, без резких изменений профиля, наклоны поверхностей должны быть постепенными. Литье является оптимальным методом изготовления в следующих условиях (за исключением узлов, которые достаточно просты для изготовления их экструзией или глубоким волочением):

1. Деталь имеет большую внутреннюю полость.

В этом случае должно быть удалено значительное количество металла, если применяется механическая обработка; литье устраняет необходимость этой обработки.

2. Деталь имеет сложную внутреннюю полость.

Вполне вероятно, что невозможна механическая обработка; литьем, однако, могут быть выполнены очень сложные внутренние полости.

3. Деталь сделана из материала, который тяжело обрабатывается механически.

Твердые материалы могут обрабатываться механически очень тяжело, например белый литейный чугун; но этой проблемы не существует у литья.

4. Применяемый металл является дорогим, и из-за этого должны быть небольшие его затраты.

При механической обработке затрачивается материала больше, чем при литье.

5. Отличие свойств материала в разных направлениях должно быть минимизировано.

Металлы, подвергнутые процессам обработки, часто имеют свойства, которые отличаются по разным направлениям.

6. Блок имеет сложный профиль.

Литье может быть экономичней, чем монтаж блока из отдельных деталей.

Важно обсудить, где применять песочное литье, а в какие процессы литья включить стоимость механической обработки для изготовления литейных форм. Когда требуется много одинаковых отливок, использование литейной формы, которую можно применять многократно, дает возможность распределить стоимость этой литейной формы на множество деталей и сделать процесс экономичным. А там, где требуется только одиночное изделие, применяемая форма должна быть как можно дешевле, поскольку полная стоимость будет приходиться на единственное изделие. В Табл. 19.3 приведены основные характеристики различных процессов литья.

Табл. 19.3. Процессы литья

Процесс — литье	Обычные материалы	Толщина сечения [мм]	Масса [кг]	Шероховатость R_a [мкм]	Скорость изготовления [деталь/ч]
Песочное	Большая часть	>4	0.1...200000	25...12.5	1...60
Кокильное	Кроме железных сплавов	3...50	0.1...200	3.2...1.6	5...100
По выплавляемым моделям	Все	1...75	0.005...700	3.2...1.6	>1000
Центробежное	Большая часть	3...100	∅ 25мм...1.8 м	25...12.5	>50

Табл. 19.3 (окончание)

Процесс — литье	Обычные материалы	Толщина сечения [мм]	Масса [кг]	Шероховатость R_a [мкм]	Скорость изготовления [деталь/ч]
Под давлением: высокое давление	Кроме железных сплавов	1...8	0.0001...5	1.6... 0.8	>200
Под давлением: низкое давление	То же	2...10	0.1...200	1.6...0.8	> 200

Следующие факторы в значительной степени определяют тип применяемого процесса литья:

1. Большая тяжелая отливка.

Песочное литье может применяться для очень больших отливок.

2. Сложная конструкция.

Песочное литье является наиболее гибким методом и может применяться для очень сложных отливок.

3. Тонкие стенки.

Стенки толщиной почти в 1 мм можно получать литьем по выплавляемым моделям или под давлением. Песочным литьем такие тонкие стенки получить невозможно.

4. Качественное воспроизведение детали.

Литье под давлением и литье по выплавляемым моделям дают хорошую воспроизводимость детали. Песочное литье делает это хуже всех.

5. Высокая чистота поверхности.

Литье под давлением или литье по выплавляемым моделям дают наилучшую чистоту поверхности, песочное литье — худшую.

6. Сплавы с высокой точкой плавления.

Может применяться песочное литье или литье по выплавляемым моделям.

7. Стоимость механической обработки.

Самая высокая стоимость при литье под давлением. Песочное литье дешевле. Однако при большом количестве изделий стоимость механической обработки для металлических форм распределяется по большому числу отливок, тогда как стоимость формы для песочного литья одинакова, и не имеет значения, сколько отливок было сделано, поскольку для каждой отливки требуется новая форма. В Табл. 19.4 отражены типичные приложения литья.

Табл. 19.4. Типичные приложения литья

Тип литья	Приложения
Песочное	Блоки двигателей, станины металлорежущих станков, корпуса насосов
Кокильное	Головки цилиндров, поршни, зубчатые передачи и болванки
По выплавляемым моделям	Станины металлорежущих станков, лопадки турбин, компоненты блоков
Центробежное	Трубы, барабанные тормоза, маховички шкивов, оружейные стволы
Под давлением	Коробки передач, устройства для бытовых целей, детали насосов

Виды формования металлов

Они включают придание определенной формы материалу методами пластической деформации. К таким видам относятся горячая штамповка, экструзия, прокатка и волочение. В зависимости от метода могут изготавливаться как маленькие (примерно от 10^{-3} кг), так и большие (до 100 кг) компоненты, с толщиной стенок 0.1 мм...1м. В Табл.19.5 приведены типичные характеристики этих процессов.

Табл. 19.5. Управляемые процессы

Процесс	Обычные материалы	Толщина сечения [мм]	Минимальный размер	Максимальный размер	Шероховатость R_a [мкм]	Скорость изготовления [деталь/ч]
Закрытая объемная штамповка	Стали, Al, Cu, сплавы Mg	> 3	10 см ²	7000 см ²	3.2...12.5	≥ 300
Профилирование листового металла на роликовой листогибочной машине	Любой пластичный материал	0.2...6	—	—	0.8...3.2	—
Волочение	То же	0.1...25	∅ 3 мм	∅ 6 м	0.8...3.2	≥ 3000
Прессование ударным выдавливанием	То же	0.1...20	∅ 6 мм	∅ 0.15 м	0.8...3.2	≥ 2000
Экструзия горячая холодная	Более всего подходит пластичным материалам	1...100	∅ 8 мм	∅ 500 мм	0.8...3.2	≥ 720 м
		0.1...100	∅ 8 мм	4 м (длина)	0.8...3.2	≥ 720 м

Примечание:

Пластичными материалами являются обычно сплавы алюминия, меди и магния, стали с малым содержанием углерода и титановые сплавы.

