

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Издание 2-е, переработанное и дополненное**

**Под редакцией проф., докт. техн. наук Ю.П.Солнцева**

**Рекомендовано Государственным комитетом  
Российской Федерации по высшему образованию  
в качестве учебника для студентов  
высших технических учебных заведений**

**МОСКВА • МИСИС • 1996**

**Издание включено в Федеральную программу книгоиздания  
в России на 1996 г.**

**А в т о р ы:** Ю.П.Солнцев, В.А.Веселов, В.П.Демянцевич, А.В.Кузин,  
Д.И.Чашников

**Р е ц е н з е н т:** кафедра «Металловедение» Санкт-Петербургского  
технического университета

**УДК 669.017**

**Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учеб-  
ник для вузов/ Солнцев Ю.П., Веселов В.А., Демянцевич В.П., Кузин  
А.В., Чашников Д.И. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: •МИСИС•, 1996.  
— 576 с.**

Во втором издании (первое вышло в 1988 г.) изложены основы металловедения черных и цветных металлов, теории и практики термической обработки, литья, обработки давлением, сварки, обработки резанием. Включен новый раздел, в котором рассмотрены закономерности формирования структуры неметаллических материалов, их основные механические, технологические свойства, применение. Описаны теория разрушения, хладноломкости, поведение конструкционных материалов, сварных и паяных соединений в различных температурно-силовых условиях. Рассмотрены традиционные и новейшие способы получения и обработки конструкционных материалов, их технико-экономические показатели, области применения материалов, пути автоматизации обработки, методы механических испытаний.

Учебник рекомендован для студентов высших технических учебных заведений. Может быть также рекомендован студентам вузов, обучающимся по специальностям «Физика металлов», «Материаловедение и технология новых материалов», «Техника и физика низких температур». Ил. 286. Табл. 38. Библиогр. список: 24 назв.

2004070000

ISBN 5-87623-022-7

© Солнцев Ю.П., Веселов В.А., Демянцевич В.П.,  
Кузин А.В., Чашников Д.И., •МИСИС•, 1996

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	12
<b>Раздел I. ПРОИЗВОДСТВО ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ</b>	<b>14</b>
<b>Глава 1. Metallургия чугуна . . . . .</b>	<b>14</b>
1. Исходные материалы для доменного производства . . . . .	14
2. Доменная печь . . . . .	16
3. Доменный процесс . . . . .	19
4. Производство литейного чугуна . . . . .	21
<b>Глава 2. Metallургия стали . . . . .</b>	<b>22</b>
1. Кислородно-конвертерное производство стали . . . . .	22
2. Мартеновское производство стали . . . . .	26
3. Производство стали в электропечах . . . . .	31
4. Рафинирование стали в установках для переплава . . . . .	35
5. Разливка стали . . . . .	37
6. Внепечные способы рафинирования стали . . . . .	40
<b>Глава 3. Metallургия цветных металлов . . . . .</b>	<b>41</b>
1. Производство меди . . . . .	41
2. Производство алюминия . . . . .	44
3. Производство магния . . . . .	47
4. Производство титана . . . . .	48
<b>Раздел II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>Глава 1. Строение и кристаллизация металлов . . . . .</b>	<b>51</b>
1. Общие сведения . . . . .	51
2. Кристаллическое строение металлов . . . . .	52
3. Дефекты строения кристаллических тел . . . . .	56
3.1. Точечные дефекты . . . . .	57
3.2. Линейные дефекты . . . . .	58
3.3. Теоретическая и фактическая прочность . . . . .	60
3.4. Поверхностные дефекты . . . . .	63
4. Кристаллизация металлов . . . . .	64
4.1. Энергетические условия кристаллизации . . . . .	64
4.2. Механизм процесса кристаллизации . . . . .	67
4.3. Строение слитка спокойной стали . . . . .	69
5. Методы исследования внутреннего строения металлов . . . . .	71
5.1. Металлографические методы исследования . . . . .	71
5.2. Рентгеноструктурный анализ (РСА) . . . . .	73

5.3. Микроструктурный анализ (МРСА)	73
<b>Глава 2. Деформация и разрушение металлов .</b>	<b>74</b>
1. Свойства металлов и сплавов .	74
2. Упругая и пластическая деформация . . . .	74
3. Хрупкое и вязкое разрушение . . . . .	76
4. Факторы, определяющие характер разрушения .	80
5. Наклеп, возврат и рекристаллизация .	84
<b>Глава 3. Испытания механических свойств и склонности к хрупкому разрушению . . . . .</b>	<b>89</b>
1. Общие сведения . . . . .	89
2. Особенности испытаний при низких температурах . . . . .	89
3. Статические испытания .	90
4. Динамические испытания . . . . .	94
5. Испытания долговечности металлов . . . . .	98
5.1. Усталостные испытания . . . . .	98
5.2. Испытания на ползучесть . . . . .	101
6. Трепцистойкость металлов и коэффициент интенсивности напряжений . . . . .	103
7. Испытания на вязкость разрушения . . . . .	109
<b>Глава 4. Строение металлических сплавов и диаграммы состояния . . . . .</b>	<b>113</b>
1. Общие сведения . . . . .	113
2. Основные типы диаграмм состояния . . . . .	116
2.1. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов . . . . .	116
2.2. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии . . . . .	117
2.3. Правило отрезков . . . . .	117
2.4. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии . . . . .	119
2.5. Диаграмма состояния сплавов с перитектическим превращением . . . .	120
2.6. Диаграмма состояния сплавов, образующих химические соединения .	121
2.7. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих полиморфные превращения . .	122
<b>Глава 5. Железо и его сплавы .</b>	<b>122</b>
1. Компоненты и фазы в сплавах железа с углеродом .	122
2. Диаграмма состояния системы железо—цементит (метастабильное равновесие)	124
3. Диаграмма состояния системы железо—графит (стабильное равновесие)	131
4. Углеродистые стали .	132
4.1. Влияние углерода на свойства стали	133
4.2. Влияние примесей на свойства стали	134
4.3. Классификация углеродистых сталей	135
4.4. Стали обыкновенного качества .	136
4.5. Качественные углеродистые стали .	136
5. Чугуны . . . . .	138

5.1. Виды чугунов .	138
5.2. Факторы, способствующие графитизации .	139
5.3. Микроструктура и свойства чугуна . . . .	142
<b>Глава 6. Теоретические основы термической обработки .</b>	<b>147</b>
1. Общие сведения	147
2. Виды термической обработки стали .	149
3. Превращения в стали при нагреве. Образование аустенита . . . .	151
4. Превращение аустенита в перлит при охлаждении. Диаграмма изотермического превращения аустенита .	155
5. Мартенситное превращение аустенита	159
6. Превращения при отпуске закаленной стали . . . . .	162
<b>Глава 7. Технология термической обработки стали .</b>	<b>163</b>
1. Отжиг и нормализация . . . . .	163
2. Закалка стали .	165
3. Отпуск закаленной стали . .	172
4. Термомеханическая обработка (ТМО) стали . . .	174
<b>Глава 8. Поверхностное упрочнение стальных деталей . .</b>	<b>175</b>
1. Упрочнение поверхности методом пластического деформирования . . . . .	175
2. Поверхностная закалка . . . . .	176
3. Химико-термическая обработка стали . . . .	178
3.1. Общие сведения .	178
3.2. Цементация стали . . . . .	179
3.3. Азотирование стали . . .	182
3.4. Цианирование стали	183
3.5. Диффузионная металлизация . . . . .	184
<b>Глава 9. Легированные стали . . . . .</b>	<b>185</b>
1. Влияние легирующих элементов . . . . .	185
1.1. Влияние легирующих элементов на свойства феррита . . . . .	186
1.2. Карбиды в легированных сталях . . . . .	187
1.3. Влияние легирующих элементов на превращения в стали . . . . .	187
1.4. Особенности закалки и отпуска легированных сталей . . . . .	189
2. Классификация легированных сталей . . . . .	189
3. Маркировка легированных сталей . . . . .	191
<b>Глава 10. Конструкционные стали . . . . .</b>	<b>192</b>
1. Характеристика конструкционных сталей . . . . .	192
2. Стали для строительных конструкций . . . . .	193
3. Цементуемые стали .	195
4. Улучшаемые стали . . . . .	195
5. Высокопрочные стали .	198
6. Рессорно-пружинные стали .	200
7. Подшипниковые стали . . .	201
8. Износостойкая аустенитная высокомарганцевая сталь . . . . .	202

<b>Глава 11. Инструментальные стали . . . . .</b>	<b>203</b>
1. Стали для режущего инструмента .	203
1.1. Требования к сталям .	203
1.2. Углеродистые стали . .	204
1.3. Легированные стали .	206
1.4. Быстрорежущие стали . .	207
2. Металлокерамические твердые сплавы .	211
3. Стали для измерительного инструмента . . . .	214
4. Штамповые стали . . . .	214
4.1. Стали для штампов холодного деформирования . .	214
4.2. Стали для штампов горячего деформирования . . . . .	217
<b>Глава 12. Стали и сплавы со специальными свойствами . . . . .</b>	<b>218</b>
1. Коррозионностойкие стали . . . . .	218
1.1. Общие сведения . . . . .	218
1.2. Хромистые стали . . . . .	221
1.3. Аустенитные хромоникелевые стали . . .	222
1.4. Другие методы защиты от коррозии . . .	223
2. Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы . . . . .	224
3. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами . . . . .	227
3.1. Магнитные стали и сплавы . . . . .	227
3.2. Электротехнические стали и сплавы . .	228
3.3. Сплавы с малым температурным коэффициентом линейного расширения . . . .	228
3.4. Сплавы для упругих элементов . . . . .	229
3.5. Сплавы с эффектом памяти формы . . .	229
<b>Глава 13. Цветные металлы и сплавы . . .</b>	<b>230</b>
1. Титан и его сплавы . .	230
2. Алюминий и его сплавы . . . . .	233
2.1. Применение и основные свойства . . . .	233
2.2. Классификация алюминиевых сплавов . . . .	235
2.3. Деформируемые алюминиевые сплавы	237
2.4. Литейные алюминиевые сплавы	240
3. Композиционные материалы . . .	241
3.1. Общие сведения .	241
3.2. Строение композиционных материалов . .	242
3.3. Дисперсноупрочненные композиционные материалы на основе алюминия .	243
3.4. Армированные композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов .	244
4. Магний и его сплавы	246
5. Медь и ее сплавы . .	247
5.1. Основные свойства меди .	247
5.2. Сплавы меди с цинком, или латуни .	249
5.3. Бронзы . . . . .	252

6. Антифрикционные сплавы .	256
7. Припой	259
<b>Глава 14. Порошковые материалы</b>	<b>259</b>
1. Общие сведения . . . . .	259
2. Конструкционные материалы . .	261
3. Антифрикционные материалы .	265
4. Фрикционные материалы .	269
5. Пористые фильтрующие элементы .	269
<b>Глава 15. Металлы и сплавы для работы при низких температурах . . . . .</b>	<b>271</b>
1. Общие сведения .	271
2. Свойства и применение сталей при низких температурах . .	273
2.1. Влияние легирующих элементов на хладноломкость сталей климатического холода . .	274
2.2. Ферритные низкоуглеродистые никелевые стали . . . . .	277
2.3. Аустенитные стали . .	278
2.4. Железоникелевые сплавы . . .	281
3. Свойства и применение алюминиевых сплавов при низких температурах . . . .	283
4. Свойства и применение сплавов титана при низких температурах . . . . .	285
5. Свойства и применение сплавов меди при низких температурах . . . . .	287
6. Выбор конструкционных материалов для работы при низких температурах . . . . .	289
6.1. Механические свойства . . . . .	289
6.2. Совместимость с рабочей средой .	291
6.3. Физические свойства .	292
6.4. Технологические свойства .	294
<b>Глава 16. Неметаллические материалы . . . . .</b>	<b>296</b>
1. Общие сведения . . .	296
1.1. Состав и строение полимеров . . . . .	296
1.2. Основные свойства полимеров . . . . .	300
2. Пластические массы . . . .	303
2.1. Термопластичные пластмассы .	306
2.2. Термореактивные пластмассы .	311
3. Резины .	313
4. Клеящие материалы . . . . .	316
5. Лакокрасочные материалы . .	318
6. Стекло . . .	321
7. Керамические материалы . . . .	324
8. Применение неметаллических материалов в криогенной, холодильной, пищевой и торговой технике .	329
<b>Раздел III. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО . . . . .</b>	<b>336</b>
<b>Глава 1. Технология изготовления отливок в песчаных формах</b>	<b>337</b>
1. Общие понятия . . . . .	337

2. Формовочные материалы .	340
3. Оснастка .	342
4. Ручная формовка . .	342
5. Машинная формовка . .	344
6. Изготовление стержней . . . . .	348
7. Окраска и сборка форм .	350
8. Заливка и другие окончательные операции . . . . .	351
<b>Глава 2. Специальные способы литья . . . . .</b>	<b>352</b>
1. Литье в кокиль . . . . .	352
2. Литье по выплавляемым моделям . .	354
3. Центробежное литье . . . . .	356
4. Литье под давлением . . . . .	357
5. Литье в оболочковые формы . . . . .	360
6. Другие специальные способы литья . . . . .	363
<b>Глава 3. Конструирование литых деталей . . . . .</b>	<b>365</b>
1. Классификация дефектов . . . . .	365
2. Выбор вида технологического процесса . . . . .	367
3. Анализ технологичности . . . . .	369
<b>Раздел IV. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ (ОМД)</b>	<b>373</b>
<b>Глава 1. Общие сведения . . . . .</b>	<b>373</b>
<b>Глава 2. Прокатка . . . . .</b>	<b>376</b>
1. Способы прокатки . . . . .	376
2. Классификация прокатных станов . . . . .	377
3. Основы технологии продольной прокатки . . . . .	378
4. Производство бесшовных труб . . . . .	381
5. Специальные виды прокатки . . . . .	382
6. Производство гнутых профилей . . . . .	386
7. Производство сварных труб . . . . .	387
<b>Глава 3. Волочение . . . . .</b>	<b>389</b>
1. Основные понятия и закономерности процесса волочения .	389
2. Производство проволоки . . . . .	390
3. Производство прутков и профилей .	391
4. Производство труб . . . . .	392
<b>Глава 4. Прессование . . . . .</b>	<b>393</b>
1. Прессовое оборудование . . . . .	393
2. Технология прессования . . . . .	393
3. Гидроэкструзия . . . . .	395
<b>Глава 5. Свободная ковка . . . . .</b>	<b>397</b>
1. Общие сведения . . . . .	397
2. Технологияковки . . . . .	400

<b>Глава 6. Объемная и листовая штамповка .</b>	<b>401</b>
1. Горячая объемная штамповка	402
2. Холодная объемная штамповка	404
3. Листовая штамповка .	404
<b>Глава 7. Пути совершенствования методов обработки металлов давлением</b>	<b>407</b>
1. Эффект сверхпластичности и его использование в процессах ОМД .	407
2. Высокоскоростные и импульсные методы обработки металлов давлением	410
<b>Раздел V. СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .</b>	<b>412</b>
<b>Глава 1. Сущность процесса и основные способы сварки плавлением и давлением .</b>	<b>412</b>
1. Роль и место технологического процесса сварки в современном производстве .	412
2. Физическая сущность и основные способы процесса сварки . . . .	413
3. Сущность основных способов сварки плавлением и область их рационального применения . . . . .	415
4. Сущность основных способов сварки давлением . . . . .	427
<b>Глава 2. Влияние процесса сварки на качество сварных конструкций. Сварочное оборудование . . . . .</b>	<b>436</b>
1. Сварочные материалы . . . . .	436
2. Тепловое воздействие сварочного источника на свариваемый металл. Методы расчетного определения параметров режима сварки . . . . .	441
3. Деформации и напряжения, возникающие при сварке, и способы борьбы с ними . . . . .	443
4. Источники питания для сварки . . . . .	448
5. Автоматическое регулирование процессов дуговой сварки .	453
<b>Глава 3. Пайка и газокислородная резка металлов .</b>	<b>455</b>
1. Пайка металлов . . . . .	455
2. Газокислородная резка металлов .	459
<b>Раздел VI. ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ . .</b>	<b>467</b>
<b>Глава 1. Основные сведения о процессе обработки металлов резанием .</b>	<b>467</b>
1. Схемы обработки и классификация движений в процессе резания . . . . .	467
2. Элементы токарного проходного резца . . . . .	468
3. Элементы резания и параметры срезаемого слоя .	472
4. Процесс резания и образования стружки .	473
5. Наростообразование при резании металлов .	474
6. Силы резания и мощность при точении .	475
7. Тепловые явления при резании .	476
8. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей .	477
9. Износ и стойкость режущих инструментов . . . . .	478

10. Упрочнение при обработке резанием . . . . .	478
11. Производительность и выбор режима резания	480
12. Материалы для изготовления режущих инструментов . .	481
13. Обрабатываемость материалов . . . . .	482
<b>Глава 2. Металлорежущие станки и их кинематические основы . .</b>	<b>483</b>
1. Классификация и обозначение металлорежущих станков . . .	483
2. Приводы и передачи металлорежущих станков .	486
3. Элементарные механизмы станков .	489
4. Настройка кинематических цепей станков .	493
<b>Глава 3. Станки токарной группы .</b>	<b>496</b>
1. Общие сведения .	496
2. Классификация и типы токарных резцов .	497
3. Основные узлы токарно-винторезного станка . . . . .	498
4. Крепление заготовок и инструментов на токарно-винторезных станках . . . . .	499
5. Работы, выполняемые на токарно-винторезных станках . . . . .	501
6. Обработка заготовок на токарно-револьверных станках . . . . .	503
7. Токарно-карусельные и лобовые станки . . . . .	506
8. Обработка заготовок на токарных автоматах и полуавтоматах . . . . .	508
<b>Глава 4. Обработка на сверлильных и расточных станках . .</b>	<b>510</b>
1. Сверление отверстий . . . . .	510
2. Элементы и силы резания при сверлении .	511
3. Зенкерование, развертывание, нарезание резьб . . . . .	512
4. Приспособления для сверлильных станков .	514
5. Сверлильные станки . . . . .	516
6. Обработка заготовок на расточных станках . . . . .	517
<b>Глава 5. Обработка на фрезерных станках . . . . .</b>	<b>521</b>
1. Сущность фрезерования и классификация фрез . .	521
2. Элементы резания при фрезеровании .	523
3. Силы и мощность резания при фрезеровании . . . . .	525
4. Обработка заготовок на консольно-фрезерных станках .	526
5. Обработка заготовок на продольно-фрезерных станках . . . . .	527
6. Приспособления для фрезерных станков. Универсальные делительные головки . .	528
7. Приспособления для закрепления фрез .	532
<b>Глава 6. Обработка на строгальных, долбежных, протяжных станках .</b>	<b>534</b>
1. Особенности обработки строганием и долблением . . . . .	534
2. Строгальные и долбежные резцы .	536
3. Строгальные станки	537
4. Обработка заготовок на долбежных и протяжных станках .	539
5. Протяжные станки . .	542
<b>Глава 7. зубонарезание .</b>	<b>543</b>
1. Общие сведения .	543
2. Нарезание зубчатых колес методом копирования . . . . .	544

3. Нарезание зубчатых колес методом обкатки .	545
4. Изготовление зубчатых колес на зубофрезерных станках .	545
5. Изготовление зубчатых колес на зубодолбежных и зубострогальных станках .	548
<b>Глава 8. Обработка абразивными материалами .</b>	<b>550</b>
1. Общие сведения .	550
2. Абразивные материалы и инструменты .	551
3. Схемы шлифования .	554
4. Отделочные методы абразивной обработки .	557
<b>Глава 9. Основные направления автоматизации обработки на металлорежущих станках .</b>	<b>560</b>
1. Общие сведения . .	560
2. Станки с программным управлением . .	561
3. Многооперационные станки . .	562
4. Автоматические поточные линии и гибкие автоматические производства . . . . .	563
<b>Глава 10. Обработка заготовок методами пластического деформирования . . . . .</b>	<b>564</b>
1. Сущность методов обработки пластическим деформированием . .	564
2. Формообразующие методы . . . . .	565
3. Упрочняющие-калибрующие методы .	566
<b>Глава 11. Электрофизикохимические методы обработки . . . . .</b>	<b>568</b>
<b>Рекомендательный библиографический список . . . .</b>	<b>570</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>571</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник соответствует программам курсов «Технология конструкционных материалов» и «Материаловедение» для студентов машиностроительных и металлургических вузов. Эти курсы вместе с другими общетехническими дисциплинами дают студентам необходимую общепрофессиональную, технологическую подготовку, закладывают основы знаний, необходимых как при работе на производстве, так и в научно-исследовательских и проектных институтах. При конструировании и изготовлении машин и приборов, организации их эксплуатации и ремонта инженер-механик в повседневной работе сталкивается с конструкционными материалами и их использованием. Для успешного решения многих практических задач необходимы сведения о современных способах получения и обработки материалов, их свойствах и рациональных областях применения.

Технология конструкционных материалов является комплексной дисциплиной, в которой рассматриваются основные сведения о способах производства этих материалов и их обработке с целью получения деталей с заданными свойствами и конфигурацией, пригодными для использования в машинах и конструкциях.

Материаловедение рассматривает строение и свойства металлов, сплавов и других конструкционных материалов. Изучение этого курса позволяет осуществить рациональный выбор материалов для конкретных применений.

Различают две основные группы материалов: металлы и их сплавы и неметаллические материалы. Металлы и сплавы разделяют на черные и цветные. К черным металлам относятся железо и сплавы на его основе: сталь и чугун. К цветным относятся все остальные металлы: алюминий, медь, титан, магний, свинец, олово, никель и т.д. В современной технике используется не менее 65 наименований цветных металлов.

Из всех металлов и сплавов наиболее важную роль в машиностроении играет сталь. Доля производства стали составляет 95 % всех металлических материалов. Широкая распространенность стали обусловлена тем, что она обладает редким сочетанием свойств. При сравнительно низкой стоимости сталь характеризуется высокой прочностью, пластичностью и вязкостью в сочетании с хорошими технологическими свойствами. Затраты энергии на производство единицы массы стальных деталей (их энергоемкость) значительно ниже затрат на производство деталей из алюминия, титана и других металлов. Поэтому сталь широко используется во всех областях техники и объем ее производства характеризует экономический потенциал страны. Суммарная масса стальных

изделий и конструкций, находящихся на службе человечества, т.е. современный металлический фонд, составляет около 7 млрд. т.

Современное производство стали в мире составляет более 600 млн. т в год и по крайней мере на ближайшее столетие сталь сохранит свое значение как важнейший конструкционный материал. Из других металлов наиболее интенсивно будет развиваться производство алюминия и его сплавов. Содержание железа в земной коре составляет 4,6 %, а алюминия — 8,8 %, т.е. почти в два раза больше. Хотя объем производства других цветных металлов и сплавов существенно меньше, без их применения было бы невозможно создание таких отраслей современной техники, как электро-, радио-, приборостроение, авиация, атомная, ракетно-космическая техника.

Разделы 1 и 2 написаны докт. техн. наук, проф. Ю. П. Солнцевым, глава 16 этого раздела — Ю. П. Солнцевым при участии канд. техн. наук, доц. Л. Д. Соболевой, раздел 3 — канд. техн. наук, доц. А. В. Кузиным, раздел 4 — канд. техн. наук Д. И. Чашниковым, раздел 5 — докт. техн. наук, проф. В. П. Демянцевичем, раздел 6 — канд. техн. наук, доц. В. А. Веселовым

Авторский коллектив глубоко признателен рецензентам — коллективу кафедры «Металловедение» Санкт-Петербургского технического университета, а также докторам технических наук профессорам И. П. Волчку и А. М. Паршину за ценные замечания и рекомендации, сделанные ими при рецензировании рукописи.

# ПРОИЗВОДСТВО ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

## Глава 1.

### МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

Чугуном называется сплав железа с углеродом, который содержит более 2,14 % С. Около 80 % всего количества выплавляемого чугуна составляет передельный чугун, являющийся исходным продуктом для производства стали. Для производства фасонного литья на машиностроительных заводах используют литейный чугун (15—20 %), а в качестве легирующих добавок и раскислителей при выплавке стали — ферросплавы: ферромарганец и ферросилиций (1—2 %).

#### 1. Исходные материалы для доменного производства

Исходными материалами для доменного производства служат руда, флюсы, топливо и воздух. Железная руда — это горная порода, содержащая железо в таких количествах, при которых ее технически и экономически целесообразно перерабатывать. Руда состоит из смеси железосодержащих минералов и пустой породы, в состав которой входят различные соединения, прежде всего кремнезем  $\text{SiO}_2$ , глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , оксид кальция  $\text{CaO}$  и оксид магния  $\text{MgO}$ . Пригодность железной руды для доменной плавки зависит от содержания железа, состава пустой породы и концентрации таких вредных примесей, как сера, фосфор, мышьяк и др. Важную роль играет восстановимость руды, которая определяется скоростью восстановления из нее железа и зависит от природы оксида железа, плотности и пористости руды. Чем плотнее и менее пориста руда, тем хуже ее восстановимость.

Для производства чугуна используют руды следующих основных типов.

Магнитный железняк или магнетит содержит 45—70 % Fe в виде оксида  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и обладает магнитными свойствами. Руда имеет темный цвет, высокую плотность и трудно восстанавливается.

Красный железняк или гематит содержит 50—60 % Fe в виде безводного оксида  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Красный железняк содержит мало вредных примесей серы и фосфора; по сравнению с магнитным железняком он легче восстанавливается. Благодаря этому красные железняки относятся к лучшим железным рудам.

Бурый железняк представляет собой водный оксид железа  $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ . Пустая порода обычно загрязнена серой и фосфором. Содержание железа в руде около 30 %. Благодаря хорошей восстановимости использование небогатых руд бурого железняка экономически целесообразно.

Шпатовый железняк (сидерит) содержит 30—40% Fe в виде карбоната  $FeCO_3$ . Руда характеризуется хорошей восстановимостью и низким содержанием серы и фосфора.

Перед плавкой руды проходят специальную подготовку, которая повышает производительность доменных печей и уменьшает расход топлива. Основными операциями подготовки руд к плавке являются дробление, сортировка, обогащение, обжиг и спекание.

Целью обогащения руд является удаление пустой породы и повышение содержания железа. Обогащение получает все большее распространение, что связано с необходимостью использования бедных руд. Для обогащения железных руд применяют промывку и магнитную сепарацию.

Промывка водой позволяет отделить от руды часть рыхлой песчано-глинистой пустой породы. Магнитная сепарация состоит в том, что измельченную руду помещают в магнитное поле. Магнит притягивает частицы руды, содержащие оксиды железа и обладающие магнитными свойствами, отделяя их от пустой породы.

Агломерацией называется процесс спекания руд мелких фракций, концентрата, колошниковой пыли, возврата агломерата на специальной машине для улучшения их металлургических свойств. Эти материалы смешиваются с измельченным твердым топливом (коксом, углем), увлажняются и подаются в агломерационную машину. Агломерационная машина ленточного типа состоит из большого числа паллетспекательных тележек с отверстиями в днище,двигающихся по направляющим рельсам (рис. 1). В загруженной паллете после зажигания газовыми горелками начинается горение топлива, причем фронт горения распространяется сверху вниз. Воздух просасывается сквозь слой шихты благодаря действию специальных вакуумных устройств, называемых эксгаустерами. Температура в слое шихты достигает

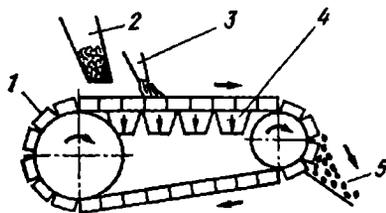


Рис. 1. Схема агломерационной машины:  
1 — паллеты; 2 — шихтовый бункер;  
3 — горелка; 4 — вакуум-камеры (эксгаустеры); 5 — агломерат

1300—1600 °С. В результате восстановления оксидов железа в присутствии кремнезема образуется фаялит  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  по реакции



В зоне горения фаялит, имеющий температуру плавления 1209 °С, плавится и смачивает зерна шихты, благодаря чему при охлаждении образуется твердая пористая масса — агломерат. Агломерат имеет высокую пористость (до 50%) и хорошую восстановимость. Кроме того, в процессе спекания почти полностью выжигается сера, которая удаляется в виде сернистого газа. В металлургии обычно используют офлюсованный агломерат, для чего в шихту дополнительно вводят известняк.

*Доменные флюсы* — это материалы, вводимые в доменную печь для понижения температуры плавления пустой железной руды и ошлакования золы топлива. При сплавлении пустой породы и золы с флюсом образуется легкоплавкий шлак, который удаляется из печи в жидком состоянии. Выбор флюсов зависит от химического состава пустой породы. Если пустая порода имеет песчано-глинистый характер, то в качестве флюсов применяют известняк  $\text{CaCO}_3$ , реже доломит  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ . При известковой пустой породе флюсами служат кремнезем, кварц или песчаник  $\text{SiO}_2$ .

Основным видом топлива, используемым при выплавке чугуна в доменных печах и вагранках, является кокс. Кокс получают сухой перегонкой при 1000—1200 °С без доступа воздуха некоторых сортов каменных углей, называемых коксующимися. При удалении летучих веществ в специальных коксовых печах происходит спекание, длительность которого составляет 15—20 ч. Перед коксованием уголь проходит подготовку, заключающуюся в измельчении в щековых дробилках до крупности зерна 2—3 мм, обогащении и смешивании. Спекшаяся пористая масса кокса при выделении газов растрескивается и распадается на куски. Выделяющийся газ собирают и направляют в химическое отделение, где из него извлекают такие ценные химические продукты, как бензол, аммиак, смолы. После этого коксовый газ используют в качестве топлива.

В доменном производстве используют кокс в виде прочных кусков размером от 25 до 100—200 мм светло-серого цвета с пористостью около 50%. Химический состав металлургического кокса зависит от месторождения угля, %: углерода 80—90, серы 0,5—2,0, фосфора до 0,04; золы 8,0—12,06 влаги до 5; летучих 0,7—1,2. Средняя теплота сгорания кокса составляет 29,3 МДж/кг (7000 ккал/кг).

## 2. Доменная печь

Доменная печь представляет собой вертикальную печь шахтного типа. Современные доменные печи имеют общую высоту до 80 м, полезный

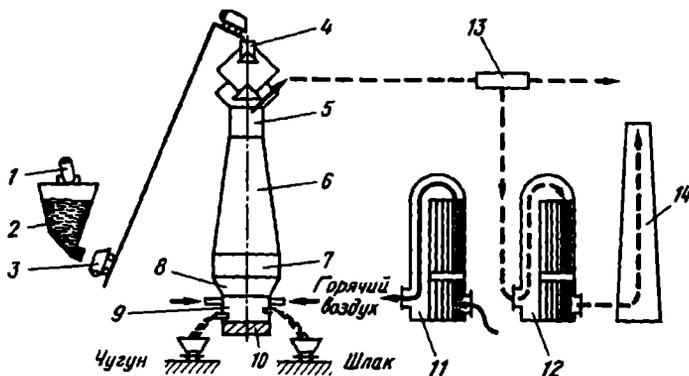


Рис. 2. Схема работы доменного цеха

объем (объем рабочего пространства) до  $5600 \text{ м}^3$ . Кладка печи находится в стальном кожухе толщиной 30—40 мм. Производительность доменной печи объемом  $3000 \text{ м}^3$  составляет более 6000 т чугуна в сутки.

Схема работы доменного цеха современного металлургического завода приведена на рис. 2.

Сырые материалы в саморазгружающихся вагонах прибывают на рудный двор, расположенный параллельно линии печей. Мостовой кран перегружает материалы в приемные бункеры доменных печей, откуда они с помощью вагон-весов 1 поступают через бункер 2 в загрузочные вагонетки — скипы 3. Агломерат, руду, флюс и кокс, поступающие в печь в определенном соотношении, называют *шихтой*. Скиповый подъемник представляет собой наклонный рельсовый мост, по которому движутся две вагонетки. Скип поднимается стальным канатом до верхней точки рельсового моста и опрокидывается. Через загрузочное устройство 4 шихта попадает в доменную печь. Печь состоит из колошника 5, шахты 6, распара 7, заплечиков 8 и горна 9.

Доменные печи, как и все шахтные печи, работают по принципу противотока. Сверху сходят шихтовые материалы, а снизу им навстречу движутся газы, образующиеся в процессе горения топлива.

Колошник имеет цилиндрическую форму. Он служит для загрузки сырых материалов и отвода газов. Колошник футерован шамотным кирпичом и изнутри защищен стальными плитами. Засыпной аппарат, расположенный над колошником, подает сырые материалы в определенной последовательности.

Расширяющаяся книзу коническая шахта облегчает опускание материалов и равномерное распределение газов по сечению печи. Шамотная кладка шахты имеет коробчатые холодильники, по которым цирку-

лирует охлаждающая вода. В шахте происходят процессы восстановления оксидов железа и начинается его науглероживание.

Ниже шахты следует самая широкая цилиндрическая часть доменной печи — распар. Здесь происходит плавление пустой породы и флюсов с образованием шлака, которое заканчивается в заплечиках, имеющих форму сужающегося книзу усеченного конуса. Нижнее основание заплечиков имеет меньший диаметр из-за сокращения объема материалов вследствие их плавления.

Расположенный ниже заплечиков горн имеет цилиндрическую форму. Кладка горна и заплечиков охлаждается плитовыми холодильниками с водяным охлаждением. В верхней части горна расположены водоохлаждаемые медные фурмы, через которые в доменную печь поступает нагретый воздух. Здесь происходит горение кокса, а в нижней части горна на лещади 10 скапливаются жидкие чугун и шлак, которые периодически выпускаются через специальные отверстия — летки. Чугунная летка расположена на 0,5 м, а шлаковая летка — на 1,5 м выше лещади. Постоянно остающийся на лещади полуметровый слой жидкого чугуна предохраняет ее от разрушения. Чугунная летка между выпусками чугуна забивается огнеупорной массой. Шлаковая летка представляет собой медную водоохлаждаемую фурму.

Доменная печь оснащена несколькими воздухонагревателями — кауперами. Их число обычно не менее трех (чаще — четыре), из которых один нагревается отходящими газами, другой нагревает холодный воздух, а третий находится в резерве. На рис. 2 представлено два воздухонагревателя. Воздуходувная машина подает холодный воздух в воздухонагреватель 11, где он проходит через разогретую насадку, нагревается до 1200—1300 °С и поступает через фурмы в доменную печь. Насадка воздухонагревателя 12 нагревается за счет тепла от горения доменного и природного газа, поступающих к его горелкам после газоочистки 13. Продукты горения удаляются через дымовую трубу 14. Когда насадка воздухонагревателя 11 остынет, а воздухонагревателя 12 — разогреется, происходит их автоматическое переключение. Подогрев дутья позволяет существенно интенсифицировать доменный процесс.

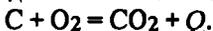
Для повышения производительности доменных печей и экономии дефицитного кокса успешно применяются дутье постоянной влажности, повышенное давление под колошником, обогащенное кислородом дутье и вдувание через фурмы природного газа, мазута и угольной пыли. Все основные процессы — подготовка и загрузка шихтовых материалов, подогрев и обогащение дутья, обеспечение нормального хода печи, выпуск и транспортирование шлака и чугуна — механизированы и автоматизированы.

### 3. Доменный процесс

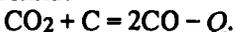
Физико-химические процессы, протекающие в различных зонах доменной печи, определяются существующими там температурными условиями.

При загрузке на колошник сырые материалы попадают в область низких температур 200—300 °С. По мере опускания материалов температура растет, достигает максимума 1900—2100 °С на уровне фурм и в горне снижается до 1450 °С.

На уровне фурм раскаленный кокс сгорает в струе нагретого воздуха с выделением большого количества тепла:



Образующийся углекислый газ реагирует с твердым углеродом кокса и восстанавливается до оксида углерода. Эта реакция идет с поглощением тепла:



Встречая руду, оксид углерода восстанавливает оксиды железа, превращаясь в углекислый газ:



Восстановление железа оксидом углерода называют *непрямым* или *косвенным восстановлением*. Суммарный тепловой эффект косвенного восстановления положителен. Этот процесс протекает в нижней части шахты доменной печи при сравнительно низких температурах.

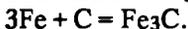
*Прямым восстановлением* называют восстановление твердым углеродом кокса. Восстановление твердым углеродом в основном происходит по суммарной реакции:



Эта реакция идет с большим поглощением тепла и протекает при более высоких температурах в зоне распара и верхней части заплечиков. Прямое восстановление может также происходить с помощью сажистого углерода, образующегося по реакции  $2CO = CO_2 + C_{сажа}$  и осаждающегося в порах шихтовых материалов.

При температурах выше 900—1000 °С оксид железа (FeO) восстанавливается только прямым путем. Обычно в доменной печи газами, т.е. косвенным путем, восстанавливается около 60—70 % Fe, а твердым углеродом — 30—40 %. После завершения процесса восстановления при температуре 1300—1400 °С железо находится в твердом состоянии и имеет вид пористой губчатой массы (температура плавления железа 1539 °С).

При взаимодействии железа с оксидом углерода или непосредственно с углеродом образуется карбид железа Fe<sub>3</sub>C (цементит):



Цементит хорошо растворяется в железе и постепенно науглероживает его, в результате чего образуется сплав железа с углеродом, имеющий значительно более низкую температуру плавления. В высокотемпературных зонах (распоре, заплечиках) такой сплав переходит в жидкое состояние и стекает в горн. Одновременно с восстановлением и науглероживанием железа происходит восстановление оксидов кремния, марганца, фосфора и некоторых других элементов и их растворение в металле.

Весь фосфор, попавший в доменную печь с сырыми материалами, восстанавливается и полностью переходит в чугун. Регулирование концентрации фосфора в чугуне возможно лишь соответствующим подбором шихты. Основным источником другой вредной примеси — серы — являются кокс, в меньшей степени руда и известь. Около половины серы удаляется с колошниковыми газами в виде  $\text{SO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  в верхних горизонтах печи. Необходимыми условиями более полного удаления серы (десульфурации) являются избыточное содержание извести в шлаках, их высокая основность, а также высокая температура в горне доменной печи. Сера находится в виде хорошо растворимого в металле сульфида железа  $\text{FeS}$ . Ее удаление происходит по реакции  $\text{FeS} + \text{CaO} = \text{CaS} + \text{FeO}$ . Сернистый кальций нерастворим в чугуне и переходит в шлак.

Образование шлака начинается в области распара при температуре около  $1200^\circ\text{C}$ , когда пустая порода сплавляется с известью. Образующийся шлак стекает в горн, скапливается под слоем чугуна и периодически выпускается через шлаковую летку. Шлак состоит главным образом из основных и кислотных оксидов. Важнейшая характеристика доменного шлака — его основность, представляющая собой отношение суммы кислотных оксидов к сумме основных:

$$(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3).$$

Основность шлаков при выплавке разных чугунов и ферросплавов колеблется от 0,9 до 1,4. Чем выше основность, тем легче происходит десульфурация чугуна.

Чугун выпускают из печи через чугунные летки 4—6 раз в сутки. Чугун стекает по желобу в специальные чугуновозные ковши вместимостью до 100 т, в которых по железнодорожным путям направляется на разливочную машину, либо в случае передела в сталь, его сливают в специальные обогреваемые копыльники — миксеры. Выдержка в миксере способствует выравниванию химического состава чугуна.

Разливочная машина представляет собой замкнутый конвейер из чугунных форм, в которые заливается чугун. Залитый чугун затвердевает, охлаждается, после чего формы опрокидываются и чугунные чушки массой до 55 кг попадают прямо в железнодорожные вагоны для

отправки на другие заводы. Все операции при работе разливочной машины механизированы и автоматизированы.

Основные показатели работы доменной печи — коэффициент использования полезного объема (КИПО) и расход кокса на 1 т выплавленного чугуна. КИПО представляет собой отношение полезного объема печи (объема от уровня чугунной летки до максимального уровня засыпки сырых материалов)  $V$  к суточной выплавке чугуна  $G$ , т. е.

$$\text{КИПО} = V/G, \text{ м}^3/\text{т}.$$

Чем меньше численное значение КИПО, тем лучше работает доменная печь, тем более форсированно ведется плавка. Значения КИПО колеблются в широких пределах (0,4—0,7) и зависят от содержания железа в руде, подготовки шихтовых материалов и сорта выплавляемого чугуна. На отечественных заводах при выплавке передельного чугуна КИПО в среднем составляет около 0,55.

Стоимость кокса составляет 40—50 % от стоимости чугуна. Удельный расход кокса зависит от качества шихты, температуры нагрева дутья и его обогащения кислородом, степени использования физического тепла и восстановительной способности газов. В доменном производстве средний удельный расход кокса на 1 т передельного чугуна составляет около 500 кг.

Интенсификация доменного процесса может быть осуществлена увеличением полезного объема доменных печей, обогащением дутья кислородом, использованием природного газа, улучшением подготовки шихты, заменой железной руды агломератом и окатышами, автоматизацией всех процессов плавки.

#### 4. Производство литейного чугуна

Выплавка литейных чугунов также производится в доменных печах. В связи с необходимостью получения в литейных чугунах более высокого содержания кремния по сравнению с передельными чугунами процесс ведется при более горячем ходе печи и сопровождается повышенным расходом кокса.

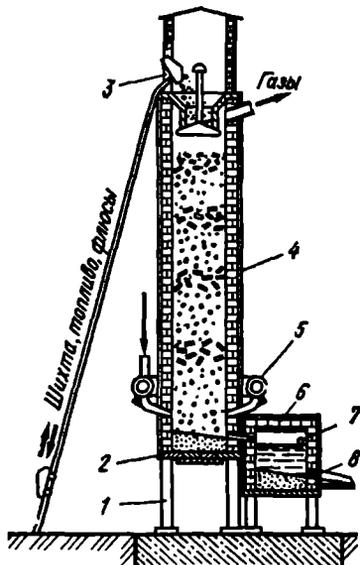


Рис. 3. Схема вагранки:

1 — колонны; 2 — опорная плита; 3 — загрузочное окно; 4 — шахта; 5 — фурма для дутья; 6 — копильник; 7 — отверстие для выпуска шлака; 8 — отверстие для выпуска чугуна

На машиностроительные заводы литейный чугун поступает в виде твердых отливок — *чушек*. Далее он переплавляется в вагранках, плазменных, электродуговых и индукционных печах. Благодаря простоте конструкции наибольшее распространение получила вагранка, схема которой приведена на рис. 3.

Принцип работы вагранки состоит в следующем. Шахту печи сначала загружают коксом на высоту, примерно равную внутреннему диаметру вагранки над уровнем фурм. Затем загружают металлическую шихту (литейный и передельный чугун, возврат собственного производства, стальной лом, ферросплавы и т.д.), кокс и флюс, необходимый для формирования шлака. В качестве флюса используют известняк. Первую порцию кокса разжигают, после чего через фурмы подают воздушное дутье. Металл по мере расплавления собирается в копильнике и периодически выпускается из него. По мере оплавления металла систематически производят загрузку шихты. Современные вагранки имеют производительность 2,5—50,0 т/ч жидкого чугуна. Для снижения расхода кокса дутье подогревают до 350—550 °С.

## Глава 2 МЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ

Сталь — это сплав железа с углеродом, который содержит менее 2,14 % С (обычно не более 1,3 %). Постоянными примесями в стали являются марганец, кремний, фосфор и сера. Кроме углеродистых, в машиностроении и строительстве широко применяют легированные стали, в состав которых для улучшения тех или иных свойств дополнительно вводят хром, никель, молибден и другие элементы.

Исходными металлическими материалами для получения стали служат передельный чугун, стальной лом и ферросплавы. Чугун по сравнению со сталью содержит большее количество углерода и примесей. Поэтому основная задача передела чугуна в сталь состоит в удалении избытка углерода и примесей с помощью окислительных процессов, протекающих в сталеплавильных агрегатах. Основными способами производства стали являются кислородно-конвертерный, мартеновский и электродуговой.

### 1. Кислородно-конвертерное производство стали

Сталь в конвертерах выплавляют бессемеровским, томасовским и кислородно-конвертерным способами. Недостатками первых двух способов

являются низкое качество стали из-за повышенной концентрации азота и ограниченность сырьевой базы. Последнее обусловлено необходимостью использования только специальных сортов чугуна (бессемеровского или томасовского) со строго регламентированным содержанием кремния, серы и фосфора. Оба способа имеют ограниченное применение. В России бессемеровскую и томасовскую сталь почти не производят.

В основе конвертерных процессов лежит обработка жидкого чугуна газообразными окислителями без подвода извне дополнительного тепла. Процесс выплавки стали осуществляется только за счет химической теплоты экзотермических реакций окисления примесей с учетом физической теплоты жидкого чугуна. Продувка чугуна производится сверху или через днище в специальных агрегатах — конвертерах. Конвертерную плавку характеризует высокая производительность за счет большой реакционной поверхности металл—окислитель и высокой скорости окисления примесей.

Применение технически чистого кислорода (не менее 99,5 %  $O_2$ ) для продувки чугуна позволило за счет снижения содержания азота улучшить качество кислородно-конвертерной стали. Первые промышленные конвертеры на кислородном дутье начали работать в 50-х гг. В последующие годы этот способ получил распространение и в ряде стран стал ведущим в сталеплавильном производстве. В России в настоящее время используются кислородные конвертеры емкостью 100—400 т. Объем выплавляемой кислородно-конвертерной стали составляет около 35 % от общего объема ее производства.

