

Глава шестая

Магний

6.1. МАТЕРИАЛЫ

Магний

Плотность магния $1.7 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ 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.

Магниевого 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. Магниевого 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.

Магниевого 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							
—	HK31A	rem	—	—	—	3.0	0.6
—	HM21A	rem	—	—	0.6	2.0	—
—	HM31A	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 сплавов снимается примерно за 1 ч при температурах 150...200°C для твердопрокатанных тонких листов или за 15 мин при 200...260°C для прессованных выдавливанием или горячей объемной штамповкой. Для ковких магниевых сплавов этот режим будет составлять 30 мин при температурах 300...400°C. Для ковких магниевых 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 сплавов при 20°C равна $7 \cdot 10^6$ Ом⁻¹·м⁻¹. Для литейных магниевых сплавов и т.д. сплавов она колеблется примерно от 14 до $15 \cdot 10^6$ Ом⁻¹·м⁻¹. Ковкие магниевые сплавы имеют электрическую проводимость около $20 \cdot 10^6$ Ом⁻¹·м⁻¹, магниевые сплавы — $10 \cdot 10^6$ Ом⁻¹·м⁻¹ и магниевые сплавы — от 16 до $19 \cdot 10^6$ Ом⁻¹·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]	Текучесть		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 формуетостью и свариваемостью
MAG-121	AZ61A	Основного назначения сплав, сваривается газовой и аргонодуговой сваркой
Магниево-цинково-марганцевые сплавы		
MAG-131	—	Средней прочности сплав с хорошей формуетостью 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 $8.88 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, 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 прочность, 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 спецификации 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	—
Хастелой 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			
В-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, Инколой 800 — $7.95 \cdot 10^3$, Инколой 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 [%]
Нимокаст 80	700	970	680	12
	1000	75	40	82
Нимокаст 90	700	540	400	18
	900	154	77	40
Нимокаст 713	760	940	745	6
	980	470	305	20
Нимокаст PD21	700	810	780	2
	1000	560	390	4
Нимокаст 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
	HW	20	450	170	30
		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	Пруток, 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 800H	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 80A	Лопатки и части газовых турбин, литые под давлением втулки и сердечники
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 ... 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, Обработываемость 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	8
				400	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	$60 \dots 70$
Ti—6Al—2Sn—4Zr—2Mo	Обработка на твердый раствор, старение	$50 \dots 60$
α-β-фазы		
Ti—6Al—4V	Отожжен	$50 \dots 60$
Ti—4Al—4Mo—2Sn—0.5Si	Горячаяковка	$45 \dots 55$
	Обработка на твердый раствор, старение	$40 \dots 50$
Ti—4Al—4Mo—4Sn—0.5Si	То же	$30 \dots 40$
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	Твердость		
		Шарпи [Дж]	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, штампуются и обрабатываются 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 прутки

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. Аминсмолы (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 из 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, поликарбонаты, 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

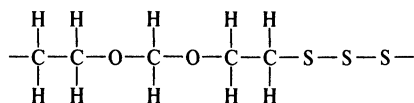


Рис. 9.11. Полисульфид

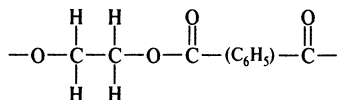


Рис. 9.12. Полиэтилентерефталат

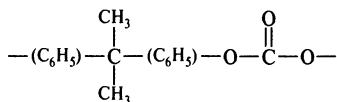


Рис. 9.13. Поликарбонат

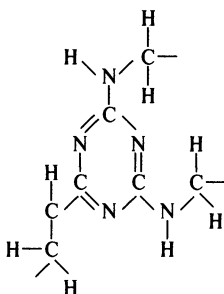


Рис. 9.14. Меламин-формальдегид

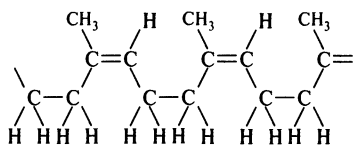


Рис. 9.15. Цис-полиисопрен, цепь натурального каучука до вулканизации

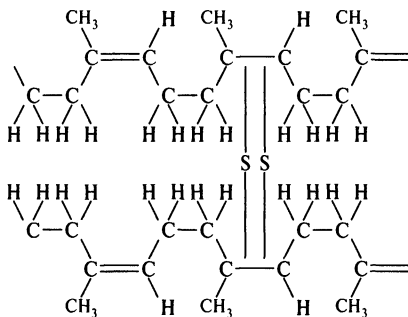


Рис. 9.16. Вулканизированный каучук, связанные серой полиисопреновые цепи

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. Большее 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. Большее 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
Полиуретан	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
Полизфир	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
Полизфир без наполнителя	1300
Полизфир, 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
Полууретан	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		66
Поликарбонат	Аморфный	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
Полисulfон	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
Полизфир без наполнителя	55	2.4	—	200
Полизфир, 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 коэфф. линейного расширения [$10^{-5} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]	Удельная теплемкость [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
Поллиуретан, 16	—	—	0.040
Поллиуретан, 32	—	—	0.023
Поллиуретан, 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 пайка	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 свето-фильтров, 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, возможен эксплуатация при относительно высоких температурах. Трубки фитингов, части водяных насосов и моечных 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 мочных 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
Полихлоропрен	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 и термостойкости 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.)