По сравнению с отлитыми ковкие изделия имеют большую степень однородности и надежные механические свойства. Процессы манипуляции дают, однако, направленные свойства материалам, чего нет в случае литья. Они оптимальны для изготовления изделия в том случае, когда:

1. Деталь формована из листового металла.

В зависимости от требуемой формы, если компоненты не слишком большие, могут использоваться резка ножницами, гибка или волочение.

2. Длинные куски металла требуют постоянного поперечного сечения.

Оптимальными методами будут экструзия или прокатка, которыми могут быть изготовлены длинные куски металла сложного поперечного сечения без необходимости какой-либо обработки их на станке.

3. Деталь не имеет внутренних полостей.

Может применяться горячая объемная штамповка, когда нет внутренних полостей, в частности, если требуются более высокие ударная вязкость и ударная прочность, чем полученные литьем. Таким образом, материал может быть изготовлен с направленными свойствами для улучшения его сервисных эксплуатационных качеств.

4. Требуются бесшовные, профилированные обжимкой объемы или сосуды.

Оптимальными будут глубокое волочение или прессование ударным выдавливанием.

5. Компонент изготавливается из материала в форме проволоки или прутка.

Может применяться гибка или высадка. Варианты типичных приложений формирующих процессов приведены в **Табл. 19.6**.

Табл. 19.6. Типичные приложения формирующих процессов

Процесс	Приложение
Штамповка в закрытых штампах	Соединительные стержни, коленчатые валы
Профилирование листового металла на роликовой листогибочной машине	Полоса, тонколистовая сталь, секции оконных рам
Волочение	Баллоны, кухонные приборы, электрические детали
Прессование ударным выдавливанием	Зажимы, раструбы инструмента
Экструзия	Оконные рамы, декоративные панели

Порошковые процессы

Порошковые процессы позволяют изготавливать в большом количестве детали малых форм с высокой производительностью, вплоть до 1800 штук в час, и с незначительными, если они

и возникают, требованиями к чистовой машинной обработке. Детали можно производить из всех материалов и, в частности, даже из тех, которые не могли бы быть использованы при других процессах, например из-за высокой точки плавления металлов молибдена, тантала и вольфрама, и там, где имеется потребность в некоторой характерной пористости, например у пористых вкладышей подшипников, заполненных маслом. Механическое уплотнение порошков, однако, дает возможность изготавливать только двумерные фасонные профили, не похожие на литые и штампованную поковку. Следует добавить, что существует ограничение на выпуск порошковых фасонных профилей, так как они чувствительны к выгалкиванию из штампа. Например, не получается конусность, невозможны внутренние выточки и отверстия с прямыми углами в направлении прессования. Далее, если исходить из отношения масс, порошковые металлы стоят дороже, чем аналогичные металлы для процессов формования или литья. Однако более высокой их стоимости можно противопоставить отсутствие металлических отходов, устранение финишной машинной обработки и высокую производительность изготовления. Максимальная масса изделия составляет около 4.5 кг.

Механическая обработка металлов

Когда процессы подбора и резки металла позади, в определении оптимального процесса или процессов появляются следующие факторы:

1. Операции надо задумывать так, чтобы удалялось минимальное количество материала. Это сокращает стоимость материала, стоимость энергии на механическую обработку и стоимость износа инструмента.

2. Время, потраченное на операцию, должно быть сведено до минимума, стоимость труда должна быть низкой.

3. Квалификация оказывает влияние на стоимость труда.

4. Следует принять во внимание влияние свойств материала на машинную обработку. В частности, твердость. В основном, чем тверже материал, тем дольше он будет обрабатываться режущим инструментом. Так твердость воздействует на выбор материала инструмента, который может использоваться, и, в случае очень твердого материала, на процесс, который можно применять. Например, шлифовка является процессом, который может употребляться к очень твердым материалам, поскольку материал инструмента, частицы абразива могут быть очень твердыми. Там, где имеется значительный объем механической обработки, следует производить ее твердыми резцами с хорошей обрабатываемостью материалов, что минимизирует время резки.

5. Процесс или процессы заставляют учитывать требования к качеству изделий и скорости изготовления.

6. Нельзя забывать о геометрической форме изделия при выборе процесса или процессов изготовления.

7. Необходимая чистота обработки поверхности и точность размеров также оказывают влияние на выбор процесса или процессов.

Издержки на механические операции составляют значительную часть стоимости изделия, в частности, если принимаются во внимание затраты, необходимые для какой-либо операции по выполнению конкретных допусков. В качестве примера рассмотрим стоимость ряда последовательных процессов для выполнения операции с допуском 0.10 мм (Табл. 19.7).

Табл. 19.7. *Стоимость процессов для выполнения операции с допуском 0.10 мм*

Механический процесс	Стоимость процесса
Профилирование	Самый дорогой
Строгание	Средние по стоимости
Горизонтальная расточка	
Фрезерование	
Обработка на револьверной головке (токарно-револьверный станок)	Самый дешевый

Стоимость всех процессов увеличивается, если возрастает требуемый допуск. При высоких допусках шлифовка является одним из дешевых процессов. Как показано в Табл. 19.8, различные механические операции дают также и различную чистоту обработки.

Табл. 19.8. *Чистота обработки*

Механический процесс	Шероховатость R_a [мкм]	Состояние поверхности
Строгание и профилирование	25...8	Средняя по чистоте обработки
Сверление	8...1.6	
Фрезерование	6.3...0.8	
Токарная обработка	6.3...0.4	
Шлифовка	1.6...0.1	Самая гладкая

Выбор процесса будет зависеть, таким образом, от требуемой геометрической формы изделия. В Табл. 19.9 указаны процессы, которые могут применяться для различных геометрических форм.