Схема кислородного конвертера представлена на рис. 4. Корпус конвертера 1 изготавливают из стальных, сваренных встык листов толщиной до 100 мм. Корпус имеет среднюю цилиндрическую часть, глухое дно и симметрично сужающуюся горловину 2. У основания горловины расположено сталевыпускное отверстие 3. Такое расположение летки способствует лучшему отделению стали от шлака и уменьшает опасность восстановления фосфора при сливе металла. Рабочее пространство конвертера футеровано смолодоломитовыми огнеупорами, а сталевыпускное отверстие — магнетитовыми блоками. Конвертер может поворачиваться в вертикальной плоскости благодаря опорному поясу 4 с цап-

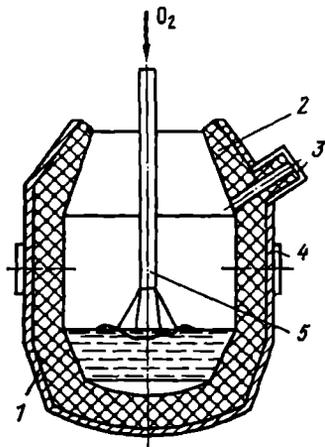
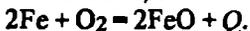


Рис. 4. Схема устройства кислородного конвертера

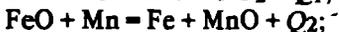
фами, расположенными в подшипниках опор. Одна или обе цапфы являются приводными. Кислород обычно подается сверху через водоохлаждаемую фурму 5. Подача сверху обусловлена образованием высокотемпературной реакционной зоны в месте вдувания кислорода в металл и необходимостью сохранения футеровки днища конвертера. Фурма способна перемещаться вверх—вниз. При подаче дутья она находится на расстоянии 300—800 мм от поверхности ванны. Кислород подается под давлением 0,8—1,0 МПа. Его расход зависит от емкости конвертера и интенсивности продувки и составляет 2,5—4 м<sup>3</sup>/т металл в 1 мин. Длительность плавки в современном кислородном конвертере составляет 35—50 мин.

Исходными материалами конвертерной плавки являются жидкий чугун, лом — металлическая часть шихты и шлакообразующие, окислители — неметаллическая часть. Перед загрузкой конвертер наклоняют. Сначала загружают металлический лом (20—30 % от массы плавки). Затем заливают чугун, конвертер приводят в вертикальное положение, опускают кислородную фурму и начинают продувку кислородом. Одновременно с началом продувки по мере ее проведения по специальному желобу загружают известь, железную руду и флюсы (боксит, плакиновый шпат).

Проникая в металл, вдуваемый кислород прежде всего взаимодействует с железом, составляющим основную массу залитого чугуна:



Образующийся FeO частично переходит в шлак, частично растворяется в металле и окисляет примеси, содержащиеся в чугуне:



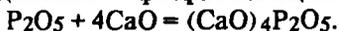
Эти реакции, особенно окисление кремния, идут с выделением большого количества теплоты. Через 2—4 мин после начала продувки кремний полностью окисляется.

С понижением содержания кремния и марганца и повышением температуры металла возрастает скорость окисления углерода как за счет взаимодействия с FeO по реакции  $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO} - Q$ , так и за счет прямого воздействия газообразного кислорода. Выделяющиеся пузыри CO улучшают перемешивание металла и шлака.

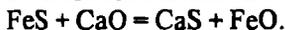
Одновременно с окислением примесей образуется шлак. Скорость шлакообразования зависит от скорости растворения извести. В начале продувки шлак содержит много кремнезема и FeO и имеет низкую основность ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$ ). По ходу продувки известь растворяется, основность шлака растет и к концу плавки  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 3$ . Общее количество шлака составляет обычно 10—15 % от массы металла. Активный

основной шлак способствует более полному удалению из металла вредных примесей — фосфора и серы.

Избыток свободного оксида кальция связывает фосфор в прочное соединение — фосфат кальция:



В высокоосновном шлаке сера связывается в сульфид кальция:



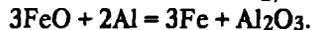
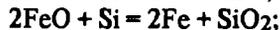
После окончания продувки и получения заданного содержания углерода конвертер поворачивают в горизонтальное положение, берут пробу и выпускают металл в ковш.

В последние годы начинают широко использовать выплавку стали с продувкой чугуна кислородом снизу через фурмы, установленные в днище конвертера. Фурмы представляют собой две концентрически расположенные трубки: по внутренней подается кислород, а в щель между внутренней и внешней — защитный газ, в качестве которого обычно используют метан или пропан. Защитный газ предотвращает ранний контакт кислорода с жидким металлом, защищает фурму и околофурменное пространство от сгорания. Число фурм в днище может составлять более 20 шт. и колеблется в зависимости от вместимости конвертера. Днища имеют меньшую стойкость, чем стены конвертера, поэтому их изготавливают съемными.

Во избежание заполнения фурм жидким металлом и выхода их из строя перед установкой конвертера в вертикальное положение через фурмы пускают дутье, используя для этой цели какой-либо инертный газ (обычно аргон).

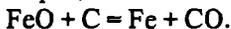
При донной продувке по сравнению с верхней продувкой резко возрастает интенсивность перемешивания металла, площадь контактной поверхности газ—металл. Благодаря этому увеличивается скорость обезуглероживания чугуна, интенсифицируются процессы удаления вредных примесей и газов.

Раскисление стали в ковше — обязательная завершающая операция. Окислительный характер плавки приводит к высокой концентрации FeO в металле, вызывающей в стали красноломкость при горячей деформации и ухудшение механических свойств. Раскислением называется процесс восстановления железа из FeO. Раскисление производят марганцем, кремнием и алюминием по реакциям



Кремний и марганец вводят в виде соответствующих ферросплавов, алюминий — в чистом виде. Марганец, кремний и алюминий называют раскислителями стали. В зависимости от степени раскисленности различают кипящие, полуспокойные и спокойные стали.

Кипящие стали раскисляют только ферромарганцем. В таких сталях частично остается растворенный FeO и при кристаллизации продолжает идти процесс кипения по реакции



Газовые пузыри остаются в теле затвердевшего слитка и завариваются при последующей прокатке. Кипящая сталь дает наиболее высокий выход годного металла, наименьшие отходы, что обуславливает ее самую низкую стоимость.

Спокойную сталь раскисляют комплексно ферромарганцем, ферросилицием и алюминием. В металле нет растворенного FeO, процесс кипения прекращается, сталь «успокаивается». Спокойная сталь — наиболее дорогая сталь, значительная часть стального слитка идет в отходы.

Полуспокойную сталь раскисляют ферромарганцем и уменьшенным количеством ферросилиция. По качеству и стоимости она занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной сталями.

Качество стали определяется содержанием в ней вредных примесей, газов и неметаллических включений. По качеству кислородно-конвертерная сталь не уступает мартеновской, а в ряде случаев ее превосходит.

Благодаря меньшим затратам на передел на 20—30 % при сопоставимой стоимости шихты себестоимость кислородно-конвертерной стали ниже мартеновской. Конвертерный процесс легче поддается комплексной механизации и автоматизации. Строительство кислородно-конвертерного цеха одинаковой производительности с мартеновским требует меньших капитальных затрат.

Перечисленные преимущества кислородно-конвертерной стали позволяют в ряде развитых стран полностью (Япония) или в основном (США, ФРГ, Великобритания) заменить мартеновские печи кислородными конвертерами. В отечественной металлургии также происходит постепенное вытеснение мартеновского процесса кислородно-конвертерным.

## 2. Мартеновское производство стали

Мартеновская печь является пламенной регенеративной печью (рис. 5, б). В рабочем пространстве печи сжигается газообразное или жидкое топливо. Высокая температура, необходимая для получения стали в жидком состоянии, обеспечивается за счет регенерации тепла отходящих газов.

Верхнее строение мартеновской печи состоит из плавильного пространства, головок и вертикальных каналов. Плавильное пространство ограничено передней стенкой с завалочными окнами, задней стенкой с выпускным отверстием, снизу — подиной и откосами, сверху — сводом,

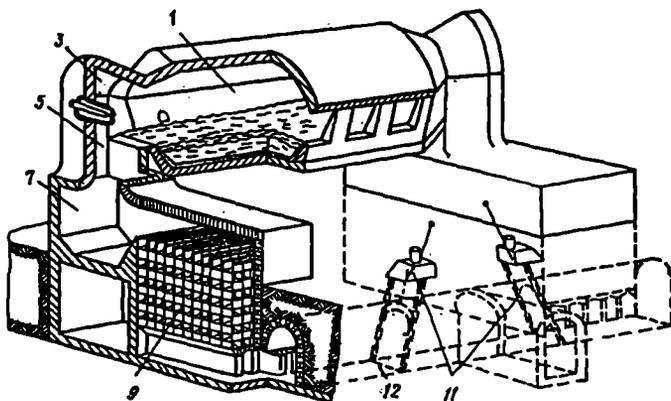
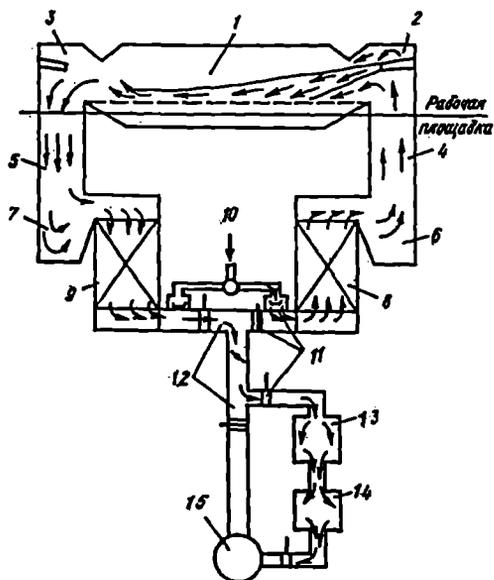


Рис. 5. Схема устройства мартеновской печи:

1 — рабочее пространство; 2, 3 — правая и левая головки; 4, 5 — правый и левый вертикальные каналы; 6, 7 — правый и левый шлаковики; 8, 9 — правый и левый регенераторы; 10 — воздушное охлаждение; 11 — реверсивные и регулирующие клапаны; 12 — бороз; 13 — котел-утилизатор; 14 — газоочистка; 15 — дымовая труба

Рис. 6. Общий вид мартеновской печи. Обозначения см. на рис. 5

с торцов — головками. Через завалочные окна в печь загружают шихту и дополнительные материалы по ходу плавки, удаляют и наводят шлак, берут пробы металла и шлака. Через отверстие в задней стенке, находящееся на уровне подины, производят выпуск готового металла и шлака. На время плавки отверстие забивают магнезитовым порошком.

Рабочее пространство печи футеровано огнеупорным кирпичем. В зависимости от вида футеровки различают основные и кислые марте-новские печи. В основных печах подину и откосы выкладывают основ-ным магнезитовым кирпичом, а сверху наваривают слой магнезитового или доломитового порошка. Подвесной свод выполняют из хромагне-зитового кирпича. Использование основной футеровки позволяет загру-жать в печь известь, получать основной шлак и удалять вредные приме-си — серу и фосфор.

В кислых печах подину и откосы футеруют кислым диначесвым кир-пичем на основе кремнезема, а верхний слой наваривают из кварцевого песка. Свод также выполняют из диначеса. Из-за невозможности удале-ния серы и фосфора кислый процесс применяют значительно реже ос-новного. В кислых печах в качестве шихты либо используют чистые по сере и фосфору чугуи и стальной лом, либо переливают жидкую заго-товку из основной печи после удаления из нее вредных примесей (в дуплекс-процессе основная печь — кислая мартеиовская печь). Сталь, выплавленная в кислых мартеиовских печах, содержит меньшее коли-чество растворенных газов, характеризуется более благоприятной фор-мой неметаллических включений и их равномерным распределением в объеме металла, чем сталь, полученная в основных мартеиовских печах.

В торцах рабочего пространства печи расположены головки для под-вода топлива и воздуха и отвода продуктов горения. Головки соединены с нижним строением печи вертикальными каналами. Нижнее строение мартеиовской печи расположено под рабочей площадкой. Оно состоит из шлаковиков, в которых происходит отделение от дымовых газов час-тиц шлака и пыли из рабочего пространства, регенеративных камер и боровов с перекидными клапанами.

На схеме рис. 5 стрелками показано движение газов. В рабочем пространстве печи топливо смешивается с воздухом и сгорает с образо-ванием факела пламени с температурой 1800—1900 °С. Газообразные продукты горения поступают в каналы противоположной левой голо-вки, затем в вертикальные каналы, шлаковики и регенераторы; темпе-ратура дымовых газов, поступающих в регенераторы, составляет 1500—1550 °С.

Регенераторы представляют собой камеры с выложенными клеткой насадками из огнеупорного шамотного кирпича. При прохождении ды-мовых газов насадки одной пары регенераторов, в нашем случае — левых, нагреваются до 1300—1400 °С. После перекидки клапанов дви-

жение топлива, воздуха и газов меняется на противоположное: через один из нагретых регенераторов в рабочее пространство поступает газообразное топливо, через другой — воздух. Проходя через насадку, они нагреваются до 1100—1200 °С. В это время другая пара регенераторов нагревается, аккумулируя тепло отходящих газов. После охлаждения насадок первой пары регенераторов до определенной температуры происходит очередная перекидка клапанов и процесс повторяется в обратном направлении: из регенераторов дымовые газы идут по борвам в дымовую трубу, по пути проходят через котел-утилизатор и газоочистку.

Мартеновские печи, работающие на жидком топливе (мазуте), с каждой стороны имеют только по одному регенератору для подогрева воздуха.

В качестве газообразного топлива обычно используют смесь доменного и коксового газов. В последнее время широко применяют природный газ, который добавляют к коксово-доменной газовой смеси. Воздух для сжигания топлива дополнительно обогащают кислородом до содержания 25—30 %. Форсунка и устройства для подачи мазута, природного газа и кислорода в факел расположены в головках мартеновской печи.

Обычно применяют стационарные мартеновские печи, но для выплавки стали из фосфористых чугунов и облегчения удаления шлака используют качающиеся печи. Рабочее пространство качающихся печей заключено в прочный стальной кожух, рама которого опирается на катки и может поворачиваться.

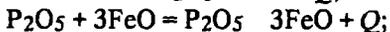
Обычно основную мартеновскую плавку ведут одним из двух способов: скрап-процессом или скрап-рудным процессом.

Плавку стали в основных мартеновских печах скрап-процессом ведут на тех заводах, где нет доменных печей и жидкий чугун не производится. Основной скрап-процесс обычно применяют в печах малой емкости до 100 т на машиностроительных заводах; исходными материалами являются стальной лом (скрап), расход которого составляет 60—70 %, чушковый перелдельный чугун (30—40 %) и известь в количестве 8—12 % от массы металла.

Процесс плавки состоит из нескольких последовательных периодов: заправка печи, закалка шихтовых материалов, их плавления, периода кипения или доводки, раскисления и выпуска металла.

Во время плавления чугуна и скрапа происходит образование шлака и удаление фосфора. При плавлении полностью окисляется кремний и частично углерод, марганец, фосфор. Из оксидов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ) образуется жидкий шлак, покрывающий металл. Прекращается непосредственный контакт металла с кислородом печных газов. Дальнейшее окисление примесей металла происходит через слой шлака за счет рас-

творенного в нем FeO. Фосфор удаляется в результате протекания следующих экзотермических реакций:



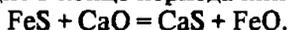
Период плавления для дефосфорации наиболее благоприятен: низкая температура, активный железистый шлак с достаточной основностью. Во избежание восстановления фосфора из шлака в металл большую часть шлака после расплавления скачивают, наводят новый шлак введением дополнительных порций извести.

В период кипения тепловой режим печи форсируют, вводят небольшими порциями железную руду для окисления углерода металла:



Пузыри CO проходят сквозь толщу металла и вызывают его кипение. При кипении происходит энергичное перемешивание металла, что облегчает удаление газов, всплывание в шлак взвешенных неметаллических включений, равномерный прогрев по глубине ванны. Оптимальная длительность кипения обеспечивается при выгорании 0,4—0,6 % C.

Эффективная десульфурация стали с удалением серы в шлак происходит в конце периода кипения:



Этому способствует высокая температура металла и шлака, высокая основность шлака и уменьшение в нем FeO.

После удаления вредных примесей и получения заданной концентрации углерода производят раскисление стали. Раскисление проводят в два этапа: предварительное раскисление в печи и окончательное - в ковше. Ферромарганец и доменный ферросилиций (12 % Si) вводят в печь, богатый ферросилиций (45 % Si) и алюминий — в ковш во время выпуска плавки. Основным скрап-процессом обычно выплавляют только спокойную сталь.

Если выплавляется легированная сталь, то неокисляющиеся в стальной ванне легирующие элементы (никель, медь, молибден) вводят в завалку или по ходу плавки. Слабоокисляющиеся элементы (хром, марганец) вводят в печь в виде ферросплавов после предварительного раскисления; сильно окисляющиеся элементы (кремний, титан, ванадий, алюминий, бор) вводят в ковш при выпуске плавки.

Скрап-рудный процесс применяют на больших металлургических заводах, имеющих жидкий чугуи. Плавку обычно ведут как в средних, вместимостью до 150—400 т, так и в крупных (вместимостью до 900 т) мартеновских печах. В качестве шихты в печи загружают стальной лом (20—40 %) и заливают жидкий чугуи (60—80 %). Содержание чугуи в шихте увеличено по сравнению со скрап-процессом. Из-за повышенного содержания примесей окислительные процессы форсируют, вводя

в завалку твердые окислители — железную руду или агломерат, что и определяет название процесса.

Основные периоды и протекающие при этом реакции те же, что и при скрап-процессе.

Для интенсификации процесса применяют кислород. Кислород используют как для обогащения воздуха для сжигания топлива, так и при продувке ванны через специальные фурмы, расположенные в своде печи, в период плавления и кипения. При использовании кислорода производительность мартеновских печей повышается на 20—25 % при снижении расхода топлива на 10—20 %.

Скрап-рудным процессом обычно выплавляют только углеродистые стали массового применения, скрап-процессом — углеродистые и легированные стали. Вместе с тем скрап-рудный процесс экономичнее скрап-процесса.

### 3. Производство стали в электропечах

Электроплавка — наиболее совершенный способ получения стали, имеющий ряд преимуществ по сравнению с производством стали в конвертерах и мартеновских печах. Простота регулировки теплового режима и высокие температуры процесса позволяют использовать шлаки высокой основности, что облегчает более полное удаление вредных примесей. Восстановительная атмосфера печи способствует глубокому раскислению стали. В электрических печах выплавляют высококачественные конструкционные, инструментальные, коррозионностойкие, жаростойкие и другие специальные стали и сплавы.

Для выплавки стали применяют дуговые и индукционные электрические печи. Емкость наиболее широко применяемых дуговых печей колеблется в широких пределах 0,5—360 т. Печи средней и большой вместимости обычно используют на металлургических заводах для получения слитков, а печи малой емкости — на машиностроительных предприятиях для получения стальных отливок. Источником тепла является электрическая дуга, которая возбуждается между графитовыми электродами и металлической шихтой.

Схема устройства электропечи с тремя электродами приведена на рис. 7. Печь имеет цилиндрический сварной кожух с плоским или сферическим дном, внутри футерованный огнеупорным кирпичом, съемный свод с тремя отверстиями для электродов. Электроды удерживаются и автоматически перемещаются по вертикали электродержателями с помощью специального механизма. Особый механизм позволяет устанавливать печь в наклонное положение. При выпуске стали печь наклоняют в сторону выпускного отверстия, при удалении шлака — в сторону загрузочного окна.

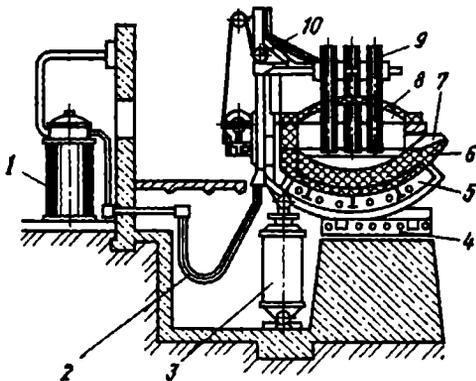


Рис. 7. Схема дуговой электропечи:

1 — понижающий трансформатор; 2 — токоподводящие кабели; 3 — гидравлический привод для наклона печи; 4, 5 — опора сектора и сектор для наклона печи; 6 — подина печи; 7 — желоб для выпуска металла; 8 — свод печи; 9 — электроды; 10 — механизм для подъема и опускания электродов

щимся дном или грейфером. Лишь печи малой емкости загружают шихтой через загрузочное окно.

Плавка в электродуговых печах ведется основным и кислым процессами. Чаще применяют основной процесс. При основном процессе футеровка подины и стен печи выполняется из основных огнеупоров, при кислом процессе — из кислых.

При выплавке электростали в основных печах применяют разновидности процесса с полным и частичным окислением или без окисления примесей.

Плавка с полным окислением применяется, когда в шихтовых материалах содержится повышенное количество фосфора и других примесей. Для их окисления и ускорения процесса в печь в завалку и после расплавления вводят железную руду и известь. Оксиды железа окисляют примеси (Si, Mn, P, C), образуется железистый шлак, как и при основном мартеновском скрап-процессе. Фосфористый шлак скачивают для предупреждения восстановления фосфора обратно в металл. Этот процесс плавки, во время которого происходит окисление примесей, называется *окислительным*. К его завершению количество примесей и растворенных газов (водорода и азота) уменьшается, а содержание фосфора в металле становится минимальным.

Применение кислорода позволяет значительно интенсифицировать процесс, ускорить окисление углерода и других примесей. Вдувание

Первичная обмотка трансформатора питается переменным током высокого напряжения (6—30 кВ), который на вторичной обмотке преобразуется в ток низкого напряжения нескольких ступеней — от 90 до 280 В. Мощность трансформатора (до 40 МВ·А и более) и диаметр электродов определяются емкостью печи. К электродержателям ток подводится с помощью гибких кабелей и медных шин.

Шихта состоит из стального лома, легированных отходов, чугуна, флюсов, железной руды, легирующих добавок и раскислителей. Загрузку шихты в печь производят сверху с помощью бады с открываю-

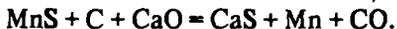
кислорода в ванну сокращает время расплавления шихты и нагрева металла, что уменьшает длительность окислительного периода. При этом уменьшается опасность дополнительного загрязнения металла неметаллическими включениями и газами. Особенно целесообразно применение кислорода при выплавке коррозионностойких и других сталей с низкой концентрацией углерода. При применении кислорода продолжительность электроплавки сокращается на 30—35 %, а расход электроэнергии — на 20—25 % при одновременном улучшении качества стали. В России с применением кислорода выплавляется 2/3 всей электростали.

После окончания окислительного периода начинается восстановительный период плавки. Основными задачами восстановительного периода являются раскисление стали, удаление серы, корректировка химического состава и температуры металла.

Сразу после удаления окислительного шлака сталь раскисляют, присаживая на зеркало металла раскислители в виде молотых ферромарганца, ферросилиция, силикомарганца и др. Затем наводят новый известковый шлак в количестве 2,0—3,5 % от массы металла. Для более глубокого раскисления металла шлак дополнительно обрабатывают смесью раскислителей с порошком кокса. Раскисление шлака способствует восстановлению FeO. Уменьшение содержания FeO в шлаке в соответствии с законом распределения приводит к его интенсивному диффузионному переходу из металла в шлак, что в свою очередь обуславливает раскисление металла. Так как процесс проходит в шлаке или на его границе с металлом, то сам металл не загрязняется продуктами раскисления — неметаллическими включениями типа  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , что всегда сопутствует обычному осадочному раскислению.

В ходе восстановительного периода в печи образуется белый шлак с малым содержанием FeO и высокой основностью.

Белый шлак обеспечивает глубокую десульфурацию стали:



Более глубокая десульфурация металла в электропечах по сравнению с мартеновскими печами обусловлена более высокой температурой процесса, высокой основностью шлака и низким содержанием в нем оксидов железа.

Содержание FeO и MnO в шлаке снижается до десятых долей процента, а концентрация серы доводится до следов.

Плавка завершается введением в печь небольших количеств раскислителей — ферросилиция и алюминия и легирующих элементов, небольшой выдержкой до их полного усвоения и выпуском стали в ковш.

Плавку в кислых электродуговых печах обычно применяют в литейных цехах при производстве фасонных стальных отливок. Печи имеют

кислую футеровку и плавка ведется под кислым шлаком, содержащим до 65 %  $\text{SiO}_2$ . Из-за невозможности удаления вредных примесей в шихте используют только чистые исходные материалы, обычно переплавляя отходы собственного производства. В окислительный период вводят небольшие порции железной руды, чистой по сере и фосфору. Кипение ванны при кислом процессе также важно для качества стали, как и при основном, так как в этот период металл перемешивается, из него удаляются газы и неметаллические включения. После окислительного периода шлак частично обновляют, вводя свежие шлакообразующие добавки — кварцевый песок, шамотный бой и др. Шлак раскисляют молотым ферросилицием и коксом или древесным углем. После получения заданного содержания углерода проводят раскисление стали силикомарганцем и алюминием.

Недостатком кислого процесса является потребность в шихтовых материалах с низким содержанием вредных примесей. Вместе с тем плавка в кислой электродуговой печи является одношлаковым процессом и имеет меньшую продолжительность, чем в основной. Кислая футеровка дешевле основной и имеет более высокую стойкость. Металл имеет меньшую газонасыщенность, более высокую температуру, лучшую жидкоподвижность, что особенно важно для фасонного литья. Кислые печи обычно имеют сравнительно небольшую емкость: 1—5 т.

Вместимость индукционных печей колеблется от нескольких килограммов до 90 т. Нагрев в индукционных печах осуществляется за счет джоулева тепла, выделяемого в твердом или жидком металле вихревыми токами, индуцируемыми переменным магнитным полем.

Схема индукционной печи для выплавки стали приведена на рис. 8. В немагнитном кожухе помещается индуктор и огнеупорный плавильный тигель. Через индуктор, представляющий собой катушку из медной трубки, охлаждаемой внутри водой, пропускается ток, возбуждающий вокруг переменное магнитное поле. Электрический ток подается к индуктору с помощью гибкого кабеля или медных шин. В металле, находящемся в тигле, индуцируются мощные вихревые токи, обеспечивающие его нагрев и плавление. Тигли изготавливают набивкой из порошков основных или кислых огнеупорных оксидных материалов.

Шихты составляют из чистых от вредных примесей материалов и загрузку в тигель производят сверху. Во время плавления в тигель вводят шлаковую смесь на основе извести или кремнезема в зависимости от вида футеровки печи. После полного расплавления подводимую мощность снижают до 30—40 % от максимальной и берут пробу на химический анализ. Получив результаты анализа и необходимую температуру металла, проводят раскисление и легирование стали.

В индукционных печах сталь выплавляют методом переплава. Расчет шихты ведут так, чтобы после расплавления получить металл задан-

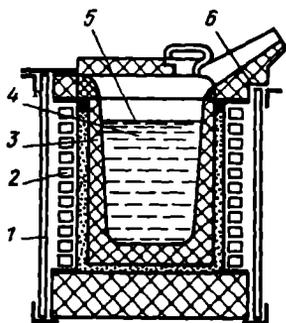


Рис. 8. Схема электрической индукционной печи:

1 — кожух печи; 2 — индуктор; 3 — тигель; 4 — металл; 5 — шлак; 6 — желоб для выпуска металла

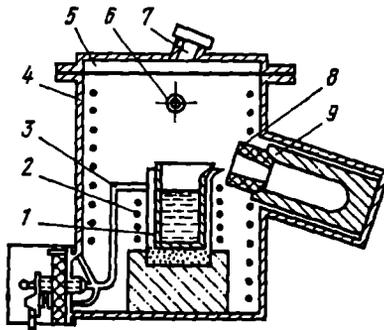


Рис. 9. Схема индукционной вакуумной печи:

1 — тигель; 2 — индуктор; 3 — подвод тока и воды для охлаждения индуктора; 4 — корпус вакуумной камеры; 5 — водоохлаждаемый свод; 6 — полая цапфа для поворота печи при разливке металла с отверстием для откачки воздуха; 7 — смотровое окно; 8 — воронка; 9 — изложница, заполняемая сталью в вертикальном положении при повороте печи

ного состава. Преимуществом индукционной печи является возможность достижения весьма высоких температур металла, что позволяет выплавлять различные высоколегированные стали и сплавы специального назначения. Под действием электромагнитного поля индуктора происходит интенсивная циркуляция жидкого металла в тигле, что способствует перемешиванию и получению металла однородного химического состава.

Индукционные печи позволяют вести плавку в любой контролируемой атмосфере или в вакууме. Схема вакуумной индукционной печи приведена на рис. 9. Вакуум в рабочем пространстве составляет до 1,4 Па. Раскисление производят углеродом, образующийся оксид CO удаляют из металла, и металл не загрязняется продуктами раскисления. Выплавка в вакуумных индукционных печах позволяет получить плотный металл с минимальным содержанием газов и неметаллических включений.

#### 4. Рафинирование стали в установках для переплава

Путем переплава получают стали и сплавы особо высокого качества и наиболее ответственного назначения. Специальная электрометаллургия включает такие способы переплава, как электрошлаковый, вакуумно-дуговой, электронно-лучевой, плазменно-дуговой, а также их сочетания.

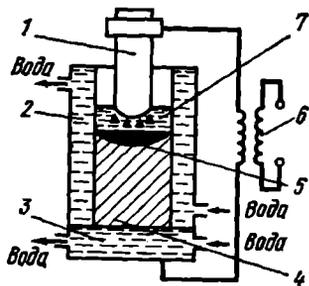


Рис. 10. Схема установки электрошлакового переплава стали:

1 — расходный электрод; 2 — медный водоохлаждаемый кристаллизатор; 3 — поддон; 4 — слиток; 5 — жидкий металл; 6 — трансформатор; 7 — расплавленный шлак

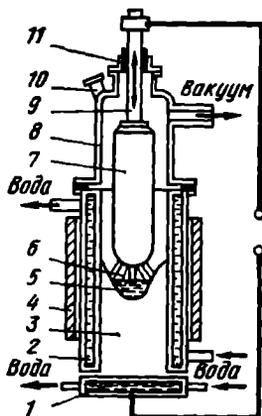


Рис. 11. Схема установки вакуумного дугового переплава:

1 — водоохлаждаемый поддон; 2 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 3 — слиток; 4 — солениод с продольным магнитным полем для концентрации дуги; 5 — ванна жидкого металла; 6 — электрическая дуга; 7 — расходный электрод; 8 — вакуумная камера; 9 — шток; 10 — смотровое окно; 11 — уплотнение

Разработанный отечественными металлургами способ электрошлакового переплава (ЭШП) расходных электродов в водоохлаждаемом кристаллизаторе нашел широкое применение для получения коррозионностойких, подшипниковых, инструментальных и других сталей специального назначения. Схема установки электрошлакового переплава приведена на рис. 10. Между расходным электродом и наплавляемым слитком имеется слой электропроводящего шлака, в котором выделяется тепло при прохождении через него электрического тока. При этом температура шлака повышается до 2000 °С. Шлак плавят в дуговой электропечи и заливают в кристаллизатор. Металл расходного электрода плавится и каплями стекает сквозь слой шлака. Это обеспечивает большую площадь соприкосновения металла со шлаком, что усиливает протекание рафинировочных процессов. Под слоем шлака в кристаллизаторе постепенно наплавляется слиток, масса которого может достигать нескольких десятков тонн.

В результате ЭШП металл очищается от вредных примесей и неметаллических включений. Содержание серы в стали после переплава уменьшается почти в два раза. Интенсивный отвод тепла в водоохлаждаемом кристаллизаторе обеспечивает быстрое затвердевание металла и направленную снизу вверх кристаллизацию. Образуется высококаче-

ственный плотный слиток с однородным строением, в котором отсутствуют пористость, усадочная рыхлость, зональная ликвация, неметаллические и газовые включения. Металл ЭШП имеет более высокие и однородные механические свойства.

Разновидностью электрошлакового переплава является метод электрошлакового литья (ЭШЛ). Этот метод позволяет получать фасонные отливки в водоохлаждаемой металлической литейной форме. Это позволяет избежать взаимодействия жидкого металла с воздухом и газами внутри литейной формы, а также с материалом самой формы.

Схема установки вакуумного дугового переплава (ВДП) с расходным электродом приведена на рис. 11. Установка состоит из герметичной рабочей камеры с водоохлаждаемым кристаллизатором, через патрубков присоединенной к вакуумной системе. Переплавляемый электрод, как и при ЭШП, изготавливают из той же марки стали, слиток которой необходимо получить.

Установки ВДП работают на постоянном токе. Расходуемый электрод служит катодом, а получаемый в водоохлаждаемом кристаллизаторе слиток очищенного металла — анодом. Электрическая дуга зажигается между электродом и затравкой, а в рабочем режиме — между электродом и расплавленным металлом. Давление в рабочей камере поддерживается на уровне не более 13 Па.

Вакуумно-дуговой переплав хорошо очищает металл от газов и неметаллических включений. Повышение свойств металла достигается благодаря вакуумной обработке металла и вследствие направленной снизу вверх последовательной кристаллизации. Методом ВДП можно выплавлять слитки большой массы. В настоящее время освоена выплавка слитков массой до 60 т. Проектируются установки для выплавки слитков массой 100—200 т.

В установках электронно-лучевого переплава (ЭЛП) источником нагрева и плавления металла является кинетическая энергия потока электронов, излучаемых высоковольтной катодной пушкой. При бомбардировке металлической шихты пучком электронов большой мощности кинетическая энергия переходит в тепловую, металл расплавляется и заполняет медный водоохлаждаемый кристаллизатор. Формирующийся слиток по мере наплавления вытягивается вниз. Глубокий вакуум в сочетании с благоприятными условиями затвердевания в водоохлаждаемом кристаллизаторе позволяет получать особо чистый металл с высокими механическими свойствами.

## 5. Разливка стали

Сталь, выплавленную в печи, по желобу выпускают в сталеразливочный ковш, который мостовым краном транспортируют к месту разливки

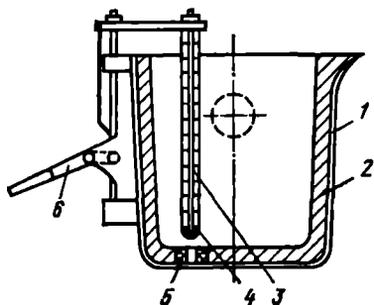


Рис. 12. Сталеразливочный ковш:

1 — кожух; 2 — футеровка ковша; 3 — стопор; 4 — огнеупорная пробка; 5 — стакан с отверстием для выпуска стали; 6 — рычажный механизм стопора

жидким металлом шамотными кольцами. Стопор перемещается вверх — вниз с помощью рычажного стопорного устройства. Перемещение рычажного механизма производится вручную или с помощью гидравлического привода с дистанционным управлением.

Из ковша жидкую сталь разливают в металлические формы — *изложницы*. Изложницы отливают из чугуна, реже из стали. Они представляют собой толстостенные сосуды, обычно сквозные, иногда открытые только сверху. Поперечное сечение изложницы зависит от вида последующей обработки давлением, которой будет подвергнут полученный слиток. В *сортовой прокатке* обычно используются слитки квадратного сечения, в *листовой прокатке* — прямоугольного сечения, дляковки применяют слитки многогранного или круглого сечения. Стенки изложниц имеют небольшой наклон к вертикали и слиток получает форму усеченного конуса или пирамиды, что облегчает извлечение слитков из изложниц. Масса слитков колеблется в широких пределах — от 10 кг до 300 т и более.

Разливку стали производят сверху или сифоном (рис.13, 14). При разливке сверху каждую изложницу заполняют отдельно. Для лучшего центрирования струи и уменьшения разбрызгивания стали на изложницу устанавливают футерованную изнутри промежуточную воронку.

При сифонной разливке сталь из ковша поступает в центровую и через каналы сифонных проводок — одновременно снизу во все изложницы, установленные на поддоне. На поддон устанавливают массивный литой башмак, поддерживающий центровую и перекрывающий швы сифонных проводок.

Крупные слитки обычно отливают сверху, мелкие и средние — сифоном. Разливка сифоном улучшает качество поверхности слитков, но

металла. Ковш состоит из стального сварного кожуха, имеющего форму усеченного конуса, футерованного изнутри огнеупорным шамотным кирпичом или монокристаллической набивной массой на основе кремнезема (рис. 12). Кожух имеет цапфы для захвата крюками мостового крана. В ковш подают часть шлака, предохраняющего сталь от быстрого охлаждения и окисления. В днище ковша вставлен разливочный стакан из огнеупорного материала с отверстием для выпуска металла. Отверстие перекрыто пробкой, навинченной на стальной стержень стопора, защищенного от контакта с

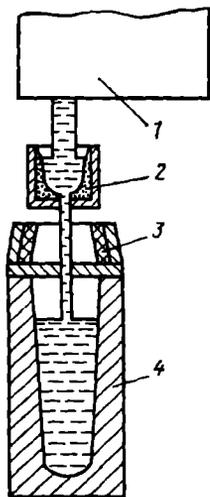


Рис. 13. Схема разливки стали сверху:

1 — ковш; 2 — промежуточная воронка; 3 — футерованная прибыльная подставка; 4 — изложница

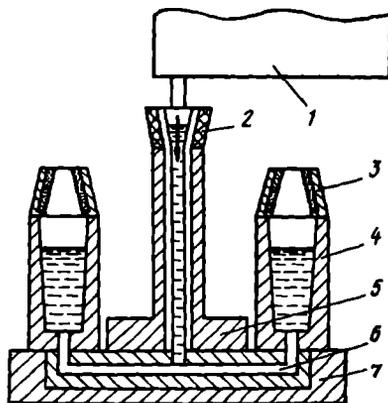


Рис. 14. Схема разливки стали сифоном:

1 — ковш; 2 — футерованная центровая проводка; 3 — футерованная прибыльная надставка; 4 — изложница; 5 — башмак; 6 — каналы сифонных проводок; 7 — поддон

требует более высокой температуры металла, увеличивает потери металла на литники и усложняет подготовку к разливке. При разливке сифоном существует опасность загрязнения стали неметаллическими включениями из-за размывания сифонного кирпича.

При затвердевании стали ее объем уменьшается примерно на 3 %. Это приводит к образованию усадочной раковины и усадочной пористости. При разливке спокойной стали пустоты должны быть выведены из тела слитка в его прибыльную часть, которая при дальнейшем переделе отрезается и идет в переплав. Этому способствует конусность изложниц, расширяющихся сверху, и применение утепленных прибыльных надставок, футерованных изнутри огнеупором. Теплоизоляционный слой уменьшает теплотери металла в головной части слитка, сталь в утепленной надставке длительное время сохраняется в жидком состоянии, питает металлом затвердевающий слиток и тем самым уменьшает глубину распространения усадочной раковины.

Объем прибыльной части слитка спокойной стали составляет 12—20 %, существенно снижая выход годного. При разливке кипящей стали утепленные прибыли не нужны, так как усадочные раковины не образуются, поскольку выделяющиеся в металле пузырьки CO полностью компенсируют усадку.

Более совершенной по сравнению с разливкой стали в слитки является непрерывная разливка, позволяющая уменьшить отходы и повы-

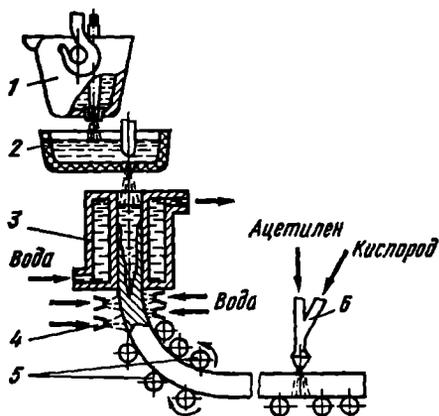


Рис. 15. Схема непрерывной разливки стали:

1 — сталеразливочный ковш; 2 — промежуточный ковш; 3 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 4 — зона вторичного охлаждения; 5 — тянущие валки; 6 — ацетилено-кислородный резак

разливки в кристаллизатор вводят специальную затравку, имеющую то же сечение и размер, что и полость кристаллизатора. Верхний торец затравки служит дном в кристаллизаторе в первые моменты литья, а нижний находится между тянущими валками. Частично затвердевший слиток протягивают сквозь кристаллизатор и он поступает в зону вторичного охлаждения. Режим вторичного охлаждения должен обеспечить быстрое затвердевание слитка. Вода из форсунок поступает на ролики, прилегающие к поверхности заготовки. В результате интенсивного охлаждения слиток успевает затвердеть раньше, чем достигнет тянущей клетки.

Продвижение слитка через установку осуществляется с помощью тянущих валков. По мере продвижения по роликам горизонтального рольганга затвердевший слиток разрезают на заготовки заданной длины с помощью кислородно-газовых резаков и передают на прокатку или на склад.

## 6. Внепечные способы рафинирования стали

Дополнительное улучшение качества стали может быть достигнуто при ее внепечной обработке. Основными методами внепечного рафинирования в современной металлургии являются обработка жидкого металла синтетическим шлаком в ковше, продувка стали инертными газами и ее вакуумирование.

суть качество металла. Это обусловлено тем, что вся жидкая сталь затвердевает в виде одного непрерывного слитка нужного профиля и неограниченной длины. Такой слиток, разрезанный на мерные длины, используется затем в прокатных цехах при производстве листа или сортового проката.

Схема непрерывной разливки стали приведена на рис. 15. Сталь из разливочного ковша поступает в предварительно подогретый промежуточный ковш, а оттуда — в полость интенсивно охлаждаемого сквозного медного кристаллизатора. Перед началом

Для рафинирования обычно применяют двухкомпонентный известково-глиноземный шлак, содержащий 55 % CaO и 45 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Шлак выплавляют в электродуговой печи с футеровкой из графита. Благодаря сравнительно невысокой температуре плавления (1450 °С) такой шлак жидкоподвижен, активен и обладает хорошей десульфурирующей способностью. Порцию шлака с температурой около 1650 °С в количестве 5—6 % от массы стали заливают в сталеразливочный ковш, ковш подают к желобу сталеплавильного агрегата и выпускают сталь, нагретую до определенной температуры. Струя жидкой стали падает с большой высоты на слой шлака в ковше, разбрызгивается на множество капель и энергично перемешивается со шлаком. Поверхность взаимодействия металла и шлака резко увеличивается, что способствует интенсивному удалению вредных примесей.

При продувке инертными газами из металла удаляют растворенные газы и неметаллические включения, а также выравнивают температуру и химический состав стали в ковше перед разливкой. Обычно для продувки используют аргон под давлением 0,2—0,5 МПа. Продувку ведут либо через пористые огнеупорные вставки в днище ковша, либо через футерованную форму, опускаемую в ковш с металлом сверху. При всплывании пузырьков аргона в них переходят водород и азот, растворенные в стали, и таким образом удаляются из металла; в результате содержание этих газов в стали уменьшается.

Вакуумную внепечную обработку жидкой стали проводят с целью удаления растворенных в ней газов и уменьшения содержания неметаллических включений. Вакуумирование осуществляют, помещая ковш или изложницу в вакуумную камеру. Азот и водород переходят в газовую фазу, и их концентрация в металле падает. Концентрация кислорода снижается вследствие более глубокого раскисления металла углеродом в условиях вакуума.

## Глава 3

### МЕТАЛЛУРГИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

#### 1. Производство меди

Содержание меди в земной коре составляет 0,01 %. Наибольшее промышленное значение имеют сульфидные руды, на которые приходится около 80 % всех мировых запасов меди. К сульфидным рудам относятся медный колчедан или халькопирит CuS · FeS, халькозин Cu<sub>2</sub>S и др. Среднее содержание меди в рудах составляет 1—2 %. Пустая порода обычно

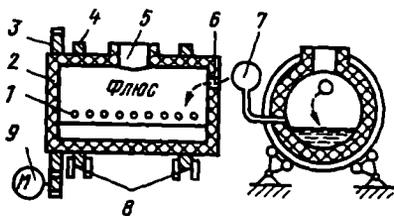


Рис. 16. Схема медеплавильного конвертера:

1 — фурмы воздушного дутья; 2 — футерованный кожух; 3 — зубчатая передача; 4 — обод; 5 — горловина для заливки штейна; 6 — отверстие для загрузки флюса; 7 — воздухопровод; 8 — опорные ролики; 9 — электродвигатель с редуктором

состоит из песчаников, глины, известняка и др. Многие руды являются полиметаллическими и кроме меди содержат другие ценные металлы: серебро, золото, никель, свинец и т.д.

Извлечение меди из руд производится двумя способами: гидрометаллургическим и пирометаллургическим. Более широкое распространение получил пирометаллургический способ, включающий операции обогащения руд с получением концентрата, его обжиг, плавку на медный штейн, получение черновой меди и ее рафинирование. Для обогащения медных руд применяют *метод флотации*, основанный на разной смачиваемости водой с поверхностно-активными добавками металлосодержащих частиц и частиц пустой породы. При флотации удаляют большую часть пустой породы и получают медный концентрат, содержащий до 30 % Cu.

После обогащения рудные концентраты подвергают обжигу для частичного удаления (до 50 %) серы. Руду, прошедшую обжиг и называемую *огарком*, направляют на дальнейшую переработку, а образовавшийся сернистый газ  $SO_2$  используется для производства серной кислоты.

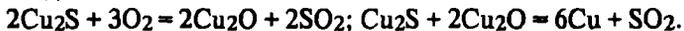
Плавка на штейн проводится в отражательных пламенных печах и электропечах. В их рабочем пространстве развивается температура до  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ . На подине печи постепенно скапливаются жидкие продукты плавки: шлак, в основном состоящий из оксидов, и штейн — сплав, состоящий в основном из сульфидов  $Cu_2S$  и  $FeS$  и небольшого количества примесей. Штейн по мере накопления выпускают в ковш. В расплавленном состоянии штейн, имеющий температуру плавления  $900\text{—}1150\text{ }^\circ\text{C}$ , поступает в конвертер (рис. 16) для переработки в черновую медь.