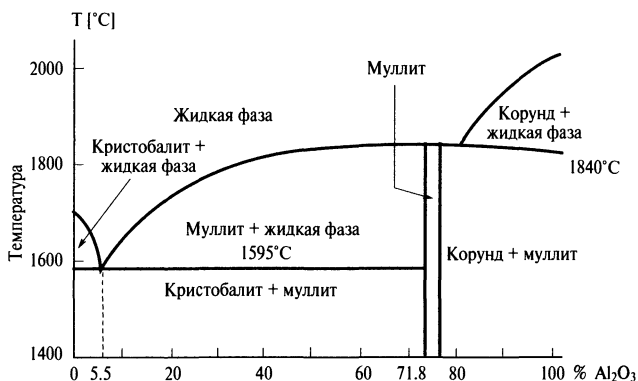


Рис. 10.1. Равновесная диаграмма кремнезем—глинозем

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, высокоабразивные 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 стекла 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 стекла — 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°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
Плавленный 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-стареющие 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 полибутадиена: получается продукт, который называют высокостойким к ударам полистиролом (HIPS). Стирол-акрилонитрил становится жестким с полибутадиеном или стирол-бутадиен сополимером, давая акрилонитрилбутадиенстирол, 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-стареющими сталями (см. Гл. 3) и сплавами алюминия (см. Гл. 4).

Другой путь, вводящий рассеянием 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% Е 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% Е 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.

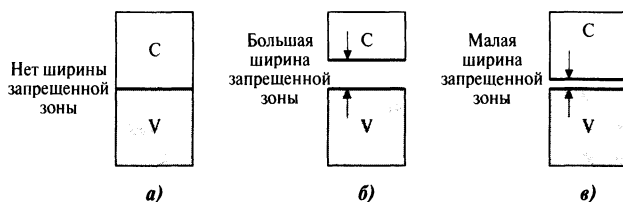


Рис. 12.1. Энергетические зоны для: *а* — хорошего проводника, *б* — изолятора, *в* — полупроводника;
C — зона проводимости, V — валентная зона

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.

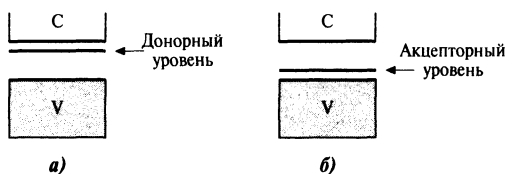


Рис. 12.2. Типы проводимости в полупроводниках:

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 $\tan \delta$, который дается соотношением

$$\tan \delta = \frac{\text{потери энергии за цикл}}{2\pi + \text{максимум запасенной энергии}}.$$

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%)	6.2	28
желтая	6.4	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.

Диамagnetные 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.

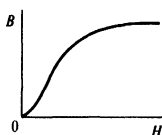


Рис. 13.1. Зависимость B - H для литейной стали

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.

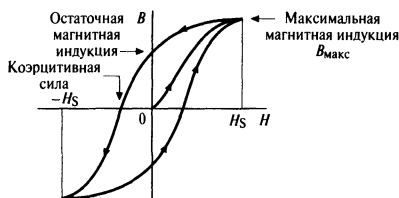


Рис. 13.2. Петля гистерезиса

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 магнитомягкие 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. μ_r	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
Ферроксикуб, 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				
Ални	—	—	—	—
Маглой 6	0.56	46	10	1030
Алнико	—	—	—	—
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 расходуетс^я 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
Древесины, перпендикулярные структуре	2...12
Эластомеры	2...12
Древесины, 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 окалина, 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	Магнелиевые 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 углерода—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 800H — 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
Высокое	Газированная вода
	Все керамики
	Стекла
	Свинцовые сплавы
	Сплавы сталей

Табл. 15.1 (продолжение)