Табл. 19.9. *Механические процессы для конкретных геометрических форм*

Тип поверхности	Подходящий процесс
Плоская	Профилирование, строгание, фрезерование лицевой стороны, шлифовка поверхности
Наружная цилиндрическая	Токарная обработка, шлифовка
Внутренняя цилиндрическая	Сверление, расточка, шлифовка
Плоская и контурная, пазы	Фрезерование, шлифовка

Механическая обработка, в основном, является относительно дорогим процессом, если сравнивать ее с другими методами формоизменения материалов. Однако это очень гибкий процесс, который предоставляет широкий выбор разнообразных форм. Значительная часть общей стоимости механической обработки изделия обусловлена временем настройки станков при переходе от одного этапа механической обработки к другому. При сокращении числа этапов механических обработок и, следовательно, времени настройки станков становится возможной значительная экономия. Таким образом, важно обращать внимание на чередование операций механической обработки и выбор станка.

Процессы соединения материалов

Изготовление включает соединение материалов и возможность собирать очень большие структуры, много больше тех, которые могут быть получены другими методами, такими как литье или горячая объемная штамповка. Большинство процессов соединения — это, по сути, клейка, пайка мягким и твердым припоями, сварка и скрепление систем. Факторами, которые определяют процесс сборки, служат материалы, соединение модели из компонентов, ограничения, вызванные окружающей средой (в зависимости от того является сборка постоянной или временной), а также стоимость. Сваренные, спаянные и скрепленные сборки и некоторые скрепленные узлы, например заклепанные, являются, вообще говоря, уже готовыми сборками, в то время как спаянные мягким припоем и связанные болтами сборки можно легко разобрать и соединить снова. В **Табл. 19.10** приведены процессы соединения различных металлов и сплавов.

Табл. 19.10. *Процессы соединения металлов и сплавов*

Процесс	Материалы	Мин.-макс. толщина листа [мм]	Скорость изготовления [м/мин]
Сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа	Большой частью нежелезные сплавы, углеродистые и низколегированные стали	0.1...3	0.2 (ручная), 1.5 (автоматическая)

Табл. 19.10 (окончание)

Процесс	Материалы	Мин.-макс. толщина листа [мм]	Скорость изготовления [м/мин]
Дуговая сварка металлическим (плавящимся) электродом в среде инертного газа	Большей частью нежелезные сплавы, углеродистые, низколегированные и нержавеющие стали	0.5...80	0.5 (ручная)
Ручная дуговая сварка металлическим (плавящимся) электродом в среде инертного газа	Углеродистые, низколегированные сплавы и нержавеющие стали, никелевые сплавы	1.5...200	0.2
Дуговая сварка под флюсом	Углеродистые, низколегированные сплавы и нержавеющие стали	5...20	5
Сварка сопротивлением (контактная)	В основном низкоуглеродистые стали, нелитейный чугун, или высокоуглеродистая сталь	0.3...6	—
Газовая сварка	В основном железные сплавы	0.5...30	0.1
Пайка твердым припоем	Большей частью металлы	0.1...50	Высокая
Пайка мягким припоем	То же	0.1...6	—
Склеивание	То же	0.05...50	Высокая
Механические зажимы	То же	0.25...200	Может быть высокой

19.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ

Инжекционное прессование и экструзия наиболее широко применяются для изготовления изделий из полимеров. Основным процессом является инжекционное прессование, оно используется для массового производства мелких деталей, часто сложных профилей. С помощью экструзии изготавливаются изделия в виде непрерывных, длинных форм или из материалов постоянного поперечного сечения. Для выбора процесса необходимы следующие факторы:

1. Скорость производства.

Типичные циклы времени: инжекционное прессование и формовка на пескодувной машине (время цикла 10...60 с), литье под давлением (время цикла 20...600 с), центробежная формовка (время цикла 70...1200 с), термоформовка (время цикла 10...60 с).

2. Требование вложения капитала.

Инжекционное прессование требует наибольшего вложения капитала, экструзия и формовка на пескодувной машине — меньшего, центробежная формовка, литье под давлением, конвейерное прессование, термоформовка и простое литье — наименьшего.

3. Наиболее экономичное серийное производство.

Инжекционное прессование, экструзия и формовка на пескодувной машине экономичны только при большом серийном производстве. Термоформовка, центробежная формовка и механическая обработка применяются для малых серийных производств. В Табл. 19.11 указано минимальное количество выпускаемых изделий, которое удовлетворяет требованию экономичности.

4. Чистота обработки поверхности.

Инжекционное прессование, формовка на пескодувной машине, центробежная формовка, термоформовка, конвейерное литье и литье под давлением, а также простое литье – все дают очень хорошую чистоту поверхности. Экструзия дает только достаточно хорошую чистоту поверхности.

5. Запрессовывание металлов во время процесса.

Это возможно при инжекционном прессовании, центробежной формовке, конвейерном и простом литье.

6. Точность размеров.

Инжекционное прессование и конвейерное литье дают очень высокую точность размеров, литье под давлением и простое литье — высокую, а экструзия — низкую точность.

Табл. 19.11. Минимальное количество изделий

Процесс	Экономичный выпуск изделий [детали]
Механическая обработка	1...100
Центробежная формовка	100...1000
Листовая штамповка	100...1000
Экструзия	300...3000 *
Формовка на пескодувной машине	1000...10000
Инжекционное прессование	10000...100000

* Длина изделий [м].

7. Размер изделия.

Инжекционное прессование и механическая обработка лучше подходят для производства очень маленьких изделий. Толщина профилей порядка 1 мм может быть получена с помощью инжекционного прессования, штамповкой и экструзией.

8. Закрытые полые конфигурации.

Можно применять формовку на пескодувной машине и центробежную формовку.

9. Запутанные, сложные конфигурации.

Возможно использовать инжекционное прессование, формовку на пескодувной машине, конвейерное и простое литье.

10. Винтовые резьбы.

Резьбы могут быть изготовлены с помощью инжекционного

прессования, формовкой на пескодувной машине, простым литьем и механической обработкой.

11. Большие формованные листы.

Можно получить термоформовкой.

В Табл. 19.12 приведены методы изготовления, применяемые для некоторых обычных термопластов, а в Табл. 19.13 — для реактопластов.