Конвертер имеет горизонтальный цилиндрический стальной сварной кожух, футерованный изнутри магнезитовым кирпичом. Расплавленный штейн заливают в конвертер через горловину. Конвертер установлен на опорных роликах и с помощью зубчатого венца может поворачиваться в заданное положение. Через 40—50 фурм, расположенных в огнеупорной кладке по образующей конвертера, под давлением подается воздух. На поверхность штейна загружают кварцевый песок для шлакования образующихся при продувке оксидов железа. Процесс про-

дувки воздухом, длящийся в общей сложности до 30 ч, делится на два периода.

Первый период состоит в окислении сульфидов железа кислородом воздушного дутья:  $2\text{FeS} + 3\text{O}_2 = 2\text{FeO} + 2\text{SO}_2 + \text{Q}$ . Образующийся оксид FeO взаимодействует с кремнеземом флюса и переходит в шлак:  $2\text{FeO} + \text{SiO}_2 = \text{SiO}_2 \cdot 2\text{FeO} + \text{Q}$ . Сернистый газ направляется на производство серной кислоты. Конвертерный шлак в конце первого периода сливают в ковш и направляют на повторную переработку в отражательные печи для извлечения меди. Оставшийся штейн приобретает белый цвет и состоит в основном из сульфидов меди  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Содержание меди в белом штейне составляет около 80 %. Обе реакции проходят с выделением тепла и ванна разогревается до 1250—1300 °С.

После скачивания шлака наступает второй период, во время которого расплавленный белый штейн продувают воздухом и получают черную медь:



Черновая медь содержит до 2% примесей железа, серы, цинка, никеля, свинца и др. Ее разливают в слитки на ленточных разливочных машинах и отправляют на рафинирование. Рафинирование черновой меди проводят огневым и электролитическим способами.

При огневом рафинировании черновую медь загружают в пламенные печи вместимостью до 400 т и после расплавления продувают воздухом через футерованные стальные трубы для окисления меди и растворенных в ней примесей:  $4\text{Cu} + \text{O}_2 = 2\text{Cu}_2\text{O}$ .

Оксид меди (I)  $\text{Cu}_2\text{O}$  хорошо растворим в меди, быстро распространяется по всему объему ванны. Так как большинство примесей (Al, Si, Mn, Zn, Sn, Fe, Ni и др.) имеют более высокое сродство к кислороду, чем медь, оксид меди (I) производит их окисление:  $\text{Me} + \text{Cu}_2\text{O} = \text{MeO} + 2\text{Cu}$ .

Из примесей не окисляются только благородные металлы: золото и серебро. Они остаются растворенными в меди.

Образовавшиеся оксиды примесей нерастворимы в меди и удаляются в шлак. Оксиды некоторых примесей ( $\text{SbO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ) легко возгоняются и улетучиваются с печными газами.

После скачивания шлака металл раскисляют и перемешивают природным газом для удаления растворенных в нем газов. Раскисление меди происходит по реакции



После огневого раскисления расплав содержит 99,5—99,7% Cu. Из него изготовляют слитки или анодные пластины для электролитического рафинирования.

Электролиз проводят в ваннах, футерованных кислотостойкими материалами, например листовым свинцом, асфальтом, керамическими плитами. Электролитом служит 15%-ный раствор медного купороса и

серной кислоты. На равном расстоянии друг от друга попеременно в электролит погружают анодные пластины черновой меди и катоды, представляющие собой тонкие пластины из чистой электролитической меди. Аноды и катоды подвешивают на анодной и катодной шинах. При включении постоянного тока происходит растворение металла анодов, катионы  $\text{Cu}^{2+}$  переходят в раствор, а на катодах происходит разрядка катионов:  $\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$  с выделением металлической меди. Электролитическая медь имеет более высокую чистоту от примесей и содержит до 99,98 %  $\text{Cu}$ . За 10—12 дней на катоде отлагается до 200 кг меди. Катодную медь выгружают из ванны, промывают, переплавляют в плавильных печах, разливают в слитки и отправляют для проката на лист, трубы и проволоку, а также для выплавки сплавов меди — латуней и бронз.

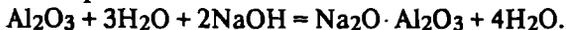
## 2. Производство алюминия

В группу легких металлов, имеющих плотность меньше  $5 \text{ г/см}^3$ , входят  $\text{Al}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Be}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{K}$  и др. Наибольшее промышленное применение из них имеют алюминий, магний, титан.

Алюминий является самым распространенным металлом в земной коре. Он преимущественно встречается в виде соединений с кислородом и кремнием — алюмосиликатов. Для получения алюминия используют руды, богатые глиноземом  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Чаще всего применяют бокситы, в которых содержится, %:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  40—60,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  15—30,  $\text{SiO}_2$  5—15,  $\text{TiO}_2$  2—4 и гидратной влаги 10—15.

Технологический процесс производства алюминия состоит из трех этапов: извлечение глинозема из алюминиевых руд, электролиз расплавленного глинозема с получением первичного алюминия и его рафинирование. Извлечение глинозема обычно производят щелочным способом, применяемым в двух вариантах: мокром (метод Байера) и сухом.

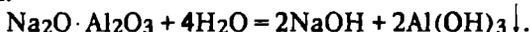
При мокром методе бокситы сушат, измельчают и загружают в герметические автоклавы с концентрированной щелочью, где выдерживают в течение 2—3 ч при температуре 150—250 °С и давлении до 3 МПа. При этом протекают реакции взаимодействия гидроксида алюминия с едким натром:



Раствор алюмината натрия  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}$  в виде горячей пульпы идет на дальнейшую переработку. Оксиды железа, титана и другие примеси, не растворяющиеся в щелочах, выпадают в осадок — шлам.

Кремнезем также взаимодействует со щелочью и образует силикат натрия:  $\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ , который, в свою очередь, взаимодействуя с алюминатом натрия, выпадает в осадок, образуя нерастворимое соединение  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

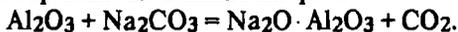
Пульпа после фильтрации и разбавления водой сливается в отстойник, где из алюминатного раствора выпадает в осадок гидроксид алюминия:



Гидроксид алюминия фильтруют и прокаливают при температуре до 1200 °С в трубчатых вращающихся печах. В результате получается глинозем:



Сухой щелочной способ или способ спекания состоит в совместном прокаливании при температурах 1200—1300 °С смеси боксита, соды и извести, приводящем к образованию спека, в котором содержится водорастворимый алюминат натрия:

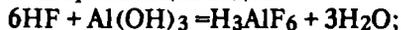


Известь расходуется на образование нерастворимого в воде силиката кальция  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . Алюминат натрия выщелачивают из спека горячей водой и полученный раствор продувают углекислотой:



Осадок промывают и прокаливают, получая глинозем, как и в предыдущем способе.

Алюминий получают электролизом глинозема, растворенного в расплавленном криолите  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . Этот метод был предложен в 1886 г. одновременно Ч.Холлом в США и П.Эру во Франции и применяется до сих пор почти без изменений. Криолит получают в результате взаимодействия плавиковой кислоты  $\text{HF}$  с гидроксидом алюминия с последующей нейтрализацией содой:



Электролиз осуществляют в алюминиевой ванне — электролизере, схема которого приведена на рис. 17. Ванна имеет стальной кожух прямоугольной формы, а ее стену и подину изготавливают из угольных блоков, теплоизолированных шамотным кирпичом. В футеровку подины вмонтированы стальные катодные шины, благодаря чему угольный корпус ванны является катодом электролизера. Анодами служат самообжигающиеся, вертикально расположенные угольные электроды, погруженные в расплав. При электролизе аноды постепенно сгорают и перемещаются вниз. По мере сгорания они наращиваются сверху жидкой анодной массой, из которой при нагреве удаляются летучие и происходит ее коксование. Электролит нагревается до рабочей температуры 930—950 °С. Глинозем, расходуемый в процессе электролиза, периодически загружают в ванну сверху. Благодаря охлаждению воздухом на поверхности образуется корка электролита. На боковой поверхности ванны образуется затвердевающий слой электролита (гарнисаж), предохраняющий футеровку от разрушения и теплоизолирующий ванну.

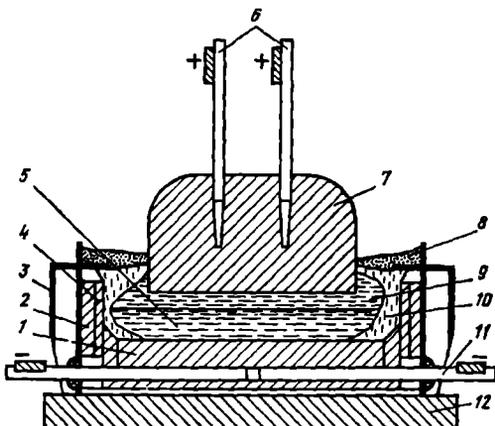
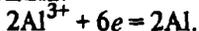


Рис. 17. Схема электролизера для производства алюминия:

1 — катодные угольные блоки; 2 — огнеупорная футеровка; 3 — стальной кожух; 4 — угольные плиты; 5 — жидкий алюминий; 6 — металлические стержни с шинами; 7 — угольный анод; 8 — глинозем; 9 — жидкий электролит; 10 — корка затвердевшего электролита; 11 — катодная токоподводящая шина; 12 — фундамент

При высокой температуре глинозем  $Al_2O_3$ , растворенный в электролите, диссоциирует на ионы:  $Al_2O_3 \rightleftharpoons 2Al^{3+} + 3O^{2-}$ . На поверхности угольной подины, являющейся катодом, ионы восстанавливаются до металла:



По мере уменьшения содержания глинозема в электролите его периодически загружают в ванну электролизера. Жидкий алюминий скапливается на подине электролизера и периодически удаляется с помощью вакуумных ковшей.

Кислородные ионы разряжаются на угольном аноде:  $3O^{2-} - 6e = 3/2 O_2$ , окисляют анод, образуя CO и CO<sub>2</sub>, которые удаляются вентиляционными устройствами. Электролизные ванны соединяют последовательно в серии из 100—200 ванн.

Первичный алюминий, полученный в электролизной ванне, загрязнен примесями Si, Fe, неметаллическими включениями ( $Al_2O_3$ , C), а также газами, преимущественно водородом. Для очистки алюминия его подвергают рафинированию либо хлорированием, либо электролитическим способом.

Более чистый алюминий получают электролитическим рафинированием, где электролитом являются безводные хлористые и фтористые соли. В расплавленном электролите алюминий подвергают анодному растворению и электролизу. Электролитическим рафинированием получают алюминий чистотой до 99,996 %, потребляемый электрической, химической и пищевой промышленностью. Еще более чистый алюминий (99,9999 %) можно получить зонной плавкой. Этот способ дороже электролиза, мало производителен и применяется для изготовления

небольших количеств металла в тех случаях, когда необходима особая чистота, например для производства полупроводников.

### 3. Производство магния

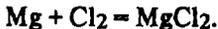
Сырьем для производства магния служит магнезит, в основном состоящий из  $MgCO_3$ , доломит  $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ , карналлит —  $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$ .

Существуют два способа получения металлического магния: термический и электролитический. В основе первого способа лежит восстановление оксида магния углеродом или кремнием, а второго — электролиз расплавленного хлористого магния  $MgCl_2$ . Более распространен электролитический способ производства металлического магния. Он состоит из двух основных процессов: получения хлористого магния из исходного сырья и его электролиза.

Хлористый магний получают обжигом магнезита или доломита и хлорированием образовавшегося оксида магния при  $800—900^\circ C$  в присутствии восстановителя (углерода):



Электролиз расплавленного хлорида  $MgCl_2$  производится в электролизерах, представляющих собой герметизированные ванны прямоугольной формы с шамотной футеровкой (рис. 18). Аноды изготовляют из графита, катодами служат две стальные пластины. В качестве электролита используют расплав хлористых солей  $MgCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $CaCl_2$ , содержащий 7—15 %  $MgCl_2$ . Анодное пространство отделено от катодного огнеупорной перегородкой. После восстановления магний и хлор не должны взаимодействовать; это привело бы к сгоранию магния в хлоре:



Как и при электролизе глинозема, электрический ток, проходя через электролит, нагревает его и осуществляет электрохимический процесс.

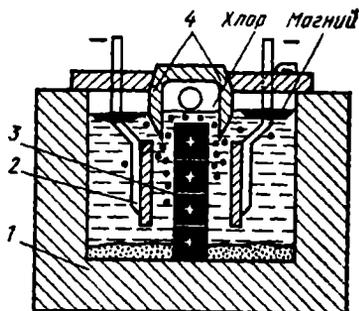


Рис. 18. Схема магниевых электролизера:

1 — ванна из огнеупорного кирпича в стальном кожухе; 2 — стальные катоды; 3 — графитовые аноды; 4 — огнеупорные диафрагмы, отделяющие анодное пространство от катодного

Ионы магния разряжаются на катоде:  $Mg^{2+} + 2e = Mg$ . Плотность магния меньше плотности электролита, поэтому магний всплывает и скапливается на поверхности ванны. Для предупреждения окисления магния ванну закрывают керамической крышкой. Расплавленный магний периодически удаляют с помощью вакуумных ковшей и сифонов. Образующийся на аноде хлор отсасывается через хлоропровод.

После электролиза магний содержит примеси. Его подвергают рафинированию, которое осуществляют переплавкой в тигельных печах с флюсами или возгонкой. Рафинированный металл, содержащий не менее 99,9 % Mg, разливают в чушки на разливочной машине. При разливке струя магния предохраняется от окисления путем опыления металла порошком серы.

#### 4. Производство титана

По содержанию в земной коре (0,6 %) титан занимает четвертое место после алюминия, железа и магния. Из-за высокого сродства к кислороду прямое восстановление титана из его оксидов представляет большие трудности. Восстановление диоксида титана углеродом возможно при температурах выше 1800 °С. Однако при этих температурах одновременно с титаном образуются карбид TiC и нитрид TiN, которые растворяются в титане, обесценивая его хрупкость. При высоких температурах титан легко взаимодействует с кислородом и водородом, также снижающим его пластичность. Из-за трудностей получения металла, чистого от карбидов, нитридов и растворенных газов, до сороковых годов нашего века титан считался хрупким материалом, непригодным для обработки давлением.

Технический способ производства чистого титана был разработан в 40-х годах В.Кроллем, работавшим в Германии и США. Процесс получения технического титана состоит из: 1) обогащения руды и получения диоксида титана; 2) получения четыреххлористого титана; 3) восстановления титана и получения титановой губки; 4) переплавки титановой губки в слитки.

Основными исходными рудами для производства титана являются ильменит  $FeO \cdot TiO_2$  (38—61 %  $TiO_2$ ) и рутил (91—99 %  $TiO_2$ ). Перед переработкой руды обогащают обычными методами (флотацией, магнитной сепарацией и др.). После восстановительной плавки в электродуговых печах с добавлением в шихту углеродсодержащих материалов отделяют основную массу железа и получают достаточно чистый диоксид титана.

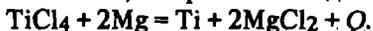
Для получения четыреххлористого титана диоксид титана смешивают с коксом или древесным углем, в качестве связующего добавляют каменноугольную смолу и из полученной смеси прессуют брикеты. Пос-

ле прокаливания при 800 °С пористые брикеты подвергают хлорированию в герметизированных электрических печах — хлораторах. В реакционной зоне происходит реакция



Четыреххлористый титан имеет температуру кипения 136 °С, поэтому он находится в парообразном состоянии. Для отделения от углекислого газа его направляют в конденсатор, где он переходит в жидкое состояние, а затем подвергается очистке от примесей. Очищенный  $\text{TiCl}_4$  — это бесцветная прозрачная жидкость, которая должна содержать не более 0,01 % элементов: железа, ванадия или кремния.

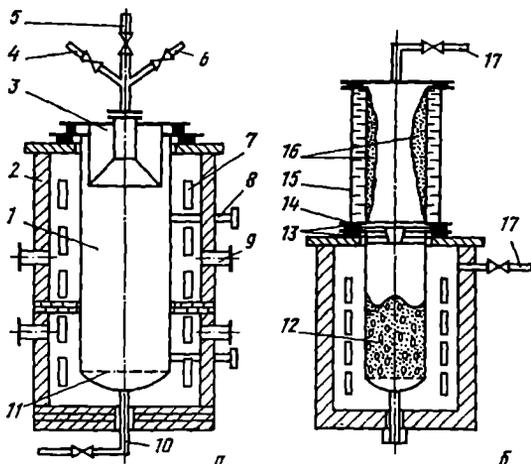
Восстановление титана обычно производят с помощью магния в специальных реакторах (рис. 19). Реактор представляет собой герметичную реторту из коррозионностойкой стали, имеющую систему слива хлористого магния и помещенную в шахтную электропечь. В реторту загружают слитки чистого магния, затем ее герметизируют, откачивают воздух, заполняют очищенным аргоном и помещают в печь. При температуре около 700 °С магний расплавляется, после чего температуру в реакторе доводят до 800 °С и подают жидкий очищенный четыреххлористый титан, который взаимодействует с магнием по реакции



Процесс идет с выделением тепла, поэтому электрообогрев выключают. Температуру в реторте регулируют подачей четыреххлористого титана и обдувом воздуха от вентилятора. Температура не должна превышать 950—1000 °С, так как иначе может начаться взаимодействие титана со стальными стенками реторты. Образующийся жидкий хлористый магний периодически сливают.

Рис. 19. Схема установки для получения титановой губки магнитермическим способом:

*a* — аппарат для восстановления  $\text{TiCl}_4$ ; *б* — аппарат отгонки магния и его хлорида из титановой губки; 1 — реторта; 2 — электропечь; 3 — крышка; 4 — патрубок для подвода аргона; 5 — патрубок для подачи  $\text{TiCl}_4$ ; 6 — патрубок для откачки воздуха; 7 — электронагреватель; 8 — датчики для измерения температуры; 9 — каналы для обдува реторты воздухом; 10 — слив  $\text{MgCl}_2$ ; 11 — решетка; 12 — продукты реакции восстановления; 13 — уплотняющие прокладки; 14 — тепловые экраны; 15 — конденсатор; 16 — конденсат; 17 — патрубок к вакуумной системе



Восстановленный титан выделяется на стенках реактора в виде губчатой массы, пропитанной хлористым магнием и магнием. Она содержит около 55—60 % Ti, 25—30 % Mg, 10—15 % MgCl<sub>2</sub>. Для рафинирования губчатой массы реторту вакуумируют при температуре 900—950 °С в течение 25—40 ч и проводят отгонку паров примесей магния и хлористого магния, которые осаждаются в конденсаторе. Затем реторту охлаждают и извлекают из нее титановую губку. Полученная титановая губка — это пористая масса серого цвета с развитой поверхностью, легко поглощающая кислород, азот и пары воды.

Титановая губка более высокого качества получается при использовании натрия в качестве восстановителя.

Переплав титановой губки производят в вакуумных электрических дуговых печах с расходуемым электродом, который получают прессованием из измельченной титановой губки. Материал тигля может загрязнять титан, поэтому плавку ведут в водоохлаждаемой медной изложнице. Быстро затвердевая на стенках тигля, титан не сплавляется с медью. Электрическая дуга горит между расходуемым электродом и жидкой ванной расплавленного металла и постепенно оплавляет электрод. Для улучшения качества металла производят двойную переплавку. При второй плавке в качестве расходуемого электрода используют слиток первой плавки.

Недостатком метода вакуумно-дугового переплава является сложность использования титановых отходов в шихте. Использование отходов возможно при проведении вакуумно-дуговой плавки в гарнисаже. В расплавленном состоянии титан энергично взаимодействует со всеми огнеупорными материалами, из которых могут быть изготовлены тигли для его переплава. Титан взаимодействует с кремнеземом, магниезитом, диоксидом циркония и насыщается кислородом. При использовании графитового тигля титан насыщается углеродом (до 1 %). Загрязнение титана резко ухудшает его свойства. Чтобы исключить взаимодействие расплавленного металла с материалом тигля, его внутреннюю поверхность облицовывают затвердевшей корочкой титана, называемой гарнисажем. Благодаря этому расплавленный титан находится в контакте со слоем твердого титана толщиной 2—3 мм и не загрязняется примесями из материала тигля.

При проведении гарнисажной плавки в графитовый тигель загружают титановые отходы и свежий губчатый титан. Между расходуемым электродом и шихтой зажигают дугу. По мере расплавления электрода расплавляется и шихта в тигле. После оплавления электрода печь поворачивают и основную массу расплава сливают в изложницу или литейную форму, а часть оставляют остывать вместе с тиглем.

В настоящее время используют гарнисажные печи вместимостью по титану 5—10 т.

Глава 1  
СТРОЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

1. Общие сведения

Металловедение — это наука, изучающая связь состава, строения и свойств металлов и сплавов в различных термодинамических условиях.

Используя металлы достаточно давно, люди замечали, что при холодной деформации (наклепе) металл упрочняется, а при последующем нагреве восстанавливает пластичность. Однако еще до середины прошлого века не было известно, какие изменения происходят в металле в процессе деформации.

Как наука металлостроения насчитывает менее 200 лет. Основы научного металлостроения были заложены великими русскими металлургами П.П.Аносовым (1799—1851 гг.) и Д.К.Черновым (1839—1921 гг.). П.П.Аносов впервые применил микроскоп для исследования структуры металлов, установил связь строения и свойств стали, разработал научные принципы получения стали высокого качества, раскрыл секрет производства булата. Д.К.Чернов, работавший в Петербурге на Обуховском заводе, открыл существование критических температур фазовых превращений в стали (критических точек) и их связь с содержанием углерода. Он заложил основы создания диаграммы сплавов железо—углерод, являющейся важнейшей в металлостроении. Им была разработана теория кристаллизации металлов и термической обработки стали. По словам академика А.А.Байкова, значение Д.К.Чернова для металлургии соизмеримо со значением Д.И.Менделеева для химии. Большое значение для развития металлостроения имели труды Н.Н.Курнакова (1860—1941 гг.), разработавшего методы физико-химического анализа сплавов и построения диаграмм состояния, А.А.Байкова (1870—1946 гг.), предложившего физико-химическую интерпретацию металлургических процессов, С.С.Штейнберга (1872—1940 гг.) и Н.И.Минкевича (1883—1942 гг.), внесших существенный вклад в развитие теории и технологии термической обработки. Использование методов рентгеновского анализа для исследования металлов позволило немецким ученым М.Лауэ и П.Дебаю, а также У.Г.Брэггу (Англия) установить их кристаллическое строение и изучить изменения структуры сплавов при разных способах обработки. Для развития современного металлостроения важ-

ную роль сыграли работы Г.В.Курдюмова, В.Д.Садовского (СССР), Юм-Розери и Н.Мотта (Англия), Ф.Зейтца (США) и др.

Металлы делятся на две большие группы:

железо и сплавы на основе железа (сталь, чугун) называют черными металлами, а остальные металлы (Al, Mg, Cu, Ni, V, Zn, Ti, W, Mo и др.) и их сплавы — цветными.

Помимо черных и цветных металлов и сплавов различают легкие металлы (Mg, Be, Al, Ti), обладающие малой плотностью; легкоплавкие металлы (Zn, Sn, Pb) с температурой плавления соответственно 419,5; 232; 327 °С;

тугоплавкие металлы (W, Mo, Nb, Ta) с температурой плавления выше, чем у железа (1536 °С);

благородные металлы (Ag, Au, Pt) с высокой устойчивостью против коррозии;

урановые металлы (актиниды), используемые для атомной техники; редкоземельные металлы (РЗМ) — лантаноиды;

щелочные (Li) и щелочноземельные металлы (Na, K) — в свободном состоянии применяются в качестве жидкометаллических теплоносителей в атомных реакторах для отвода тепла от клапанов авиамоторов; натрий также используется в качестве катализатора в производстве искусственного каучука;

76 элементов периодической системы Д.И.Менделеева из 106, известных в настоящее время, являются металлами. Такие элементы, как Si, Ge, As, Se, Te являются промежуточными между металлами и неметаллами, иногда их называют «полуметаллами».

Свойства металлов разнообразны: ртуть не замерзает при температурах ниже 0 °С, вольфрам выдерживает рабочие температуры выше 2000 °С, литий легче воды, а осмий в 45 раз тяжелее лития, электропроводность серебра в 130 раз выше, чем у марганца. Металлы имеют характерные общие свойства, отличающие их от кристаллических неметаллов и полуметаллов. К ним относятся высокая пластичность; высокие тепло- и электропроводность; хорошая отражательная способность (металлы непрозрачны и имеют характерный металлический блеск); термоэлектронная эмиссия, т.е. способность к испусканию электронов при нагреве; кристаллическое строение.

## 2. Кристаллическое строение металлов

Общим свойством металлов и сплавов является их кристаллическое строение, характеризующееся определенным закономерным расположением атомов в пространстве. Для описания атомно-кристаллической структуры используют понятие кристаллической решетки, являющейся воображаемой пространственной сеткой с ионами (атомами) в узлах.

Атомно-кристаллическая структура может быть представлена изображением не ряда периодически повторяющихся объемов, а одной элементарной ячейкой. Элементарной ячейкой называется ячейка, повторяющаяся во всех трех измерениях. Трансляцией этого наименьшего объема можно полностью воспроизвести структуру кристалла.

Наиболее часто металлы имеют кристаллические решетки следующих типов: объемноцентрированный куб или сокращенно ОЦК; гранецентрированный куб (ГЦК); гексагональная плотноупакованная (ГП).

Типы элементарных ячеек кристаллических решеток металлов и схемы упаковки атомов приведены на рис. 20. В точках пересечения прямых линий располагаются атомы; они называются узлами решетки. Расстояния  $a$  и  $c$  между центрами атомов, находящихся в соседних узлах решетки, называют параметрами или периодами решетки. Величина их в металлах порядка 0,3—0,7 нм, размеры элементарных ячеек 0,2—0,3 нм.

Если принять, что атомы в решетке представляют собой упругие соприкасающиеся шары, то нетрудно видеть, что в решетке, помимо атомов, имеется значительное свободное пространство. Плотность кристаллической решетки, т.е. объем, занятый атомами, характеризуется коэффициентом компактности.

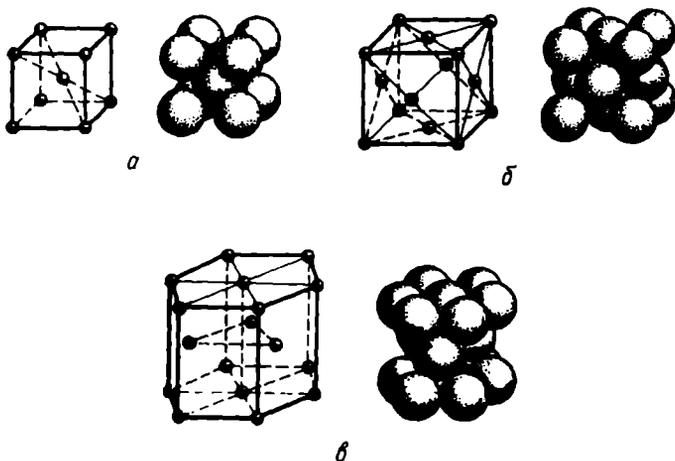


Рис. 20. Типы элементарных ячеек кристаллических решеток и схемы упаковки в них атомов:

$a$  — объемноцентрированная кубическая;  $b$  — гранецентрированная кубическая;  $c$  — гексагональная плотноупакованная решетка

Координационным числом называется число атомов, находящихся на наиболее близком равном расстоянии от данного атома. Для ОЦК решетки координационное число равно 8, для решеток ГЦК и ГП оно составляет 12. Из этого следует, что решетка ОЦК менее компактна, чем решетки ГЦК и ГП. В решетке ОЦК каждый атом имеет всего 8 ближайших соседей, а в решетках ГЦК и ГП — 12.

Коэффициент компактности  $Q$  равен отношению суммарного объема атомов, входящих в решетку, к объему решетки:

$$Q = \frac{4\pi R^3}{3V} \cdot n \cdot 100,$$

где  $R$  — радиус атома (иона);  $n$  — базис или число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку;  $V$  — объем элементарной ячейки; для простой кубической решетки  $n = 1/8 \cdot 8 = 1$ ;  $V = a^3 = (2R)^3$  и  $Q = 52\%$ .

Для ОЦК  $n = 1/8 \cdot 8 + 1 = 2$ . Учитывая, что атомы соприкасаются по диагонали куба, длина которой равна 4 атомным радиусам, параметр решетки равен  $a = 4R\sqrt{3}$ , а  $Q_{\text{ОЦК}} = 68\%$ .

Проведя аналогичные вычисления, найдем  $Q_{\text{ГЦК}} = 74\%$ ,  $Q_{\text{ГП}} = 74\%$ .

Таким образом, решетки ГЦК и ГП более компактны, чем ОЦК.

Некоторые металлы при разных температурах могут иметь различную кристаллическую решетку. Способность металла существовать в различных кристаллических формах носит название полиморфизма или аллотропии. Принято обозначать полиморфную модификацию, устойчивую при более низкой температуре, индексом  $\alpha$  ( $Fe_\alpha$ ), при более высокой  $\beta$ , затем  $\gamma$  и т.д.

Известны полиморфные превращения железа:  $Fe_\alpha \rightleftharpoons Fe_\gamma$ , титана  $Ti_\alpha \rightleftharpoons Ti_\beta$  и других элементов.

Температура превращения одной кристаллической модификации в другую называется температурой полиморфного превращения.

При полиморфном превращении меняются форма и тип кристаллической решетки. Это явление называется перекристаллизацией. Так, при температуре ниже  $911^\circ\text{C}$  устойчиво  $Fe_\alpha$ , имеющее кристаллическую решетку ОЦК. Выше  $911^\circ\text{C}$  до  $1392^\circ\text{C}$  устойчиво  $Fe_\gamma$ , имеющее решетку ГЦК. При нагреве выше  $911^\circ\text{C}$  атомы решетки ОЦК перестраиваются, образуя решетку ГЦК. На явлении полиморфизма основана термическая обработка.

При переходе из одной полиморфной формы в другую меняются свойства, в частности плотность и соответственно объем вещества. Например, плотность  $Fe_\gamma$  на 3% больше плотности  $Fe_\alpha$ , а удельный объем соответственно меньше. Эти изменения объема необходимо учитывать при термообработке.

Полиморфизм олова явился одной из причин гибели полярной экспедиции английского исследователя Р.Скотта. Оловом были запаяны канистры с керосином. При низкой температуре произошло полиморфное превращение пластичного белого олова с образованием крупного порошка серого олова. Горючее вылилось и испарилось, и на обратном пути экспедиция осталась без топлива. Превращение белого олова в серое называют «оловянной чумой».

Типы кристаллических решеток важнейших металлических элементов приведены в табл. 1.

Свойства материалов зависят от природы атомов, из которых они состоят и силы взаимодействия между ними. Аморфные материалы характеризуются хаотическим расположением атомов. Поэтому свойства их в различных направлениях одинаковы или, другими словами, аморфные материалы изотропны. В кристаллических материалах расстояния между атомами в разных кристаллографических направлениях различны. Например, в ОЦК решетке в кристаллографической плоскости, проходящей через грань куба, находится всего один атом, так как четыре атома в вершинах одновременно принадлежат четырем соседним элементарным ячейкам:  $1/4 \cdot 4 = 1$  атом. В то же время в плоскости, проходящей через диагональ куба, будут находиться два атома:  $1 + (1/4 \cdot 4) = 2$ .

Из-за неодинаковой плотности атомов в различных направлениях кристалла наблюдаются разные свойства. Зависимость свойств в кристалле от направления называется *анизотропией*.

Таблица 1. Типы кристаллических решеток важнейших металлических элементов

*А. Металлы с одним типом решетки*

Тип решетки	Координационное число	Коэффициент компактности	Металл
ОЦК	8	68	Na, K, V, Nb, Cr, Mo, W
ГЦК	12	74	Cu, Ag, Au, Pt, Al, Pb, Ni
ГП	12	74	Be, Mg, Zn, Cd

*Б. Металлы с полиморфными превращениями*

Металл	Тип решетки	Температура превращения, °С
Ca	ГЦК $\rightleftharpoons$ ГП	450
Ce	ГП $\rightleftharpoons$ ГЦК	477
Zr	ГП $\rightleftharpoons$ ОЦК	862
Ti	ГП $\rightleftharpoons$ ОЦК	882
Fe	ОЦК $\rightleftharpoons$ ГЦК $\rightleftharpoons$ ОЦК	911, 1392

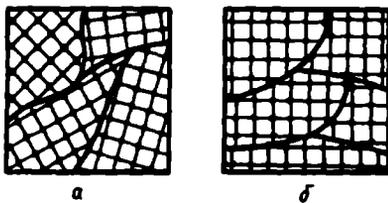


Рис. 21. Ориентировка кристаллических решеток в зернах литого металла (а) и после обработки давлением (б)

Разница в физико-химических и механических свойствах кристаллов в разных направлениях может быть весьма существенной. При измерении в двух взаимно перпендикулярных направлениях кристалла цинка значения температурного коэффициента линейного расширения различаются в 3—4 раза, а прочности кристалла железа — более, чем в 2 раза.

Анизотропия свойств характерна для одиночных кристаллов, или для так называемых монокристаллов. Большинство же технических металлов, затвердевших в обычных условиях, имеют поликристаллическое строение. Они состоят из большого числа кристаллов или зерен (рис. 21, а). При этом каждое отдельное зерно анизотропно. Различная ориентировка отдельных зерен приводит к тому, что в целом свойства поликристаллического металла усреднены.

Поликристаллическое тело характеризуется *квазиизотропностью* — кажущейся независимостью свойств от направления испытания. Квазиизотропность сохраняется в литом состоянии. При обработке давлением (прокатке, ковке), особенно, если она ведется без нагрева, большинство зерен металла приобретает примерно одинаковую ориентировку — так называемую *текстуру* (рис. 21, б), после чего металл становится анизотропным. Свойства деформированного металла вдоль и поперек направления главной деформации могут существенно различаться.

Анизотропия может приводить к дефектам металла — расслою, волнистости листа. Анизотропию необходимо учитывать при конструировании и разработке технологии получения деталей.

### 3. Дефекты строения кристаллических тел

Идеальная кристаллическая решетка представляет собой многократное повторение элементарных кристаллических ячеек. Для реального металла характерно наличие большого количества дефектов строения, нарушающих периодичность расположения атомов в кристаллической решетке. Эти дефекты оказывают существенное влияние на свойства материала.

Различают три типа дефектов кристаллического строения: точечные, линейные и поверхностные.

### 3.1. Точечные дефекты

Точечные дефекты (рис. 22) характеризуются малыми размерами во всех трех измерениях. Величина их не превышает нескольких атомных диаметров. К точечным дефектам относятся: а) свободные места в узлах кристаллической решетки — вакансии; б) атомы, сместившиеся из узлов кристаллической решетки в межузельные промежутки — дислоцированные атомы; в, г) атомы других элементов, находящиеся как в узлах, так и в междоузлиях кристаллической решетки, — примесные атомы.

Точечные дефекты образуются в процессе кристаллизации под воздействием тепловых, механических, электрических воздействий, а также при облучении нейтронами, электронами, рентгеновскими лучами.

Вакансии и дислоцированные атомы могут появляться вследствие тепловых движений атомов при любой температуре. При комнатной температуре концентрация вакансий и дислоцированных атомов сравнительно невелика, но резко повышается при нагреве, особенно вблизи температуры плавления. Точечные дефекты не закреплены в определенных объемах металла, они непрерывно перемещаются в кристаллической решетке в результате диффузии.

Косвенным доказательством образования вакансий в кристаллической решетке может служить простой эксперимент с нагревом двух одинаковых образцов алюминия до температуры, на несколько градусов ниже его температуры плавления. Если охлаждение этих образцов происходит с разной скоростью, то при комнатной температуре объем быстро охлажденного (закаленного) образца будет на 0,2 % больше, чем объем медленно охлажденного (отожженного) образца. Объясняется это тем, что при температуре, близкой к температуре плавления, благодаря диффузии части атомов к поверхности в металле образуется большое число вакансий. В случае медленного охлаждения большинство атомов успевает вернуться в исходное положение, при быстром охлаждении не успевает. Эти вакансии остаются в структуре закаленного образца. Если

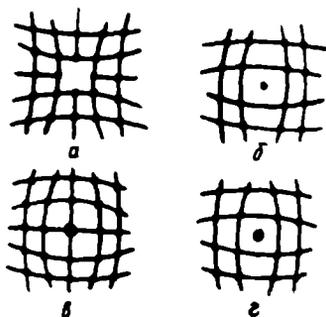


Рис. 22. Точечные дефекты и схемы искажения около них кристаллической решетки:

а — вакансия; б — дислоцированный атом; в, г — примесные атомы

же закаленный образец вновь нагреть и медленно охладить, разница между объемами образцов исчезнет.

Точечные дефекты производят локальное изменение межатомных расстояний, тем самым искажая кристаллическую решетку. При этом увеличивается сопротивление решетки дальнейшему смещению атомов, что способствует некоторому упрочнению кристаллов и повышает их электросопротивление.

Вакансии, дислоцированные атомы и другие точечные дефекты обнаружены при исследовании металлов с помощью автоионного микроскопа, дающего увеличение свыше  $10^6$  раз.

### 3.2. Линейные дефекты

Линейные дефекты характеризуются малыми размерами в двух измерениях, но имеют значительную протяженность в третьем измерении. Наиболее важным видом линейных дефектов являются дислокации (лат. dislocation — смещение).

Теория дислокаций была впервые применена в середине тридцатых годов нашего века физиками Орована, Поляни и Тейлором для описания процесса пластической деформации кристаллических тел. Ее использование позволило объяснить природу прочности и пластичности металлов. Теория дислокаций дала возможность объяснить огромную разницу между теоретической и практической прочностью металлов. Интересно, что создание стройной теории дислокаций надолго определило возможность их практического обнаружения. Существование дислокаций было предсказано значительно раньше, чем было выявлено их присутствие в металле. Дислокации были обнаружены лишь с помощью электронного микроскопа благодаря сопутствующим деформациям или искажениям кристаллической решетки. При прохождении пучка электронов через такие искажения происходит дифракция электронов, подобная дифракции рентгеновских лучей.

На приведенных ниже схемах видно, что атомы над краевой дислокацией испытывают сжатие, а под ней — растяжение. При прохождении пучка электронов через такое искажение решетки происходит дифракция. Дислокации выявляются также с помощью травления химическими реактивами. В местах выхода дислокаций на полированную поверхность металла скорость химического травления выше, чем на других участках.

На рис. 23 приведена схема участка кристаллической решетки с одной «лишней» атомной полуплоскостью, т.е. краевой дислокацией. Линейная атомная полуплоскость  $PQO'P$  называется *экстраплоскостью*, а нижний край экстраплоскости — *линией дислокации*. Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то дислокацию

называют положительной и обозначают знаком  $\perp$ , если в нижней — то отрицательной и обозначают знаком  $\lrcorner$ . Различие между дислокациями часто условное. Перевернув кристалл, мы превращаем положительную дислокацию в отрицательную. Знак дислокаций позволяет оценить результат их взаимодействия. Дислокации одного знака отталкиваются, а противоположных — притягиваются.

Помимо краевых дислокаций в кристаллах могут образовываться и винтовые дислокации (рис. 24). Винтовые дислокации могут быть получены путем частичного сдвига атомных слоев по плоскости  $Q$ , который нарушает параллельность атомных слоев. Кристалл как бы закручивается винтом вокруг линии  $EF$ . Линия  $EF$  является линией дислокации. Она отделяет ту часть плоскости скольжения, где сдвиг уже завершился, от той части, где сдвиг еще не происходил. Винтовая дислокация, образованная вращением по часовой стрелке, называется правой, а против часовой стрелки — левой.

Вблизи линии дислокации атомы смещены со своих мест и кристаллическая решетка искажена, что вызывает образование поля напряжений: выше линии дислокации решетка сжата, а ниже растянута.

Энергия искажения кристаллической решетки характеризуется с помощью вектора Бюргерса. Вектор Бюргерса может быть получен, если, переходя от узла к узлу, обвести замкнутый контур в реальном кристалле, заключив дислокацию внутрь контура (рис. 25). Участок  $BC$  будет состоять из шести отрезков, а участок  $DA$  из пяти. Разница  $BC - DA = b$ , где  $b$  есть величина вектора Бюргерса.

Вектор Бюргерса краевой дислокации равен межатомному расстоянию и перпендикулярен линии дислокации. В случае винтовой дислокации он составляет ту же величину, но параллелен линии дислокации. Обведя контуром несколько дислокаций, сливающихся или перекрещи-

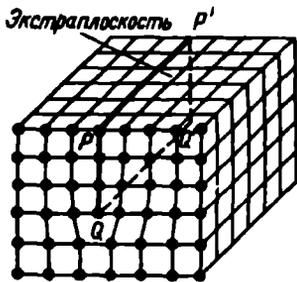


Рис. 23. Краевая дислокация

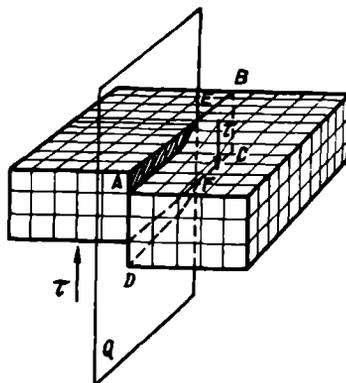


Рис. 24. Винтовая дислокация

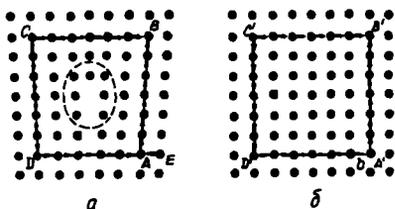


Рис. 25. Схема определения вектора Бюргера для краевой дислокации:

*a* — схема плоскости решетки реального кристалла; *b* — схема плоскости решетки кристалла без дефектов

вающихся в одной зоне, получим вектор Бюргера, соответствующий сумме векторов Бюргера каждой дислокации.

Вектор Бюргера характеризует свойства дислокации, прежде всего ее способность к перемещению. Если дислокации имеют равные и противоположно направленные векторы Бюргера, то они являются дислокациями разных знаков.

Дислокации образуются уже при кристаллизации металлов, а также в ходе пластической деформации и фазовых превращений. Плотность дислокаций может достигать большой величины. Под *плотностью дислокаций*  $\rho$  обычно понимают суммарную длину дислокаций  $\Sigma l$ , приходящуюся на единицу объема  $V$  кристалла:  $\rho = \Sigma l / V$ . Таким образом, единица измерения плотности дислокаций  $\rho$ , см/см<sup>3</sup> или см<sup>-2</sup>. Для отожженных металлов плотность дислокаций составляет величину  $10^6 - 10^8$  см<sup>-2</sup>, после холодной деформации она увеличивается до  $10^{11} - 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, что соответствует примерно 1 млн. километров дислокаций в 1 см<sup>3</sup>.

Плотность дислокаций может быть определена экспериментально при больших увеличениях подсчетов числа выходов дислокаций на единицу площади предварительно протравленного металлографического шлифа, а также при изучении на просвет структуры тонких пленок в электронном микроскопе.

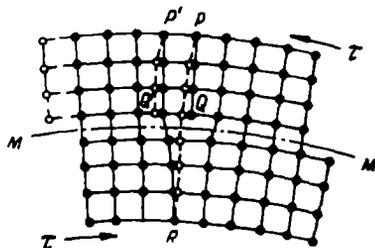
Установлено, что дислокации притягивают в свою зону атомы примесей, которые осаждаются в виде цепочки вдоль края экстраплоскости. Такие атомы снижают уровень упругих искажений дислокационной структуры. Цепочки инородных атомов образуют так называемые «атмосферы Коттрелла» или «облака Коттрелла». С повышением температуры облака Коттрелла рассеиваются. При понижении температуры до достижения предела растворимости они могут образовывать дисперсные выделения второй фазы.

### 3.3. Теоретическая и фактическая прочность

Использование теории дислокаций позволило объяснить большое расхождение между теоретической и фактической прочностью металлов.

Теоретическая прочность должна быть пропорциональна произведению сил межатомной связи на число атомов в сечении кристалла.

Рис. 26. Схема пластической деформации путем последовательного перемещения дислокации



Расчетное усилие для смещения одной части кристалла относительно другой оказалось на 2—3 порядка выше фактически затрачиваемого при пластической деформации металла. Так, теоретическая прочность железа составляет около 13 000 МПа, а фактическая — всего 250 МПа.

Такое расхождение теоретической и фактической прочности объясняется тем, что деформация происходит в результате одновременного смещения целых атомных плоскостей, а за счет постепенного перемещения дислокаций. Влияние дислокаций на процесс пластической деформации рассмотрим на примере краевых дислокаций (рис. 26). Пластический сдвиг является следствием постепенного перемещения дислокаций в плоскости сдвига. Распространение скольжения по плоскости скольжения происходит последовательно. Каждый элементарный акт перемещения дислокации из положения  $PQ$  в положение  $P'Q'$  совершается путем разрыва лишь одной вертикальной атомной плоскости  $P'R$  по линии пересечения ее с плоскостью сдвига  $M-M$ . Для перемещения дислокаций требуется значительно меньшее усилие, чем для жесткого смещения одной части кристалла относительно другой в плоскости сдвига. При движении дислокации вдоль направления сдвига через весь кристалл происходит смещение верхней и нижней его частей на одно межатомное расстояние. В результате перемещения дислокация выходит на поверхность кристалла и исчезает. На поверхности остается ступенька скольжения.

В лекции о роли дислокаций Орован в качестве аналогии движения дислокаций указывал способы перемещения таких представителей животного мира, как дождевой червь или змея. Они скользят по поверхности земли, последовательно перемещая участки своего тела. При этом участки, через которые прошла волна возмущения, восстанавливают исходную форму. В случае пластического сдвига позади переместившейся дислокации атомные структуры верхних и нижних слоев совпадают, также восстанавливая свою исходную конфигурацию.