Сопротивление коррозии	Материал
Высокое	Никелевые сплавы
	Медные сплавы
	PTFE, полипропилен, нейлон, эпоксидная смола, полистирол, PVC
Среднее ч	Алюминиевые сплавы
	Полиэтилен, полиэфир
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
	Полиэфир
Низкое	Низколегированные стали
	Углеродистые стали
Ультрафиолетовая радиация	
Высокое	Все керамики
	Стекла
	Все сплавы
Среднее	Эпоксидные смолы, полиэфир, 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
	Магниеые сплавы
Среднее	Алюминиевые сплавы
	Углеродистые стали
Низкое	Полистирол, полиуретан, нейлон, полиэфир
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, ABC, 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
Магнелиевые	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 поверхностно 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, приспосабливается 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 α 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

$$\alpha = \frac{L_t - L_0}{L_0 T} \text{ К}^{-1}.$$

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 $U = \frac{\lambda}{\Delta x}$.

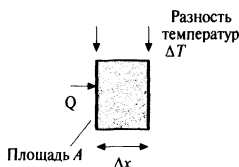


Рис. 16.1. Теплопроводность

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	—	—
Стеклоянное волокно 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 чистовой 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 материалы—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/м³, 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.

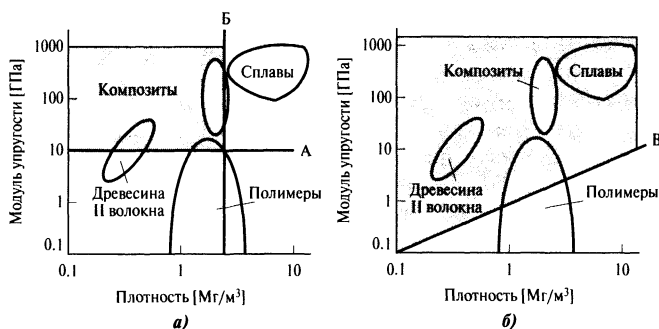


Рис. 17.1. Диаграммы свойств:

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
Пруток высокоуглеродистой стали	2.3
Отливка литейного чугуна	2.4
Пруток марганцевой стали	2.5
Латунный лист	5.1
Медный лист	8.3
Лист нержавеющей стали	8.5
Алюминиевый прут	8.5
Пруток никель-хромистой стали	4.6
Латунный прут	6.6
Алюминиевый лист	7.1
Алюминиевая отливка	9.6
Пруток нержавеющей стали	9.6
Пруток фосфорной бронзы	16.0
Пруток 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 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 термопластиками 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 термореактивная 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 клейких 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.

Полиэфиры. 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 сопротивлением 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 EPDM, 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.

Оксид 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 оксид 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 впадин, 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**.

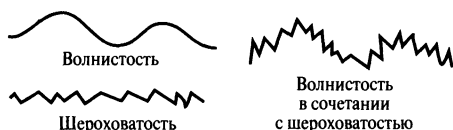


Рис. 19.1. Конечные виды поверхности

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 [деталей/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, лопатки турбин, компоненты блоков
Центробежное	Трубы, барабанные тормоза, маховички шкивов, орудийные 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	Ø 3 мм	Ø 6 м	0.8...3.2	≥ 3000
Прессование ударным выдавливанием	То же	0.1...20	Ø 6 мм	Ø 0.15 м	0.8...3.2	≥ 2000
Экструзия горячая холодная	Более всего подходит пластичным материалам	1...100	Ø 8 мм	Ø 500 мм	0.8...3.2	≥ 720 м
		0.1...100	Ø 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 выталкиванию 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 revolverной 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	Наименее гладкая
Сверление	8...1.6	Средняя по чистоте обработки
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	Большой 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	Большой 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	Центрбежная 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

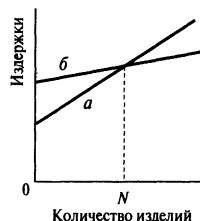


Рис. 19.3. Графическое решение задачи

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 не прямые 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.1. Стандартные приставки для единиц системы СИ

Коэффициент умножения	Степень 10	Приставка	Обозначение	
			русское	международное
1000000000000000000000000	10^{24}	= уотта		Y
100000000000000000000000	10^{21}	= зетта		Z
100000000000000000000000	10^{18}	= экса	Э	E
100000000000000000000000	10^{15}	= пета	П	P
100000000000000000000000	10^{12}	= тера	Т	T
10000000000	10^9	= гига	Г	G
1000000	10^6	= мега	М	M
1000	10^3	= кило	к	k
100	10^2	= гекто	г	h
10	10	= дека	да	da
0.1	10^{-1}	= деци	д	d
0.01	10^{-2}	= санти	с	c
0.001	10^{-3}	= милли	м	m
0.000001	10^{-6}	= микро	мк	μ
0.000000001	10^{-9}	= нано	н	n
0.000000000001	10^{-12}	= пико	п	p
0.000000000000001	10^{-15}	= фемто	ф	f
0.000000000000000001	10^{-18}	= атто	а	a
0.000000000000000000001	10^{-21}	= зепто		z
0.00000000000000000000001	10^{-24}	= уокто		y