Табл. 19.12. Методы изготовления термопластов

Полимер	Экструзия	Инжекционное прессование	Экструзия на пескодувной машине	Центрежная формовка	Термоформовка	Литье	Соединение и сборка	Пленка
ABS	*	*		*	*		*	
Акрилик	*	*			*	*	*	
Целлюлозы	*	*			*			*
Полиацеталь	*	*	*					
Полиамид	*	*		*		*		*
Поликарбонат	*	*	*		*		*	
Полиэфир	*	*						
Полиэтилен HD	*	*		*	*	*		*
Полиэтилен LD	*	*		*	*	*		*
Полиэтилентерефталат	*	*	*	*	*			*
Полипропилен	*	*	*		*		*	*
Полистирол	*	*	*	*	*		*	*
Полисульфон	*	*			*			
PTFE	*							
PVC	*	*	*	*	*		*	*

Табл. 19.13. Методы изготовления реактопластов

Полимер	Литье под давлением	Конвейерное литье	Простое литье	Прокатка в тонкий лист	Пена	Пленка
Эпоксидная смола			*	*	*	
Меламин-формальдегид	*	*		*		
Фенол-формальдегид	*	*	*	*	*	
Полиэфир	*	*	*	*		*
Мочевина формальдегида	*	*		*		

Перечень процессов, которые могут применяться с пластиками, — это сварка, склеивание, заклепывание, прессовая и обжимная посадки, а также системы нарезки резьбы.

19.5. РАСХОДЫ НА ПРОЦЕССЫ

Себестоимость изготовления для процессов в основном состоит из двух составляющих: фиксированные расходы и переменные. На **Рис. 19.2** показаны типичные формы графиков зависимости себестоимости изготовления от количества изделий. На **Рис. 19.2а** даны низкие фиксированные, но высокие переменные издержки на единицу изделия, например песочной отливки, а на **Рис. 19.2б** — высокие фиксированные, но низкие переменные издержки на единицу изделия, например кокильной отливки. Общая себестоимость есть сумма фиксированных издержек плюс себестоимость единицы изделия. На **Рис. 19.3** показаны две линии общей себестоимости для процессов, заданных графиками на **Рис. 19.2а,б**. Ниже количества изделий N процесс, показанный на **Рис. 19.2а**, будет дешевле, чем показанный на **Рис. 19.2б**, а выше N — наоборот.

Расходы включают следующие составляющие:

1. Фиксированные расходы.

Издержки капитала для монтажа, например, литейной машины или даже литейного завода обычно оплачиваются за предполагаемое время монтажа. Вследствие этого в год монтажа будет снижение капитала, и это тоже издержки капитала, которые приходятся уже на выпуск продукции в том же году. Так, если капи-



Рис. 19.2. Себестоимость изготовления изделий

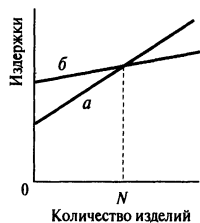


Рис. 19.3. Графическое решение задачи

тал, затраченный на покупку необходимой машины и ее монтаж, скажем, 50000 долл., то в первом году снижение капитала можно считать в 10%, и, таким образом, 5000 долл. оплачиваются как издержки капитала, т.е. относятся на фиксированные расходы в пересчете на количество произведенной продукции в тот год. Еще одной составляющей фиксированных расходов являются издержки на штампы или инструменты, необходимые специально для планируемой продукции. Другие факторы мы должны включить в фиксированные расходы на эксплуатацию завода и инструмента или на ремонт штампа.

2. Переменные расходы.

Переменные расходы — это издержки на материал, на оплату труда, затраты на энергию и некоторые необходимые конечные затраты.

Чтобы решить, какие расходы приходятся на одно изделие, надо ответить на следующие вопросы:

1. Оборудование применяется только для рассматриваемого изделия?

Цель этого вопроса состоит в определении того, полные затраты капитала приходятся на одно изделие или они могут быть распределены на некоторое число изделий.

2. Инструмент применяется только для рассматриваемого изделия?

Если разработан специальный инструмент для конкретного изделия, тогда полные затраты на него будут переведены на это изделие.

3. Что представляют собой прямые расходы на оплату труда на одно изделие?

Прямые расходы на оплату труда — это те расходы, которые прямо связаны с процессом изготовления.

4. Что входит в другие расходы на оплату труда?

Они определяют непрямые расходы на оплату труда и включают такие расходы, как убытки за надзор, инспекцию и т.д.

5. Каковы расходы на энергию?

6. Требуется ли какие-нибудь финишные процессы: если да, то каковы затраты на них?

7. Что представляют собой расходы на материал?

8. Имеются ли какие-нибудь накладные расходы для включения их в себестоимость изделия?

Накладные расходы — это те затраты, которые компания не может специально распределить на какую-либо конкретную службу или изделие, но они являются частью полных затрат компании, например расходы на телефоны, арендная плата для завода, заработная плата управленческого аппарата.

П р и л о ж е н и е

ЕДИНИЦЫ РАЗМЕРНОСТЕЙ

Международная система единиц (СИ) имеет семь основных единиц:

Длина L	метр	м
Масса M	килограмм	кг
Время T	секунда	с
Сила тока I	ампер	А
Температура θ	кельвин	К
Сила света J	кандела	кд
Количество вещества N	моль	моль

Две дополнительные единицы СИ — радиан и стерадиан.

Система единиц СИ для других физических величин сформирована из основных единиц в зависимости от уравнения, определяющего рассматриваемую величину. Плотность определяется по уравнению $\text{плотность} = \text{масса}/\text{объем}$ и, таким образом, имеет размерность единицы массы в единице объема, например $\text{кг}/\text{м}^3$. Некоторым производным единицам даны специальные наименования. Например, единица силы определяется по уравнению $\text{сила} = \text{масса} \cdot \text{ускорение}$ и, таким образом, имеет размерность $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$ или $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$, и ей дано наименование Ньютон (Н). Единица механического напряжения получается из уравнения $\text{напряжение} = \text{сила}/\text{площадь}$, и она имеет производную единицу $\text{Н}/\text{м}^2$; ей дано наименование Паскаль (Па), итак, $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}/\text{м}^2$. Некоторые величины определяются как отношение двух величин с теми же размерностями. Например, относительное удлинение определяется как изменение длины/длина и, таким образом, не имеет размерности.