Дислокации легко перемещаются в направлении, перпендикулярном экстраплоскости. Чем легче перемещаются дислокации, тем ниже прочность материала, тем легче идет пластическая деформация.

Любая пластическая деформация кристаллических тел обязана дислокациям: их количеству, подвижности, степени взаимодействия с дефектами решетки и т.д. Характер связи между атомами влияет на пластичность кристаллов. Так, в неметаллах с их жесткими направленными связями дислокации очень узкие, они требуют больших напряжений для старта — в  $10^3$  раз больше, чем для металлов. В результате хрупкое разрушение в неметаллах наступает раньше, чем сдвиг.

Таким образом, причиной низкой прочности реальных металлов является наличие в структуре материала дислокаций и других несовершенств кристаллического строения. Получение бездислокационных кристаллов приводит к резкому повышению сопротивления пластической деформации, т.е. к повышению прочности материалов.

Влияние искажений кристаллической решетки на прочность металлов приведено на рис. 27. Левая ветвь кривой соответствует созданию совершенных бездислокационных нитевидных кристаллов (так называемых усов), прочность которых близка к теоретической.

При ограниченной плотности дислокаций и других искажений кристаллической решетки процесс сдвига происходит тем легче, чем больше дислокаций находится в объеме металла.

С ростом напряжений возрастает число источников дислокаций в металле и их плотность увеличивается. Помимо параллельных дислокаций возникают дислокации в разных плоскостях и направлениях. Дислокации воздействуют друг на друга, мешают друг другу перемещаться, происходит их аннигиляция (взаимное уничтожение) и т.д., что позволило Дж.Гордону образно назвать их взаимодействие в процессе пласти-

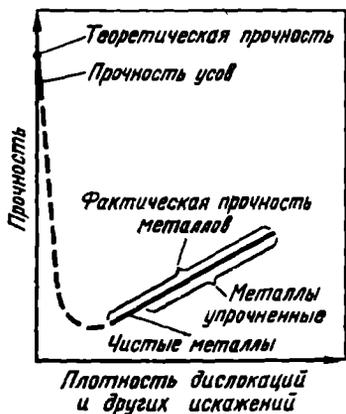


Рис. 27. Влияние искажений кристаллической решетки на прочность кристалла

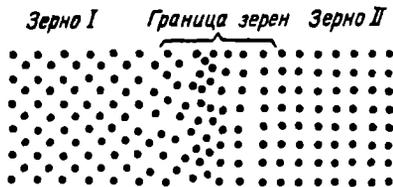


Рис. 28. Схема строения зерен и границы между ними

ческой деформации «интимной жизнью дислокаций». С повышением плотности дислокаций их движение все более затрудняется и для продолжения деформации требуется увеличение прилагаемой нагрузки. В результате металл упрочняется, что соответствует правой ветви кривой рис. 27.

Упрочнению способствуют и другие несовершенства кристаллического строения, также тормозящие движение дислокаций. К ним относятся атомы растворенных в металле примесей и легирующих элементов, частицы выделений второй фазы, границы зерен или блоков и т.д. На практике препятствие движению дислокаций, т.е. упрочнение, создается введением других элементов (легированием), наклепом, термической или термомеханической обработкой. Снижение температуры также препятствует свободному перемещению дислокаций. При низких температурах прочность растет, а пластичность падает. Металл становится более прочным, но хрупким.

Таким образом, повышение прочности металлов и сплавов может быть достигнуто двумя путями: 1) получением металлов с более близким к идеальному строением кристаллической решетки, т.е. металлов, в которых отсутствуют дефекты кристаллического строения или же их число крайне мало; 2) либо, наоборот, увеличением числа структурных несовершенств, препятствующих движению дислокаций.

### 3.4. Поверхностные дефекты

Поверхностные дефекты имеют малую толщину и значительные размеры в двух других измерениях. Обычно это места стыка двух ориентированных участков кристаллической решетки. Ими могут быть границы зерен, границы фрагментов внутри зерна, границы блоков внутри фрагментов. Соседние зерна по своему кристаллическому строению имеют неодинаковую пространственную ориентировку решеток. Блоки повернуты по отношению друг к другу на угол от нескольких секунд до нескольких минут, их размер  $10^{-5}$  см. Фрагменты имеют угол разориентировки не более  $5^\circ$ . Если угловая разориентировка решеток соседних зерен не превышает  $5^\circ$ , то такие границы называются *малоугловыми границами зерен*. Все субзеренные границы (границы фрагментов и блоков) — малоугловые. Строение границ зерен оказывает большое влияние на свойства металла.

Граница между зернами представляет собой узкую переходную зону шириной 5—10 атомных расстояний с нарушенным порядком расположения атомов. В граничной зоне кристаллическая решетка одного зерна переходит в решетку другого зерна (рис. 28). Неупорядоченное строение переходного слоя усугубляется скоплением в этой зоне дислокаций и повышенной концентрацией примесей.

Вследствие того, что границы зерен препятствуют перемещению дислокаций и являются местом повышенной концентрации примесей, они оказывают существенное влияние на механические свойства металла.

Под размером зерна принято понимать величину его среднего диаметра, выявляемого в поперечном сечении. Это определение условно, так как действительная форма зерна в металлах меняется в широких пределах — от нескольких микрометров до миллиметров. Размер зерна оценивается в баллах по специальной стандартизованной шкале и характеризуется числом зерен, приходящихся на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности шлифа, при увеличении в 100 раз.

Процесс пластического течения, следовательно, и предел текучести зависят от длины свободного пробега дислокаций до «непрозрачного» барьера, т.е. до границ зерен металла. Предел текучести  $\sigma_T$  связан с размером зерна  $d$  уравнением Холла — Петча:  $\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-1/2}$ , где  $\sigma_0$  и  $k$  — постоянные для данного металла. Чем мельче зерно, тем выше предел текучести и прочность металла. Одновременно при измельчении зерна увеличиваются пластичность и вязкость металла. Последнее особенно важно для металлических изделий, работающих при низких температурах. Повышенные пластичность и вязкость обусловлены более однородным составом и строением мелкозернистого металла, отсутствием в нем крупных скоплений, структурных несовершенств, способствующих образованию трещин. Помимо перечисленных дефектов в металле имеются макродефекты объемного характера: поры, газовые пузыри, неметаллические включения, микротрещины и т.д. Эти дефекты снижают прочность металла.

## 4. Кристаллизация металлов

### 4.1. Энергетические условия кристаллизации

Всякое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Переход из одного состояния в другое происходит при определенной температуре, называемой *температурой плавления* или *кипения*.

В газах отсутствует закономерность в расположении частиц; частицы движутся хаотически, причем газ стремится занять возможно больший объем. Твердые кристаллические тела имеют правильное строение, при котором атомы и ионы находятся в узлах кристаллических решеток (так называемый ближний порядок), а отдельные ячейки и блоки определенным образом ориентированы по отношению друг к другу (дальний порядок). В жидкостях определенная ориентировка распространяется не на весь объем, а лишь на небольшое число атомов, образующих сравни-

тельно устойчивые группировки или флуктуации. С понижением температуры устойчивость флуктуаций увеличивается, и они проявляют способность к росту. Таким образом, для жидкостей характерен только ближний порядок расположения атомов.

По мере увеличения температуры твердого тела растет подвижность атомов в узлах решетки, амплитуда колебаний увеличивается и при достижении определенной температуры, называемой температурой плавления, атомы вырываются из узлов, и решетка разрушается с образованием жидкой фазы. Температура плавления — важная константа и входит во все справочники: температура плавления ртути  $-38,9$ ; свинца  $327$ ; цинка  $419$ ; алюминия  $660$ ; меди  $1083$ ; железа  $1536$  °C и т.д.

Противоположная картина наблюдается при охлаждении жидкости и ее последующем затвердевании. При охлаждении жидкости, наоборот, подвижность атомов падает и вблизи температуры плавления образуются группировки атомов, в которых атомы упакованы, как в кристаллах. Эти группировки являются центрами кристаллизации или зародышами. При достижении температуры плавления — затвердевания — вновь образуется кристаллическая решетка, и металл переходит в твердое состояние.

Переход металла из жидкого состояния в твердое при определенной температуре называется *кристаллизацией*. Рассмотрим энергетические условия процесса кристаллизации.

Энергетическое состояние любой системы характеризуется определенным запасом внутренней энергии, которая складывается из энергии движения молекул, атомов, электронов, внутриядерной энергии, энергии упругих искажений кристаллической решетки и других видов энергии.

Свободной энергией (энергия Гельмгольца) является такая составляющая внутренней энергии, которая в изотермических условиях может быть превращена в работу. Свободная энергия изменяет свою величину при изменении температуры, плавлении, полиморфных превращениях и т.д.  $F = U - TS$ , где  $F$  — свободная энергия,  $U$  — полная внутренняя энергия системы,  $T$  — температура,  $S$  — энтропия.

Согласно второму закону термодинамики, всякая система стремится к минимальному значению свободной энергии. Любой самопроизвольно текущий процесс идет только в том случае, если новое состояние более устойчиво, т.е. обладает меньшим запасом свободной энергии. Например, шарик стремится скатиться вниз по наклонной плоскости, понизив при этом свою свободную энергию; естественно, что самопроизвольное возвращение шарика вверх по наклонной плоскости невозможно, так как при этом произойдет увеличение его свободной энергии.

Процесс кристаллизации подчиняется этому же закону. Металл затвердевает, если меньшей свободной энергией обладает твердое состоя-

ние, и плавится, если меньшей свободной энергией обладает жидкое состояние.

Изменение свободной энергии жидкого и твердого состояния при изменении температуры показано на рис. 29. С повышением температуры величина свободной энергии обоих состояний уменьшается, но законы изменения свободной энергии различны для жидкого и твердого состояний вещества.

Различают теоретическую и фактическую температуру кристаллизации.  $T_S$  — теоретическая, или равновесная, температура кристаллизации, при которой  $F_{ж} = F_{тв}$ . При этой температуре равновероятно существование металла как в жидком, так и в твердом состояниях. Реальная же кристаллизация начнется только тогда, когда этот процесс будет термодинамически выгоден системе, при условии  $\Delta F = F_{ж} - F_{тв}$ , для чего необходимо некоторое переохлаждение. Температура, при которой практически идет кристаллизация, называется *фактической температурой кристаллизации*  $T_{кр}$ . Разность между теоретической и фактической температурой кристаллизации называется степенью переохлаждения:  $\Delta T = T_S - T_{кр}$ . Чем больше степень переохлаждения  $\Delta T$ , тем больше разность свободных энергий  $\Delta E$ , тем интенсивнее будет идти кристаллизация.

Температурные кривые, характеризующие процесс охлаждения с различными скоростями, приведены на рис. 30. При медленном охлаждении, соответствующем кривой  $v_1$ , степень переохлаждения невелика и кристаллизация протекает при температуре, близкой к равновесной. Горизонтальная площадка на термической кривой объясняется выделением скрытой теплоты кристаллизации, которая компенсирует отвод тепла. С ростом скорости охлаждения (кривые  $v_2, v_3$ ) степень переохлаждения растет, и процесс кристаллизации протекает при все более

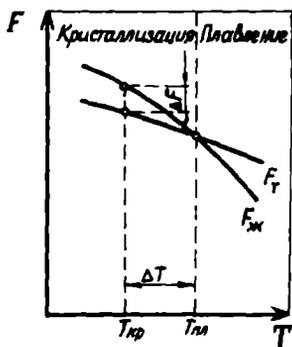


Рис. 29. Влияние температуры на изменение энергии Гельмгольца  $F$  (свободной энергии) жидкого и твердого металла

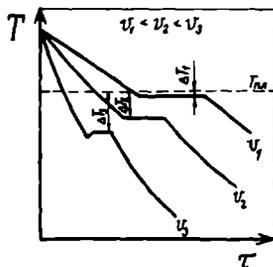


Рис. 30. Температурные кривые кристаллизации металла с различными скоростями охлаждения

понижающейся температуре. Помимо скорости охлаждения степень переохлаждения зависит от чистоты металла. Чем чище металл, тем выше степень переохлаждения.

#### 4.2. Механизм процесса кристаллизации

Еще Д.К.Черновым было установлено, что процесс кристаллизации состоит из двух элементарных процессов: 1) зарождения центров кристаллизации; 2) роста кристаллов из этих центров.

При температурах, близких к температуре затвердевания, в жидком металле образуются небольшие группировки атомов — так называемые флуктуации, в которых атомы упакованы так же, как в твердых кристаллах. Из части этих флуктуаций образуются зародыши или центры кристаллизации. С увеличением степени переохлаждения возрастает число центров кристаллизации, образующихся в единицу времени. Вокруг образовавшихся центров кристаллизации начинают расти кристаллы. Одновременно в жидкой фазе образуются новые центры кристаллизации. Увеличение общей массы затвердевшего металла происходит как за счет возникновения новых центров кристаллизации, так и за счет роста существующих. Схема последовательных этапов процесса затвердевания приведена на рис. 31.

Взаимным ростом кристаллов объясняется неправильная форма зерен. Реальные твердые кристаллы, получившие неправильную форму, называются кристаллитами.

Суммарная скорость кристаллизации зависит от хода обоих элементарных процессов. Она определяется скоростью зарождения центров кристаллизации ( $CЗ$ ) и скоростью роста кристаллов из этих центров ( $СР$ ) (рис. 32). Величины  $CЗ$  и  $СР$  зависят от степени переохлаждения. При равновесной температуре  $\Delta T = 0$  и  $CЗ = 0$ ,  $СР = 0$ . С увеличением  $\Delta T$

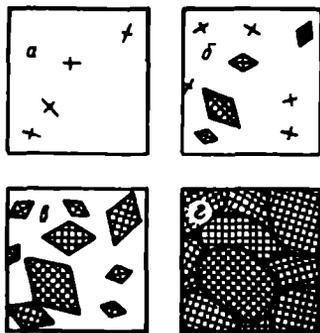


Рис. 31. Схема кристаллизации металла

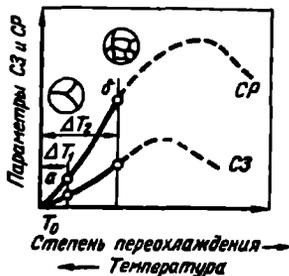


Рис. 32. Влияние степени переохлаждения на скорости зарождения и роста кристаллов

растет разность свободных энергий:  $\Delta E = F_{ж} - F_{тв}$  и при хорошей подвижности атомов СЗ и СР растут и достигают максимума. Последующее уменьшение СЗ и СР объясняется снижением подвижности атомов при падении температуры. При малых значениях коэффициента диффузии затруднена перестройка атомов жидкости в кристаллическую решетку твердого тела. При очень сильном переохлаждении СЗ и СР равны нулю и жидкость не кристаллизуется, а превращается в аморфное тело.

Для реальных металлов, как правило, реализуются лишь восходящие ветви кривых СЗ и СР и с ростом  $\Delta T$  увеличиваются скорости обоих процессов.

Если раньше аморфное состояние достигалось лишь для солей, силикатов, органических веществ, то в настоящее время с использованием специальных приемов достигается высокая скорость охлаждения (более  $10^6$  °C/c) и стеклообразное состояние металла. Металлы в стеклообразном состоянии характеризуются особыми физико-механическими свойствами.

От соотношения скоростей зарождения и роста зависит размер зерен. При малом переохлаждении, например при заливке металла в земляную форму с малой теплопроводностью или подогретую металлическую форму, скорость роста велика, скорость зарождения сравнительно мала. В этом случае в объеме образуется сравнительно небольшое количество крупных кристаллов.

При увеличении  $\Delta T$  в случае заливки жидкого металла в холодные металлические формы, скорость зарождения возрастает, что приводит к образованию большого количества мелких кристаллов.

Размер зерна определяется не только степенью переохлаждения. Важную роль играет температура нагрева и разливки металла, его химический состав и особенно присутствие посторонних примесей. В реальных условиях самопроизвольное зарождение кристаллов в жидком металле затруднено. Источником образования зародышей служат различные твердые частицы: неметаллические включения, оксиды, продукты раскисления.

Чем больше примесей, тем больше центров, тем мельче зерна. Иногда в металл специально вводят вещества, которые при кристаллизации способствуют измельчению зерна. Эту операцию называют модифицированием. При введении в магниевые сплавы магнетита зерно уменьшается более чем в 10 раз: от 0,2—0,3 мм до 0,01—0,02 мм. Модификаторами для стали являются алюминий, ванадий, титан; для чугуна — магний.

При кристаллизации реальных слитков и отливок важную роль играет направление отвода тепла. Кристаллизация начинается от стенок

Рис. 33. Схема дендритного кристалла (по Д.К.Чернову)



формы или изложницы. В направлении отвода тепла, т.е. перпендикулярно к стенке формы кристалл растет быстрее, чем в других направлениях. При этом образуются оси первого порядка. Одновременно на их ребрах происходит зарождение и рост перпендикулярных им осей второго порядка, затем третьего и т.д. В результате образуется разветвленный древовидный кристалл, называемый *дендритом* (рис. 33).

Так как при затвердевании имеет место так называемая *избирательная кристаллизация*, т.е. в первую очередь затвердевает более чистый металл, то границы зерен более обогащены примесями. Неоднородность химического состава в пределах дендрита называется *дендритной ликвацией*. В большей степени, чем другие элементы, ликвации подвержены углерод, сера, фосфор.

#### 4.3. Строение слитка спокойной стали

Зерна (дендриты), образующиеся в стальном слитке, могут иметь различную форму, размеры и ориентировку. Строение стального слитка впервые описано Д.К.Черновым в 1878 г.

Схема строения слитка спокойной стали приведена на рис. 34. Структура слитка состоит из трех зон: наружной мелкозернистой зоны I, зоны столбчатых кристаллов II и зоны равноосных кристаллов III.

Наружная мелкозернистая зона состоит из неориентированных в пространстве мелких кристаллов. Ее образование обусловлено резким перепадом температур: жидкий металл — холодные стенки изложницы. Металл в этой зоне сильно переохлаждается, в нем образуется большое число центров кристаллизации и он приобретает мелкозернистое строение.

После образования корковой зоны условия теплоотвода меняются, температурный градиент в прилегающем слое жидкого металла падает и снижается степень переохлаждения. В результате из сравнительно небольшого числа центров кристаллизации в направлении отвода тепла,

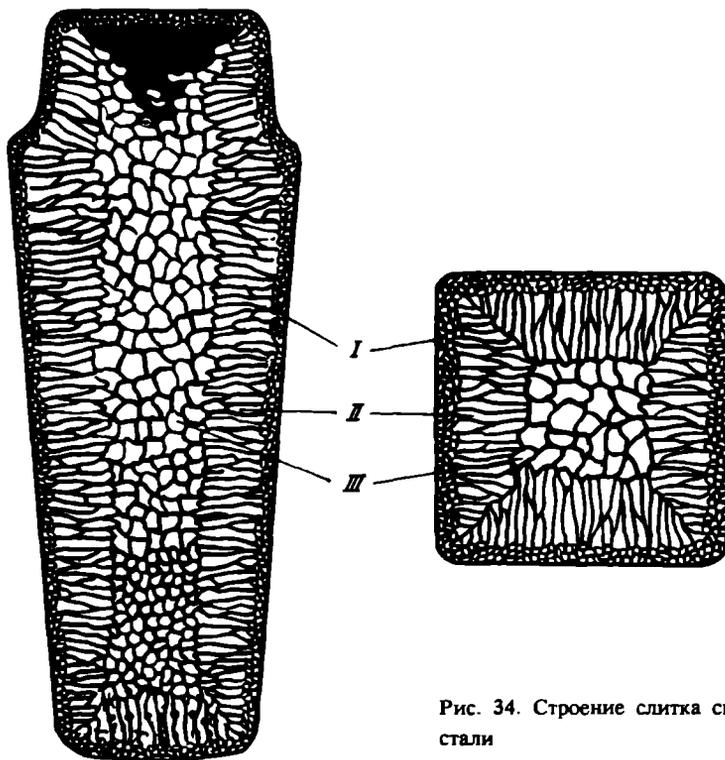


Рис. 34. Структура слитка спокойной стали

т.е. перпендикулярно к стенке изложницы, начинают расти столбчатые кристаллы, образующие вторую зону. Развитие их в стороны сдерживается соседними дендритами.

Третья зона — зона равноосных кристаллов. В центре слитка нет определенной направленности отвода тепла. Здесь зародышами обычно являются различные мелкие твердые частицы, оттесненные при кристаллизации к центру слитка.

Относительное распределение в объеме слитка столбчатой и равноосной зон очень важно. В зоне столбчатых кристаллов металл более плотный, но в местах их стыка он имеет малую прочность. Кристаллизация, при которой зоны столбчатых кристаллов стыкуются, называется *транскристаллизацией*.

Для цветных металлов транскристаллизация полезна, так как металл становится плотнее, а учитывая его высокую пластичность, трещины при деформации не образуются. Транскристаллизация стали нежелательна, так как на стыке двух кристаллов при деформации могут образоваться трещины.

Основными дефектами слитка являются усадочная раковина, пористость и ликвация. Усадочная пористость обычно образуется вблизи усадочной раковины и по оси слитка. Образование усадочной раковины и усадочной пористости обусловлено тем, что все металлы, кроме висмута, имеют в твердом состоянии меньший удельный объем, чем в жидком.

## 5. Методы исследования внутреннего строения металлов

Современное состояние металловедения в значительной мере обязано прогрессу методов исследования структуры металлов и сплавов. Различают макроструктуру — строение металла, видимое невооруженным глазом, и микроструктуру — строение металла, видимое под микроскопом.

Макроанализ производят для оценки качества металла после различных видов обработки: литья, обработки давлением, сварки, термической и химико-термической обработки. Макроанализ определяет нарушения сплошности металла (рыхлость, пористость, трещины, непровары и пузыри после сварки и др. дефекты), неоднородность структуры после литья или обработки (термической, термомеханической и др.), виды изломов (вязкий, хрупкий, камневидный и т.д.). Этот анализ является предварительным исследованием, так как не выявляет подробностей внутреннего строения, но позволяет выбрать участки для микроскопического исследования металла.

### 5.1. Металлографические методы исследования

Металлография изучает строение металла под микроскопом. Для этой цели используют оптический, электронный и ионный микроскопы.

*Оптическая микроскопия.* В оптическом микроскопе изображение формируется в отраженном свете. С помощью оптического микроскопа различимы структурные составляющие размером не менее 0,2 мкм. В современных микроскопах используют увеличение от 100 до 2500 раз. Микроскопическое исследование специально подготовленного шлифа позволяет изучать такие структурные особенности, как форма, размер, распределение фаз и неметаллических включений, размер зерна, ликвационные области, дислокации получением ямок травления и др.

Разработаны несколько типов микроскопов для изучения микроструктуры образца в различных температурных условиях. Можно проводить наблюдения за ростом зерна в металле при нагреве, фазовыми превращениями, спеканием, диффузией, поверхностными явлениями.

Существуют приспособления, позволяющие проводить деформацию образца при одновременном наблюдении за его структурой — процесса-

ми скольжения, двойникования, фазовыми превращениями, вызванными деформацией.

*Электронная микроскопия.* Электронный микроскоп дает увеличение до  $10^6$  раз; при таком увеличении различают объекты микроструктуры до 0,2—0,5 нм. Вместо световых лучей в этих микроскопах используются пучки электронов с длиной волны около 0,005 нм (световая длина волны 500 нм), ускоренных до больших энергий в условиях глубокого вакуума. Электронный микроскоп позволяет наблюдать и измерять особенности структуры почти на атомарном уровне. Наибольшее распространение получили электронные микроскопы просвечивающего типа, в которых пучок электронов проходит через специально подготовленную тонкую фольгу. Электронный микроскоп дает детальную информацию о распределении, движении, размножении и плотности дислокаций, сведения о зарождении и росте выделений, включений, характере образования и перемещения трещин. Он позволяет получать информацию о ходе процесса разрушения, что невозможно сделать другими методами контроля. С помощью микроскопии изучают связь механических и физических свойств металлов с их микроструктурой. С его помощью впервые удалось показать связь распределения тонких выделений, дислокаций и дефектов упаковки легированной стали с ее механическими свойствами и деформируемостью.

*Растровая электронная микроскопия.* Растровый (сканирующий) электронный микроскоп (РЭМ) позволяет изучать поверхность металла, в частности, дает качественную и количественную информацию о поверхностях изломов (фрактографический метод исследования). Это основная область применения РЭМ. Увеличение в РЭМ от 30 до  $4 \cdot 10^4$  раз, но этот микроскоп обладает очень большой глубиной фокуса, что дает электронно-оптическое изображение гораздо лучшего качества, чем в оптическом или в просвечивающем электронном микроскопе. Это позволяет исследовать размеры, форму и распределение очень мелких частиц, фаз — эвтектических и эвтектоидных смесей.

Фрактография позволяет определить характер разрушения, критические температуры вязко-хрупкого разрушения, причины его зарождения. По фрактографическим показателям можно установить продолжительность развития усталостных трещин при различных условиях нагружения.

*Автоионная микроскопия.* Увеличение автоионного микроскопа составляет более  $10^6$ . С помощью этого метода можно различать отдельные атомы, находящиеся на поверхности металла, изучать поверхностную диффузию, обнаружить отдельные вакансии, межузельные атомы, дислокации, изучать состояние границ зерен. Высокая разрешающая способность, возможность получения информации о дефектах структуры

кристаллической решетки делает автоионный микроскоп уникальным прибором.

Изображение в автоионном микроскопе формируется с помощью ионизированного гелия, образцы представляют собой тонкую проволоку с сильно утонченным острием. С помощью этого метода наиболее полно исследованы тугоплавкие металлы.

### *5.2. Рентгеноструктурный анализ (РСА)*

В основе метода лежит взаимодействие рентгеновского излучения с электронами вещества, в результате которого возникает дифракция рентгеновских лучей. РСА особенно широко применяется для изучения структуры кристаллических тел, так как они представляют собой созданную самой природой дифракционную решетку для рентгеновского излучения. С помощью РСА определяют размеры и формы элементарных ячеек металлов, нарушения кристаллической структуры (блоки кристаллитов, плотность дислокаций, дефекты упаковки), фазовый состав сплавов (качественный и количественный анализ), текстуру металлов. После термической обработки сплавов определяют количество остаточного аустенита, распавшегося мартенсита, количество углерода в этих фазах. Широко применяется РСА при построении диаграмм состояния.

### *5.3. Микроструктурный анализ (МРСА)*

МРСА используется для исследования распределения компонентов и примесей в сталях и сплавах с микронным разрешением. Этот метод дает ответ на вопрос, какие элементы присутствуют в микрообъеме сплава и каковы их концентрации.

В микрорентгеновском анализаторе пучок электронов диаметром около 0,5 мкм падает на поверхность образца, взаимодействует с его атомами и генерирует рентгеновское излучение. По длине волны и интенсивности излучения определяют состав и количество фаз, сегрегаций, дендритов, неметаллических включений и любых микрообластей (границ зерен, приграничных участков).

МРСА становится стандартным инструментом, используемым в металлургии для контроля качества продукции и при создании новых материалов.

## Глава 2 ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

### 1. Свойства металлов и сплавов

Различают физические, химические, технологические и механические свойства.

Физические свойства определяют поведение материалов в тепловых, гравитационных, электромагнитных и радиационных полях. К физическим относятся плотность, теплоемкость, температура плавления, термическое расширение, магнитные характеристики, теплопроводность, электропроводность.

Под химическими свойствами понимают способность материалов вступать в химическое взаимодействие с другими веществами, сопротивляемость окислению, проникновению газов и химически активных веществ. Характерным примером химического взаимодействия среды и металла является коррозия. Коррозия наносит огромный ущерб промышленности. Для защиты от коррозии применяют покрытия деталей лаками, красками, более стойкими металлами. В некоторых случаях вместо обычных сталей применяют более стойкие сплавы на основе алюминия, меди, титана или коррозионностойкие стали.

Технологические свойства металлов и сплавов характеризуют их способность подвергаться горячей и холодной обработке, в том числе при выплавке, горячем и холодном деформировании, обработке резанием, термической обработке и особенно сварке. При рассмотрении свойств отдельных видов материалов их технологичности будет уделено соответствующее внимание.

Целесообразность применения тех или иных материалов определяется не только их свойствами, но и их стоимостью.

При конструировании изделий в первую очередь руководствуются механическими свойствами материалов. Механические свойства материалов характеризуют их способность сопротивляться деформированию и разрушению под воздействием различного рода нагрузок. Механические нагрузки могут быть статическими, динамическими и циклическими. Кроме того, материалы могут подвергаться деформации и разрушению как при разных температурах, так и в различных, в том числе агрессивных, средах.

### 2. Упругая и пластическая деформация

Деформацией называется изменение форм и размеров тела под действием напряжений. Деформация, возникающая при сравнительно небольших напряжениях и исчезающая после снятия нагрузки, называется

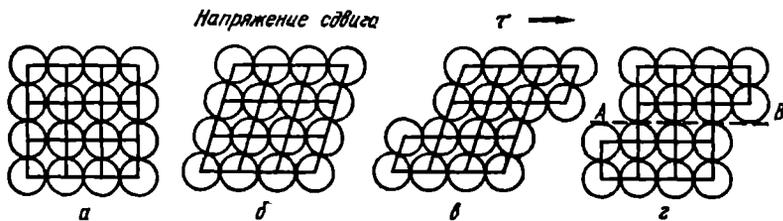


Рис. 35. Схема пластической деформации скольжением:

*a* — исходное недеформированное состояние кристалла; *б* — упругодеформированное состояние; *в* — упруго- и пластически деформированное состояние; *г* — состояние после пластической (остаточной) деформации по плоскости *AB*

*упругой*, а сохраняющаяся — *остаточной* или *пластической*. При увеличении напряжений деформация может заканчиваться разрушением.

Упругая и пластическая деформации в своей физической основе принципиально отличаются одна от другой. При упругой деформации происходит обратимое смещение атомов из положений равновесия в кристаллической решетке. Упругая деформация не вызывает заметных остаточных изменений в структуре и свойствах металла. После снятия нагрузки сместившиеся атомы под действием сил притяжения (при растяжении) или отталкивания (при сжатии) возвращаются в исходное равновесное положение, и кристаллы приобретают первоначальную форму и размеры. Упругие свойства материалов определяются силами межатомного взаимодействия.

В основе пластической деформации лежит необратимое перемещение одних частей кристалла относительно других. После снятия нагрузки исчезает лишь упругая составляющая деформации. Пластичность, т.е. способность металлов перед разрушением претерпевать значительную пластическую деформацию, является одним из важнейших свойств металлов. Благодаря пластичности осуществляется обработка металлов давлением. Пластичность позволяет перераспределять локальные напряжения равномерно по всему объему металла, что уменьшает опасность разрушения.

Для металлов характерно большее сопротивление растяжению или сжатию, чем сдвигу. Поэтому процесс пластической деформации обычно представляет собой процесс скольжения одной части кристалла относительно другой по кристаллографической плоскости или плоскостям скольжения с более плотной упаковкой атомов. В результате скольжения кристаллическое строение перемещающихся частей не меняется (рис. 35).

Другим механизмом пластической деформации является двойникование. Как и скольжение, двойникование осуществляется за счет сдвига, однако в этом случае происходит сдвиг части кристалла в положение,

соответствующее зеркальному отображению несдвинутой части (рис. 36). При деформации двойникованием напряжение сдвига выше, чем при скольжении. Двойники обычно возникают тогда, когда скольжение по тем или иным причинам затруднено. Деформация двойникованием обычно наблюдается при низких температурах и высоких скоростях приложения нагрузки, так как в этих случаях для скольжения необходимо высокое напряжение сдвига. Двойники более характерны для металлов с ГП решеткой (Ti, Mg, Zn).

В соответствии с дислокационной концепцией процессы скольжения и двойникования осуществляются не одновременным сдвигом одной атомной плоскости относительно другой, а последовательным перемещением дислокаций в плоскости сдвига. Благодаря тому, что для перемещения дислокаций требуются значительно меньшие усилия, чем для жесткого смещения атомных плоскостей, фактическое напряжение сдвига значительно меньше теоретического.

Величина напряжения, необходимого для осуществления пластической деформации, зависит от скорости деформирования и температуры. С увеличением скорости деформирования достижение заданной деформации требует больших напряжений, а при повышении температуры значение необходимых напряжений снижается. Таким образом, пластическая деформация является термически активируемым процессом. При понижении температуры предел текучести большинства металлов растет. Наиболее сильно он увеличивается в металлах с ОЦК и ГП решетками. Металлы с ГЦК решеткой имеют значительно более слабую зависимость предела текучести от температуры.

### 3. Хрупкое и вязкое разрушение

Заключительная стадия деформирования материалов — стадия разрушения — стала объектом исследования сравнительно недавно, так как раньше считали, что после появления трещин в материале изделие нельзя использовать. Разрушение рассматривалось как заключительная мгновенная стадия нагружения, которая не может быть остановлена. В настоящее время выявлено, что стадия разрушения с момента появления повреждения может составлять до 90 % долговечности конструкции.

Толчком к систематическому изучению механики разрушения явились участвовавшие случаи катастрофических аварий судов, мостов, резервуаров, летательных аппаратов и других конструкций, в свою очередь обусловленные применением высокопрочных материалов и усложнением условий их работы.

Разрушение твердого тела представляет собой процесс разделения его на части под действием нагрузки, который также может сопровож-

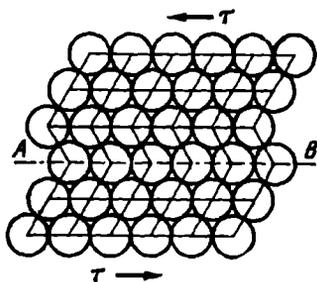


Рис. 36. Пластическая деформация двойникованием ( $AB$  — плоскость двойникования)

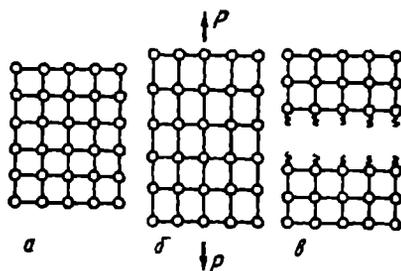


Рис. 37. Схема разрушения путем отрыва: а — исходное состояние; б — упругая деформация; в — хрупкое разрушение (отрыв)

даться термическими, радиационными, коррозионными и другими воздействиями. На атомном уровне разрушение представляет собой разрыв межатомных связей с образованием новых поверхностей. Если разрыв межатомных связей происходит перпендикулярно плоскости разрушения, то происходит разрушение сколом или отрывом. Если разрыв связей идет под действием силы, приложенной параллельно плоскости разрушения, то происходит разрушение сдвигом или скольжением. В металлах может иметь место и тот, и другой вид разрушения, что определяется главным образом их кристаллической структурой. Кроме того, характер разрушения зависит от температуры, скорости деформации, напряженного состояния, чистоты металла и т.д.

В зависимости от степени пластической деформации перед разрушением различают два основных вида разрушений: хрупкое и вязкое. При вязком разрушении металл претерпевает перед разрушением не только упругую, но и значительную пластическую деформацию. При отсутствии пластической деформации или при ее незначительном развитии происходит хрупкое разрушение.

Хрупкое разрушение происходит путем отрыва или скола, когда плоскость разрушения перпендикулярна нормальным напряжениям (рис. 37). Под действием нормальных напряжений происходит упругая деформация кристаллической решетки, а после достижения предельной степени ее искажения происходит последовательный разрыв межатомных связей с отрывом одной атомной плоскости от другой, т.е. разрушение металла. Разрушение начинается от какого-либо дефекта, вблизи которого развивается концентрация напряжений, превосходящая теоретическую прочность металла. У достаточно пластичных металлов, характеризующихся релаксацией напряжений, местной концентрации напряжений вблизи несплошностей оказывается недостаточно, и развитие трещин скола не происходит.

Вязкое разрушение происходит путем сдвига под действием касательных напряжений. Плоскость скольжения расположена под углом  $45^\circ$  к направлению главных нормальных напряжений.

Чисто сдвиговое вязкое разрушение характерно для таких аморфных материалов, как глина; чисто хрупкое разрушение свойственно идеально упругим материалам, например алмазу. Однако большинству реальных материалов одновременно присуще и вязкое, и хрупкое разрушение, а разделение на отдельные виды разрушения условно проводится по преобладанию того или иного типа.

Характерными признаками вязкого и хрупкого разрушения являются энергоемкость, т.е. величина работы разрушения, вид трещины и поверхности излома и скорость распространения трещины.

При разрушении по хрупкому механизму затрачивается значительно меньшая работа на процесс самого разрушения, чем при вязком. Начавшееся хрупкое разрушение является самопроизвольным процессом. Оно происходит за счет высвобождения накопленной в системе упругой энергии и поэтому для распространения трещины не требуется подвод энергии извне. При хрупком разрушении затрата энергии на образование новых поверхностей в результате раскрытия трещины меньше, чем освобождающаяся при этом накопленная упругая энергия. При вязком разрушении затрачивается значительно большая работа. Для развития вязкого разрушения необходим непрерывный внешний подвод энергии, расходуемой на пластическое деформирование металла впереди растущей трещины и преодоление возникающего при этом упрочнения. При этом работа, затрачиваемая на пластическую деформацию, значительно превышает работу собственно разрушения.

При хрупком разрушении магистральная разделяющая тело трещина имеет малый угол раскрытия (острая трещина), пластическая деформация вблизи поверхности разрушения почти полностью отсутствует (рис. 38). При вязком разрушении трещина имеет большой угол раскрытия (тупая трещина), поверхность разрушения характеризуется значительной степенью пластической деформации.

При низких температурах межзеренные границы обычно прочнее самих зерен, и поэтому у большинства металлов при низких температурах разрушение имеет транскристаллический характер и проходит по зернам, а не по границам между ними. При повышенных температурах межзеренные границы обычно слабее зерен. Поэтому разрушение при повышенных температурах имеет, как правило, межкуристаллический характер.

Микроизлом при хрупком разрушении имеет блестящую гладкую поверхность. Плоские грани расколотых кристаллических зерен придают металлический блеск хрупкому излому. Электронно-микроскопическое исследование обнаруживает «речные узоры» или «ручьистое» стро-

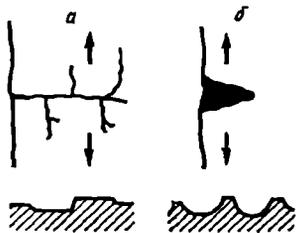


Рис. 38. Вид трещины и схемы разрушения (сечение перпендикулярно поверхности излома):

*a* — хрупкое; *b* — вязкое

ение излома, являющееся следствием взаимодействия движущейся трещины с дефектами кристалла, а также наличие предпочтительных кристаллографических ориентировок фасеток скола. Излом при вязком разрушении имеет матовый волокнистый характер без металлического блеска. Электронно-микроскопическое исследование обнаруживает характерное «чашечное» строение излома.

Для хрупкого разрушения характерна высокая скорость распространения трещины, достигающая приблизительно 0,4 скорости распространения звука в металле. Отсюда скорость распространения хрупкой трещины для стали должна составлять около  $2 \cdot 10^3$  м/с. Скорость распространения вязкой трещины значительно ниже и определяется скоростью нарастания напряжений.

С помощью рассмотренных признаков можно определить характер разрушения детали или конструкции (вязкий или хрупкий механизм). Необходимость квалификации характера разрушения в каждом отдельном случае обусловлена тем, что меры борьбы с вязким и хрупким разрушением принципиально различны. В случае вязкого разрушения необходимо повышать прочность материала. При хрупком разрушении надо, наоборот, увеличивать вязкость и пластичность, если необходимо, даже снижая прочность. Наиболее опасно хрупкое разрушение.

Разрушение сколом можно разделить на три фазы: зарождение микротрещины, ее подрастание до критического размера и распространение через соседние зерна. Уровень разрушающих напряжений определяется наиболее энергоемкой фазой. В относительно чистых металлах — это зарождение и начальное подрастание трещины. В металлах, содержащих включения, первые две стадии протекают сравнительно легко, но затем трещина сдерживается границами зерен. По этой причине в таких металлах часто наблюдают зарождение и торможение множества трещин до момента неустойчивого распространения одной из них.

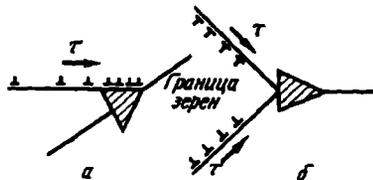


Рис. 39. Дислокационные модели зарождения микротрещин:

*a* — модель Зинера—Стро; *b* — модель Коттрелла

Существует ряд моделей дислокационного механизма зарождения трещины (рис. 39). Согласно общей модели Зинера, краевые дислокации движутся по плоскости скольжения к препятствию, например к границе зерна, двойника, межфазной границе и т.д. Если при подходе они не могут одолеть этот «непрозрачный» барьер, то образуется нагромождение дислокаций и в этом месте возникает концентрация напряжений. При этом напряжение в локальной зоне может во много раз превысить приложенное напряжение. После того, как напряжения превзойдут силы межатомной связи материала, возникает микротрещина.

Следующей стадией разрушения является подрастание зародышевой микротрещины до трещины критического размера, когда будет достигнуто критическое соотношение между действующим напряжением и длиной трещины.

Существует несколько моделей докритического подрастания трещины. Трещина может расти за счет того, что при своем движении поглощает другие дислокационные микротрещины. Росту трещины способствует взаимодействие полей напряжения у ее вершины. Таким образом, стадии зарождения микротрещины и ее подрастания до критического размера являются следствием движения дислокаций, т.е. пластической деформации металла.

Критический размер трещины характеризуется концентрацией напряжений в ее устье, достигающей уровня прочности металла. При достижении трещиной критической длины ее дальнейшее распространение происходит лавинно без заметной пластической деформации, не требуя подвода энергии извне.

#### 4. Факторы, определяющие характер разрушения

Один и тот же материал в зависимости от условий деформации может разрушаться по хрупкому или вязкому механизму. Характер разрушения зависит от влияния различных факторов как связанных, так и не связанных со свойствами материала.

Различают внешние и внутренние факторы. К внешним факторам относятся температура, тип надреза или концентратора напряжений, условия и скорость нагружения, характер окружающей среды, форма и размеры детали. К внутренним факторам, присущим материалу, относятся тип кристаллической решетки, химический состав, структура и размер зерна, зависящий от технологии предшествующей обработки.

Влияние температуры на характер разрушения хорошо иллюстрируется схемой, предложенной А.Ф.Иоффе и развитой Н.Н.Давиденковым (рис. 40). Согласно этой схеме, смена одного вида разрушения другим определяется соотношением значений предела текучести  $\sigma_T$  и разрушающего напряжения  $\sigma_{отр}$ . Температурные зависимости  $\sigma_T$  и

$\sigma_{отр}$  имеют различный характер, так как в соответствии с этой схемой предел текучести и разрушающее напряжение друг с другом не связаны.

Напряжение трения кристаллической решетки или сопротивление Набарро  $\sigma_0$ , входящее в уравнение Холла—Петча для предела текучести, связано с температурой материала следующей зависимостью:  $\sigma_0 = Ve^{-\beta T}$  где  $V$  и  $\beta$  — постоянные.

Разрушающее напряжение, в первом приближении соответствующее сопротивлению отрыва, может быть определено по формуле:

$$\sigma_{отр} = (4G\gamma/k) d^{-1/2},$$

где  $G$  — модуль сдвига,  $G = E / [2(1 + \mu)]$ ;  $E$  — модуль упругости;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\gamma$  — эффективная поверхностная энергия разрушения;  $k$  — постоянная;  $d$  — диаметр зерна.

С понижением температуры напряжение трения решетки, а следовательно, и предел текучести резко возрастают. В противоположность этому ни один из членов в правой части уравнения для сопротивления отрыву не зависит существенно от температуры, поэтому в первом приближении разрушающее напряжение является температурно независимым.

В процессе нагружения при определенной температуре напряжение может достичь раньше величины либо  $\sigma_T$ , либо  $\sigma_{отр}$ . Если раньше будет достигнуто  $\sigma_T$ , то произойдет пластическая деформация, которая при дальнейшем росте напряжений приведет к разрушению. Если раньше будет достигнуто  $\sigma_{отр}$ , то произойдет хрупкое разрушение.

Точка пересечения  $\sigma_T$  и  $\sigma_{отр}$  делит схему Иоффе—Давиденкова на две температурные области: левее этой точки располагается область хрупких разрушений материала ( $\sigma_{отр} < \sigma_T$ ), правее — область вязких разрушений ( $\sigma_{отр} > \sigma_T$ ). Температуру, при которой предел текучести становится равным разрушающему напряжению, называют температурой вязко-хрупкого перехода или критической температурой хрупкости и обозначают  $T_{кр}$ .

К недостаткам схемы Иоффе—Давиденкова относится сложность и недостоверность определения сопротивления отрыву, а также то, что фактически при всех температурах испытания хрупкому разрушению

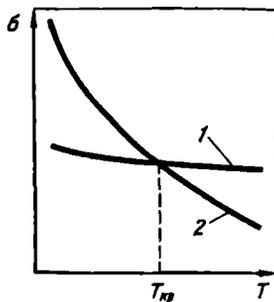


Рис. 40. Схема вязко-хрупкого перехода по Иоффе—Давиденкову:

1 — разрушающее напряжение или сопротивление отрыву; 2 — напряжение течения или сопротивления сдвигу;  $T_{кр}$  — критическая температура хрупкости

предшествует более или менее выраженная пластическая деформация. Процессы хрупкого разрушения и пластической деформации в металлах взаимосвязаны. Вместе с тем схема отличается наглядностью и хорошо описывает феноменологию вязко-хрупкого перехода. Эта схема больше отвечает современным представлениям, если под сопротивлением отрыву понимать не среднее, а локальное сопротивление хрупкому разрушению; под пределом текучести — также локальное сопротивление пластической деформации.