системе единиц длины служит фут (ft), 1 фут = 0.3048 м. Единицей массы принят фунт (lb), 1 фунт = 0.4536 кг. Единицей времени является секунда (так же, как в системе СИ). В системе fps производной единицей силы, которой дано специальное наименование, является паундаль (pdl), 1 паундаль = 0.1383 Н. Однако более общей единицей силы является фунт силы (lbf). Это есть гравитационная сила, действующая на массу в 1 фунт (lb). Поскольку стандартное значение ускорения, данное по отношению к весу, есть 32.174 фут/с^2 , то 1 фунт силы = 32.174 паундаль = 4.448 Н. Иногда применяется подобная единица — килограмм-сила (кгс). Это гравитационная сила, действующая на массу в 1 кг, и поскольку стандартная величина ускорения, данная к весу, есть 9.80665 м/с^2 , то 1 кгс (kgf) = 9.80665 Н. В США часто применяется единица напряжения psi, или фунт силы на дюйм квадратный: $1 \text{ psi} = 6.895 \cdot 10^3 \text{ Па}$. В Табл. А.2 приведены коэффициенты преобразования системы fps в систему СИ и наоборот.

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 K
	1°F = 5/9 K, (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
Диамagnetики	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
Магниеые 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
магниеые сплавы ковкие	176
магниеые 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-старяющие	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
магнелиевые сплавы ковкие	179
магнелиевые 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
магнелиевые 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
магнелиевые 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
Соппротивление	
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
заэвтектоидные	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
магнелиевые 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

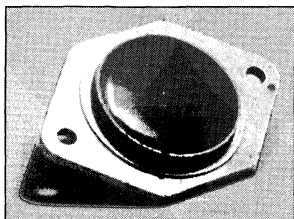
Подписано в печать 2.06.2004. Формат 84х108/32. Бумага типограф. № 2.

Гарнитура «Times New Roman Суг». 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** $10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}$

Теплопроводность
 $1 \dots 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

Электрическая прочность
 $15 \text{ кВ}/\text{мм}$

**Тангенс угла
диэлектрических потерь**
(при 1000 Гц) — $(4 \dots 4,5) \cdot 10^{-3}$

Рабочая температура
 $-60 \dots +250^\circ\text{C}$

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 $\text{tg } \delta$ малочувствительны к изменению частоты, что позволяет использовать материал в высокочастотной технике. При возрастании частоты от 100 до 10^6 Гц $\text{tg } \delta$ изменяется от $3,0 \times 10^{-4}$ до $9,5 \times 10^{-4}$ при $\epsilon = \text{const}$

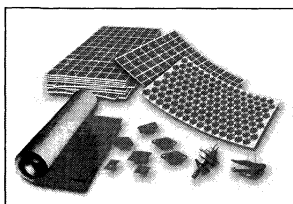
ПОСТАВКА в виде двух компонентов: **А** — керамико-полимерная композиция, **В** — катализатор.

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) — $(4...4,5) \cdot 10^{-3}$**

**Рабочая температура
-60 ... +250°C**

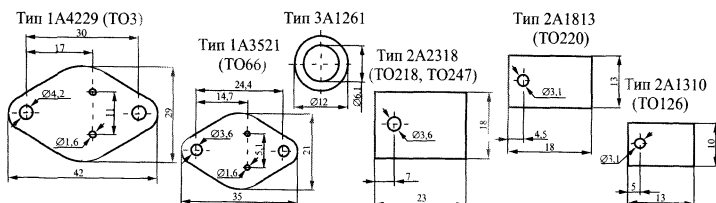
Эластичные прокладки, армированные стеклотканью

Обеспечивают

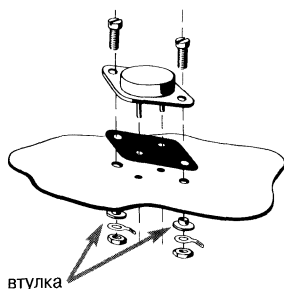
- Интенсивный теплоотвод от нагреваемой поверхности
- Монтаж полупроводниковых элементов без нанесения теплопроводящей пасты, что гарантирует чистоту и сокращает время сборки
- Высокую эластичность, гарантирующую надежный контакт в соединении полупроводник подложка—радиатор
- Снижение себестоимости за 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