Применяются стандартные приставки для кратных и подкратных единиц, система СИ оперирует одними кратными числами 10^3 . В Табл. А.1 приведены коэффициенты и их названия. Например, 1000 Н может обозначаться как 1 кН, 1000000 Па как 1 МПа, 1000000000 Па как 1 ГПа, 0.001 м как 1 мм и 0.000001 А как 1 мкА. Заметим, что часто единицу $\text{Н}/\text{мм}^2$ применяют для механического напряжения, $1 \text{ Н}/\text{мм}^2$ есть 1 МПа.

Внесистемными единицами, которые читатель может найти на страницах этой книги, являются frs (фут—фунт—секунда) — единицы, которые до сих пор часто применяются в США. В этой

Табл. А.2. Коэффициенты преобразования

Длина	1 м = 3.28 фут, 1 см = 0.394 дюйм
	1 фут = 30.48 см, 1 дюйм = 2.54 см
Площадь	1 см ² = 0.155 дюйм ²
	1 дюйм ² = 6.452 см ²
Объем	1 м ³ = 35.315 фут ³ , 1 см ³ = 0.0610 дюйм ³
	1 фут ³ = 0.0283 м ³ , 1 дюйм ³ = 16.39 см ³
Масса	1 кг = 2.205 фунт
	1 фунт = 0.454 кг
Плотность	1 кг·м ⁻³ = 0.0624 фунт·фут ⁻³ , 1 Мкг·м ⁻³ = 0.0361 фунт·дюйм ⁻³
	1 фунт·дюйм ⁻³ = 16.02 кг·м ⁻³ , 1 фунт·дюйм ⁻³ = 27.68 Мг·м ⁻³
Сила	1 Н = 7.233 паундаль, 1 Н = 0.2248 фунт силы
	1 паундаль = 0.1383 Н, 1 фунт силы = 4.448 Н
	1 кгс = 9.807 Н
Механическое напряжение	1 Па = 0.0209 фунт силы·фут ⁻² = 145.0 фунт силы·дюйм ⁻²
	1 фунт силы·фут ⁻² = 47.880 Па, 1 фунт силы·дюйм ⁻² = 6.895 кПа
Энергия	1 Дж = 0.7376 фут·фунт силы = 23.730 фут·паундаль = 0.2388 кал
	1 кал = 4.187 Дж, 1 фут·паундаль = 0.0421 Дж,
	1 фут·фунт силы = 1.356 Дж 1 Б.Т.Е. = 1.055 кДж (британская единица теплоты)
Мощность	1 кВт = 1.341 л.с.
	1 л.с. = 550 фут·фунт силы·с ⁻¹ = 0.7457 кВт
Температура	1 К = 1°C = 1.8°F, t°C = 273.15 + t К
	1°F = 5/9 К, (t°F - 32)/9 = t°C/5
Теплопроводность	1 Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹ = 2.39·10 ⁻³ кал·см ⁻¹ ·К ⁻¹
	1 кал·см ⁻¹ ·К ⁻¹ = 4.18·10 ⁻² Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹

В Табл. А.3 приведены приближенные соотношения между основными шкалами твердости, когда они применяются к сталям, а в Табл. А.4 — к цветным сплавам.

Табл. А.3. Шкалы твердости для сталей

Шкала Бринелля, нагрузка 300 кг, индентор 10 мм, стальной шар	Шкала Роквелла		Шкала Виккерса, индентор — алмазная пирамида
	А	С	
615	81.3	60.1	700
585	80.0	57.8	650
550	78.6	55.2	600
512	77.0	52.3	550
471	75.3	49.1	500
425	73.3	45.3	450
379	70.8	40.8	400
331	68.1	35.5	350
284	65.2	29.8	300

Табл. А.3 (окончание)

Шкала Бринелля, нагрузка 300 кг, индентор 10 мм, стальной шар	Шкала Роквелла		Шкала Виккерса, индентор — алмазная пирамида
	А	С	
238	61.6	22.2	250
190	—	—	200
143	—	—	150
95	—	—	100

Табл. А.4. Шкалы твердости для цветных сплавов

Шкала Бринелля, нагрузка 300 кг, индентор 10 мм, стальной шар	Шкала Роквелла	Шкала Виккерса, индентор — алмазная пирамида
	В	
190	93.8	200
181	91.6	190
171	89.2	180
162	86.5	170
152	83.4	160
143	80.0	150
133	76.1	140
124	71.5	130
114	66.3	120
105	60.0	110
95	52.5	100

Предметный указатель

Этот указатель не дает перечень всех применяемых терминов, такой перечень имеется в Гл. 1. Указатель не дает также перечень всех различных типов сплавов и полимеров, перечислены только их основные классы. Для более детального ознакомления читатель отсылается к Гл. 18, где обсуждается каждый обычно применяемый металл или полимер, и к главам, специально посвященным полимерам или конкретному металлу.

<i>U</i> -значение	273
Азотирование	15, 69
Алюминиевые сплавы	100
ковкие	102
литейные	101
Алюминий	100
Аморфное состояние вещества	15
Анодирование	15
Антиферромагнетики	252
Армированные частицами материалы	237
Атактическая структура	15
Аустемперинг	18
Аустенизация	16
Аустенит	16
Баббитовые металлы	270
Бейнит	16
Белые подшипниковые металлы	270
Бринелля испытание	36
Бронзы	
алюминиевые	133
бериллиевые	133
кремнистые	133
оловянные	132
Виды формования металлов	296
Виккерса испытание	26, 36
Волокнистые композиционные материалы	237
механические свойства	240
Выбор материалов	
диаграммы свойств	276
критерий	275
Вязкость разрушения	16
значения	261
полимеры	218
титановые сплавы	197
Гальванические серии металлов и сплавов	268
Германий	244
Гомополимер	16
График <i>S/N</i>	16
График напряжение—деформация	16