Свойство материала хрупко разрушаться с понижением температуры называется хладноломкостью. Помимо температуры, она зависит от влияния многих факторов. Хладноломкость проявляется при определенных условиях и является не свойством, а состоянием материала. Основной характеристикой хладноломкости является критическая температура хрупкости. С помощью этой характеристики оценивают и сопротивление хрупкому разрушению материала. Критическая температура хрупкости не является константой материала и определяется целым рядом факторов.

Анализ причин хрупких разрушений показал, что трещины хладноломкости обычно начинаются от надрезов, являющихся концентраторами напряжений. Надрезом является любое нарушение непрерывности металла. К надрезам относятся дефекты сварных соединений (пористость, непровары, пустоты по сечению шва), поверхностные царапины, неметаллические включения, газовые раковины. Надрезами могут быть технологические отверстия и резкие переходы сечений в детали. Надрезы создают в металле сложное напряженное состояние, стесненность пластической деформации и концентрацию напряжений (рис. 41). Сложное напряженное состояние проявляется в том, что под действием растягивающих сил напряжения возникают не только в продольном, но и в поперечном направлениях.

Стесненность пластической деформации приводит к увеличению сопротивления пластической деформации, т.е. к росту  $\sigma_T$ . Чем острее и глубже надрез, тем более стеснена пластическая деформация, тем выше  $\sigma_T$ . Под влиянием надрезов металл разрушается хрупко при более высокой температуре.

Чувствительность к надрезу и трещине, являющейся предельным выражением надреза, относится к числу важнейших характеристик работоспособности металла. С повышением прочности металла растет чувствительность к надрезу.

С увеличением скорости нагружения также возрастает опасность хрупкого разрушения. Чем ниже температура металла, тем более сильное влияние оказывает скорость деформирования.

Окружающая среда может влиять на изменение поверхностной энергии разрушения материала и оказывать коррозионное воздействие.

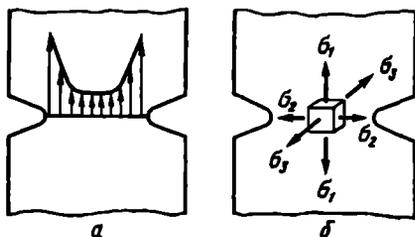


Рис. 41. Концентрация растягивающих напряжений в вершине надреза (а) и схема объемного напряженного состояния в сечении надреза (б)

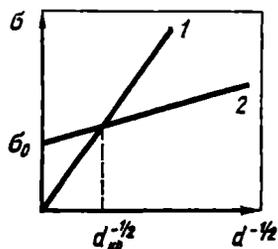


Рис. 42. Влияние размера зерна на предел текучести и разрушающее напряжение образцов из мягкой стали при 77 К:

$$1 - \sigma_{0TP} = (4 G \gamma / k) d^{-1/2};$$

$$2 - \sigma_T = \sigma_0 + k d^{-1/2}$$

Кроме того, в среде, содержащей водород, происходит водородное охрупчивание металлов. Растрескивание при коррозии под напряжением и насыщенность водородом увеличивают хрупкость металла и смещают критическую температуру хрупкости в область более высоких значений.

Чем больше сечение образца, тем больше стесненность пластической деформации. Увеличение объемности напряженного состояния приводит к повышению предела текучести.

Появление дефектов в материале подчиняется вероятностным законам, вследствие чего прочность детали должна иметь статистическую природу. С увеличением размера образца возрастает вероятность появления опасных дефектов.

На ослабление сечений с увеличением размеров накладывается действие металлургических факторов из-за большего развития ликвации, пористости, различия в размерах зерен, меньшей степени проработки структуры при ковке, прокатке или термической обработке.

Склонность к хрупкому разрушению при низких температурах зависит от кристаллической структуры металла.

Металлы с кристаллической решеткой объемноцентрированного куба (стали на основе  $\alpha$ -железа, вольфрам, хром, молибден и др.), а также некоторые металлы с гексагональной плотноупакованной решеткой (цинк, кадмий, магний) относятся к хладноломким материалам. Чистый титан имеет решетку ГП, но сохраняет пластичность и при низких температурах. Металлы с решеткой гранцентрированного куба (аустенитные стали на основе  $\gamma$ -железа, медь, алюминий, никель) не склонны к хладноломкости.

Размер зерна металла имеет важное значение для предела текучести, сопротивления хрупкому разрушению и для температуры вязко-

хрупкого перехода. Измельчение зерна существенно понижает критическую температуру хрупкости.

Процесс течения металла зависит от среднего расстояния, на которое перемещаются дислокации, прежде чем они будут заблокированы у границ зерен.

На рис. 42 показана зависимость  $\sigma_T$  и  $\sigma_{отр}$  от размера зерна. У мелкозернистых образцов предел текучести меньше разрушающего напряжения. Чем мельче зерно, т.е. больше параметр  $d^{-1/2}$ , тем больше  $\Delta\sigma = \sigma_{отр} - \sigma_T$ . Если размер зерен больше  $d_{кр}$ , то для данных условий испытания (температуры, скорости и др.) будет иметь место хрупкое разрушение. Изменением технологии выплавки и разливки, пластической деформации и термической обработки можно влиять на размер зерна и тем самым управлять свойствами металла и его кладостойкостью.

## 5. Наклеп, возврат и рекристаллизация

После снятия нагрузки, большей предела текучести, в образце останется остаточная деформация. При повторном нагружении возрастает предел текучести металла и уменьшается его способность к пластической деформации, т.е. происходит упрочнение металла. Упрочнение металла под действием пластической деформации называется наклепом.

При деформации зерна меняют свою форму и ориентировку, образуя волокнистую структуру с преимущественной ориентировкой кристаллов. Происходит разворот беспорядочно ориентированных зерен осями наибольшей прочности вдоль направления деформации. Зерна деформируются и сплющиваются, вытягиваясь в направлении деформации. Преимущественная кристаллографическая ориентировка зерен вдоль направления деформации называется текстурой металла. Образование текстуры способствует появлению анизотропии свойств вдоль и поперек направления волокон.

С ростом степени деформации механические свойства ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$ ,  $HB$ ), характеризующие сопротивление деформации, повышаются, происходит деформационное упрочнение, а способность к пластической деформации ( $\delta$ ,  $\psi$ ) падает (рис. 43). Предел текучести растет более интенсивно, чем временное сопротивление и по мере увеличения степени пластической деформации значения обеих характеристик сближаются. В результате наклепа механические свойства меняются весьма существенно: например, при степени деформации  $\varepsilon = 70\%$  среднеуглеродистой стали ее временное сопротивление  $\sigma_b$  увеличивается примерно в два раза, а относительное удлинение  $\delta$  уменьшается с 30 до 2%. Стальная проволока, полученная холодным волочением при степени деформации

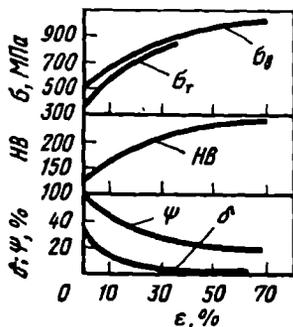


Рис. 43. Влияние степени пластической деформации на механические свойства низкоуглеродистой стали

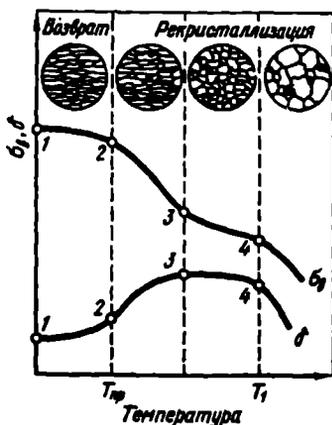


Рис. 44. Схема изменения структуры и свойств деформированного металла при нагреве:

1—2 — возврат; 2—3 — первичная кристаллизация; 3—4 — собирательная рекристаллизация

80—90 %, приобретает значение  $\sigma_{\text{в}} = 4000$  МПа, что не может быть достигнуто легированием и термической обработкой.

Упрочнение при наклепе объясняется существенным повышением плотности дислокаций, характерным для процесса пластической деформации. Плотность дислокаций после холодной деформации увеличивается на несколько порядков по сравнению с плотностью дислокаций отожженного металла, достигая величины  $10^{11} - 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Одновременно в процессе пластической деформации увеличивается количество точечных несовершенств — вакансий и дислоцированных атомов. С ростом плотности дислокаций и несовершенств кристаллического строения затрудняется свободное перемещение дислокаций. Дополнительные барьеры для дислокаций создаются за счет деформации зерен и дробления блоков. Все эти факторы способствуют упрочнению металла при наклепе.

Одновременно в результате пластической деформации существенно изменяются физико-химические свойства металлов. Наклепанный металл имеет меньшую плотность, более высокое электросопротивление, меньшую теплопроводность; у него падает устойчивость против коррозии.

Рост числа дефектов кристаллического строения и возникновение внутренних напряжений в результате наклепа приводит к тому, что свободная энергия металла растет и он приходит в неравновесное, не-

устойчивое состояние. Длительная выдержка при комнатной температуре, а тем более нагрев должны способствовать переходу металла в более устойчивое структурное состояние.

Прежде всего уже при небольшом нагреве (до 400 °С для железа) происходит снятие искажений кристаллической решетки, уменьшение плотности дислокаций за счет их аннигиляции, уменьшение количества вакансий, снижение внутренних напряжений. Однако видимых изменений структуры не происходит и вытянутая форма зерен сохраняется. Этот процесс называют возвратом металла.

При последующем нагреве происходит изменение микроструктуры наклепанного металла (рис. 44). С ростом температуры подвижность атомов растет, и образуются новые зерна вместо ориентированной волокнуистой структуры. Образование новых равноосных зерен называется рекристаллизацией.

Процесс рекристаллизации протекает в две стадии. Различают первичную, или рекристаллизацию обработки, и собирательную рекристаллизацию.

Рекристаллизацией обработки, или первичной рекристаллизацией, называют процесс образования новых равноосных зерен. Новые зерна возникают на границах блоков и старых зерен, т.е. там, где решетка наиболее искажена при наклепе. Процесс первичной рекристаллизации термодинамически выгоден, так как при переходе деформированного металла в более устойчивое равновесное состояние сопровождается уменьшением свободной энергии. В результате первичной рекристаллизации наклеп металла снимается, и свойства приближаются к исходным значениям. Плотность дислокаций также уменьшается до первоначального уровня.

Температуру начала рекристаллизации называют *температурным порогом рекристаллизации*. Температура начала рекристаллизации зависит от температуры плавления (правило академика А.А. Бочвара):  $T_{\text{рекр}} = aT_{\text{пл}}$ , где  $a$  — коэффициент, зависящий от состава и структуры металла. Для технически чистых металлов  $a = 0,3...0,4$ , для сплавов  $a = 0,5...0,6$ . Причина такой зависимости обусловлена тем, что оба процесса (плавление и рекристаллизация) связаны с изменением взаимного расположения атомов и для их развития необходима определенная диффузионная подвижность атомов. Соотношение уровней диффузионной подвижности при плавлении и рекристаллизации примерно постоянно, вследствие чего примерно постоянно соотношение температур обоих процессов. В сплавах примеси взаимодействуют с дислокациями и ограничивают их подвижность, что затрудняет образование зародышей новых зерен и тормозит рекристаллизацию. Поэтому температура рекристаллизации у сплавов выше, чем у чистых металлов.

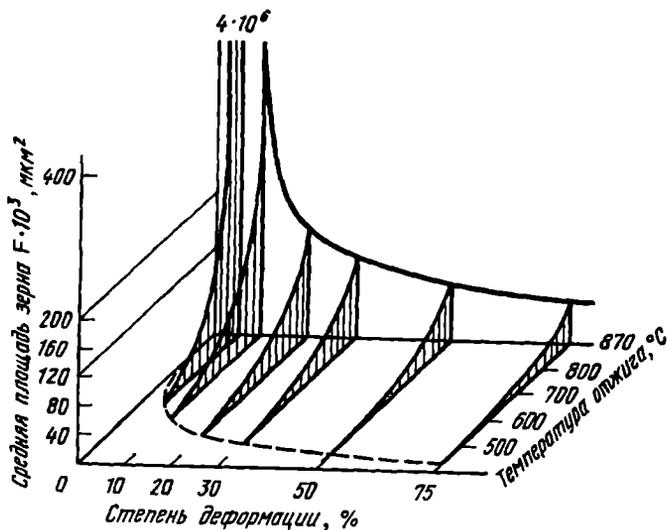


Рис. 45. Диаграмма рекристаллизации железа

Последующий рост температуры приводит ко второй стадии процесса — *собирательной рекристаллизации*, состоящей в росте вновь образовавшихся новых зерен. Большое количество мелких зерен имеет большой запас поверхностной энергии. При укрупнении зерен общая поверхность их границ уменьшается, что способствует переходу металла в более равновесное состояние. Движущей силой собирательной рекристаллизации является снижение поверхностной энергии.

Размер зерен, получившихся при рекристаллизации, оказывает большое влияние на свойства металла. Образование крупных зерен при нагреве снижает механические свойства.

Величина зерна при собирательной рекристаллизации зависит от температуры нагрева, степени предшествующей пластической деформации и, в меньшей степени, от длительности выдержки при нагреве. Наиболее крупные зерна образуются при небольшой предварительной деформации (до 15 %), которую называют *критической*. При малых степенях деформации имеет место неоднородность наклепа, а следовательно, неоднородность дефектов решетки и напряжений. При этих условиях границы зерен приобретают возможность быстрого перемещения на относительно большие расстояния, что способствует укрупнению зерен.

Наглядное представление о влиянии температуры и степени деформации на размер зерна дают диаграммы рекристаллизации (рис. 45). С помощью этих диаграмм можно в первом приближении выбрать степень деформации и температуру рекристаллизационного отжига, при кото-

рых исключается вероятность сильного роста зерен металла. Для уточнения температуры отжига необходимо учитывать содержание примесей в металле, величину зерна до деформации, скорость нагрева, длительность выдержки и другие факторы.

Если необходимо снять наклеп, то для достижения достаточной скорости процесса отжиг наклепанного металла ведут при более высокой температуре, чем температура рекристаллизации (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Температуры плавления, рекристаллизационного отжига и горячей обработки

Металл	Температура, °С			
	плавления	рекристаллизации	рекристаллизационного отжига	горячей обработки давлением
Молибден	2620	900	1400...1600	2000...1400
Титан	1672	500	650...750	1150...800
Железо	1536	450	650...750	1300...800
Медь	1083	270	500...600	900...650
Алюминий	660	100	350...400	500...400
Свинец	327	-30	—	—
Олово	232	-70	—	—

Деформация может быть холодной и горячей. Холодная деформация проводится при температурах ниже температуры рекристаллизации и сопровождается наклепом металла. Горячая деформация осуществляется при температурах выше температуры рекристаллизации. Для горячей деформации характерно полное или частичное снятие упрочнения. Таким образом, при обработке давлением имеют место два одновременно идущих процесса: упрочнение за счет пластической деформации и разупрочнение при рекристаллизации.

Есть металлы, которые при комнатной температуре не подвергаются наклепу и испытывают горячую деформацию. Примером является свинец, имеющий температуру рекристаллизации ниже комнатной температуры. Для молибдена, имеющего температуру рекристаллизации около 900 °С, деформация при нагреве до 800 °С еще является холодной деформацией.

## **1. Общие сведения**

Поведение металлов под действием внешних нагрузок характеризуется их механическими свойствами, которые позволяют определить пределы нагрузки для каждого конкретного материала, произвести сопоставимую оценку различных материалов и осуществить контроль качества металла в заводских и лабораторных условиях.

К испытаниям механических свойств предъявляется ряд требований. Температурно-силовые условия проведения испытаний должны быть по возможности приближены к служебным условиям работы материалов в реальных машинах и конструкциях. Вместе с тем методы испытаний должны быть достаточно простыми и пригодными для массового контроля качества металлургической продукции. Учитывая необходимость сопоставления качества разных конструкционных материалов, методы испытаний механических свойств должны быть строго регламентированы стандартами.

Результаты определения механических свойств используют в расчетной конструкторской практике при проектировании машин и конструкций. Наибольшее распространение имеют следующие виды механических испытаний.

1. Статические кратковременные испытания однократным нагружением на одноосное растяжение—сжатие, твердость, изгиб и кручение.
2. Динамические испытания с определением ударной вязкости и ее составляющих — удельной работы зарождения и развития трещины.
3. Испытания переменной нагрузкой с определением предела выносливости материала.
4. Испытания на термическую усталость.
5. Испытания на ползучесть и длительную прочность.
6. Испытания на сопротивление развитию трещины с определением параметров вязкости разрушения.
7. Испытания материалов в условиях сложнапряженного состояния, а также натурные испытания деталей, узлов и готовых конструкций.

## **2. Особенности испытаний при низких температурах**

Механические испытания при низких температурах более сложны, чем такие же испытания при комнатной температуре. При их проведении необходимо захлаживание образцов с помощью холодильных камер и

криостатов, использование специальных средств измерения температуры образцов и их деформации. Захлаживание при механических испытаниях осуществляется с помощью специальных хладагентов.

Температуры кипения обычно применяемых для этой цели газов имеют следующие значения:

аммиак	239,8 К (-33,3 °С);	углекислый газ	194,6 К (-78,5 °С);
метан	111,7 К (-161,4 °С);	кислород	90,1 К (-183 °С);
аргон	87,3 К (-185,7 °С);	азот	77,3 К (-195,8 °С);
водород	20,3 К (-252,7 °С);	гелий	4,2 К (-268,9 °С).

В качестве хладагентов при проведении температурных испытаний до  $-70^{\circ}\text{C}$ , т.е. до температур климатического холода, применяют твердую углекислоту (сухой лед) в смеси с денатуратом или этиловым спиртом. При испытаниях до  $77\text{ К}$  ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) хладагентом обычно служит жидкий азот или его пары. Эти системы охлаждения сравнительно дешевы и удобны. В качестве хладагентов при температурах ниже  $77\text{ К}$  обычно используют жидкие водород и гелий.

Применение жидкого водорода, имеющего температуру кипения  $20\text{ К}$ , сопряжено с большими трудностями. Взрыво- и пожароопасная концентрация водорода в воздухе колеблется в пределах  $4,6\text{—}76\%$ . В случае попадания воздуха в систему с жидким водородом происходит его конденсация с образованием твердых осадков, способствующих детонации и взрыву.

Жидкий гелий вполне безопасен для испытаний при низких температурах, но он значительно дороже водорода. Это обуславливает необходимость сложной организации сбора, очистки, вторичного использования испаряющегося газообразного гелия. Из-за сложности теплозащиты при работе с жидким гелием для испытаний обычно применяют небольшие образцы, малогабаритные криостаты.

Для измерения температур до  $153\text{ К}$  ( $-120^{\circ}\text{C}$ ) применяют жидкостно-стеклянные термометры сопротивления и термопары. Измерение деформации при низких температурах производят с помощью тензодатчиков сопротивления.

### 3. Статические испытания

Наиболее часто проводят испытания на растяжение (ГОСТ 1497-73). Обычно применяют малый пятикратный образец круглого сечения (диаметр  $S$ , расчетная длина  $25\text{ мм}$ ). На рис. 46 приведены два вида диаграмм растяжения: с площадкой и без площадки текучести в координатах нагрузка  $P$  — удлинение  $\Delta l$ . Диаграмма просто преобразуется в диаграмму в координатах напряжение  $\sigma$  — относительная деформация  $\delta$ :  $\sigma = P/F_0$ ;  $\delta = (\Delta l/l_0) \cdot 100\%$ , где  $F_0$ ,  $l_0$  — начальная площадь сечения и длина образца до испытания.

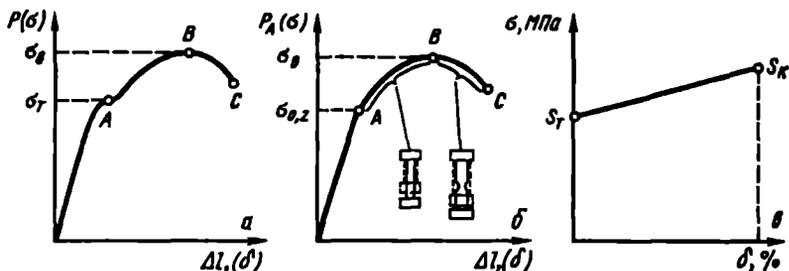


Рис. 46. Диаграммы растяжения:

*a* — с площадкой текучести; *b* — без площадки текучести; *в* — диаграмма истинных напряжений

Диаграмма растяжения состоит из трех участков: упругой деформации *OA*, равномерной пластической деформации *AB* и сосредоточенной деформации шейки *BC*.

Участок упругой деформации имеет прямолинейный вид и характеризует жесткость материала. Чем меньшую упругую деформацию претерпевает материал под действием нагрузки, тем выше его жесткость, которая характеризуется модулем упругости  $E$ :  $E = \sigma / \delta$ .

Модуль упругости — структурно нечувствительная характеристика, определяемая силами межатомного взаимодействия, является константой материала.

Упругие свойства зависят от температуры металла. При понижении температуры межатомные расстояния уменьшаются, кристаллы сжимаются, что приводит к увеличению модуля упругости. Основной рост модуля упругости происходит в области температур до 77 К, ниже температур жидкого азота рост замедляется, а вблизи абсолютного нуля модуль упругости становится температурно-независимым.

Наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки («течет»), называется *физическим пределом текучести*  $\sigma_T$ , МПа. Если нет площадки текучести, то определяют условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , МПа, при котором образец получает остаточное удлинение, равное 0,2 % первоначальной расчетной длины:

$$\sigma_T = P_T / F_0.$$

Предел текучести — основной показатель прочности при расчете допустимых напряжений, характеризующий сопротивление малым пластическим деформациям.

Напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению, называется *временным сопротивлением*, МПа:

$$\sigma_B = P_B / F_0.$$

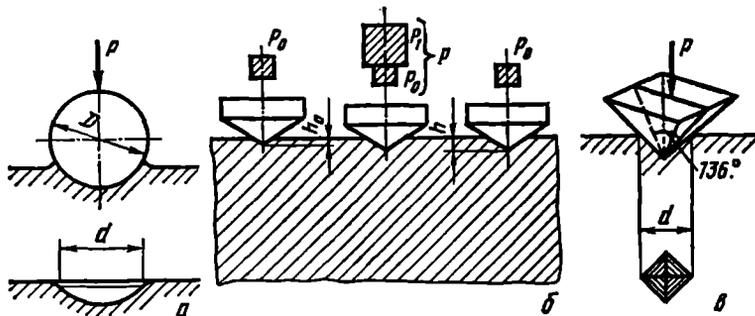


Рис. 47. Схема определения твердости:

а — по Бринеллю; б — по Роквеллу; в — по Виккерсу

Величина пластической деформации к моменту разрушения характеризует пластичность материала. Различают две характеристики пластичности: относительное удлинение  $\delta$ , %, и относительное сужение  $\psi$ , %:

$$\sigma = \left[ (l - l_0) / l_0 \right] 100,$$

где  $l$  — длина образца после разрыва;  $l_0$  — первоначальная длина образца;

$$\psi = \left[ (F_0 - F) / F_0 \right] 100,$$

где  $F$  — площадь сечения разрушившегося образца в месте разрыва;  $F_0$  — первоначальная площадь сечения образца.

Условно принято считать металл надежным при  $\delta \geq 15\%$ ,  $\psi \geq 45\%$ .

Более точную зависимость между деформацией образца и напряжением показывают диаграммы истинных напряжений (рис. 46, в). Истинное напряжение определяют делением нагрузки на площадь поперечного сечения образца в момент испытания.

Наиболее простым методом испытания свойств является измерение твердости. *Твердостью* называют свойство материала оказывать сопротивление деформации в поверхностном слое при местных контактных воздействиях. Различают методы определения твердости: по Бринеллю (по диаметру отпечатка шарика); по Роквеллу (по глубине вдавливания алмазного конуса или закаленного шарика); по Виккерсу (для деталей малой толщины или тонких поверхностных слоев твердость определяют по диагонали отпечатка алмазной пирамиды). Схемы этих методов приведены на рис. 47.

Испытание по методу Бринелля (рис. 47, а) состоит во вдавливании в испытуемое тело стального шарика диаметром  $D$  под действием постоянной нагрузки  $P$  и измерении диаметра отпечатка  $d$ . Число твердости по Бринеллю НВ определяется величиной нагрузки  $P$ , деленной на сферическую поверхность отпечатка. Чем меньше диаметр отпечатка, тем выше твердость металла. На практике твердость определяют не по фор-

мулам, а по специальным таблицам, исходя из диаметра отпечатка  $d$ . Из опасения возможной деформации шарика метод Бринелля не рекомендуется применять для стали с твердостью более 450 НВ.

Временное сопротивление и число твердости по Бринеллю связаны между собой: для стали  $\sigma_b = 0,34$  НВ, для медных сплавов  $\sigma_b = 0,45$  НВ, для алюминиевых сплавов  $\sigma_b = 0,35$  НВ.

При испытании по методу Роквелла (рис. 47, б) индентором служит алмазный конус ( для более мягких материалов маленький стальной шарик). Конус и шарик вдавливаются в металл двумя последовательными нагружениями: предварительным  $P_0 = 100$  Н и основным  $P_1$ . Имеются три шкалы. При испытании алмазным конусом и нагрузке  $P_1 = 1400$  Н — шкала С, твердость обозначается НРС, то же при  $P_1 = 500$  Н — шкала А (Н<sub>1</sub>.А), а при испытании стальным шариком и  $P_1 = 900$  Н — шкала В (HRB).

Единица твердости по Роквеллу — безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индикатора на 0,002 мм.

По шкале С определяют значения твердости более твердых материалов, чем методом Бринелля (твердость более 450 НВ).

Твердость по Виккерсу (рис. 47, в) определяют путем вдавливания правильной четырехгранной пирамиды под действием нагрузки  $P$  и измерения диагонали отпечатка  $d$ . Нагрузка меняется от 10 до 1000 Н. Чем тоньше материал, тем меньше должна быть прилагаемая нагрузка. Число твердости по Виккерсу НV определяют с помощью специальных таблиц по величине диагонали отпечатка.

В некоторых случаях определяют микротвердость отдельных участков металла. Этот метод используют для измерения твердости отдельных зерен или очень тонких слоев.

При испытании механических свойств при низких температурах необходимые температурные условия в образце создаются с помощью специальных приспособлений — криостатов. Криостаты по конструктивному признаку могут быть разделены на две группы (рис. 48). К первой группе относятся криостаты с двусторонним вводом силовых элементов, ко второй — криостаты реверсивного типа, т.е. с односторонним вводом тяг. Криостаты с двусторонним вводом тяг имеют более простое устройство. Они представляют собой двухстенные ванны из латуни или коррозионностойкой стали с войлочной или пенопластовой изоляцией. Их недостаток состоит в том, что выходящие из криостата две силовые тяги являются источником повышенного теплоотвода, что приводит к большому расходу охлаждающей жидкости. Криостаты этого типа обычно применяют при испытаниях до 77 К.

Криостат реверсивного типа позволяет уменьшить теплопритоки. В них нагрузка на образец создается с помощью опорной трубы, к которой крепится нижний захват образца, и расположенного внутри трубы по-

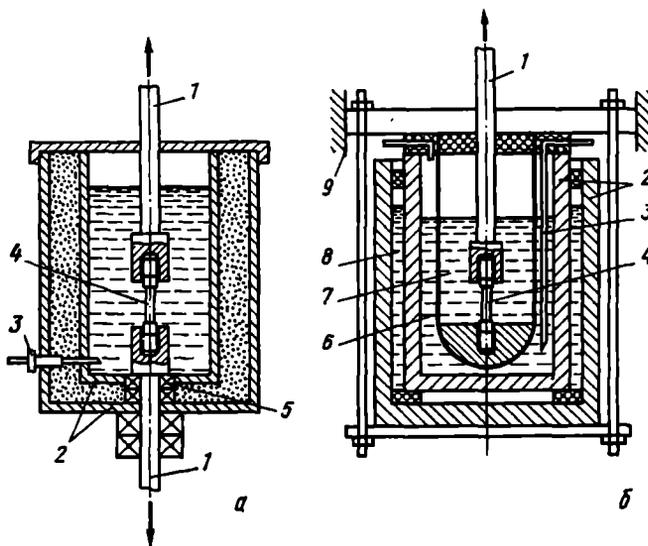


Рис. 48. Схемы криостатов для испытаний на растяжение:

*a* — с двухсторонним вводом тяг; *b* — реверсивного типа с односторонним вводом тяг; 1 — нагружающие тяги; 2 — двухстенный корпус камеры с теплоизоляцией; 3 — ввод жидкого хладагента; 4 — испытуемый образец; 5 — тефлоновое уплотнение; 6 — опорная труба; 7 — жидкий водород или гелий; 8 — экран жидкого азота; 9 — внешний корпус камеры

движного штока, связанного с верхним захватом образца. Испытания в среде жидкого гелия требуют принятия дополнительных мер по теплоизоляции рабочей камеры и ее тщательной герметизации. Для усиления теплоизоляции применяют вакуумные рубашки и экраны, охлаждаемые жидким азотом. Поверхности экранов, обращенные к рабочей камере криостатов, покрыты хромом, никелем или серебром и тщательно отполированы до зеркального блеска. Применяют криостаты с перезарядными устройствами, позволяющими при одной заливке хладагента испытывать несколько образцов.

#### 4. Динамические испытания

Основным динамическим испытанием является метод испытания на ударный изгиб (ГОСТ 9454-78) с определением ударной вязкости металла. Метод основан на разрушении образца с надрезом одним ударом маятникового копра (рис. 49).

Образец устанавливают на опорах копра и наносят удар по стороне образца, противоположной надрезу. Работа, затраченная на разрушение образца:  $K = P g (H - h) = P g l (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$ , где  $P$  — масса маятника;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $H, h$  — высота подъема маятника до удара и после разрушения образца;  $l$  — длина маятника;  $\alpha_2, \alpha_1$  — углы подъема маятника до удара и после разрушения образца. Величины  $P, H, l, \alpha_1$  — постоянны, поэтому при испытаниях значение работы разрушения определяют с помощью специальных таблиц по значению  $\alpha_2 (h)$ .

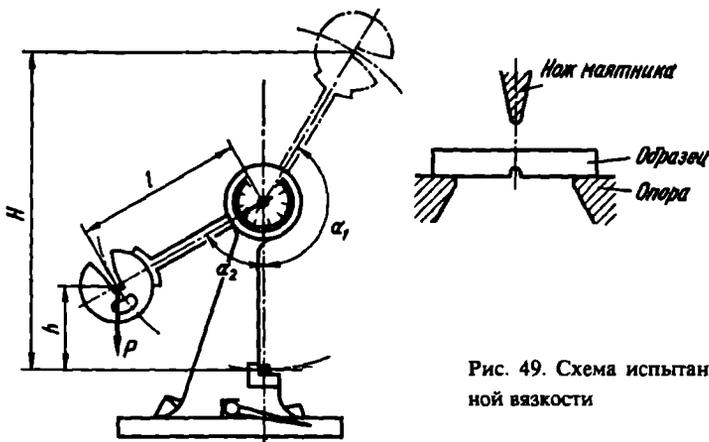


Рис. 49. Схема испытаний ударной вязкости

Ударная вязкость  $KС$ , Дж/см<sup>2</sup>, определяется как отношение работы разрушения  $K$ , затраченной на деформацию и разрушение ударным изгибом надрезанного образца, к начальной площади поперечного сечения образца в месте надреза  $S_0$ :

$$KС = K / S_0.$$

В зависимости от вида концентратора напряжений различают образцы трех типов: с радиусом дна надреза 1,0 мм (тип I); 0,25 мм (тип II) и иницированной трещиной (тип III) (рис. 50).

Введение ударных испытаний образцов с трещинами является следствием того, что работоспособность материала определяется не столько сопротивлением зарождению трещины, сколько сопротивлением ее распространению. Обычные образцы имеют сечение 10×10 мм, но для особо ответственных случаев и для оценки работоспособности крупных деталей применяют образцы сечением 25×25 мм с иницированной трещиной. Чем острее надрез, тем более жестким испытаниям подвергается металл. Вид

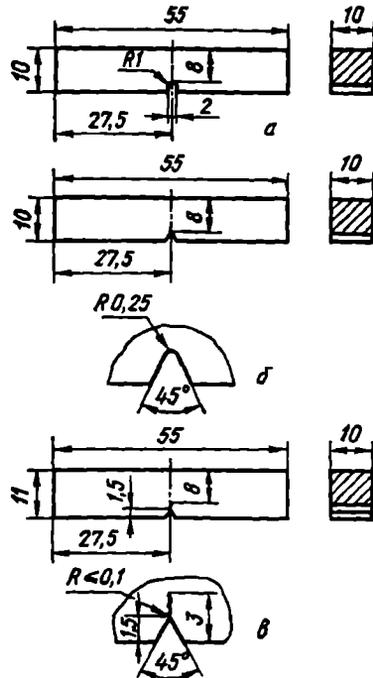


Рис. 50. Основные виды образцов для испытаний ударной вязкости (ГОСТ 9454-78):

$a$  — тип I (тип Менаже);  $b$  — тип II (тип Шарпи);  $c$  — тип III (с иницированной трещиной)

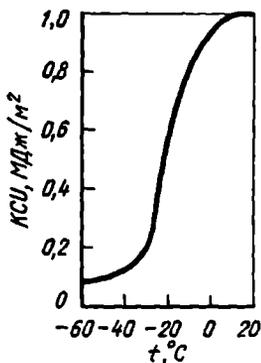
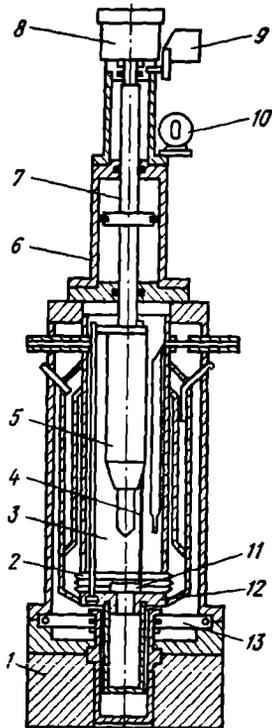


Рис. 51. Изменение ударной вязкости стали Ст3 при понижении температуры испытаний

Рис. 52. Схема пневматического копра для испытаний на ударный изгиб при гелиевых температурах:

1 — основание копра; 2 — сиффон; 3 — объем для заливки жидкого хладагента; 4 — тиги; 5 — молот; 6 — пневмоцилиндр; 7 — шток; 8 — шариковый замок; 9 — шторка; 10 — фотодатчик; 11 — образец; 12 — наковальня; 13 — динамометр



надреза входит в обозначение работы удара и ударной вязкости. Работу удара обозначают двумя буквами *KU*, *KV*, *KT*, а ударную вязкость — тремя буквами *KCU*, *KCV*, *KCT*. В этих обозначениях последние буквы являются символами концентраторов напряжений.

Испытания ударной вязкости широко применяются для оценки склонности металла к хрупкому разрушению при низких температурах. Преимуществом этого метода является простота эксперимента, учет влияния скорости нагружения и концентрации напряжений. Для оценки хладноломкости обычно проводят испытания серии образцов при понижающихся температурах. Кривые зависимости ударной вязкости от температуры называют *серийными кривыми хладноломкости* (рис. 51). С помощью этих кривых определяют температурный порог хладноломкости. При температуре эксплуатации ниже порога хладноломкости металл применять не следует.

Для проведения испытаний при низких температурах применяют копры двух типов. К первому, наиболее распространенному, относятся копры обычного типа, у которых система нагружения вынесена за пределы холодильной камеры. Второй тип копра представляет собой специ-

альную установку с размещением системы нагружения внутри холодильной камеры. ГОСТ 22848–77 рекомендует испытания при температуре до 20 К проводить на обычных копрах, а для испытаний при 4 К применять специальные копры.

На копрах первого типа проводят испытания ударной вязкости с непосредственным переносом образца щипцами из емкости с охлаждающей жидкостью на опоры копра. Для сохранения температуры образцы обматывают непрочной оболочкой — ватой, папиросной бумагой и др. При определении ударной вязкости металла из полученных значений работы вычитают работу разрушения контейнера. При испытаниях необходимо обеспечить минимальную продолжительность от момента извлечения образца из холодильной камеры до проведения опыта. Время установки охлажденного образца на опоры копра с момента извлечения из холодильной камеры до удара маятника должно быть не более 5 с.

Для испытаний в среде жидкого гелия используют пневматические копры (рис. 52). Кроме копра установка содержит пульт управления с регистрирующей аппаратурой, включающей осциллограф для записи диаграммы деформации.

Пневматический копер работает следующим образом. Молот поднимается в исходное положение, в котором он удерживается с помощью стопорного шарикового замка. При установке молота в исходное положение тяги поднимают наковальню с образцом. Благодаря этому наковальня перестает соприкасаться с динамометром, установленным на основании копра, что снижает теплопритоки извне. При достижении образцом необходимой температуры выключают стопорный замок. Рабочий ход молота происходит под действием его силы тяжести и подачи воздуха в пневмоцилиндр. В начале движения молота вследствие ослабления тяг наковальня опускается и плотно ложится на динамометр. При ударе ножа молота по образцу датчик деформации и тензодатчики динамометра передают электрические сигналы на осциллограф. После разрушения образца попадают в приемный бункер. В конце хода молот тормозится гидроамортизатором и автоматически быстро возвращается в исходное положение. Кассетное устройство позволяет при одной заливке хладагента испытывать 12 стандартных образцов.

Техническими условиями на поставку металлопродукции ответственного назначения обычно оговаривают минимально допустимое значение ударной вязкости при заданной температуре.

Оценку хладноломкости можно также проводить по виду излома разрушившегося образца. Метод основан на определении соотношения площадей вязких и хрупких участков излома ударных образцов. Вязкий излом имеет характерное волокнистое строение с пепельным оттенком. С понижением температуры количество волокнистой составляющей в изломе снижается, появляются кристаллические блестящие участки.

Обычно за критическую температуру принимают такую, при которой доля волокнистой структуры равна 50 %.

В ряде случаев целесообразно определять не только общую работу разрушения при ударном изгибе, но и ее составляющие — работу зарождения и работу развития трещины:  $KC = KC_3 + KC_p$ . Работа зарождения трещины зависит от радиуса надреза. Чем острее надрез, тем меньшая работа нужна для зарождения трещины. Работа развития трещины мало зависит от геометрии надреза и лучше характеризует склонность металла к хрупкому разрушению. Для ее определения обычно используют образцы с заранее инициированной трещиной.

Следует, однако, иметь в виду, что при испытании пластичных материалов работа разрушения образца с трещиной превышает истинную работу развития трещины на величину работы пластической деформации, расходуемой на изгибную и поперечную макродеформации.

Работу зарождения и работу развития трещины удобно определять при испытаниях на ударный изгиб с помощью диаграмм нагрузки—прогиб, полученных фотографированием с экрана осциллографа.

Известен приближенный метод определения составляющих ударной вязкости, основанный на предположении о линейной зависимости ударной вязкости от радиуса надреза и равенстве нулю работы зарождения трещины для образцов с радиусом надреза, равным нулю, или с трещиной. Тогда экстраполяция данных испытаний образцов всего двух типов с радиусом 1 и 0,25 мм на нулевое значение радиуса надреза даст значение работы развития трещины.

Определение составляющих ударной вязкости позволяет выявить влияние различных факторов на обе стадии разрушения.

## 5. Испытания долговечности металлов

Долговечность металлов определяется испытаниями на усталость, ползучесть и длительную прочность, износ, коррозию и другими методами.

### 5.1. Усталостные испытания

Усталость представляет собой процесс постепенного накопления повреждений в металле под действием переменных напряжений, приводящих к образованию и развитию усталостных трещин. Из-за различной ориентировки зерен и блоков, макро- и микродефектов напряжения в металле распределяются неравномерно. При расчетной нагрузке ниже временного сопротивления в отдельных перенапряженных локальных объемах происходит пластическая деформация и, как следствие ее предельного развития, возникают микротрещины. Микротрещины постепенно сливаются, образуя макротрещину, с течением времени распространяющуюся на все сечение.

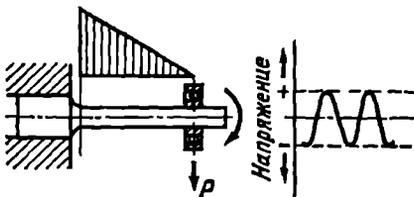
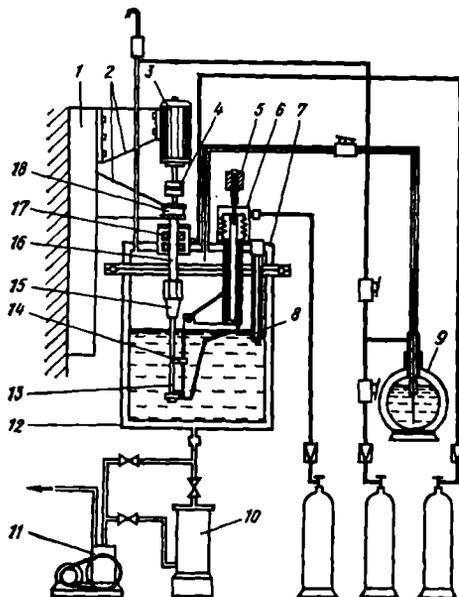


Рис. 53. Схема испытаний на усталость

Рис. 54. Схема установки для усталостных испытаний консолюно-укрепленных круглых образцов в среде жидкого водорода:

1 — станина; 2 — стойка; 3 — электродвигатель; 4 — муфта; 5 — датчик перемещения; 6 — пневмоцилиндр; 7 — крышка криостата; 8 — датчик уровня; 9 — сосуд с криогенной жидкостью; 10, 11 — вакуумные насосы; 12 — криостат; 13 — образец; 14 — термопара; 15 — цапговый зажим; 16 — несущий вал; 17 — уплотнительное устройство; 18 — упорный подшипник



Усталостные характеристики при комнатной температуре обычно определяют при испытании образцов круглого сечения на изгиб с вращением (рис. 53). Испытывают серию образцов при различной нагрузке и определяют разрушающее напряжение и соответствующее ему число циклов нагружения. Максимальным  $\sigma_{max}$  или минимальным  $\sigma_{min}$  напряжением цикла является наибольшее или наименьшее по алгебраической величине напряжение. Характеристикой цикла служит коэффициент асимметрии:  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ . При равенстве максимального и минимального напряжений по абсолютной величине  $R = -1$ . В этом случае цикл является симметричным, а предел выносливости, характеризующий сопротивление усталости, обозначают  $\sigma_{-1}$ . В зависимости от условий работы изделия испытания проводят при комнатной, высокой и низкой температурах, при симметричных и асимметричных циклах, при наличии или отсутствии агрессивных сред и концентраторов напряжений на испытываемых образцах.

На рис. 54 приведена конструкция установки для усталостных испытаний образцов при температуре до 20 К, разработанная институтом прикладной химии (ГИПХ). Нагружение производится по схеме поперечного изгиба консолюно укрепленных образцов круглого сечения. Нагружение образцов осуществляется с помощью пневматического устройства, внутри которого находится герметичный сильфонный нагру-

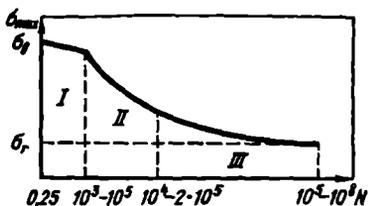


Рис. 55. Зависимость действующих напряжений от числа циклов до разрушения:

I — квазистатическое разрушение; II — малоцикловое разрушение; III — многоцикловое усталостное разрушение

При испытании строят кривую усталости — график, характеризующий зависимость между максимальными или амплитудными напряжениями (деформации) цикла и долговечностью серии одинаковых образцов, испытанных при одинаковом среднем напряжении (деформации) цикла или при одинаковом коэффициенте асимметрии цикла.

Типичная зависимость между уровнем действующих циклических напряжений и числом циклов до разрушения  $N$  имеет три характерных участка (рис. 55). Первый участок называют участком квазистатического разрушения, так как в этой области разрушение мало отличается от разрушения при однократном приложении нагрузки. Второй участок характеризует малоцикловую усталость, при которой разрушение сопровождается пластической деформацией. На третьем участке имеет место многоцикловое усталостное разрушение, проходящее при почти полном отсутствии пластической деформации.

Хотя деление на мало- и многоцикловую усталость носит условный характер, принято считать, что при малоцикловой усталости полное разрушение происходит в упругопластической области до  $5 \cdot 10^4$  циклов, а при многоцикловой — от  $5 \cdot 10^4$  циклов и более.

Для кривых усталости, имеющих горизонтальный участок, определяют *предел выносливости* — наибольшее напряжение цикла, которое выдерживает металл без разрушения. Кроме того, в пределах спадающего участка кривой может быть определен *предел ограниченной выносливости*. Для стали предел выносливости обычно определяют на базе  $N = 10^7$ , для цветных металлов  $N = 10^8$  циклов нагружения. Предел выносливости, определенный в стандартных условиях, обозначают  $\sigma_{-1}$ . Величина предела выносливости углеродистых сталей при симметричном цикле обычно составляет  $0,6\sigma_B$ .

Важной характеристикой выносливости металла является также *усталостная долговечность*, определяемая числом циклов нагружения образцов перед разрушением при заданном напряжении.

Различают три стадии усталостного разрушения: зарождение усталостной трещины, ее медленный рост до критического размера и быстрый долом оставшегося сечения образца или детали. Процесс зарождения усталостных трещин зависит от качества поверхности детали и свойств поверхностного слоя. Чем выше чистота обработки и твердость поверхностного слоя, тем меньше опасность усталостного разрушения. После зарождения трещины каждый последующий цикл нагружения приводит к ее постепенному подрастанию. Направление роста усталостной трещины зависит от характера нагружения. При циклической нагрузке растяжение—сжатие трещина развивается под прямым углом к направлению приложенного напряжения, а при кручении трещина развивается под углом  $45^\circ$  к направлению напряжения.

Усталость ответственна примерно за 50 % случаев всех аварийных разрушений, встречающихся в инженерной практике.

*Термической усталостью* называют усталость металлов, вызванную напряжениями от циклических колебаний температуры. Термическая усталость отличается от силовой меньшим числом циклов и сравнительно высоким уровнем напряжений.

В холодильной и криогенной технике температурные градиенты и соответствующие термические напряжения могут возникать из-за нагрева или охлаждения конструкций при заполнении или сливе охлаждающей жидкости, при попадании криогенных продуктов на относительно теплую поверхность металла емкостей, трубопроводов, деталей арматуры, могут быть вызваны различием теплофизических свойств входящих в конструкцию деталей из разных материалов. Особенно опасно многократное наложение термических напряжений на напряжения от внешних нагрузок. Кроме того, некоторые металлы могут претерпевать структурные превращения при охлаждении. Все это может явиться причиной преждевременного разрушения детали.

## 5.2. Испытания на ползучесть

Многие детали должны работать под нагрузкой в течение длительного времени при определенной температуре. При этом происходит медленная пластическая деформация металла под действием постоянной нагрузки, превышающей предел упругости при данной температуре. Такая деформация называется ползучестью.

Различают ползучесть при высоких и низких температурах. Более подробно изучена высокотемпературная ползучесть. При деформации нагретого металла в нем развиваются два противоположных процесса:

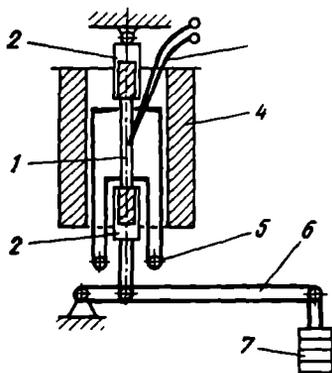


Рис. 56. Схема установки для испытаний на ползучесть:

1 — образец; 2 — захват машины; 3 — термопара; 4 — печь; 5 — зеркальный индикатор для измерения деформаций; 6 — рычаг; 7 — груз

упрочнение за счет наклепа при пластической деформации и разупрочнение в результате нагрева. Если второй процесс преобладает, то в металле начинают развиваться диффузионные разупрочняющие процессы — отдых, коагуляция фаз, рекристаллизация, способствующие ползучести. Если при высоких температурах ползучесть происходит с помощью диффузионных процессов, то при низких температурах она осуществляется за счет движения и размножения дислокаций, имеет термоактивированную природу и зависит от ряда факторов, из которых наибольшую роль играют температура испытаний и структура металла.

Основными критериями жаропрочности металлов являются предел длительной прочности и предел ползучести. Схема установки для испытаний приведена на рис. 56. Образец помещают в электрическую печь, нагревают до заданной температуры и к нему прикладывают определенную постоянную нагрузку. Возникающую в образце деформацию измеряют и по результатам испытаний серии образцов строят кривые длительной прочности и ползучести (рис. 57).

*Пределом длительной прочности* называют напряжение, которое приводит к разрушению образца при заданной температуре за определенное время, соответствующее условиям эксплуатации изделий. Предел длительной прочности обозначают  $\sigma_T^t$ , где индексы  $t$  и  $T$  обозначают температуру и время испытаний: например,  $\sigma_{200}^{700} = 300$  МПа означает, что длительная прочность металла при испытании в течение 200 ч при 700 °С составляет 300 МПа.

Кривая ползучести состоит из четырех участков (см. рис. 57). Участок *OA* соответствует упругой и пластической деформации, возникшей в момент приложения нагрузки. Затем идут участки *AB* неустановившейся ползучести, где металл деформируется с неравномерной скоростью, *BC* — установившейся ползучести и *CD* — ускоренного разрушения, связанного с образованием шейки. *Пределом ползучести* называют напряжение, вызывающее заданную суммарную деформацию за определенное время при данной температуре. Предел ползучести обозначают  $\sigma_{\delta}^t/\tau$ , где  $t$  — температура,  $\delta$  — суммарное удлинение,  $\tau$  — время;

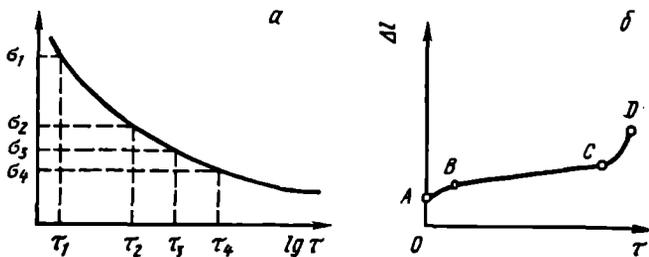


Рис. 57. Кривые длительной прочности (а) и ползучести (б)

например  $\sigma_{1/1000}^{400} = 350$  МПа означает, что предел ползучести металла при 1 %-ной деформации за 1000 ч при температуре испытаний 400 °С составляет 350 МПа. Для деталей, длительное время работающих при повышенных температурах, задается обычно скорость ползучести на установившейся стадии процесса, например 0,1 % за  $10^4$  ч или за  $10^5$  ч.

Условия эксплуатации многих изделий, работающих при низких температурах, предусматривают их длительную безаварийную работу (более 10 лет) под нагрузкой. В таких изделиях, как резервуары и емкости для хранения и транспортировки криогенных жидкостей, обладающих повышенным запасом упругой энергии в системе, деформация, обусловленная ползучестью, может способствовать значительному росту напряжений в отдельных зонах конструкции. При этом, учитывая действие низких температур эксплуатации, существенно усиливается опасность хрупкого разрушения.

При низкотемпературных испытаниях ползучести необходимая температура создается за счет того, что образец находится в среде охлаждающей жидкости, а постоянное нагружение передается на образец через верхний или нижний захват испытательной машины.

## 6. Трещиностойкость металлов и коэффициент интенсивности напряжений

Курс сопротивления материалов, формулы которого используются для расчета прочности машин и конструкций, рассматривают материал как сплошное тело, свободное от дефектов. Однако таких идеальных материалов практически нет. Реальные конструкционные материалы содержат дефекты от микроскопических нарушений сплошности до макроскопических трещин.

Дефекты типа трещин являются концентраторами напряжений, которые тем больше, чем острее трещина и больше ее длина. Номинальные

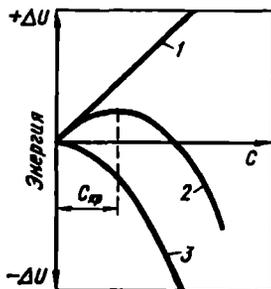
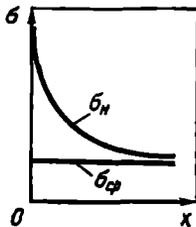
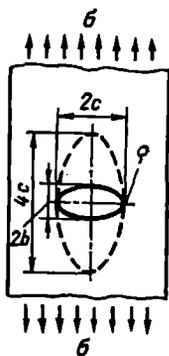


Рис. 58. Распределение напряжений у вершины эллиптической трещины

Рис. 59. Схема изменения энергии при росте трещины (по Гриффитсу):

1 — затрата энергии на образование новых поверхностей; 2 — изменение общей энергии; 3 — высвобождающаяся упругая энергия

напряжения в вершине эллиптической трещины (рис. 58) определяются по формуле

$$\sigma_n = \sigma_{cp} (1 + 2 \sqrt{c/\rho}) \approx 2 \sigma_{cp} \sqrt{c/\rho},$$

где  $\sigma_{cp}$  — среднее приложенное напряжение;  $c$  — длина большой полуоси эллипса (трещины);  $\rho$  — радиус в вершине эллипса (трещины).

Отсюда коэффициент концентрации напряжений  $k = 2\sqrt{c/\rho}$ .

В случае достаточно острой и длинной трещины напряжения вблизи ее вершины могут достигать значений, превышающих разрушающее напряжение материала даже при сравнительно малом приложенном напряжении. Для инициирования разрушения совсем не нужно, чтобы средние напряжения по сечению деталей достигали значений прочности. Достаточно создать их только в вершине дефекта, чтобы трещина начала распространяться.

Для того чтобы предсказать поведение трещины, определить перспективы ее развития или остановки, необходимо провести анализ напряженного состояния вблизи вершины трещины.

При продвижении трещины имеют место два процесса: высвобождение упругой энергии  $V$ , запасенной системой, и затрата энергии  $U$  на образование новых поверхностей трещины. Из сопоставления высвобождающейся упругой энергии и поверхностной энергии Гриффитс вывел уравнение энергетического баланса нестабильного роста трещины.

Хрупкая тонкая пластина единичной толщины (см. рис. 58) находится под действием внешних сил, создающих напряжения  $\sigma$ . Запасенная упругая энергия в единице объема пластины без трещины

$$A = \sigma \epsilon / 2 = \sigma^2 / 2 E,$$

где  $\sigma$  — приложенное внешнее напряжение;  $\varepsilon$  — деформация;  $E$  — модуль нормальной упругости ( $E = \sigma/\varepsilon$ ).

Если в пластине внезапно образуется сквозная эллиптическая трещина длиной  $2c$ , расположенная под прямым углом к направлению действующих напряжений, то упругая энергия высвободится в зоне трещины, представляющей собой область эллиптической формы объемом  $2\pi c^2$ . Высвобождающаяся энергия упругой деформации в пластине

$$V = \left[ \frac{\sigma^2}{2E} \right] \cdot 2\pi c^2 = \pi c^2 \frac{\sigma^2}{E}.$$

Для образования трещины необходима затрата энергии, так как при ее появлении возникают две новые поверхности с удельной поверхностной энергией  $\gamma$ . В пластине единичной толщины затрата энергии  $Q = 4c\gamma$ .

Энергия  $V$  расходуется системой, поэтому она имеет знак минус, а энергия  $Q$  поглощается, поэтому она является положительной (рис. 59).

Поведение трещины в растягиваемой пластине зависит от того, в какую сторону будет изменяться общая энергия пластины при малом приращении длины трещины. Если с ростом трещины энергия пластины будет уменьшаться, то трещина будет расти без внешнего дополнительного воздействия, т.е. самопроизвольно.

В поведении трещины возможны три случая:

трещина устойчива и без дополнительной деформации не растет:  $(\partial/\partial c)(-V + Q) > 0$ ;

трещина легко распространяется:  $(\partial/\partial c)(-V + Q) < 0$ ;

условие неустойчивости трещины:  $(\partial/\partial c)(-V + Q) = \gamma$ .

Из условия неустойчивости трещины следует, что

$$(\partial/\partial c)(-V + Q) = (\partial/\partial c)\left[-\frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} + 4c\gamma\right] = -\frac{2\pi c \sigma^2}{E} + 4\gamma = 0.$$

Отсюда критическое разрушающее напряжение в хрупкой пластине при наличии трещины данного размера  $\sigma_{кр} = \sqrt{2E\gamma/(\pi c)}$ .

Для данного растягивающего напряжения критическая длина трещины  $c_{кр} = 2E\gamma/(\pi\sigma^2)$ .

Если взять вторую производную от выражения в скобках в формуле для условия неустойчивости, то полученное значение будет со знаком минус. Это означает, что критической длине трещины соответствует максимум энергии и ее дальнейший рост будет происходить самопроизвольно за счет высвобождения накопленной упругой энергии.

Из найденных выражений следует, что при отсутствии пластической деформации произведение  $\sigma\sqrt{c}$  должно быть постоянной величиной для данного материала. Гриффитс проверил постоянно этого произведения испытанием на разрыв внутренним гидравлическим давлением стеклянных трубок с нанесением алмазом царапин разной длины. Во

всех случаях произведение  $\sigma\sqrt{c}$  оставалось постоянным, что подтвердило справедливость выводов Гриффитса.

Для плоского деформированного состояния при равенстве нулю одной из деформаций, т.е. в случае прямого, без скосов, излома, перпендикулярного действующим силам, критическое разрушающее напряжение

$$\sigma_{кр} = \sqrt{2E\gamma/[\pi c(1-\mu^2)]},$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Современное состояние теории развития трещин и механики разрушения основано на работах Ирвина, относящихся к 1950—60 гг. Такие, ранее упоминавшиеся характеристики, как порог хладноломкости, ударная вязкость или ее составляющие и др., позволяют проводить качественное сопоставление разных материалов и их преимущественную пригодность для данной конструкции. Однако они не могут быть использованы в количественных расчетах.

Опираясь на работы Гриффитса и других исследователей, Ирвин ввел в механику квазихрупкого разрушения новый параметр — *коэффициент интенсивности напряжений*. Преимуществом этого параметра явилась возможность его экспериментального определения и использования в расчетах на прочность. Стало возможным прогнозировать поведение несплошного материала в конструкциях на основе предварительных инженерных расчетов.

Для описания переходов от состояния стабильности образца с трещиной под действием приложенной нагрузки к катастрофическому разрушению Ирвин сопоставил два критерия оценки: энергетический и силовой. Рассмотрев связь этих критериев, он доказал равноценность энергетического и силового подхода.

При плоском напряженном состоянии при распространении трещины изменение упругой энергии  $dU$  с увеличением раскрывающихся поверхностей трещины  $dF$  происходит по условию

$$dU/dF = dU/(2dc) = G, \text{ где } U = \pi c^2 \sigma^2/(2E).$$

Отсюда, при плоском напряженном состоянии

$$G = \pi c \sigma^2/E,$$

где  $c$  — полудлина трещины;  $\sigma$  — среднее приложенное напряжение;  $E$  — модуль нормальной упругости.

При плоском деформированном состоянии

$$G' = (1 - \mu^2) \pi c \sigma^2/E.$$

Смысл параметра  $G$  по Ирвину состоит в определении сопротивления движению трещины. Этот критерий связывает вместе приложенное напряжение и размер дефекта, т.е. значения, от которых зависит работоспособность материала.

Самопроизвольное разрушение будет иметь место в том случае, если  $G$  достигнет значения  $G_c$ , характеризующего критическое сопротивление продвижению трещины. Критерием разрушения является  $G > G_c$ . Можно  $G$  интерпретировать как энергию, которую необходимо затратить для распространения трещины на единицу поверхности раскрытия трещины в момент начала ее самопроизвольного роста. Из сопоставления найденного значения  $G_c$  и критического напряжения, определенно по формуле Гриффитса, видно, что они имеют одинаковый вид и что  $G_c = 2\gamma$ .

Таким образом, обе концепции (Гриффитса и Ирвина) приводят к одинаковым результатам, несмотря на различие исходных предположений.

Для удобства экспериментальной оценки и выполнения прочностных расчетов Ирвин ввел другой параметр — коэффициент интенсивности напряжений  $K$ , являющийся математической интерпретацией критерия  $G$ .

Физический смысл параметра  $K$  сложен для восприятия, особенно из-за его непривычной размерности: напряжение, умноженное на корень квадратный из длины. Важно понять, что  $K$  — это коэффициент, характеризующий интенсивность поля напряжений перед трещиной. Коэффициент интенсивности напряжений  $K$  можно сравнить с напряженностью магнитного или электрического поля:

$$G = K^2/E; \quad K^2 = GE; \quad K = \sqrt{GE} = \sigma\sqrt{\pi c},$$

где  $\sigma$  — среднее приложенное напряжение;  $c$  — полудлина трещины. Отсюда  $K$  имеет единицу измерения МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>.

Неустойчивость трещины проявляется при достижении коэффициентом  $K$  величины критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_c$ , обычно называемого вязкостью разрушения.  $K_c$  является важнейшей характеристикой материала в механике разрушения. Критерий  $K_c$  связывает величину напряжений в момент разрушения и критический размер трещины.

Существует три типа раскрытия трещины. Соответствующие им параметры интенсивности напряжений обозначают индексами I, II, III или  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$ ,  $G_I$ ,  $G_{II}$ ,  $G_{III}$ . Тип I соответствует разрушению отрывом, когда растягивающие напряжения перпендикулярны к плоскостям трещины. Тип II представляет собой поперечный сдвиг относительно плоскости трещины, а тип III — сдвиг поверхностей трещины в стороны, когда сдвиговые напряжения параллельны фронту трещины. Из трех типов раскрытия трещины наибольший интерес представляет первый — отрыв с симметричным распределением напряжений относительно плоскости трещины. Он встречается наиболее часто.

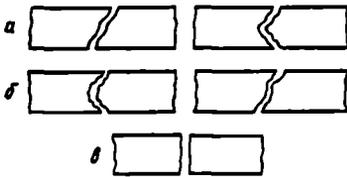
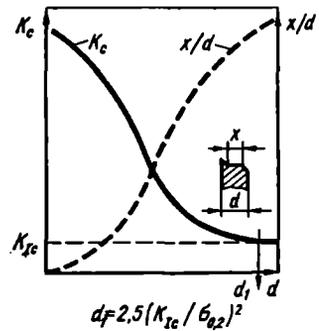


Рис. 60. Виды разрушения:

*a* — сдвиговое; *б* — частичным сдвигом; *в* — от нормальных напряжений

Рис. 61. Зависимость вязкости разрушения от толщины образца



Рост трещины связан с пластической деформацией, идущей впереди вершины трещины. Формулы Ирвина применительно к металлам справедливы только в том случае, когда размер пластической зоны мал по сравнению с длиной трещины и оставшимся сечением образца. При плоской деформации зона пластической деформации значительно меньше, чем в случае плоского напряженного состояния.

Воздействие окружающего упругонапряженного материала ограничивает размер зоны пластической деформации. Поэтому в средней части достаточно толстого образца размер пластической зоны минимален и трещина находится в области плоской деформации. В периферийных областях, где радиус пластической зоны значительно больше, материал находится в плоском напряженном состоянии. Разрушение в этих местах происходит по сдвиговому механизму с максимальным поглощением энергии. Следовательно, чем толще образец, тем стесненнее деформация, тем более точным становится анализ на базе механики разрушения.

Для образцов разной толщины возможны различные виды разрушения (рис. 60): сдвигом, частичным сдвигом, от нормальных напряжений. Вязкость разрушения определяется относительным развитием нормального и наклонного (скосов) участков разрушения. У достаточно толстых образцов с высокоразвитой поверхностью нормального разрушения вязкость разрушения приближается к предельному значению  $K_{Ic}$  — вязкости разрушения в условиях плоской деформации. Начиная с этой толщины образца,  $K_{Ic}$  и  $G_{Ic}$  практически не изменяются и являются константами материала (рис. 61).

Таким образом,  $K_{Ic}$  — это критический коэффициент интенсивности напряжений при плоском напряженном состоянии, когда разрушение происходит путем либо смешанного (прямого и косого), либо только косого излома. Коэффициент  $K_c$  не является константой материала, т.е. зависит от размеров образца. Критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации не зависит от геомет-

рии образца и является константой материала. Коэффициент  $K_{Ic}$  — предельная характеристика, определяемая при наиболее жестких условиях испытаний, к которой стремится  $K_c$  по мере увеличения толщины образца.

Учитывая, что  $K_{Ic}$  является крайней страховочной характеристикой, могут быть случаи, когда ее использование недостаточно оправдано, например, когда материалу не приходится работать при той толщине, при которой производилось определение  $K_{Ic}$ . Разрушение тонколистовых конструкций происходит в условиях плосконапряженного состояния. Использование  $K_{Ic}$  в качестве браковочной характеристики может привести к забраковыванию потенциально годных материалов, способных удовлетворительно работать при небольших толщинах.

Знание вязкости разрушения позволяет определять максимально допустимые напряжения в конструкции при наличии трещин определенной длины. Приложенные напряжения должны быть ниже разрушающего напряжения, найденного с помощью  $K_{Ic}$ . Одновременно может решаться и другая задача, связанная с определением критического размера дефекта при данном приложенном напряжении и сопоставлением его с максимальным размером исходных дефектов в металле.

Материалы, которые считаются лучшими по значениям обычных характеристик механических свойств, могут оказаться непригодными из-за сопротивления развитию трещины.

Если при дефектоскопии металла выявится, что длина трещин меньше критического значения, то для оценки надежности конструкции необходимо установить, могут ли условия ее эксплуатации вызвать развитие трещин. Распространение трещин при длине, меньшей критической, возможно при действии таких факторов, как циклические нагрузки, коррозия, водородное охрупчивание и др.

## 7. Испытания на вязкость разрушения

Статические, динамические и циклические испытания сопротивления развитию трещины или вязкости разрушения сводятся к следующей общей процедуре. В образцах определенной формы и размера наводится искусственная трещина. Затем производят нагружение образца с одновременной записью нагрузки и смещения берегов трещины.

Различают следующие основные виды образцов для определения вязкости разрушения при статическом нагружении (рис. 62):

I — цилиндрический образец с кольцевым надрезом и трещиной для испытаний на осевое растяжение и изгиб;

II — плоский образец с центральной сквозной трещиной или симметричными краевыми трещинами для испытаний на осевое растяжение;

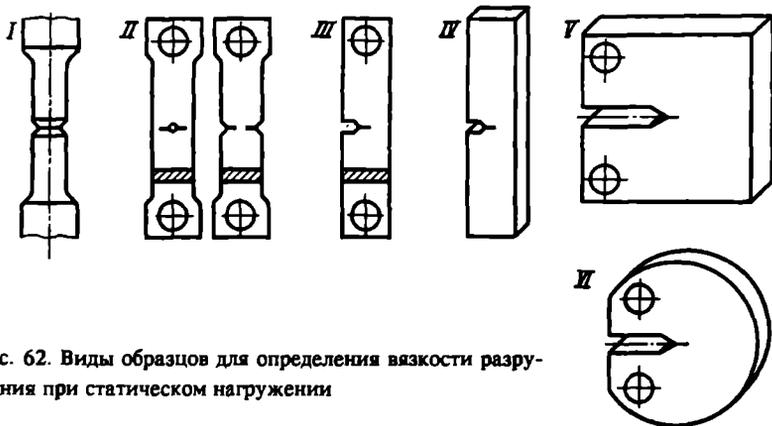


Рис. 62. Виды образцов для определения вязкости разрушения при статическом нагружении

III — плоский образец с боковым односторонним надрезом и трещиной для испытаний на растяжение;

IV — плоский образец с боковым надрезом и трещиной для испытаний на сосредоточенный изгиб;

V — плоский образец с односторонней боковой усталостной трещиной для испытаний на внецентренное растяжение;

VI — дисковый образец с односторонним надрезом и трещиной для испытаний на внецентренное растяжение.

Форму и размеры образцов для определения характеристик вязкости разрушения выбирают с учетом целей испытания, назначения, размеров и форм сечения заготовок, прочности и пластичности материала, температурных условий его эксплуатации.

Различают силовые, деформационные, энергетические критерии разрушения. К силовым критериям относят критические значения коэффициентов интенсивности напряжений  $K_c$ ,  $K_{Ic}$ ; к деформационным — критическое раскрытие трещин  $\delta_c$  и коэффициент интенсивности деформации  $K_{cE}$ ; к энергетическим — удельная энергия продвижения трещины на единицу поверхности раскрытия  $G_c$ ,  $G_{Ic}$ . В качестве основных рекомендуются  $K_c$  и  $K_{Ic}$ . При определении  $K_c$  или  $\delta_c$  целесообразно использовать образцы с толщиной, равной толщине элемента конструкции. Корректность определения  $K_{Ic}$  зависит от размеров образцов.

Усталостная трещина создается от исходного надреза за счет приложения к образцу циклической нагрузки. Во время опыта производится автоматическая запись данных о нагрузке на образец и росте трещины. При этом особенно важно правильное определение нагрузки на образец в момент скачка трещины. Регистрация данных о росте трещины производится с помощью измерителя деформации с тензодатчиками. Измери-

тель деформации устанавливают в образце или с помощью специально прикрепляемых к образцу упоров.

После того как образец с трещиной подготовлен, он устанавливается в испытательной машине и производится его непрерывное нагружение с одновременной записью диаграммы нагрузка — смещение берегов надреза.

Образцы должны иметь толщину, обеспечивающую разрушение в условиях плоской деформации. Для разрушившихся образцов характерно отсутствие деформации по толщине, в изломе отсутствуют «губы среза» или утяжки кромок.

Основным недостатком испытаний на вязкость разрушения в условиях плоской деформации является необходимость использования чрезмерно больших образцов при исследовании материалов низкой и средней прочности. Например, образцы из стали 20 с  $\sigma_{0,2} = 280$  МПа должны иметь толщину более 250 мм. Нанесение на боковые поверхности образцов дополнительных острых надрезов позволяет более чем в два раза уменьшить размеры образцов и получить при этом достоверные значения  $K_{Ic}$  для сталей низкой прочности. Такая методика определения  $K_{Ic}$  по данным измерения податливости компактного образца с пазами обладает высокой точностью. Условия плоской деформации у вершины трещины могут также достигаться за счет охрупчивания поверхностных слоев материала образца.

Известно, что склонность к хрупкому разрушению определяется действием ряда внешних и внутренних факторов. Эти же факторы оказывают влияние и на вязкость разрушения.

Вязкость разрушения тесно связана с показателями прочности материалов  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$ . Увеличение прочности сопровождается снижением пластичности и вязкости разрушения. Это объясняется тем, что у высокопрочных материалов мала энергия, поглощаемая при разрушении, уровень которой определяется величиной пластической деформации у вершины трещины. Для высокопрочных материалов эффект увеличения прочности существенно перекрывается снижением пластичности, в результате чего вязкость разрушения уменьшается.

Материалы средней и низкой прочности при комнатной температуре обычно имеют более высокие значения  $K_{Ic}$ , чем высокопрочные. С понижением температуры ситуация меняется, особенно для сплавов, имеющих ОЦК и ГП кристаллические решетки. С понижением температуры прочность растет и при определенных условиях поведение материала средней и низкой прочности становится таким же, как и поведение высокопрочного материала при комнатной температуре.

Характер температурной зависимости  $\sigma_T$  и  $K_{Ic}$  для одной из низколегированных марок стали приведен на рис. 63. Эта сталь имеет высокие значения  $K_{Ic}$  при комнатной температуре, но с понижением температу-

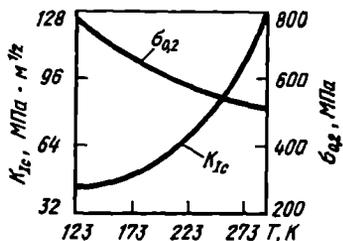


Рис. 63. Температурная зависимость предела текучести и вязкости разрушения деформированной высоколегированной конструкционной стали

можно увеличить прочность и вязкость металлов. Поэтому при измельчении зерна возрастает такой комплексный показатель свойств, каким является вязкость разрушения. Использование таких технологических приемов, как контроль процесса выплавки и особенно раскисления стали, понижение температуры конца прокатки, термомеханическая обработка, способствующих измельчению зерна, позволяет одновременно повысить вязкость разрушения.

Влияние легирующих элементов на вязкость разрушения прежде всего обусловлено их воздействием на величину зерна. Элементы, способствующие измельчению зерна, повышают вязкость разрушения, а элементы, упрочняющие твердые растворы, наоборот, понижают вязкость разрушения. Эффективное измельчение зерна достигается введением карбидообразующих элементов: ванадия, ниобия, титана. Использование алюминия для раскисления способствует получению в спокойных сталях более мелкого зерна, чем в кипящих и полуспокойных.

Знание параметров вязкости разрушения позволяет обеспечить надежность конструкции. Это особенно важно в тех случаях, когда применяются новые высокопрочные материалы в новых проектах, которые не имеют аналогов в прошлом, а безопасность изделий должна быть бесспорно обеспечена. Поэтому один из авторов линейной механики разрушения, Д.Р.Ирвин указывает на необходимость срочного обучения инженеров этой дисциплине, ибо «создание новых конструкций редко ждет, пока конструкторы устроят все пробелы в своем образовании».

ры  $K_{1c}$  резко падает. Вязкое разрушение по сдвиговому механизму переходит к низкоэнергетическому. С понижением температуры растет стесненность пластической деформации. Коэффициент  $K_c$  переходит в  $K_{1c}$  при меньших толщинах материала. Поэтому при низких температурах испытания вязкости разрушения можно проводить на образцах меньших размеров.

Размер зерна поликристаллических материалов является одним из основных параметров микроструктуры. Уменьшение размеров зерен позволяет одновременно

## Глава 4. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ И ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

### 1. Общие сведения

Чистые металлы обычно имеют низкую прочность и невысокие технологические свойства. В технике обычно применяются сплавы. *Сплавами* называют вещества, полученные сплавлением нескольких элементов.

Элементы или химические соединения, образующие сплав, называют *компонентами*. Компонентами металлических сплавов могут быть не только металлы, но и неметаллы. В зависимости от числа компонентов сплавы могут быть двойные, тройные и т.д. В зависимости от физико-химического взаимодействия компонентов в сплавах образуются фазы, число и тип которых характеризуют состояние сплава.

*Фазой* называют однородную часть сплава, характеризующуюся определенными составом, свойствами, типом кристаллической решетки и отделенную от других частей сплава поверхностью раздела.

В сплавах возможно образование следующих фаз: 1) жидких растворов; 2) твердых чистых металлов; 3) твердых растворов; 4) химических соединений. В зависимости от количества фаз сплавы могут быть одно-, двух- и многофазными.

В жидком состоянии компоненты сплава обычно неограниченно растворяются друг в друге, образуя жидкие растворы. В твердом состоянии компоненты могут образовывать: 1) механические смеси, представляющие собой смесь двух или нескольких фаз — чистых компонентов; 2) фазы — химические соединения, когда компоненты вступают в химические взаимодействия; 3) фазы — твердые растворы, когда один компонент растворяется в другом, называемом растворителем.

Механические смеси образуются при кристаллизации многих двойных сплавов, например Pb—Sb, Al—Cu. При металлографическом анализе на шлифе видны кристаллиты разных компонентов, образующих механическую смесь. Химический анализ определяет также разные элементы. Рентгеноструктурный анализ показывает два типа кристаллических решеток, образующих такую смесь.

Свойства химических соединений отличаются от свойств образующих их элементов. Они имеют постоянную температуру плавления. Рентгеноструктурный анализ показывает различие кристаллических решеток химического соединения и исходных элементов. В химическом соединении сохраняется определенное соотношение атомов элементов, позволяющее выразить их состав простой формулой типа  $A_nB_m$ .

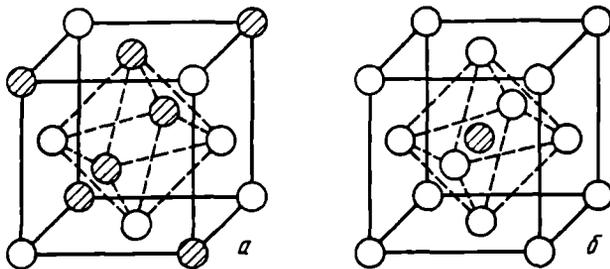


Рис. 64. Кристаллическая решетка ГЦК твердого раствора замещения (а) и твердого раствора внедрения (б)

Химический анализ твердого раствора определяет несколько элементов, а металлографический и рентгеноструктурный — однородные зерна и один тип решетки, как у чистого металла.

Различают твердые растворы замещения и внедрения. *Твердый раствор* замещения образуется замещением части атомов растворителя в его кристаллической решетке атомами растворенного компонента (рис. 64, а).

Различие в размерах атомов обуславливает искажение кристаллической решетки при замещении атомов одного компонента атомами другого компонента. Это искажение тем больше, чем больше разница в размерах атомов и строении их кристаллических решеток. При чрезмерном искажении решетки дальнейшая растворимость становится невозможной. Наступает предельная растворимость, при которой дополнительно вводимые атомы не могут войти в решетку и образуют самостоятельную фазу. Если же оба компонента имеют однотипные кристаллические решетки, а атомные диаметры отличаются не более чем на  $\pm 8\%$ , то возможна неограниченная растворимость.

Предельная растворимость зависит также от различия в строении валентных оболочек электронов. Оновалентные металлы полностью растворяются только в оновалентных: Cu—Ag, Ag—Au, Cu—Ni.

Ограниченная растворимость компонентов наступает при достижении критической величины электронной концентрации в твердом растворе  $C_{эл}$ , где электронная концентрация — это количество валентных электронов  $n$  на атом. Для ОЦК решетки растворителя  $C_{эл} = 1,36$ , для ГЦК решетки  $C_{эл} = 1,40$ . Если электронная концентрация превышает эти значения, то образуется новая фаза с другой кристаллической решеткой.

Например, из диаграммы состояния системы Cu—Zn известно, что предел растворимости Zn в Cu составляет 39%. Для сплава 61% Cu и 39% Zn  $C_{эл} = (61 \cdot 1 + 39 \cdot 2) / 100 = 1,39 < 1,40$ .

*Твердый раствор внедрения* образуется путем внедрения атомов растворенного компонента в междоузлия (пустоты) кристаллической решетки (рис. 64, б). В решетке ГЦК такая пустота находится в центре куба и образует сферу диаметром  $0,41 D$ , где  $D$  — диаметр атомов растворителя.

В решетке ОЦК пустота находится в центре грани и образует сферу диаметром  $0,29 D$ .

Твердый раствор внедрения характерен для сплавов металлов с элементами 1-го и 2-го периодов, имеющими малые атомные диаметры (С, В, N, H, O). Концентрация элементов в твердом растворе внедрения обычно невысока и всегда ниже, чем в твердых растворах замещения.

Курс металловедения тесно связан с изучением диаграмм состояния. Диаграмма состояния сплава представляет собой графическое изображение состояния сплава и показывает превращения, протекающие в сплавах в зависимости от температуры и концентрации элементов. Диаграмма состояния определяет устойчивые, равновесные состояния сплава, обладающие при данных условиях минимальной свободной энергией. Поэтому ее иногда называют диаграммой фазового равновесия.

Диаграммы состояния, как правило, строят экспериментально. Для их построения обычно используют термический метод, с помощью которого получают кривые затвердевания и охлаждения сплавов. По остановкам и перегибам на этих кривых, обусловленных тепловыми эффектами превращений, определяют температуры превращений. Точки перегиба или остановки на кривых охлаждения называют *критическими точками*. Они соответствуют температурам, при которых в сплавах начинаются, заканчиваются или полностью протекают какие-либо превращения.

В дополнение к термическому методу применяют исследования микроструктуры с помощью металлографического и электронного микроскопов, рентгеноструктурный анализ, изучение изменений физических свойств сплавов и т.д. Данные, полученные различными методами, положены в основу построения диаграмм состояния.

По горизонтали диаграммы состояния откладывается концентрация, по вертикали — температура. Каждая точка диаграммы соответствует сплаву определенного состава, находящемуся при определенной температуре в условиях равновесия.

С помощью диаграмм состояния определяют температуру плавления и полиморфных превращений в сплавах, сколько фаз и какие фазы имеются в сплаве данного состава при данной температуре, а также количественное соотношение этих фаз в сплаве и их состав (содержание компонентов).

## 2. Основные типы диаграмм состояния

### 2.1. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов

Оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, но нерастворимы в твердом состоянии и не образуют химических соединений. Компоненты: вещества  $A, B$ ; фазы: жидкость  $L$ , кристаллы  $A, B$ .

Примером диаграмм этого типа является диаграмма состояния сплава  $Pb-Sb$ . Диаграмма  $Pb-Sb$  строится на основе большого числа кривых охлаждения, полученных термическим методом (рис. 65).

Кривые охлаждения чистых металлов имеют по одной критической точке:  $327^\circ C$  для свинца и  $631^\circ C$  для сурьмы. Структура чистых металлов состоит из однородных зерен. Сплав, содержащий 13 %  $Sb$  и 87 %  $Pb$  также имеет одну критическую точку. Механическая смесь двух видов кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкости, называется эвтектикой. Микроструктура эвтектического сплава состоит из перемежающихся выделений сурьмы в свинцовой основе.

Сплавы с 5 и 40 %  $Sb$  затвердевают в интервале температур и на кривой охлаждения имеют две критические точки, соответствующие началу и концу затвердевания. Геометрическое место точек, образующих линию начала затвердевания называют *линией ликвидус* (лат. liquidus — жидкий), линию конца затвердевания — *линией солидус* (лат. solidus — твердый).

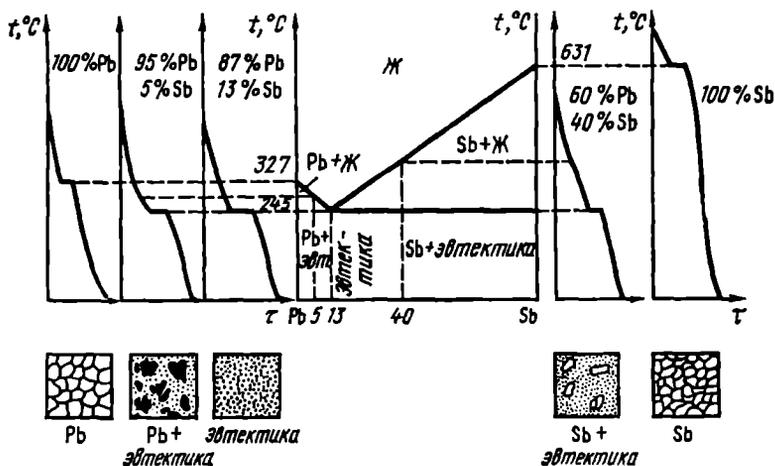


Рис. 65. Диаграмма состояния, кривые охлаждения и схемы структур сплавов свинец—сурьма при комнатной температуре

## 2.2. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Оба компонента неограниченно растворимы в жидком и твердом состояниях и не образуют химических соединений. Компоненты: вещества  $A$ ,  $B$ . Фазы: жидкость  $L$ , кристаллы твердого раствора  $\alpha$ . Примером таких сплавов являются сплавы  $Cu-Ni$  (рис. 66).

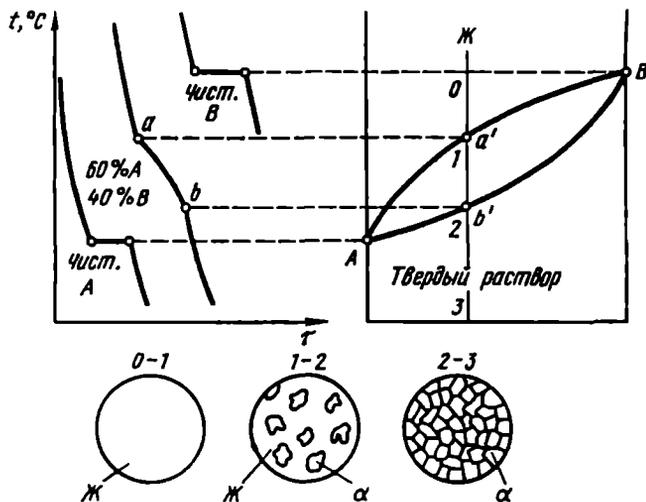


Рис. 66. Диаграмма состояния, кривые охлаждения и схемы образования структур сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии

Сплавы этого типа всегда затвердевают в интервале температур и имеют на кривых охлаждения две критические точки  $a$ ,  $b$  (два перегиба). Между началом  $a'$  и концом  $b'$  затвердевания из жидкого расплава выпадают кристаллы твердого раствора  $\alpha$ . Верхняя линия  $Aa'B$  представляет собой линию ликвидус, нижняя  $Ab'B$  — линию солидус.

Из диаграммы следует, что выше линии  $Aa'B$  сплав, например сплав  $Cu-Ni$ , состоит из однородного жидкого раствора, внутри контура  $Aa'Bb'$  — из кристаллов твердого раствора и жидкой фазы, а ниже линии  $Ab'B$  — из одного твердого раствора.

## 2.3. Правило отрезков

С помощью правила отрезков на диаграмме определяют относительное количество каждой фазы и состав фаз.

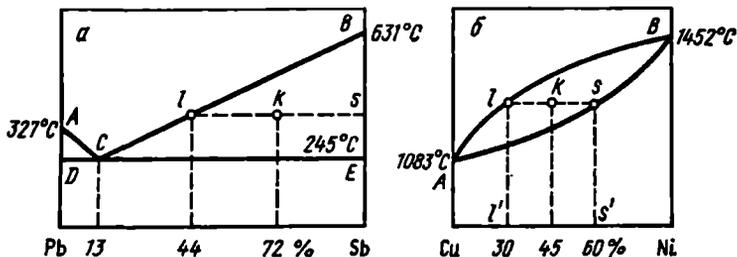


Рис. 67. Применение правила отрезков для сплавов, образующих механические смеси (а) и твердые растворы (б)

На рис. 67 приведены диаграммы состояния механической смеси и сплава с неограниченной растворимостью в твердом состоянии. Из рис. 67, а следует, что в точке *k* сплав состоит из затвердевшего компонента и жидкой фазы.

Для определения соотношения фаз и их состава через точку *k* проводим горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими область на диаграмме. Проекции точек пересечения на ось концентраций *l'*, *s'* показывают состав фаз (жидкая фаза содержит 44 % Sb).

Отрезки горизонтальной линии между точкой *k* и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз:

$$Q_s \cdot sk = Q_l \cdot lk ; Q_s / Q_l = lk / sk ,$$

где  $Q_s$ ,  $Q_l$  — количество твердой и жидкой фаз. Для определения отношения какой-либо фазы (например, твердой  $Q_s$ ) ко всему количеству сплава  $Q_{s+l}$  используется выражение

$$Q_s / Q_{s+l} = lk / sl ,$$

где *sl* — вся длина горизонтальной линии. Таким же образом определяются соотношение и состав фаз для сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии (рис. 67, б). При температуре и концентрации, отвечающим точке *k*, сплав состоит из кристаллов твердого раствора и жидкой фазы. Для определения состава жидкой фазы через точку *k* проводится горизонталь до пересечения с линиями ликвидус и солидус, а проекция точек *l* и *s'* на ось концентраций показывают составы жидкой и твердой фаз. Соотношение фаз определяется по правилу отрезков:

$$Q_l / Q_s = sk / sl \text{ или } Q_s / Q_{s+l} = lk / sl .$$

Правило отрезков может использоваться не только для изучения процесса кристаллизации сплавов, но и для исследования процессов,

проходящих в твердом состоянии. Оно применимо ко всем двухфазным сплавам независимо от их агрегатного состояния.

Отсюда следует, что при охлаждении состав жидкой фазы в соответствии с правилом отрезков меняется по линии ликвидус, а состав твердой фазы — по линии солидус.

#### 2.4. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Компоненты: *A*, *B*. Фазы: жидкость *L*, твердые растворы  $\alpha$  и  $\beta$ . Оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, ограничено в твердом и не образуют химических соединений. При этом ограниченная взаимная растворимость в твердом состоянии может меняться с изменением температуры (рис. 68).

При медленном охлаждении сплавов и высокой степени диффузии вторичная фаза выделяется по границам зерен, образуя сетку. Ускорен-

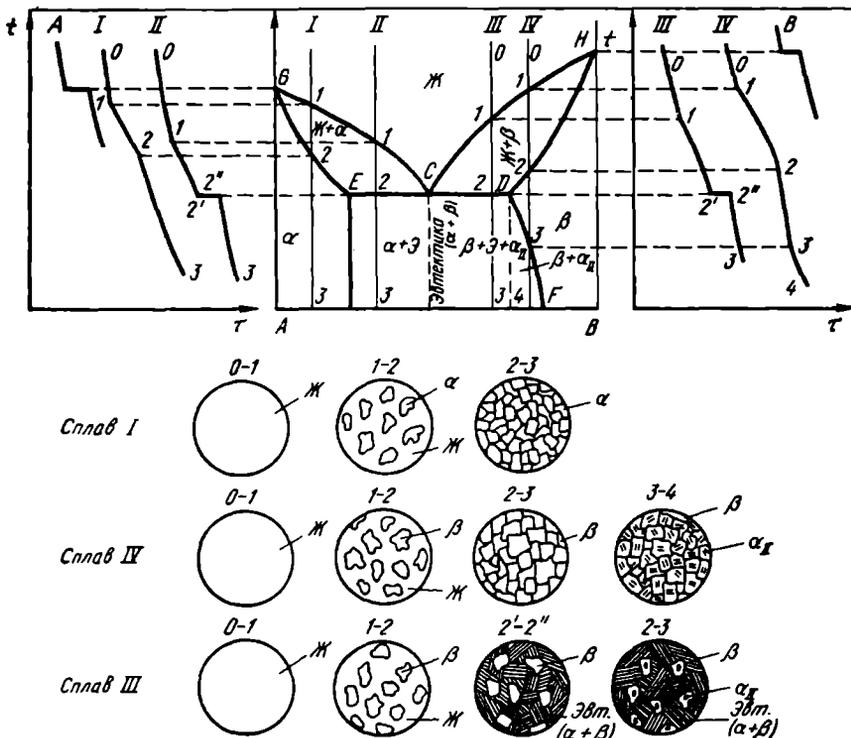


Рис. 68. Диаграмма состояния, кривые охлаждения и схемы образования структур сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии

ное охлаждение не дает развиваться диффузии и вторичные фазы выделяются внутри зерен в виде дисперсных включений.

Этот тип диаграмм очень важен в практическом отношении, так как входит в состав сложных диаграмм таких широко распространенных промышленных сплавов, как Fe—C, Al—Cu и др.

Выше линии  $GCH$  (линия ликвидус) на диаграмме расположена область однородного жидкого раствора. Линия  $GECDH$  (линия солидус) соответствует температурам конца затвердевания.

Линия  $ECD$  называется линией *эвтектического превращения*, а точка  $C$  — *эвтектической точкой*. При достижении температуры, соответствующей линии  $ECD$ , происходит эвтектическая реакция — из жидкости выделяется смесь кристаллов обоих твердых растворов  $\alpha$  и  $\beta$ :



При понижении температуры сплава IV ниже точки 3 кривой  $DF$  происходит распад  $\beta$ -твердого раствора с выделением вторичных кристаллов твердого раствора  $\alpha_{II}$ .

Этот процесс происходит в твердом состоянии и называется *вторичной кристаллизацией* в отличие от первичной, которая происходит при затвердевании сплавов.

На рис. 68 приведена последовательность образования структур сплавов I, IV и III.