Деформационное упрочнение	16
Деформация	17
Джоуни испытание	18
Диамантики	251
Дисперсно-упрочненные композиционные материалы	237, 239
Диэлектрики	
потери	246
электрическая прочность	247, 250
электрические параметры	248
Диэлектрическая постоянная	17, 246
Диэлектрическая проницаемость	17
Долговечность	17
Древесина	242
Дырка	244
Дюрометр Шора	17, 38
Емкость демпфирования	17
Железные сплавы	46
Железоуглеродистые сплавы	46
Жесткость	17, 258
Закалка	18
с отпуском	18, 69
Зоны, см. Энергетические зоны	
Изгиб	18
Износостойкость	18
подбор материалов	269
Изода испытание	19, 40
Изолятор	246
Изотактическая структура	18
Индентор	36
Испытания	
Бринелля	36
Виккерса	36
Джоуни, см. Прокаливаемость	18, 34
Изода	19, 40
Мооса	39
на изгиб	32
на ползучесть	32
на растяжение	43
на удар	19, 40
на усталость	33
Роквелла	19, 37
Шарпи	19, 42
Карбид железа, см. Цементит	
Керамики	229
электрические свойства	233
алюминиевые	235
Керметы	239
Композиты	237
Коррозионная стойкость	19
Коррозия разнородных металлов	267
Коэрцитивная сила	252

Коэффициент	
переноса тепла общий	271
пропускания	19
трения	29
Кремний	244
Кристаллическая структура	19
Кристалличность	206
Критическое сечение	86
Кюри температура	253
Латуни	132
Легирование	46
Линовка профиля	19
Литейный процесс	293
Магнетики	253
Магниевые сплавы	170
Магний	170
Магнитная	
индукция	251
постоянная	251
проницаемость	251
Магнитные свойства	251, 253
Мартенсит	19
Материалы для постоянных магнитов	253
критерий отбора по механическим свойствам	263
методы изготовления	291
относительная стоимость	278
сравнительная оценка	277
Матрица	237
Медно-никелевые сплавы	133
Медные сплавы	128
Медь	127
Мер, см. Мономер	19
Металлы и сплавы	
электрическая проводимость	247
электрическое удельное сопротивление	247
Методы изготовления	
выбор	291
издержки	304
полимеры	225, 301
реактопласты	303
термопласты	303
Методы испытаний	32
Механические свойства	255
алюминиевые сплавы ковкие	119
алюминиевые сплавы литейные	117
древесина	242
керамики алюминиевые	233
магниевые сплавы ковкие	176
магниевые сплавы литейные	176
медные сплавы ковкие	152
медные сплавы литейные	149

никелевые сплавы ковкие	186
никелевые сплавы литейные	187
полимеры	220
связанные карбиды	233
стали автоматные	83
стали инструментальные	88
стали легированные	74
стали мартенситно-старяющиеся	84
стали нержавеющие	84
стали углеродистые	77
стекла	234
титановые сплавы	199
чугуны литейные	80
Модуль	
ползучести	20, 33, 215
сдвига, см. Жесткость	17
сечения	20
упругости	20, 259
Юнга	20
Мономер	20
Мооса шкала твердости	31
Наклеп	16
Наполнители	21, 206
керамические частицы	239
углеродные частицы	238
Напряжение механическое	21
Напряженность магнитного поля	251
Науглероживание	21, 69
Никелевые сплавы	180
Нормализация, см. Тепловая обработка	21
Обработываемость на станках	21
алюминиевые сплавы	115
алюминиевые сплавы литейные	123
железоуглеродистые сплавы	73
медные сплавы	148
титановые сплавы	198
Огнеупоры	230
Оптические свойства полимеров	222
Ориентация	21
Остаточная магнитная индукция	252
Остаточные напряжения	22
Отжиг	22, 67, 110, 145, 174, 184
Относительная проницаемость	
диэлектрическая	246
магнитная	22
Относительное удлинение	22
Отпуск	69
Парамагнетики	251
Паяемость меди и медных сплавов	157
Перлит	23
Петля гистерезиса	252

Пирекс, см. Стекла	230
Пластическая деформация	23
Пластические материалы	23
Пластический разрыв	23
Плоская деформация нагружением, см. Вязкость разрушения	
Плотность	23
алюминиевые сплавы ковкие	122
алюминиевые сплавы литейные	113
железоуглеродистые сплавы	71, 87
керамики	233
медные сплавы	147
никелевые сплавы	186
полимеры	215
титановые сплавы	197
Плотность магнитного потока, см. Магнитная индукция	251
Поверхностное упрочнение	23, 69
Поглощение воды	23
Подшипниковые материалы	270
Показатель преломления	23
Ползучесть	23
железоуглеродистые сплавы	70
медные сплавы	146
никелевые сплавы	185
полимеры	215
титановые сплавы	196
тугоплавкие металлы	261
Полимеры	204
Полностью твердый	23
Полупроводник	244
<i>n</i> -типа	245
<i>p</i> -типа	245
Полутвердый	23
Порошковые процессы	297
Правило Хоукса	24
Предел	
долговечности	24
окисления	189
ползучести	24
пропорциональности	24
прочности на растяжение	24
прочности на сжатие	24
упругости	24
усталости	25
Преципитатное упрочнение	
алюминиевые сплавы	103
медные сплавы	146
Преципитаты, см. Выделение вторичных фаз	23
Применение	
алюминиевые сплавы ковкие	125
алюминиевые сплавы литейные	124
железоуглеродистые сплавы	93