### 2.5. Диаграмма состояния сплавов с перитектическим превращением

Оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, ограничено в твердом и образуют механические смеси в результате перитектической реакции.

*Перитектическим* называется превращение, когда жидкая фаза, взаимодействуя при постоянной температуре с ранее выпавшими кристаллами твердой фазы, образует новый вид кристаллов.

Диаграмма с перитектическим превращением приведена на рис. 69. На этой диаграмме линия  $ABC$  является линией ликвидус,  $AEDC$  — линией солидус,  $BED$  — линией перитектического превращения.

Рассмотрим кристаллизацию и охлаждение сплава состава I. В точке I из жидкости выпадают кристаллы  $\beta$ -твердого раствора. При достижении линии перитектического превращения состав кристаллов  $\beta$  соответствует точке D, состав жидкости — точке B. В результате взаимодействия жидкой и твердой фаз образуется третья фаза  $\alpha$ , состав которой соответствует точке E. Механизм образования  $\alpha$ -фазы можно представить схемой:  $J_B + \beta_D \rightarrow \alpha_E$ . Это и есть перитектическое превращение.

В сплавах состава II при температуре перитектического превращения количество жидкой фазы больше, чем необходимо для образования

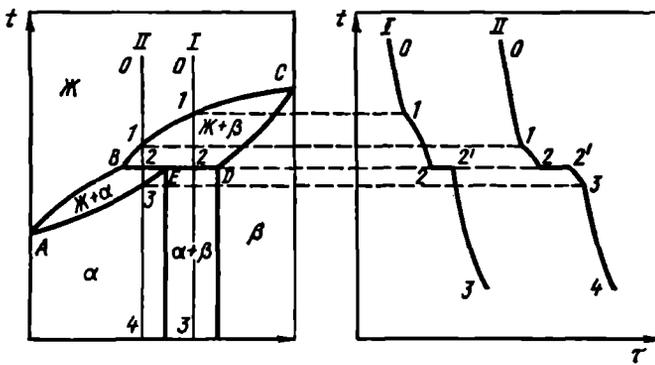


Рис. 69. Диаграмма состояния и кривые охлаждения сплавов с перитетикой кристаллов  $\alpha$ -фазы состава, соответствующего точке E. Оставшаяся в избытке жидкая фаза в интервале температур 2—3 кристаллизуется в  $\alpha$ -фазу.

### 2.6. Диаграмма состояния сплавов, образующих химические соединения

Химическое соединение характеризуется строго определенным соотношением компонентов, что отображается на диаграмме состояния вертикальной линией, пересекающей ось концентраций в точке, отвечающей соотношению компонентов в химическом соединении (рис. 70). При образовании в сплаве химических соединений они играют роль самостоятельного компонента, разделяя общую диаграмму состояния на ряд отдельных диаграмм. Это объясняется тем, что химическое соединение отличается от образующих его компонентов кристаллической решеткой, свойствами и температурой плавления.

Химические соединения могут быть устойчивыми и неустойчивыми. Химическое соединение устойчиво, если его можно нагреть без разло-

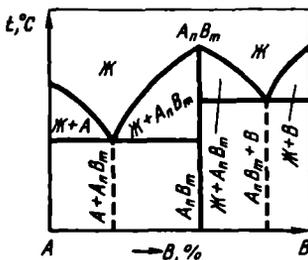


Рис. 70. Диаграмма состояния с устойчивым химическим соединением

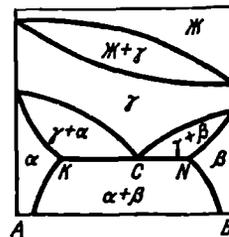


Рис. 71. Диаграмма состояния с полиморфными превращениями

жения до расплавления, и неустойчиво, если при нагреве оно разлагается. На рис. 70 приведена диаграмма состояния системы с устойчивым химическим соединением.

### 2.7. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих полиморфные превращения

Если хотя бы один из компонентов обладает полиморфизмом, то на диаграмме наблюдаются превращения в твердом состоянии. Такими компонентами являются Fe, Ti, Sn, Co, Mn и др.

На диаграммах с полиморфными превращениями верхняя часть характеризует первичную кристаллизацию, нижняя — вторичную.

На диаграмме (рис. 71) компоненты испытывают полиморфные превращения, причем низкотемпературная модификация дает ограниченные твердые растворы. При температуре, соответствующей горизонтальной линии  $KCN$ , происходит распад  $\gamma$ -твердого раствора с одновременным выделением  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз:  $\gamma_C \rightleftharpoons \alpha_K + \beta_N$ . Превращение происходит аналогично кристаллизации эвтектики, но не из жидкости, а из твердого раствора. Это превращение, происходящее в твердом состоянии, называют *эвтектоидным*, а полученную механическую смесь — *эвтектоидом*.

## Глава 5.

### ЖЕЛЕЗО И ЕГО СПЛАВЫ

#### 1. Компоненты и фазы в сплавах железа с углеродом

Железо — серебристо-серый металл, принадлежащий к VIII группе периодической системы, имеет атомную массу 55,85, плотность 7,86 г/см<sup>3</sup>, температуру плавления 1536 °С. Чистое лабораторное железо содержит не более 0,0001 % (или 10<sup>-4</sup> %) примесей, технически чистое — около 0,1—0,15 % примесей. Прочность технического железа невелика:  $\sigma_b = 250$  МПа при довольно высокой пластичности  $\delta = 50$  %,  $\psi = 80$  %

Железо в твердом состоянии может находиться в двух полиморфных модификациях: объемноцентрированного и гранецентрированного куба. Из схемы изменения свободной энергии (рис. 72) следует, что в интервале температур 910—1392 °С меньшую свободную энергию и большую стабильность имеет  $\gamma$ -железо с кристаллической решеткой

ГЦК. Ниже 910 и выше 1392 °С устойчиво  $\alpha$ -железо с ОЦК решеткой. Высокотемпературную модификацию  $\alpha$ -железа иногда называют  $\delta$ -железом, хотя оно не представляет собой новой кристаллической формы.

Кривая охлаждения железа фиксирует два полиморфных и одно магнитное превращение (рис. 73). При магнитном превращении температурная остановка при 768 °С связана не с перестройкой кристаллической решетки и перекристаллизацией, а с внутриатомными изменениями внешних и внутренних электронных оболочек, которые и приводят к изменениям магнитных свойств.

Углерод принадлежит к IV группе периодической системы. Углерод встречается в природе в виде двух модификаций: в форме алмаза и в форме графита. Атомная масса углерода 12, плотность графита 2,25 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 3500 °С. Графит имеет гексагональную слоистую кристаллическую решетку. Графит — мягкий материал и обладает низкой прочностью. Прочность графита с увеличением температуры аномально растет: при 20 °С  $\sigma_b = 20$  МПа, при 2500 °С графит прочнее всех тугоплавких металлов.

Углерод образует с железом твердые растворы внедрения. Растворимость углерода в железе зависит от его кристаллической формы.

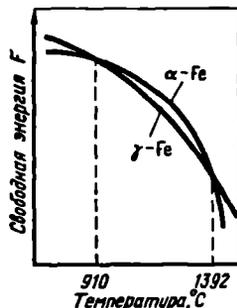


Рис. 72. Схема изменения свободной энергии полиморфных модификаций железа с ОЦК и ГЦК структурами

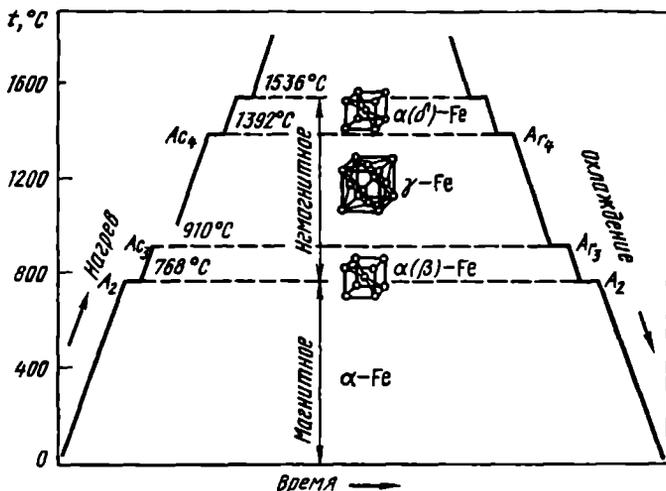


Рис. 73. Кривая нагрева—охлаждения железа

Диаметр поры кристаллической решетки ОЦК значительно меньше, чем диаметр поры решетки ГЦК. Поэтому  $\alpha$ -Fe способно растворять углерод в очень малом количестве, а растворимость углерода в  $\gamma$ -Fe существенно больше.

Влияние малого размера октаэдрической поры в решетке ОЦК на низкую растворимость углерода усугубляется еще тем, что сама октаэдрическая пора несимметрична, она вытянута по одной оси из-за воздействия на нее близлежащих атомов, в том числе и в центре куба.

В системе железо—углерод возможно присутствие следующих фаз: жидкой фазы, твердых растворов феррита и аустенита, химического соединения цементита и графита.

Феррит (Ф), являющийся твердым раствором внедрения углерода в  $\alpha$ -железе, обозначается  $Fe\alpha$ . При 727 °С наблюдается максимальная растворимость углерода в феррите, составляющая 0,02 %; при +20 °С в феррите растворяется около 0,006 % С. Свойства феррита близки к свойствам чистого железа.

Аустенит (А) — твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе, обозначается  $Fe\gamma$ . При 1147 °С аустенит может содержать до 2,14 % С, при 727 °С — 0,8 % С.

И в феррите и в аустените могут растворяться многие легирующие элементы, образуя твердые растворы замещения и резко изменяя их свойства. Кроме того, легирование может значительно менять температурные границы существования этих фаз.

Цементит (Ц) — карбид железа  $Fe_3C$ , в котором содержится 6,67 % С. Температура плавления цементита 1252 °С. Обладает высокой твердостью (около 800 НВ), легко царапает стекло. Цементит очень хрупок, имеет почти нулевую пластичность, сложную ромбическую решетку с плотной упаковкой атомов. При нагреве цементит распадается.

## 2. Диаграмма состояния системы железо—цементит (метастабильное равновесие)

В 1868 г. Д.К. Чернов в работе «Критический обзор статей г.г. Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные исследования Д.К. Чернова по этому же предмету» указал на существование в стали критических точек, тем самым положив начало изучению диаграммы железо—углерод.

Железо с углеродом образует ряд химических соединений:  $Fe_3C$ ,  $Fe_2C$  и др. Диаграмму состояния обычно изображают для соединения  $Fe_3C$  — цементита, содержащего 6,67 % С. Сплавы с более высоким содержанием углерода очень хрупки и практического применения не имеют. Диаграмма состояния железо—цементит приведена на рис. 74.

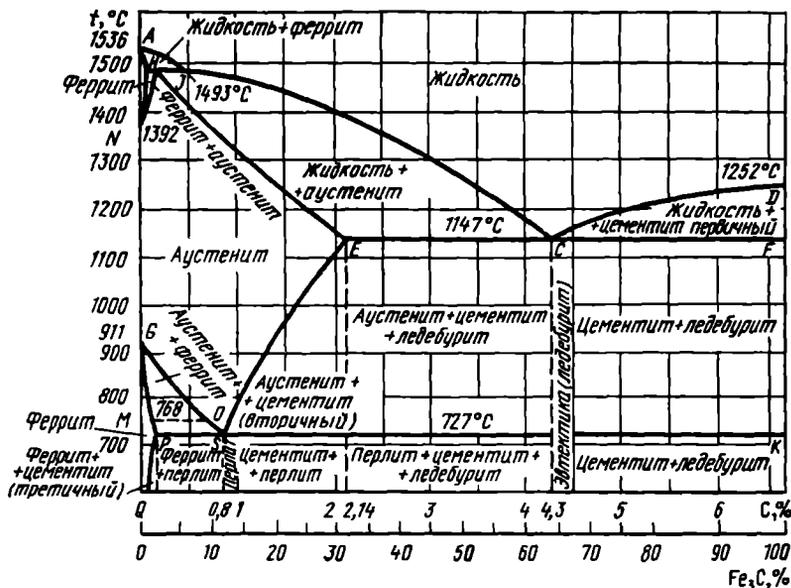


Рис. 74. Диаграмма состояния Fe—Fe<sub>3</sub>C

Железо—цементит — метастабильная система. Цементит термодинамически менее устойчивая фаза по сравнению с графитом, но кинетически образование цементита более вероятно. Поэтому диаграмму состояния железо—цементит называют метастабильной диаграммой, а диаграмму железо—графит — стабильной.

Линия *ABCD* соответствует линии начала затвердевания, называемой линией ликвидус, линия *AHJECF* — линии конца затвердевания — линии солидус. Точка *A* соответствует температуре плавления железа (1536 °C), точка *D* — температуре плавления цементита (1252 °C). Точки *N* и *G* соответствуют температурам полиморфного превращения железа.

Диаграмма состояния имеет так называемые линии эвтектического и эвтектоидного превращений. По линии *ECF* при 1147 °C происходит эвтектическое превращение:  $J_C \rightleftharpoons A_E + C_F$ . Образующаяся эвтектика называется ледебуритом. *Ледебурит* (Л) — эвтектика системы Fe—Fe<sub>3</sub>C — механическая смесь аустенита и цементита, содержащая 4,3 % углерода.

По линии *PSK* при 727 °C происходит эвтектоидное превращение:  $A_S \rightleftharpoons P + C_K$ , в результате которого из аустенита, содержащего 0,8 % C, образуется механическая смесь феррита и цементита. Эвтектоидное превращение происходит аналогично кристаллизации эвтектики, но не

из жидкости, а из твердого раствора. Образующийся эвтектоид называется перлитом. *Перлит (П)* — эвтектоид системы Fe—Fe<sub>3</sub>C — механическая смесь феррита и цементита, содержащая 0,8 % С. Перлит состоит из пластинок цементита в ферритной основе, на травленном шлифе имеет блеск перламутра, отсюда и название — перлит. Внешне зерно перлита состоит из параллельных пластинок цементита и феррита. Чем грубее и крупнее выделения цементита, тем хуже механические свойства перлита. Аустенит, входящий в состав ледебурита, при 727 °С также испытывает эвтектоидное превращение. Поэтому ниже 727 °С ледебурит состоит из механической смеси перлита и цементита.

Часто пользуются более упрощенной диаграммой (без перитектики), так как все сплавы до 2,14 % С после завершения кристаллизации имеют аустенитную структуру.

На рис. 75 приведены кривые охлаждения сплавов, содержащих менее 0,02 % С; 0,5, 0,8, 1,7, 3,5, 4,3, 5,5 % С.

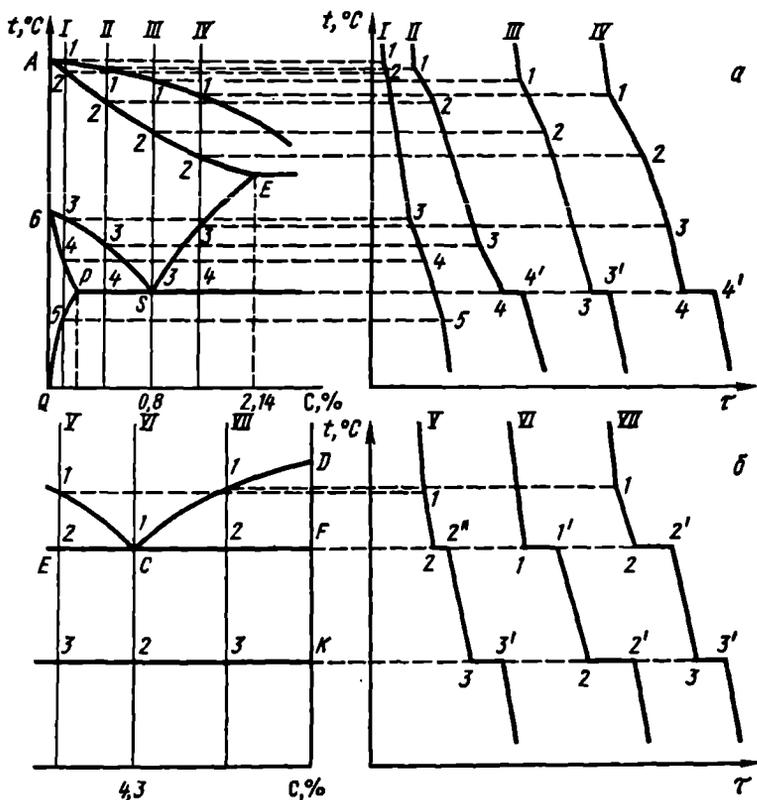


Рис. 75. Кривые охлаждения железоуглеродистых сплавов с разным содержанием углерода: левая (а) и правая (б) части диаграммы состоит Fe—Fe<sub>3</sub>C

Сплав I, содержащий менее 0,02 % С, фактически представляет собой технически чистое железо. Точка 1 соответствует началу кристаллизации аустенита, точка 2 — окончанию кристаллизации. При охлаждении от точки 2 до точки 3 превращений образовавшегося аустенита не происходит, температура сплава только понижается. В точке 3 начинается, а в точке 4 заканчивается перестройка кристаллической решетки аустенита (ГЦК) в кристаллическую решетку феррита (ОЦК). При охлаждении в интервале температур 3—4 состав аустенита меняется по линии  $GS$ , а состав феррита — по линии  $GP$ . От точки 4 до точки 5 превращений не происходит, образовавшийся феррит просто охлаждается. Линия  $PQ$  соответствует линии переменной растворимости. Ниже этой линии сплав пересыщен углеродом, происходит выделение избыточного углерода, образующего химическое соединение с железом, т.е. цементит. При охлаждении цементит выделяется непрерывно и концентрация углерода в феррите уменьшается по линии  $PQ$ , составляя при комнатной температуре < 0,006 % С. Цементит, выделяющийся из феррита, называют *третичным цементитом* и обозначают ЦШ.

Сплав II содержит 0,5 % С. Образование кристаллов аустенита происходит в интервале температур 1—2. Состав аустенита изменяется по линии солидус  $AE$ , состав жидкой фазы по линии ликвидус  $AC$ . В точке 2 кристаллизация аустенита заканчивается и от точки 2 до точки 3 структурных изменений не происходит, аустенит просто охлаждается. В точке 3 начинается выделение феррита из аустенита. Концентрация углерода в феррите изменяется по линии  $GP$ , а концентрация углерода в аустените — по линии  $GS$ . При охлаждении сплава до точки 4 состав аустенита будет соответствовать точке  $S$ , т.е. эвтектоидному составу. При температуре 727 °С произойдет эвтектоидное превращение с образованием перлита  $A_S \rightleftharpoons \Phi_P + Ц_K$ . При комнатной температуре структура сплава состоит из феррита и перлита.

Количество перлита в структуре увеличивается по мере увеличения содержания углерода в сплаве вплоть до концентрации 0,8 %.

Сплав III, содержащий 0,8 % С, по составу соответствует точке  $S$ . Аустенит сплава такой концентрации углерода не испытывает превращений при охлаждении до 727 °С, а при этой температуре весь аустенит превращается в перлит. При комнатной температуре структура сплава состоит из одного перлита.

Концентрация углерода в сплавах IV составляет более 0,8%, но менее 2,14 %. До точки 3 превращения в этом сплаве такие же, как в сплавах II и III. При охлаждении в диапазоне температур 3—4 из кристаллической решетки аустенита выделяется избыточный углерод с образованием вторичного цементита ЦШ. При этом содержание углерода в аустените изменяется по линии  $ES$ . На линии  $PSK$  при температуре

727 °С происходит эвтектоидное превращение, при котором аустенит превращается в перлит. Поэтому при комнатной температуре структура сплава состоит из перлита и вторичного цементита.

Сплавы V, VI, VII содержат более 2,14 % углерода. При первичной кристаллизации таких сплавов происходит эвтектическое превращение, сопровождающееся образованием из жидкости, содержащей 4,3 % углерода, ледебурита — механической смеси двух твердых фаз: аустенита и цементита.

В сплаве V кристаллизация начинается в точке 1 выделением аустенита из жидкого раствора и заканчивается в точке 2. При охлаждении в интервале температур 1—2 состав аустенита изменяется по линии солидус, а концентрация углерода в жидкой фазе — по линии ликвидус. В точке 2 при 1147 °С состав жидкости соответствует точке С, т.е. жидкость имеет концентрацию углерода, равную 4,3 %. Количественное соотношение жидкой и твердой фаз в точке 2 определяется отношением отрезков  $E2$  и  $2C$ . Длину отрезков можно измерять в миллиметрах или определять из разности концентраций. Если соотношения отрезков умножить на 100, то получим количество составляющих в процентах. При 1147 °С происходит эвтектическое превращение  $Ж_C \rightleftharpoons A_S + Ц_F$ . При дальнейшем охлаждении в интервале 2—3 из аустенита, как структурно свободного, так и входящего в эвтектику — ледебурит, выделяется вторичный цементит. Состав аустенита изменяется по линии  $ES$ , т.е. от 2,14 до 0,8 % С. В точке 3 происходит перлитное превращение аустенита, содержащего 0,8 % С. Структура сплавов V при комнатной температуре состоит из перлита и ледебурита. Вторичный цементит и цементит ледебурита сливаются и практически неразличимы.

В сплаве VI, содержащем 4,3 % С, при эвтектической температуре вся жидкость превращается в ледебурит. При понижении температуры содержание углерода в аустените, входящем в ледебурит, понижается по линии  $ES$ . При 727 °С происходит перлитное превращение аустенита.

В сплаве VII кристаллизация начинается с образования кристаллов цементита. Такой цементит называют первичным. Первичный цементит выделяется из жидкости при охлаждении в интервале температур 1—2. Состав жидкости при этом меняется по линии ликвидус и в точке 2 жидкость содержит 4,3 % С. Количественное соотношение жидкой и твердой фаз в точке 2 определяется соотношением отрезков  $E2$  и  $C2$ . При 1147 °С происходит эвтектическое превращение. Аустенит образовавшегося ледебурита при охлаждении испытывает превращения, рассмотренные выше. При комнатной температуре структура сплава VII состоит из ледебурита и первичного цементита.

На свойства сплавов оказывает большое влияние различие в размерах и расположении выделений цементита.

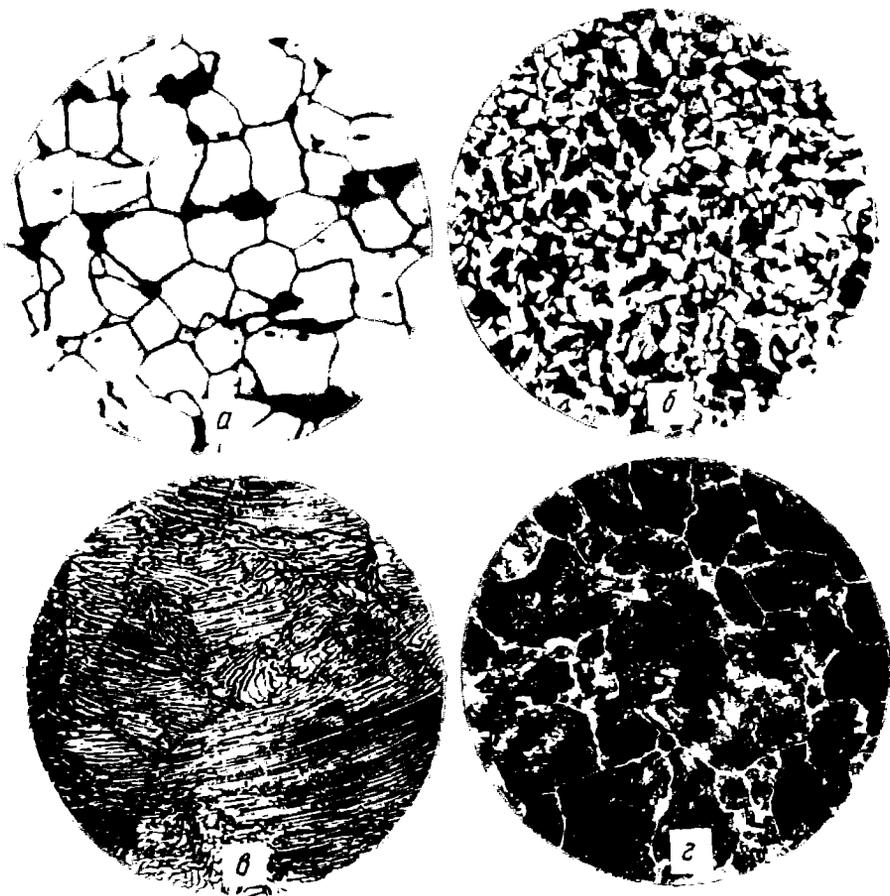


Рис. 76. Микроструктура сталей с различным содержанием углерода, %:

*a* — 0,1; *б* — 0,4; *в* — 0,8; *г* — 1,2.  $\times 200$

Ц<sub>I</sub> выделяется при высоких температурах непосредственно из жидкой фазы. Его кристаллы — крупные, т.е. Ц<sub>I</sub> дает наиболее грубые выделения.

Ц<sub>II</sub> выделяется из аустенита при достаточно высоких температурах и высокой скорости диффузии. Поэтому Ц<sub>II</sub> образуется в виде сетки по границам зерен. Ц<sub>III</sub> выделяется из феррита при сравнительно низких температурах. Ц<sub>III</sub> выделяется обычно внутри зерен в виде дисперсных включений. Эти включения увеличивают прочность феррита.

Сплавы системы Fe—Fe<sub>3</sub>C по структурному признаку делят на две группы: углеродистые стали и белые чугуны.

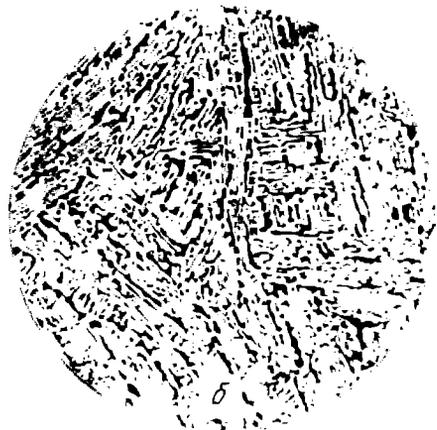


Рис. 77. Микроструктура белых чугунов:

*a* — доэвтектический чугун, 3 % С; *б* — эвтектический 4,3 % С; *в* — заэвтектический 5 % С;  $\times 200$

Углеродистые стали содержат до 2,14 % С и заканчивают кристаллизацию образованием аустенита. Белые чугуны содержат более 2,14 % С и заканчивают кристаллизацию образованием эвтектики — ледобурита.

Структуры сталей и чугунов с разным содержанием углерода приведены на рис. 76, 77.

Отсутствие в структуре сталей хрупкой эвтектики — ледобурита повышает их пластичность, что позволяет подвергать их обработке давлением. Вместе с тем наличие в структуре чугунов легкоплавкого ледобурита повышает их литейные свойства.

По структуре углеродистые стали бывают доэвтектоидные ( $\Phi + \Pi$ ), эвтектоидные ( $\Pi$ ) и заэвтектоидные ( $\Pi + \Psi$ ). Белые чугуны также делятся на доэвтектические ( $A + Л$ ), эвтектические ( $Л$ ) и заэвтектические ( $Л + \Psi$ ).

### 3. Диаграмма состояния системы железо—графит (стабильное равновесие)

Диаграмма состояния системы железо—графит характеризует стабильное равновесие. Образование графита происходит в чугунах, содержащих значительное количество кремния. Углерод в виде графита выделяется непосредственно из жидкого расплава или аустенита либо за счет распада предварительно образовавшегося цементита.

Диаграмма состояния железо—графит (рис. 78) показана пунктирными линиями, нанесенными на диаграмму состояния железо—цементит. Это позволяет сравнить обе диаграммы.

Кроме общих линий  $AC$ ,  $AE$  и  $GS$  остальные сплошные и пунктирные линии обеих диаграмм не совпадают. Эвтектическая и эвтектоидная температуры диаграммы стабильного равновесия  $Fe-C$  выше, чем для метастабильной диаграммы  $Fe-Fe_3C$ . В системе  $Fe-C$  графитная эвтектика (аустенит + графит), содержащая 4,26 %  $C$ , образуется при 1153 °С. По линии  $E'S'$  в интервале температур 1153—738 °С выделяется вторичный графит.

Эвтектоидное превращение в системе  $Fe-C$  протекает при температуре 738 °С. Эвтектоид, состоящий из феррита и графита, содержит 0,7 %  $C$ .

Пользование диаграммой состояния железо—графит принципиально не отличается от пользования диаграммой состояния железо—цементит. Вероятность образования метастабильного цементита из жидкой фазы или аустенита значительно выше, чем графита.

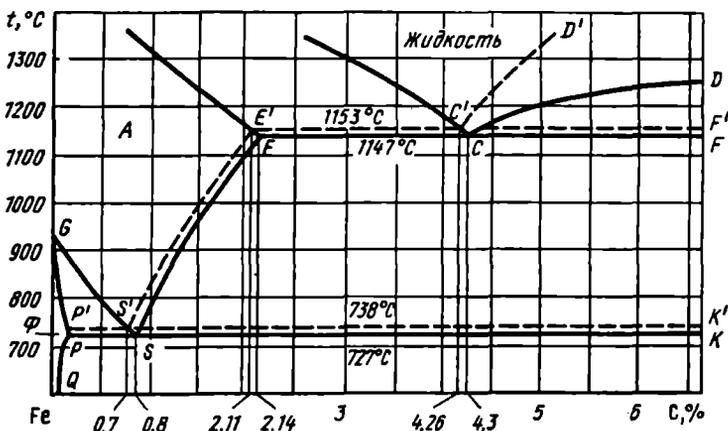


Рис. 78. Диаграмма состояния  $Fe-FeC$  (сплошные линии соответствуют метастабильной диаграмме состояния  $Fe-Fe_3C$ , штриховые — стабильной  $Fe-C$ )

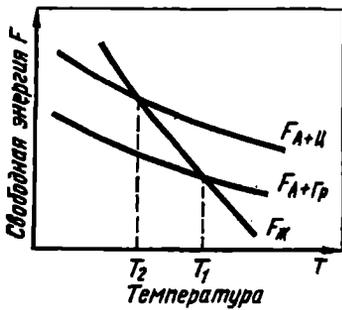


Рис. 79. Схема изменения свободной энергии при графитизации чугуна

нительно небольшом переохлаждении будет происходить кристаллизация цементита, а не графита.

Кристаллические структуры аустенита и цементита меньше различаются, чем кристаллические структуры аустенита и графита. Учитывая, что графит полностью состоит из углерода, а цементит содержит его только 6,67 %, состав жидкой фазы и аустенита ближе к цементиту, чем к графиту. Поэтому образование цементита из жидкости или аустенита происходит кинетически значительно легче, чем графита.

Графит образуется только при малых скоростях охлаждения в узком интервале температур, когда мала степень переохлаждения жидкой фазы. При ускоренном охлаждении и при переохлаждении жидкого чугуна ниже 1147 °С происходит образование цементита.

#### 4. Углеродистые стали

Сплавы железа с углеродом, содержащие до 2,14 % С (точка  $E$ ) при малом содержании других элементов, называются *углеродистыми сталями*. Углеродистые стали завершают кристаллизацию образованием аустенита. В их структуре нет эвтектики (ледебурита), благодаря чему они обладают высокой пластичностью, особенно при нагреве, и хорошо деформируются.

Углеродистые стали выплавляют в электропечах, мартеновских печах и кислородных конвертерах. Наилучшими свойствами обладает электросталь, более чистая по содержанию вредных примесей — серы и фосфора, а также газов и неметаллических включений. Она идет для изготовления наиболее ответственных деталей.

По способу раскисления различают кипящие, полуспокойные и спокойные стали. При одинаковом содержании углерода кипящие, полуспокойные и спокойные стали имеют близкие величины прочностных

Любой процесс определяется термодинамическими и кинетическими условиями протекания. Движущей силой процесса графитизации является стремление системы уменьшить запас свободной энергии. Схема изменения свободной энергии жидкой фазы, смесей аустенита с цементитом и графитом при повышении температуры приведена на рис. 79. Из схемы видно, что цементит термодинамически менее устойчивая фаза, чем графит. Однако разница между температурами  $T_1$  и  $T_2$  невелика и при сравнении

свойств и различаются значениями характеристик пластичности. Содержание кремния в спокойной стали составляет 0,15—0,35, в полуспокойной 0,05—0,15, в кипящей до 0,05 %.

Для раскисления кипящей стали кремний и алюминий не применяют, ее раскисляют марганцем. Кипящая сталь имеет резко выраженную химическую неоднородность в слитке. Ее основным преимуществом является высокий (более 95 %) выход годного. Благодаря низкому содержанию кремния и углерода кипящие стали хорошо штампуются в холодном состоянии. Из-за повышенной концентрации кислорода кипящие стали имеют сравнительно высокий порог хладноломкости и их не рекомендуют применять для изделий северного исполнения. У полуспокойной стали, раскисляемой марганцем и в ковше алюминием, выход годного составляет 90—95 %.

Спокойная сталь раскисляется кремнием, марганцем и алюминием. Выход годного слитков спокойной стали около 85 %, но металл значительно более плотен и имеет более однородный химический состав.

Углеродистые стали содержат основной элемент — углерод, а также постоянные и скрытые примеси — марганец и кремний, фосфор, серу и газы (водород, азот, кислород).

#### 4.1. Влияние углерода на свойства стали

Углерод является важнейшим элементом, определяющим структуру и свойства углеродистой стали. Даже при малом изменении содержания углерод оказывает заметное влияние на изменение свойств стали. С увеличением углерода в структуре стали растет содержание цементита. При содержании до 0,8 % С сталь состоит из феррита и перлита, при содержании более 0,8 % С в структуре стали кроме перлита появляется структурно свободный вторичный цементит.

Феррит имеет низкую прочность, но сравнительно пластичен. Цементит характеризуется высокой твердостью, но хрупок. Поэтому с ростом содержания углерода увеличивается твердость и прочность и уменьшается вязкость и пластичность стали (рис. 80).

Рост прочности происходит при содержании в стали до 0,8—1,0 % С. При увеличении содержания углерода более 0,8 % уменьшается не только пластичность, но и прочность стали. Это

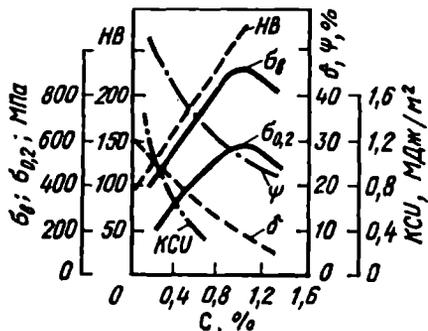


Рис. 80. Зависимость механических свойств стали от содержания углерода

связано с образованием сетки хрупкого цементита вокруг перлитных зерен, легко разрушающейся при нагружении. По этой причине заэвтектоидные стали подвергают специальному отжигу, в результате которого получают структуру зернистого перлита.

Углерод оказывает существенное влияние на технологические свойства стали: свариваемость, обрабатываемость давлением и резанием.

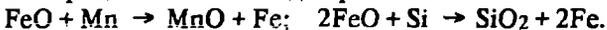
С увеличением содержания углерода ухудшается свариваемость, а также способность деформироваться в горячем и особенно в холодном состоянии.

Наиболее хорошо обрабатываются резанием среднеуглеродистые стали, содержащие 0,3—0,4 % С. Низкоуглеродистые стали при механической обработке дают плохую поверхность и трудноудаляемую стружку. Высокоуглеродистые стали имеют повышенную твердость, что снижает стойкость инструмента.

#### 4.2. Влияние примесей на свойства стали

Постоянными примесями в углеродистых сталях являются марганец, кремний, сера, фосфор, а также скрытые примеси — газы: кислород, азот, водород.

Полезными примесями являются марганец и кремний. Их вводят в сталь в процессе выплавки для раскисления:



В углеродистой стали содержится до 0,8 % Мп. Марганец, помимо раскисления, в этих количествах полностью растворяется в феррите и упрочняет его, увеличивает прокаливаемость стали, а также уменьшает вредное влияние серы:  $\text{FeS} + \text{Mn} \rightarrow \text{MnS} + \text{Fe}$ .

В полностью раскисленной углеродистой стали содержится до 0,4 % Si. Кремний является полезной примесью, так как эффективно раскисляет сталь и, полностью растворяясь в феррите, способствует его упрочнению.

Вредными примесями в стали являются сера и фосфор. Основным источником серы в стали является исходное сырье — чугуны. Сера снижает пластичность и вязкость стали, а также сообщает стали красноломкость при прокатке и ковке. Сера нерастворима в стали. Она образует с железом соединение  $\text{FeS}$  — сульфид железа, хорошо растворимый в металле. При малом содержании марганца благодаря высокой ликвидности серы в стали может образовываться легкоплавкая эвтектика  $\text{Fe—FeS}$  ( $t_{\text{пл}} = 988^\circ\text{C}$ ). Эвтектика располагается по границам зерен. При нагреве стальных заготовок до температур горячей деформации включения эвтектики сообщают стали хрупкость, а при некоторых условиях могут даже плавиться и при деформировании образовывать надрывы и трещины. Марганец устраняет красноломкость, так как сульфиды марганца не

образуют сетки по границам зерен и имеют температуру плавления около 1620 °С, что выше температуры горячей деформации. Вместе с тем сульфиды марганца, как и другие неметаллические включения, также снижают вязкость и пластичность, уменьшают усталостную прочность стали. Поэтому содержание серы в стали должно быть как можно меньше.

Повышенное (до 0,2 %) содержание серы допускается лишь в автоматных сталях для изготовления крепежных деталей неответственного назначения. Сера улучшает обрабатываемость стали.

Основной источник фосфора — руды, из которых выплавляется исходный чугун. Фосфор является вредной примесью, способной в количестве до 1,2 % растворяться в феррите. Растворяясь в феррите, фосфор уменьшает его пластичность. Фосфор резко отличается от железа по типу кристаллической решетки, диаметру атомов и их строению. Поэтому фосфор располагается вблизи границ зерен и способствует их охрупчиванию, повышая температурный порог хладноломкости.

Скрытые примеси — кислород, азот, водород находятся в стали либо в виде твердого раствора в феррите, либо образуют химические соединения (нитриды, оксиды), либо присутствуют в свободном состоянии в порах металла. Кислород и азот мало растворимы в феррите. Они загрязняют сталь хрупкими неметаллическими включениями, способствуя снижению вязкости и пластичности стали. Водород находится в твердом растворе и особенно сильно охрупчивает сталь. Повышенное содержание водорода, особенно в хромистых и хромоникелевых сталях, приводит к образованию внутренних трещин — флокенов.

Даже небольшие концентрации газов оказывают резко отрицательное влияние на свойства, ухудшая пластические и вязкие характеристики стали. Поэтому вакуумирование является важной операцией для улучшения свойств стали.

Кроме того, в углеродистых сталях присутствуют такие случайные примеси, как Cr, Ni, Cu, наличие которых обусловлено загрязненностью шихты.

### *4.3. Классификация углеродистых сталей*

Углеродистые стали классифицируют по структуре, способу производства и раскисления, по качеству.

По структуре различают: 1) доэвтектоидную сталь, содержащую до 0,8 % С, структура которой состоит из феррита и перлита; 2) эвтектоидную, содержащую около 0,8 % С, структура которой состоит только из перлита; 3) заэвтектоидную, содержащую 0,8—2,14 % С. Ее структура состоит из зерен перлита, окаймленных сеткой цементита.

По способу производства различают стали, выплавляемые в электропечах, мартеновских печах и кислородно-конвертерным способом.

По способу раскисления различают кипящие, полуспокойные и спокойные стали.

По качеству различают стали обыкновенного качества и качественные стали. Стали обыкновенного качества содержат не более 0,05 % серы и не более 0,04 % фосфора. Качественные стали содержат не более 0,04 % серы (в случае инструментальных сталей до 0,03 %) и 0,035 % фосфора, они менее загрязнены неметаллическими включениями и газами. В особо ответственных случаях эти стали содержат менее 0,02 % серы и 0,03 % фосфора. Поэтому при одинаковом содержании углерода качественные стали имеют более высокие пластичность и вязкость, особенно при низких температурах. Качественные стали предпочтительнее для изготовления изделий, эксплуатируемых при низких температурах, в частности, в условиях Севера и Сибири.

#### *4.4. Стали обыкновенного качества*

Стали обыкновенного качества изготавливают по ГОСТ 380—88. Выплавка их обычно производится в крупных мартеновских печах и кислородных конвертерах. Обозначают их буквами ст и цифрами от 0 до 6, например: Ст0, Ст1, ..., Ст6. Буквы Ст обозначают «Сталь», цифры — условный номер марки стали в зависимости от ее химического состава. В конце обозначения марки стоят буквы «кп», «пс», «сп», которые указывают на способ раскисления: «кп» — кипящая, «пс» — полуспокойная, «сп» — спокойная.

Химический анализ стали должен соответствовать нормам, указанным в табл. 4.

Чем больше цифра условного номера стали, тем выше содержание углерода. Содержание серы в стали всех марок, кроме Ст0, должно быть не более 0,050 %, фосфора — не более 0,040 %, в стали марки Ст0 серы — не более 0,060 %, фосфора — не более 0,070 %.

#### *4.5. Качественные углеродистые стали*

Углеродистые стали этого класса выплавляются в электропечах, кислородных конвертерах и мартеновских печах по ГОСТ 1050—88. Качественные стали поставляют по химическому составу и по механическим свойствам (табл. 5). К ним предъявляются более жесткие требования по содержанию вредных примесей (серы не более 0,04 %, фосфора не более 0,035 %) и микроструктуры. Для стали марок 11кп и 18кп, применяемой для плакировки, содержание серы должно быть не более 0,035 %, фосфора не более 0,030 %.

Таблица 4. Состав углеродистых сталей обыкновенного качества, % С (ГОСТ 380—88)

Марка стали	С	Мn	Si
Ст0	≤ 0,23	—	—
Ст1кп	0,06—0,12	0,25—0,5	≤ 0,05
Ст1сп	0,06—0,12	0,25—0,5	0,12—0,3
Ст2кп	0,09—0,15	0,25—0,5	0,07
Ст2сп	0,09—0,15	0,25—0,5	0,12—0,3
Ст3кп	0,14—0,22	0,3—0,6	≤ 0,07
Ст3пс	0,14—0,22	0,4—0,65	0,05—0,17
Ст3сп	0,14—0,22	0,4—0,65	0,12—0,3
Ст4кп	0,18—0,27	0,4—0,7	≤ 0,07
Ст4сп	0,18—0,27	0,4—0,7	0,12—0,3
Ст5пс	0,28—0,37	0,5—0,8	0,05—0,17
Ст5сп	0,28—0,37	0,5—0,8	0,15—0,35
Ст6пс	0,38—0,49	0,5—0,8	0,05—0,17
Ст6сп	0,38—0,49	0,5—0,8	0,15—0,35

Таблица 5. Состав и свойства некоторых марок качественных углеродистых сталей (ГОСТ 1050—88)

Марка стали	С, %	Мn, %	Si, %	Cr, % не более	Механические свойства, не менее				
					$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU <sup>*)</sup> Дж/см <sup>2</sup>
08	0,05—0,12	0,35—0,65	0,17—0,37	0,10	196	320	33	60	—
10	0,07—0,14	0,35—0,65	0,17—0,37	0,15	205	330	31	55	—
15	0,12—0,19	0,35—0,65	0,17—0,37	0,25	225	370	27	55	—
20	0,17—0,24	0,35—0,65	0,17—0,37	0,25	245	410	25	55	—
25	0,22—0,30	0,50—0,80	0,17—0,37	0,25	275	450	23	50	88
30	0,27—0,35	0,50—0,80	0,17—0,37	0,25	295	490	21	50	78
35	0,32—0,40	0,50—0,80	0,17—0,37	0,25	315	530	20	45	69
40	0,37—0,45	0,50—0,80	0,17—0,37	0,25	335	570	19	45	59
45	0,42—0,50	0,50—0,80	0,17—0,37	0,25	355	600	16	40	49
50	0,47—0,55	0,50—0,80	0,17—0,37	0,25	375	630	14	40	38
55	0,52—0,60	0,50—0,80	0,17—0,37	0,25	380	650	13	35	—
60	0,57—0,65	0,50—0,80	0,17—0,37	0,25	400	680	12	35	—

<sup>\*)</sup> Нормы ударной вязкости устанавливаются потребителем на термически обработанных (закалка + отпуск) образцах.

Качественные углеродистые стали маркируют двузначными цифрами 05, 10, 15, ..., 60, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента.

При обозначении кипящей или полуспокойной стали в конце марки указывается степень раскисленности: кп, пс. В случае спокойной стали степень раскисленности не указывается.

По содержанию углерода качественные углеродистые стали подразделяются на низкоуглеродистые (до 0,25 % С), среднеуглеродистые (0,3—0,5 % С) и высокоуглеродистые конструкционные (до 0,65 % С).

Для изделий ответственного назначения применяют высококачественные стали с еще более низким содержанием серы и фосфора. Низкое содержание вредных примесей в высококачественных сталях дополнительно удорожает и усложняет их производство. Поэтому обычно высококачественными сталями бывают не углеродистые, а легированные стали. При обозначении высококачественных сталей в конце марки добавляется буква А, например сталь У10А.

Углеродистые стали, содержащие 0,7—1,3 % С, используют для изготовления ударного и режущего инструмента. Их маркируют У7, У13, где «У» означает углеродистую сталь, а цифра — содержание углерода в десятых долях процента.

## 5. Чугуны

### 5.1. Виды чугунов

Сплавы железа с углеродом, содержащие более 2,14 % углерода, называются чугунами. В отличие от стали чугуны имеют более высокое содержание углерода, заканчивают кристаллизацию образованием эвтектики, обладают низкой способностью к пластической деформации и высокими литейными свойствами. Их технологические свойства обусловлены наличием эвтектики в структуре. Стоимость чугунов ниже стоимости стали.