керамики	235
магниеые сплавы ковкие	179
магниеые сплавы литейные	178
медные сплавы ковкие	166
медные сплавы литейные	163
никелевые сплавы	190
полимеры	226
стали инструментальные	96
стали легированные	92
стали нержавеющей	95
титан	202
титановые сплавы	202
чугуны литейные	94
Пробное напряжение	25
Прокаливаемость	25, 34
Проницаемость	25
полимеры	223
Процессы соединения материалов	300
Прочность	26
значения	257
Пуассона соотношение	27
Равновесная диаграмма	26
алюминий—кремний	102
алюминий—магний	103
алюминий—медь	103
железо—углерод	47
кремнезем—глинозем	230
медь—алюминий	130
медь—бериллий	130
медь—кремний	131
медь—никель	131
медь—олово	129
медь—цинк	129
Разрывное напряжение	26, 32
Расширение, см. Тепловые свойства	
Реактопласты	204
Рекристаллизация	26
Роквелла испытание I	9
Свариваемость	
алюминиевые сплавы	115
магниеые сплавы	177
медь и медные сплавы	158
титановые сплавы	201
Связанные карбиды	231
Синдиотактическая структура	26
Системы кодирования	
алюминиевые сплавы ковкие	105
алюминиевые сплавы литейные	104
инструментальные стали	57
литейные чугуны	51
магниеые сплавы	171

медные сплавы	134
нержавеющие стали	52
никелевые сплавы	181
полимеры	211
связанные карбиды	231
стали	52, 54
степень твердости алюминиевых сплавов	106
степень твердости магния	172
степень твердости медных сплавов	136
титан	193
Снятие напряжения	26
Соотношение Пуассона	27
Сополимер	27
Сопrotивление	
износу, см. Износостойкость	
коррозии	86, 265
ползучести	261
срезу	27
усталости	175, 260
УФ-излучению	265
Состав	
алюминиевые сплавы ковкие	109
алюминиевые сплавы литейные	107
магниеые сплавы ковкие	174
магниеые сплавы литейные	173
медные сплавы ковкие	141
медные сплавы литейные	138
никелевые сплавы	183
полимеры	213
стали автоматные	63
стали инструментальные	65
стали легированные	58
стали мартенситно-старееющие	63
стали нержавеющие	64
стали углеродистые	59
титановые сплавы	194
чугуны литейные	60
Спекание	27
Сплав	27
Способность к сварке	27
Срез	27
Стали	46
автоматные	49
дозвтектоидные	79
завзтектоидные	79
инструментальные	50
легированные	46
мартенситно-старееющие высокопрочные	49
нержавеющие	49
углеродистые	47
Старение	27

Стекла	230
Степень твердости	27
Стоимость энергии	279
Структура полимеров	
каучук	210
меламин-формальдегид	209
нейлон	208
поливинилхлорид	208
поликарбонат	209
полиоксиметилен	208
полипропилен	208
полистирол	208
полисульфид	209
политетрафторэтилен	208
полиэтилен	207
полиэтилентерефталат	209
цис-полисопрен	209
Сфероидизация	27
Тангенс угла потерь	246
Твердость	27, 36
железоуглеродистые сплавы	72
измерение	36
керамики	233
медные сплавы	148
метод повышения выделением вторичных фаз	23
полимеры	219
титановые сплавы	197
шкалы	27
Температура	
Кюри	253
перехода	27
стеклования	28, 218
Температурный коэффициент линейного расширения	26, 271
Тепловое	
коробление	28
расширение	28
Тепловые свойства	
алюминиевые сплавы ковкие	122
железоуглеродистые сплавы	87
значения	272
керамики	234
магниеые сплавы	177
медные сплавы	157
никелевые сплавы	189
полимеры	223
титановые сплавы	200
Теплоемкость	271
Теплопроводность	28
Терминология	15
Термическая обработка	28
алюминиевые сплавы	110

железоуглеродистые сплавы	67
магниеые сплавы	174
медные сплавы	145
никелевые сплавы	184
титановые сплавы	194
Термопласты	204
неполярные	205
полярные	206
Титан	192
Титановые сплавы	192
Точечная коррозия	268
Точка	
плавления	28
размягчения	28
Транс-структура	28
Трение	29
Угол изгиба, см. Испытание на изгиб	
Ударные свойства	29
железоуглеродистые сплавы	72
медные сплавы	148
полимеры	220
титановые сплавы	198
Удельная	
теплоемкость	29
электропроводность	29
Удельное электрическое сопротивление	29
Удельный вес	30
Упругая деформация	30
Упругость	223
Уравнение Эйлера	259
Усталостная прочность	30
алюминиевые сплавы	117
железоуглеродистые сплавы	72
медные сплавы	147
титановые сплавы	197
Усы	240
Ферромагнитные материалы	252
Феррит	30
Ферромагнетики	251
Ферромагнитные материалы	252
Формы изделий	
алюминиевые сплавы	123
магниеые сплавы	178
медные сплавы	159
никелевые сплавы	189
титановые сплавы	201
Химические свойства полимеров	213
Хоукса правило	24
Хрупкое разрушение	30
Цементация	30
Цементит	31

Цис-структура	31
Чистовая обработка поверхности	292
Чугуны литейные	48
белые	48
высоколегированные	48
пластичные	48
серые	48
Шарпи испытание	19
Ширина запрещенной зоны	244
полупроводники	249
Шкала твердости	37
Бринелля	39
Виккерса	39
Мооса	31, 39
Роквелла	37
Шора	39
Шора дюрометр	17, 38
Эйлера уравнение	259
Эластичность	31
Эластомеры	204
Электрическая прочность	31
диэлектрик	31
Электрические свойства	243, 247
алюминиевые сплавы	113
железоуглеродистые сплавы	72
керамики	233
магниевого сплавы	175
марганец	186
медные сплавы	147
никелевые сплавы	186
полимеры	217
титановые сплавы	197
Электрическое сопротивление проволоки	248
Электрон	244
Энергетическая зона	243
Энергетический барьер	245
Юнга модуль, см. Модуль упругости	20

Справочное издание

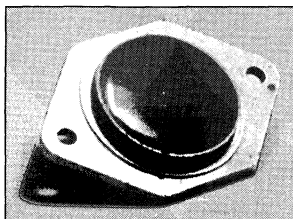
Болтон Уильям

**Конструкционные материалы:
металлы, сплавы, полимеры,
керамика, композиты.
Карманный справочник**

Ответственный редактор *В. Я. Симонов*
Научный редактор *Ю. А. Юдина*
Переводчик *В. Н. Туринов*
Художественный редактор *М. С. Коршунова*
Графика *А. Ю. Анненков, А. Н. Клочков*
Корректоры *С. И. Шишкина, Л. Р. Попова*
Технический редактор *Е. В. Рудакова*
Верстка *О. В. Озолс, А. А. Шумилин, Е. М. Илюшина*

Издательский дом «Додэка-XXI»
ИД № 02041 от 13.06.2000 г.
ОКП 95 3000
105318 Москва, а/я 70
Тел./факс: (095) 366-24-29, 366-81-45
E-mail: books@dodeca.ru; red@dodeca.ru

Подписано в печать 2.06.2004. Формат 84×108/32. Бумага типограф. № 2.
Гарнитура «Times New Roman Cyr». Печать офсетная.
Объем 10 п. л. Усл. печ. л. 16,8. Тираж 2000 экз. Изд. №12. Заказ № 1377.
Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО «Типография Новости».
105005 Москва, ул. Ф. Энгельса, 46.



**Удельное объемное
сопротивление 10^{14} Ом·см**

**Теплопроводность
1...2 Вт/(м·К)**

**Электрическая прочность
15 кВ/мм**

**Тангенс угла
диэлектрических потерь
(при 1000 Гц) — (4...4,5) 10^{-3}**

**Рабочая температура
-60 ... +250°C**

Компаунд заливочный теплопроводящий изоляционный двухкомпонентный

- Предназначен для капсулирования и герметизации электронных схем и микросборок путем полной или частичной заливки
- Полимеризуется при комнатной температуре в течение суток
- Обеспечивает эффективный теплоотвод от греющих элементов и микросборок
- Обладает высокой эластичностью, химической инертностью и хорошей адгезией к металлам
- Толщина заливаемого слоя не ограничена
- Не выделяет вредных веществ при эксплуатации
- Диапазон цветов — от светло-серого до черного

При температуре до 100°C прочность, диэлектрические характеристики и удельное объемное сопротивление материала практически не изменяются. Диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ малочувствительны к изменению частоты, что позволяет использовать материал в высокочастотной технике. При возрастании частоты от 100 до 10^6 Гц $\operatorname{tg} \delta$ изменяется от $3,0 \times 10^{-4}$ до $9,5 \times 10^{-4}$ при $\epsilon = \text{const}$

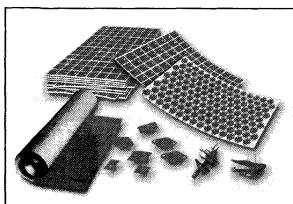
ПОСТАВКА в виде двух компонентов: **А** — керамико-полимерная композиция, **В** — катализатор.

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СОСТАВА

- к 100% массовых частей компонента **А** добавить 4,0% массовых частей компонента **В**
- тщательно перемешать в течение 3...5 минут
- нанести готовую смесь на изделие (намазыванием, погружением, заливкой...)
- полимеризация происходит на воздухе при комнатной температуре
- время «жизни» смеси 25...35 мин
- полная полимеризация длится 24 часа
- «время жизни» можно увеличить, уменьшив процентное содержание компонента **В** в смеси

При содержании компонента **В** менее 1,5% полимеризация при комнатной температуре не происходит. Для полимеризации такой смеси требуется нагрев. Температуру нагрева выбирают, исходя из термостойкости заливаемых компаундом материалов. Чем больше температура, тем меньше время полимеризации. Максимальная температура нагрева 200°C. Для каждого изделия температура подбирается отдельно, исходя из конструкции, массы и материалов, применяемых в изделии.

ВНИМАНИЕ! Компонент **В** хранить в темном месте в плотно закрытом сосуде.



**Удельное объемное
сопротивление 10^{14} Ом·см**

**Теплопроводность
1,0...1,2 Вт/(м·К)**

**Пробивное напряжение
не менее 3,5кВ
(при толщине 0,22 мм)**

**Тангенс угла
диэлектрических потерь
(при 1000 Гц) — (4...4,5) 10^{-3}**

**Рабочая температура
-60 ... +250°C**

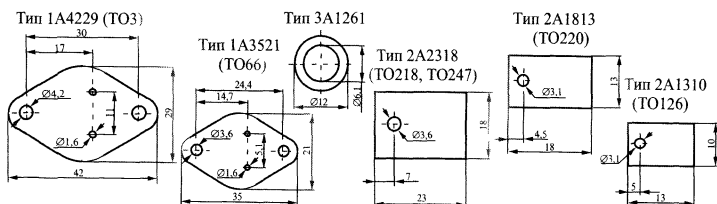
Эластичные прокладки, армированные стеклотканью

Обеспечивают

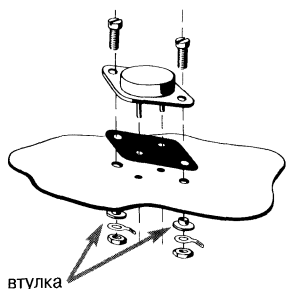
- Интенсивный теплоотвод от нагреваемой поверхности
- Монтаж полупроводниковых элементов без нанесения теплопроводящей пасты, что гарантирует чистоту и сокращает время сборки
- Высокую эластичность, гарантирующую надежный контакт в соединении полупроводник подложка—радиатор
- Снижение себестоимости за счет уменьшения трудоемкости сборки и замены дорогостоящей керамики
- Экологическую чистоту

ПОСТАВКА:

- Листами размером 220×150×(0,22±0,02) мм
- В виде готовых подложек под стандартные корпуса
- Возможно нанесение липкого слоя



- Срок изготовления не более 10 дней
- По желанию заказчика возможно изготовление подложек требуемой формы и размеров



Изолирующие втулки

- Обеспечивают изоляцию полупроводниковых приборов от корпуса радиатора при креплении винтами
- Материал — полипропилен
- Температура эксплуатации не более 180°C
- Внутренний диаметр 2,5; 3,0 мм

По вопросам поставок материалов обращайтесь в фирму «ДОДЭКА» — официальному дистрибьютору НОМАКОН:

Москва: тел /факс (095) 366-24-29
366-81-45
366-11-55

E-mail icmarket@dodeca.ru