Чугуны выплавляют в доменных печах, вагранках и электропечах. Выплавляемые в доменных печах чугуны бывают передельными, специальными (ферросплавы) и литейными. Передельные и специальные чугуны используют для последующей выплавки стали и чугуна. В вагранках и электропечах переплавляют литейные чугуны. Около 20 % всего выплавляемого чугуна используют для изготовления литья. В литейном чугуне обычно содержится не более 4,0 % углерода. Кроме углерода обязательно присутствуют примеси S, P, Mn, Si, причем в значительно большем количестве, чем в углеродистой стали.

В зависимости от формы выделения углерода в чугуне различают:

1. Белый чугун, в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита  $Fe_3C$ . Чугун в изломе имеет белый цвет и характерный блеск.

2. Половинчатый чугун, в котором основное количество углерода (более 0,8 %) находится в виде цементита. Чугун имеет структуру перлита, ледебурита и пластинчатого графита.

3. Серый чугун, в котором весь углерод или его большая часть находится в свободном состоянии в виде пластинчатого графита, а содержание углерода в связанном состоянии в виде цементита составляет не более 0,8 %.

4. Чугун с отбеленной поверхностью, в котором основная масса металла имеет структуру серого чугуна, а поверхностный слой — белого чугуна. Отбеленный слой получают в толстостенных массивных деталях при литье их в металлические формы. По мере удаления от поверхности вследствие уменьшения скорости охлаждения структура белого чугуна постепенно переходит в структуру серого. Чугун поверхностного слоя в микроструктуре содержит много твердого и хрупкого цементита, который хорошо сопротивляется износу. Поэтому чугуны с отбеленной поверхностью используют для деталей с высокой износостойкостью, для валков прокатных станов, для мукомольных валов, вагонных колес с отбеленным ободом, лемехов плугов с отбеленным носком и лезвием. Отбел может достигаться благодаря местному увеличению скорости охлаждения за счет установки в литейную форму холодильников в виде металлических вставок.

5. Высокопрочные чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму.

6. Ковкие чугуны получают из белых чугунов путем отжига, при котором углерод переходит в свободное состояние в виде хлопьевидного графита.

## *5.2. Факторы, способствующие графитизации*

Графитизацией называется процесс выделения графита при кристаллизации или охлаждении сплавов железа с углеродом. Графит может образовываться как из жидкой фазы при затвердевании чугуна, так и из твердой фазы. Образование графита иллюстрирует диаграмма состояния системы  $Fe-C$ . Ниже линии  $C'D'$  образуется первичный графит, по линии  $E'C'F'$  — эвтектический графит и по линии  $P'S'K'$  — эвтектоидный графит (см. рис. 78).

Графитизация чугуна зависит от ряда факторов. К ним относятся присутствующие в чугуне центры графитизации, скорость охлаждения и химический состав чугуна.

Образование графита в объеме чугуна энергетически маловероятно, так как рост свободной энергии при образовании новой межфазной поверхности больше, чем ее уменьшение при кристаллизации. Работа образования зародышей графита облегчается при наличии центров графитизации — различных мельчайших включений и примесей, взвешенных в жидкой фазе и аустените. Такими мельчайшими частицами могут быть оксиды  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , нитриды типа  $AlN$  и нерастворившиеся частицы графита. Параметры кристаллической решетки центров графитизации должны быть близки к кристаллической решетке графита.

Влияние скорости охлаждения обусловлено тем, что графитизация чугуна является диффузионным процессом и протекает медленно. Значительная длительность процесса графитизации обусловлена необходимостью реализации нескольких стадий: образования центров графитизации в жидкой фазе или аустените, диффузии атомов углерода к центрам графитизации и роста выделений графита. При графитизации цементита добавляется необходимость предварительного распада  $Fe_3C$  и растворения углерода в аустените. Чем медленнее охлаждение чугуна, тем большее развитие получает процесс графитизации.

В одной и той же отливке чугун может иметь различную структуру. В тонких частях отливки, где выше скорость кристаллизации и охлаждения, чугун имеет меньшую степень графитизации, чем в массивных. Быстрое охлаждение способствует получению белого чугуна, медленное — серого чугуна.

В некоторых случаях для достижения высокой твердости и сопротивления износу специально получают отбеленную зону в чугунной отливке. Для этого в литейную форму вставляют металлические холодильники, обеспечивающие высокую скорость затвердевания и охлаждения с образованием цементита. Так поступают при отливке чугунных лемехов, устанавливая холодильники в тех местах, где расположены лезвие и носок.

Из примесей, входящих в состав чугуна, наиболее сильное положительное влияние на графитизацию оказывает кремний. Содержание кремния в чугуне колеблется от 0,5 до 4—5 %. Меняя содержание кремния, можно получать чугуны, совершенно различные по структуре и свойствам. По приведенной на рис. 81 диаграмме можно прогнозировать структуру в зависимости от содержания углерода и кремния, а также толщины отливки.

Из других элементов, входящих в состав чугуна, наиболее важную роль играют марганец, сера и фосфор.

Марганец препятствует графитизации, увеличивая склонность чугуна к отбеливанию. Содержание марганца в чугуне обычно не превышает 0,5—1,0 %.

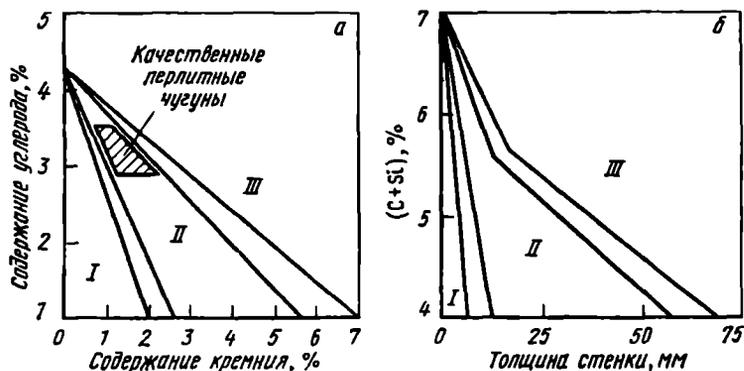


Рис. 81. Структурные диаграммы для чугунов:

*а* — влияние содержания углерода и кремния на структуру чугуна при толщине стенки отливки 50 мм; *б* — влияние скорости охлаждения (толщины стенки отливки) и суммы C + Si на структуру чугуна; *I* — белые; *II* — серые перлитные; *III* — серые ферритные чугуны

Сера является вредной примесью в чугуне. Ее отбеливающее влияние в 5—6 раз выше, чем марганца. Кроме того, сера снижает жидкотекучесть, способствует образованию газовых пузырей, увеличивает усадку и склонность к образованию трещин.

Влияние фосфора в чугуне существенно отличается от его влияния в стали. Хотя фосфор почти не влияет на графитизацию, он является полезной примесью, увеличивая жидкотекучесть серого чугуна за счет образования легкоплавкой (950—980 °С) фосфидной эвтектики.

Обычно используют чугуны следующего химического состава, %: 3,0—3,7 C, 1—3 Si, 0,5—1,0 Mn, менее 0,3 P и 0,15 S.

Иногда в чугун вводят легирующие элементы (Ni, Cr и др.), улучшая его свойства. В России имеются Орско-Халиловское и Елизаветинское рудные месторождения, дающие природнолегированные чугуны, содержащие, %: до 3 Cr, 1 Ni, 0,2 Ti или 0,2 V.

Таким образом, основными факторами, определяющими степень графитизации чугуна, являются содержание углерода, кремния и скорость охлаждения. Регулируя химический состав и скорость охлаждения в соответствии с диаграммой рис. 81, б, можно получить в отливке нужную структуру чугуна.

### 5.3. Микроструктура и свойства чугуна

Микроструктура чугуна состоит из металлической основы и графитных включений. Свойства чугуна зависят от свойств металлической основы и характера включений графита.

Металлическая основа может быть перлитной, когда 0,8 % С находится в виде цементита, а остальной углерод — в виде графита; феррито-перлитной, когда количество углерода в виде цементита менее 0,8 %, и ферритной. Структура металлической основы определяет твердость чугуна.

Графит чугуна бывает пластинчатым — серый чугун, хлопьевидным — ковкий и шаровидным — высокопрочный (рис. 82). Микроструктура

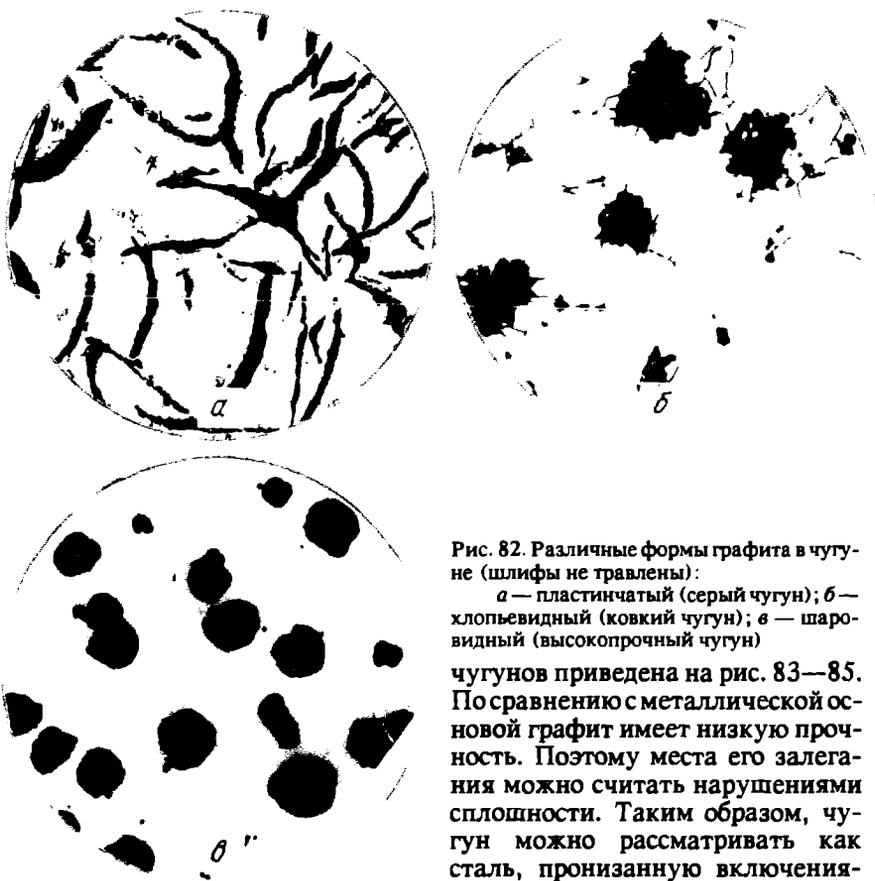


Рис. 82. Различные формы графита в чугуне (шлифы не травлены):

*a* — пластинчатый (серый чугун); *b* — хлопьевидный (ковкий чугун); *v* — шаровидный (высокопрочный чугун)

чугунов приведена на рис. 83—85. По сравнению с металлической основой графит имеет низкую прочность. Поэтому места его залегания можно считать нарушениями сплошности. Таким образом, чугун можно рассматривать как сталь, пронизанную включениями графита, ослабляющими его металлическую основу.



Рис. 83. Микроструктура серых чугунов на ферритной (а), феррито-перлитной (б) и перлитной (в) основах.  $\times 200$

Поэтому серый чугун имеет низкие характеристики механических свойств ( $\sigma_B$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) при испытаниях на растяжение. Включения графита играют роль концентраторов напряжений, поэтому работа удара близка к нулю. Вместе с тем твердость и прочность при испытаниях на сжатие, зависящие от свойств металлической основы, у чугуна достаточно высоки.

Однако серый чугун с пластинчатой формой графита имеет и ряд преимуществ. Он позволяет получать дешевое литье, так как при низкой стоимости обладает хорошей жидкотекучестью и малой усадкой. Включения графита делают стружку ломкой, поэтому чугун легко обрабатывается резанием. Благодаря смазывающему действию графита чугун обладает хорошими антифрикционными свойствами. Чугун имеет высокие демпфирующие свойства, он хорошо гасит вибрации и резонансные колебания.

Серый чугун маркируется буквами СЧ и цифрами, характеризующими величину временного сопротивления при испытаниях на растяжение. Марки и механические свойства серых чугунов, а также их ориентировочный химический состав приведены в табл. 6.

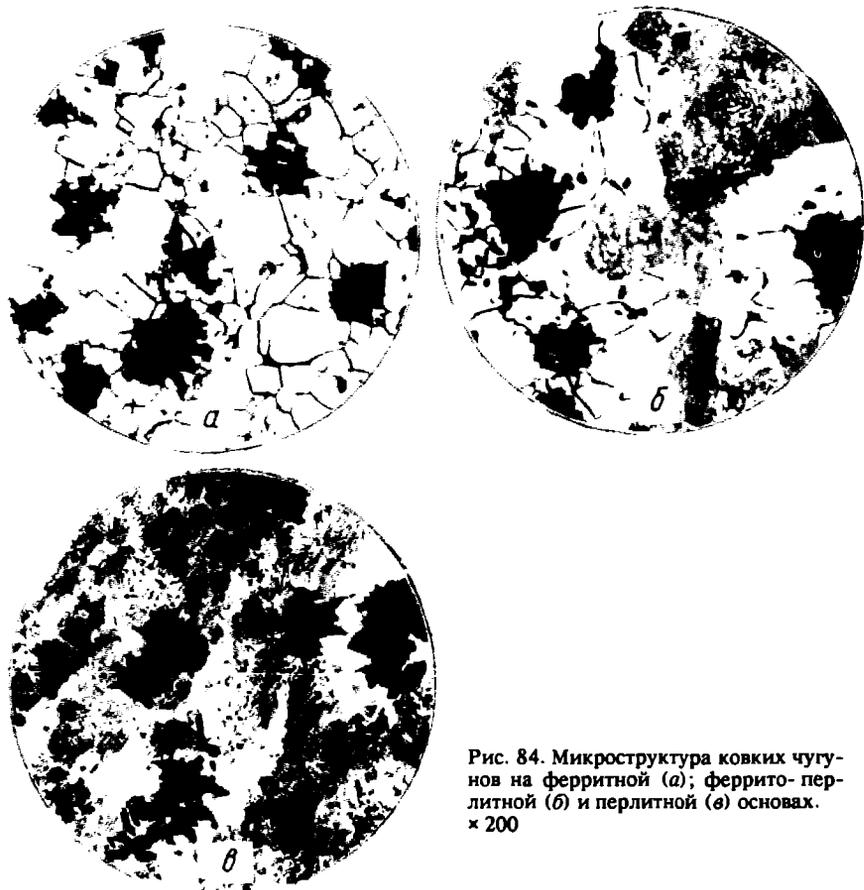


Рис. 84. Микроструктура ковких чугунов на ферритной (а); феррито-перлитной (б) и перлитной (в) основах.  $\times 200$

Таблица 6. Механические свойства и химический состав (%) серых чугунов (ГОСТ 1412—85)

Марка чугуна	$\sigma_B$ , МПа, не менее	Твердость НВ, не более	С	Si	Mn	не более	
						P	S
СЧ 10	100	190	3,5—3,7	2,2—2,6	0,5—0,8	0,3	0,15
СЧ 15	150	210	3,5—3,7	2,0—2,4	0,5—0,8	0,2	0,15
СЧ 20	200	230	3,3—3,5	1,4—2,4	0,7—1,0	0,2	0,15
СЧ 25	250	245	3,2—3,4	1,4—2,4	0,7—1,0	0,2	0,15
СЧ 30	300	260	3,0—3,2	1,3—1,9	0,7—1,0	0,2	0,12
СЧ 35	350	275	2,9—3,0	1,2—1,5	0,7—1,1	0,2	0,12

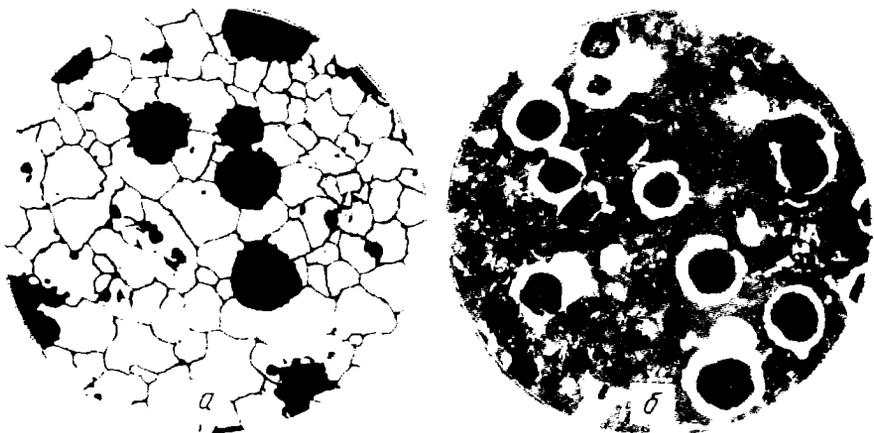


Рис. 85. Микроструктура высокопрочных чугунов на ферритной (а) и феррито-перлитной (б) основах.  $\times 200$

По мере округления графитных включений их отрицательная роль как надрезов металлической основы снижается, и механические свойства чугуна растут. Округленная форма графита достигается модифицированием. Модификаторами чугуна служат SiCa, FeSi, Al, Mg.

При использовании в качестве модификатора магния в количестве до 0,5 %, вводимого перед разливкой, получают высокопрочный чугун с шаровидной формой включений графита. Магний обычно вводят в автоклавах. Действие магния объясняют увеличением поверхностного натяжения графита и образованием микропузырьков пара, в которые диффундирует углерод.

Маркируется высокопрочный чугун буквами ВЧ и цифрой, характеризующей величину временного сопротивления, например, ВЧ 35.

Механические свойства некоторых высокопрочных чугунов приведены в табл. 7. Из высокопрочных чугунов изготавливают ответственные детали: зубчатые колеса, коленчатые валы.

Название ковкий чугунов условно, изделия из них получают литьем и пластической деформации они не подвергаются. Ковкий чугун получают из белого путем графитизирующего отжига. Графит в ковком чугуне имеет форму хлопьев. Состав ковкого чугуна, %, довольно стабилен: 2,2—3,0 C; 0,7—1,5 Si; 0,2—0,6 Mn; 0,2 P; 0,1 S. Из-за низкого содержания углерода ковкий чугун обычно выплавляют не в вагранке, а в электропечи. После заполнения форм отливки быстро охлаждают и получают структуру белого чугуна. Затем отливки подвергают длительному отжигу (до 2 сут) — томлению (рис. 86), предохраняя их от окисления печными газами засыпкой песком и др. В результате отжига структура состоит из зерен феррита или перлита и хлопьев графита.

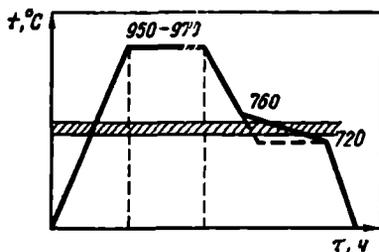


Рис. 86. Схема отжига белого чугуна на ковкий чугун

называют перлитным ковким чугуном или светлосердечным. В его структуре содержится меньше графита, чем в ферритном ковком чугуне.

Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и цифрами временного сопротивления и относительного удлинения, например КЧ 35—10.

В табл. 8 приведены марки, механические свойства и химический состав некоторых ковких чугунов.

Отливки из ковких чугунов применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках (картеры, редукторы, фланцы, муфты).

Т а б л и ц а 7. Механические свойства высокопрочных чугунов (ГОСТ 7293—85)

Марка чугуна	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость НВ
	не менее			
ВЧ35	350	220	22	140—170
ВЧ40	500	250	15	140—202
ВЧ45	450	310	10	140—225
ВЧ50	500	320	7	153—245
ВЧ60	600	370	3	192—277
ВЧ70	700	420	2	228—302
ВЧ80	800	480	2	248—351
ВЧ100	1000	700	2	270—360

Т а б л и ц а 8. Механические свойства и химический состав (%) ковких чугунов (ГОСТ 1215—79)

Марка чугуна	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость НВ	С	Si	Mn	P S	
	не менее	не менее					не более	не более
<i>Ферритные чугуны</i>								
КЧ33—8	323	8	100—163	2,6—2,9	1,0—1,6	0,4—0,6	0,18	0,20
КЧ37—12	362	12	110—163	2,4—2,7	1,2—1,4	0,2—0,4	0,12	0,06
<i>Перлитные чугуны</i>								
КЧ55—4	539	4	192—241	2,5—2,8	1,1—1,3	0,3—1,0	0,10	0,20
КЧ65—3	637	3	212—269	2,4—2,7	1,2—1,4	0,3—1,0	0,10	0,06

Излом чугуна, структура которого состоит из феррита и графита, темный. Такой ковкий чугун называют черносердечным, так как он содержит сравнительно много графита.

Если в области эвтектоидного превращения проводить более быстрое охлаждение, то в структуре сохранится перлит. Такой чугун

# Глава 6 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

## 1. Общие сведения

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры.

Термическая обработка является одним из наиболее распространенных в современной технике способов получения заданных свойств металла. Термическая обработка используется либо в качестве промежуточной операции для улучшения обрабатываемости давлением, резанием и др., либо как окончательная операция технологического процесса, обеспечивающая заданный уровень физико-механических свойств детали.

Так как основными факторами любого вида термической обработки являются температура и время, то режим термообработки обычно представляется графиком в координатах  $t - \tau$  или  $t - \lg \tau$ , где  $t$  — температура,  $\tau$  — время (рис. 87). Угол наклона характеризует скорость нагрева или охлаждения. Постоянная скорость нагрева или охлаждения изображается на графике прямой линией с определенным углом наклона.

В результате термической обработки в сплавах происходят структурные изменения. После термообработки металлические сплавы могут находиться в равновесном (стабильном) и неравновесном (метастабильном) состоянии.

Равновесное состояние достигается тогда, когда полностью завершаются все протекающие в сплавах процессы. При этом строение сплава будет соответствовать диаграмме состояния. Неравновесное состояние получается при условиях, препятствующих полному завершению протекающих процессов.

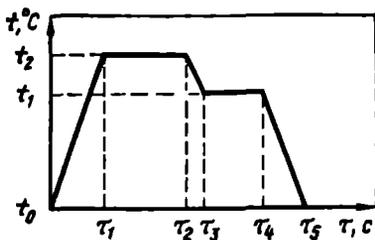


Рис. 87. График термической обработки сплавов

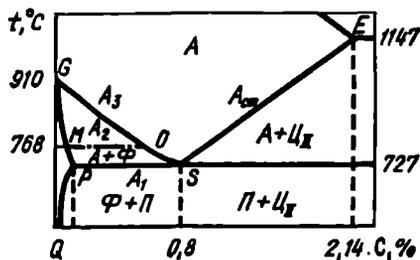


Рис. 88. Обозначения критических точек стали

Примером сохраняющихся длительное время неравновесных состояний являются наклеп, неоднородность химического состава вследствие ликвации, структура булатной стали.

Увеличение теплового движения атомов при нагреве способствует переходу в равновесное состояние.

Принято обозначать критические точки стали буквой *A* по начальной букве французского слова *arrêt* — остановка. Критические точки *A*<sub>1</sub> лежат на линии *PSK* (727 °С) диаграммы железо—углерод и соответствуют превращению перлита в аустенит (рис. 88). Критические точки *A*<sub>2</sub> находятся на линии *MO* (768 °С), характеризующей магнитное превращение феррита, *A*<sub>3</sub> соответствует линиям *GS* и *SE*. На линии *GS* начинается выделение феррита из аустенита при охлаждении или завершается превращение феррита в аустенит при нагреве. На линии *SE* начинается выделение вторичного цементита из аустенита при охлаждении или заканчивается его растворение в аустените при нагреве.

Вследствие теплового гистерезиса превращения при нагреве и охлаждении проходят при разных температурах. Поэтому для обозначения критических точек при нагреве и охлаждении вводят дополнительные индексы: букву «с» в случае нагрева и «r» в случае охлаждения, например *A*<sub>c1</sub>, *A*<sub>c3</sub>, *A*<sub>r1</sub>, *A*<sub>r3</sub> (начальные буквы от французских слов *chauf* — нагрев и *refroidissement* — охлаждение). Таким образом, *A*<sub>c1</sub> — критическая точка, соответствующая превращению  $\Pi \rightarrow A$ , а *A*<sub>r1</sub> — превращению  $A \rightarrow \Pi$ ; *A*<sub>c3</sub> — критическая точка конца растворения  $\Phi$  в *A*, а *A*<sub>r3</sub> — начало выделения  $\Phi$  из *A*. Начало выделения вторичного цементита из аустенита также обозначают *A*<sub>r3</sub>, а конец растворения вторичного цементита в аустените часто обозначают *A*<sub>сm</sub>.

Общая длительность нагрева металла при термической обработке  $\tau_{\text{общ}}$  складывается из времени собственно нагрева до заданной температуры  $\tau_{\text{н}}$  и времени выдержки при этой температуре  $\tau_{\text{в}}$ , т.е.  $\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}}$ . Время нагрева зависит от типа печи, размеров деталей, их укладки в печи; время выдержки зависит от скорости протекания фазовых превращений.

Нагрев печей для термической обработки производится электроэнергией, газом, жидким или твердым топливом. Печи для термической обработки должны обеспечивать возможность контроля и регулирования температуры, а также равномерную температуру в рабочем пространстве.

Нагрев может сопровождаться взаимодействием поверхности металла с газовой фазой. Химическое взаимодействие металла с кислородом может приводить к обезуглероживанию поверхностного слоя ( $C + O_2 \rightarrow$

CO<sub>2</sub>) и образованию окалины в количестве до 1—3 % от массы металла ( $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}$ ).

Обезуглероживание приводит к тому, что поверхность деталей, подвергающаяся наибольшим нагрузкам и износу при эксплуатации, становится менее прочной и теряет твердость. Окалинообразование приводит к угару металла, меняет форму деталей и портит их поверхность. Окалина удаляется с поверхности травлением и дробеструйной обработкой.

Для уменьшения окислительных процессов снижают коэффициент избытка воздуха, применяют рециркуляционные печи, печи с контролируемой атмосферой. Для предохранения от окисления и обезуглероживания применяют также нагрев изделий в соляных ваннах. Для нагрева используют хлористые соли NaCl, KCl, BaCl<sub>2</sub> в различных сочетаниях. Температура нагрева в солях обычно составляет 750—1000 °С и более. Однако нагрев в солях сравнительно сложен в осуществлении и ограничен размерами деталей. Для поверхностной термической обработки, например поверхностной закалки, широко применяется индукционный нагрев.

Охлаждение при термообработке производится с различной скоростью. При отжиге металл охлаждают медленно вместе с печью, при нормализации — на воздухе, при закалке применяют быстрое охлаждение в специальных средах.

## 2. Виды термической обработки стали

Различают три основных вида термической обработки металлов: собственно термическую обработку, химико-термическую и термомеханическую. Собственно термическая обработка предусматривает только температурное воздействие на металл. При химико-термической обработке (ХТО) в результате взаимодействия с окружающей средой при нагреве меняется состав поверхностного слоя металла и происходит его насыщение различными химическими элементами. Термомеханическая обработка (ТМО) предусматривает изменение структуры металла вследствие как термического, так и деформационного воздействия. При ТМО наклеп оказывает влияние на кинетику фазовых и структурных превращений, сопровождающих термообработку.

Собственно термическая обработка включает в себя отжиг, нормализацию, закалку, отпуск и старение.

Термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла, находящегося в результате каких-либо предшествующих воздействий в неравновесном состоянии, и приводящая его в более равновесное, называется *отжигом*. Охлаждение после отжига выше критических точек производится вместе с печью.

Нагрев при отжиге может производиться ниже или выше температур фазовых превращений в зависимости от целей отжига.

Отжиг, при котором нагрев и выдержка металла производится с целью приведения его в устойчивое состояние за счет снятия напряжений, уменьшения искажений кристаллической решетки, диффузии атомов, рекристаллизации, называется *отжигом первого рода*, так как отжиг этого типа не связан с превращениями в твердом состоянии, он возможен для любых металлов и сплавов.

Отжиг, при котором нагрев производится выше температур фазовых превращений с последующим медленным охлаждением для получения структурно равновесного состояния, называется *отжигом второго рода*, или *перекристаллизацией*.

Если после нагрева выше температур фазовых превращений охлаждение ведется не в печи, а на воздухе, имеет место *нормализация*, являющаяся переходной ступенью от отжига к закалке.

Различают два вида закалки: с полиморфным превращением и без него.

Термическая обработка, заключающаяся в нагреве выше температур фазовых превращений с последующим быстрым охлаждением для получения структурно неравновесного состояния, называется *закалкой с полиморфным превращением*. Этот вид закалки характерен для сплавов железа с углеродом. После закалки в сплаве сохраняется структура пересыщенного твердого раствора или структура, состоящая из продуктов превращения твердого раствора разной степени дисперсности.

При медленном охлаждении стали при прохождении критической точки  $A_{r1}$  аустенит распадается на феррито-цементитную смесь:  $A \rightarrow \Phi + \text{Ц}$ . С ростом скорости охлаждения превращение происходит при все более низких температурах. При достаточно большой скорости охлаждения распад аустенита может не произойти и аустенит, т.е. твердый раствор углерода в Fe, превратится в мартенсит — пересыщенный твердый раствор углерода в FeC.

Состояние закаленного сплава характеризуется особой неустойчивостью. Процессы, приближающие его к равновесному состоянию, могут идти даже при комнатной температуре и резко ускоряются при нагреве.

Термическая обработка, представляющая собой нагрев закаленного сплава ниже температур фазовых превращений (ниже  $A_{c1}$ ) для приближения его структуры к более устойчивому состоянию, называется *отпуском*.

*Закалка без полиморфного превращения* состоит из нагрева до температур растворения избыточной фазы и получения однородного твердого раствора с быстрым охлаждением для фиксации пересыщенного

твердого раствора и получения структурно неустойчивого состояния. Этот вид закалки характерен для сплавов алюминия с медью — дуралюминов.

Между отпуском и отжигом I рода много общего. Разница в том, что отпуск — всегда вторичная операция после закалки.

Самопроизвольный отпуск, происходящий после закалки без полиморфного превращения, в результате длительной выдержки при комнатной температуре, или отпуск при сравнительно небольшом подогреве называется *старением*. Старение также приближает состояние сплава к более устойчивому.

Принято различать первичную и вторичную термическую обработку. Целью первичной термической обработки, чаще всего отжига или нормализации, является подготовка структуры сплава к последующим операциям пластической, механической и окончательной термической обработки. Назначение вторичной термической обработки — получение окончательной структуры и необходимых физико-механических свойств сплава. Первичную термическую обработку чаще применяют для заготовок, а вторичную — для готовых деталей.

Приведем основные структуры стали, переход которых из одной в другую характеризует основные превращения:

- 1) аустенит А — твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе  $Fe\gamma(C)$ ;
- 2) мартенсит М — пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе  $Fe\alpha(C)$ ;
- 3) перлит П — эвтектоидная смесь феррита и цементита  $Fe\alpha + Fe_3C$ .

При термической обработке стали различают четыре основных превращения:

- 1) превращение при нагреве перлита в аустенит  $P \rightarrow A$  или  $Fe\alpha + Fe_3C \rightarrow Fe\gamma(C)$ ;
- 2) превращение при охлаждении аустенита в перлит  $A \rightarrow P$  или  $Fe\gamma(C) \rightarrow Fe\alpha + Fe_3C$ ;
- 3) превращение при охлаждении аустенита в мартенсит  $A \rightarrow M$  или  $Fe\gamma(C) \rightarrow Fe\alpha(C)$ ;
- 4) превращение мартенсита в перлитные структуры  $M \rightarrow P$  или  $Fe\alpha(C) \rightarrow Fe\alpha + Fe_3C$ .

### 3. Превращения в стали при нагреве. Образование аустенита

Превращение перлита в аустенит в точном соответствии с диаграммой происходит лишь при очень медленном нагреве. В реальных условиях превращение запаздывает и имеет место перегрев. Скорость превращения перлита в аустенит зависит от степени перегрева. Чем выше температура, тем быстрее идет превращение. В бесконечности кривые начала

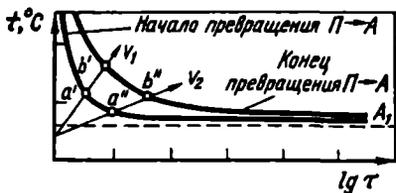


Рис. 89. Диаграмма изотермического превращения перлита в аустенит эвтектоидной стали;

$a'$ ,  $a''$  — точки начала и  $b'$ ,  $b''$  — точки конца превращения  $\text{П} \rightarrow \text{А}$  со скоростями  $v_1$ ,  $v_2$  ( $v_{\text{down1}} > v_2$ )

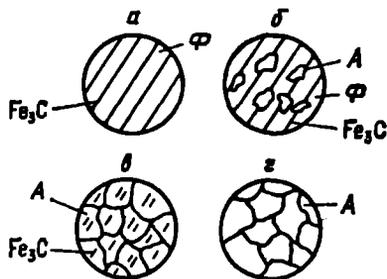


Рис. 90. Схема структурных изменений эвтектоидной стали при нагреве:

$a$  — перлитная структура;  $б$  — начало образования аустенита;  $в$  — конец полиморфного превращения и растворение цементита;  $z$  — гомогенизация аустенита

и конца превращения, асимптотически приближаясь к линии  $A_1$ , сливаются. Совпадение кривых начала и конца превращения в одной точке соответствует равновесному превращению на диаграмме железо—углерод (рис. 89). Схема структурных изменений в эвтектоидной стали при нагреве приведена на рис. 90.

Зародыши новой фазы — аустенита — образуются на межфазных поверхностях раздела феррит—цементит. Переход перлита в аустенит состоит из двух элементарных процессов: полиморфного превращения  $\text{Fe}\alpha \rightarrow \text{Fe}\gamma$  и растворения в  $\gamma$ -железе углерода цементита. Растворение цементита запаздывает по сравнению с полиморфным превращением. Поэтому после превращения феррита в аустенит необходимо дополнительное время для устранения неоднородности аустенита — его гомогенизации.

Скорость образования аустенита зависит от разности свободных энергий аустенита и перлита (рис. 91) и скорости диффузии атомов углерода, необходимых для образования аустенита. При нагреве разность свободных энергий и диффузия атомов углерода увеличивается, что приводит к росту скорости образования аустенита.

Из рис. 91 следует, что превращение перлита в аустенит при нагреве протекает в интервале температур. Чем выше скорость нагрева, тем выше температура начала и конца превращения. Такой характер превращения свойствен только сталям эвтектоидного состава. В доэвтектоидных сталях выше  $A_{c1}$  структура состоит из аустенита и феррита, а в заэвтектоидных — из аустенита и цементита. По мере нагрева до  $A_{c3}$  ( $A_{cm}$ ) происходит постепенное растворение феррита или цементита в

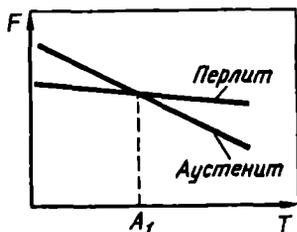


Рис. 91. Температурная зависимость изменения свободной энергии аустенита и перлита

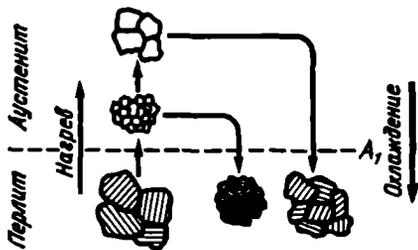


Рис. 92. Схема изменения размера зерна в зависимости от температуры нагрева аустенитного зерна

аустените. Однофазную структуру аустенита доэвтектоидные и заэвтектоидные стали приобретают только после нагрева выше  $A_{c3}$  ( $A_{cm}$ ).

Начальные зерна аустенита всегда имеют малые размеры. Они образуются на сильно разветвленной феррито-цементитной границе. При дальнейшем нагреве зерна растут, причем разные стали характеризуются различной склонностью к росту зерна (рис. 92).

По склонности к росту зерна аустенита при нагреве различают наследственно мелкозернистые и крупнозернистые стали. Наследственно крупнозернистые стали начинают быстро увеличивать размер зерен даже при небольшом нагреве.

Склонность к росту зерна зависит от содержания легирующих элементов. Для стали одной марки она является плавочной характеристикой и зависит от режима раскисления, количества неметаллических включений и т.д. Склонность к росту аустенитного зерна определяют после 3- или 8-ч выдержки образца стали при температуре 930 °С. При такой выдержке в наследственно крупнозернистых сталях зерно увеличивается, а в наследственно мелкозернистых остается практически без изменений.

От склонности к росту зерна зависит технологический процесс горячей деформации и термообработки. Наследственно мелкозернистые стали имеют больший интервал закалочных температур; их прокатка и ковка могут завершаться при более высоких температурах.

При нагреве до достаточно высокой температуры наследственно мелкозернистая сталь может иметь даже более крупное зерно аустенита, чем наследственно крупнозернистая сталь. Поэтому вводится понятие о *размере действительного зерна* — величине зерна при комнатной температуре, полученной в результате той или иной термической обработки. Размер действительного зерна обычно тем больше, чем больше размер исходного зерна аустенита (рис. 92).

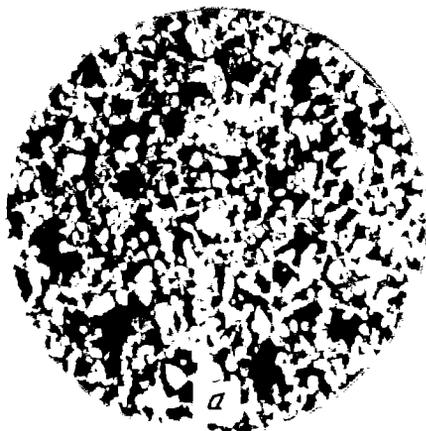


Рис. 93. Микроструктура углеродистой стали 35 в зависимости от температуры нагрева:

*a* — без перегрева; *б* — перегрев; *в* — пережог.  $\times 100$

Нагрев стали при температурах значительно выше  $A_{c3}$  приводит к перегреву, следствием которого является образование крупного действительного зерна (рис. 93, б). Перегрев может быть исправлен повторным нагревом до более низкой температуры. Если нагрев проходит при еще более высоких температурах и металл в течение

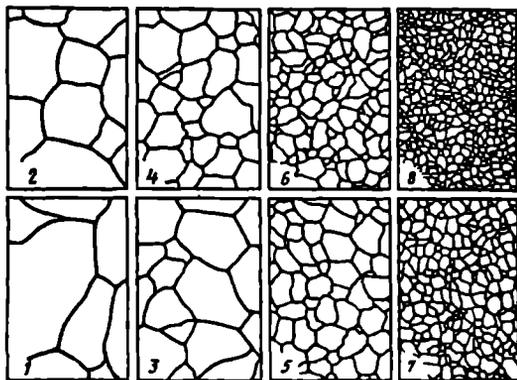
длительного времени находится при высокой температуре в окислительной атмосфере печи, может возникнуть пережог стали. Пережог сопровождается окислением и частичным оплавлением границ зерен, камневидным изломом и является неисправимым дефектом (рис. 93, в).

Величина действительного зерна стали оказывает наибольшее влияние на ударную вязкость, особенно при низких температурах. С увеличением размера зерна повышается порог хладноломкости, снижается работа распространения трещины.

Величину зерна определяют по ГОСТ 5639—82 сравнением микроструктуры стали при увеличении в 100 раз с эталонными шкалами, приведенными на рис. 94. Размер зерна оценивают баллами. Балл зерна прямо пропорционален числу зерен, помещающихся на  $1 \text{ мм}^2$  шлифа, и обратно пропорционален среднему диаметру зерна. Условно принято

Рис. 94. Шкала зернистости стали

считать, что стали с зерном от первого до пятого балла относятся к крупнозернистым сталям, а с более высоким баллом зерна (№№ 6—15) — к мелкозернистым.



#### 4. Превращение аустенита в перлит при охлаждении. Диаграмма изотермического превращения аустенита

Процесс образования перлита происходит во времени. Он включает в себя зарождение центров перлита, соответствующее началу превращения, и рост зерен перлита.

Превращение аустенита, переохлажденного ниже точки  $A_1$  ( $727^\circ\text{C}$ ), может происходить как при непрерывном охлаждении, так и при выдержке при постоянной температуре — изотермическое превращение аустенита.

При охлаждении ниже  $A_1$  свободная энергия аустенита становится выше свободной энергии продуктов его распада, поэтому переохлажденный аустенит становится неустойчивым. Вместе с тем образующиеся фазы — феррит и цементит — существенно отличаются по составу от исходной фазы — аустенита. Поэтому превращение носит диффузионный характер и должно сопровождаться перераспределением углерода за счет диффузии.

Таким образом, с понижением температуры наблюдается, с одной стороны, ускорение превращения  $A \rightarrow \text{П}$  за счет роста разности свободных энергий аустенита и продуктов его распада  $\Phi + \text{Ц}$ , а с другой, — замедление превращения из-за снижения скорости диффузии атомов углерода.

Рассмотрим кинетику и механизм превращения переохлажденного аустенита на примере стали эвтектоидного состава, содержащей 0,8 % углерода. Нагретые до температуры на  $30\text{—}50^\circ\text{C}$  выше  $A_{c1}$  образцы, имеющие структуру однородного аустенита, переносят в термостаты с заданной температурой. Учитывая, что аустенит парамагнитен, а механическая смесь феррита и цементита обладает ферромагнитными свойствами, наблюдения за изменениями магнитных характеристик образ-

Рис. 95. Кинетические кривые превращения аустенита в перлит (а) и построенная по ним диаграмма изотермического превращения аустенита (б)



цов позволяют оценить кинетику превращений аустенита в перлит при различных температурах.

На графике (рис. 95, а) приведена серия кинетических кривых изотермического распада аустенита, полученных для разных температур:  $t_1 > t_2 > t_3 > t_4 > t_5 > t_6$ . Характер кривых показывает, что сначала процесс распада идет медленно, затем скорость его растет и при образовании 50 % продуктов превращения достигает максимума, а по мере снижения количества оставшегося аустенита процесс постепенно затухает. Точки  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  соответствуют началу, точки  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$  — концу превращения.

С увеличением степени переохлаждения устойчивость аустенита сначала уменьшается. Наибольшая скорость превращения  $A \rightarrow П$  для эвтектоидной стали достигается при переохлаждении на 150—200 °С ниже  $A_1$  (точка  $t_4$  на графике). Начиная с этой температуры ( $t_4$ ), дальнейшее ее снижение уже приводит к уменьшению скорости превращения.

Преобразуя координаты, по полученным опытным кривым строят

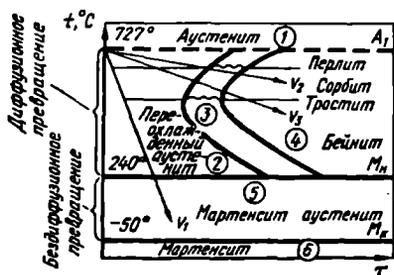


Рис. 96. Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали

диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита (рис. 95, б). Для этого на горизонтальные пунктирные линии температур изотермических выдержек  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$  наносят точки начала (а) и конца (б) превращений. Тогда кривая  $a_1$ — $a_6$  — есть линия начала, а  $b_1$ — $b_6$  — линия конца превращения.

На рис. 96 приведена диаграмма изотермического превращения аус-

тениста для эвтектоидной стали (0,8 % С). Горизонтальные линии  $M_N$  и  $M_K$  показывают температуры начала и конца бездиффузионного мартенситного превращения.

Диаграмма изотермического превращения представляет собой результат обобщения многочисленных данных исследований превращений аустенита при постоянных температурах. Диаграммы изотермического превращения называют за сходство кривых с буквой «С» также С-диаграммами, а в странах английского языка ТТТ-диаграммами (temperature — time — transformation, что означает температура — время — превращение).

На диаграмме можно выделить следующие области: 1) область устойчивого аустенита (для стали, содержащей 0,8 % С, выше  $A_1$ ); 2) область переохлажденного аустенита; 3) область начавшегося, но еще не закончившегося превращения  $A \rightarrow П$ ; 4) область закончившегося превращения; 5) область начавшегося, но еще не закончившегося мартенситного превращения (между  $M_N$ — $M_K$ ); 6) мартенситная область (ниже  $M_K$ ).

Расстояние от оси ординат до линии начала превращения характеризует меру устойчивости аустенита. Минимальная устойчивость аустенита наблюдается при снижении температуры на 150—200 °С ниже критической точки  $A_1$ . Для доэвтектоидных сталей на диаграмме изотермического превращения добавляется кривая выделения феррита из аустенита, а для заэвтектоидных сталей — кривая выделения цементита из аустенита. Эти кривые располагаются над верхней частью кривой начала превращения  $A \rightarrow П$  (рис. 97).

Диаграмма изотермического превращения позволяет определить конечную структуру для данной марки стали, если известна температура или скорость превращения.

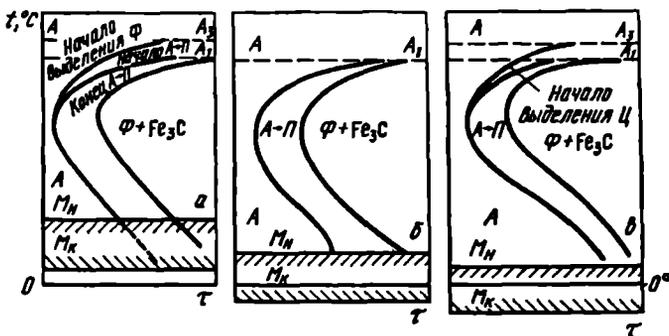


Рис. 97. Схемы диаграмм изотермического превращения переохлажденного аустенита: а — доэвтектоидная сталь; б — эвтектоидная сталь; в — заэвтектоидная сталь

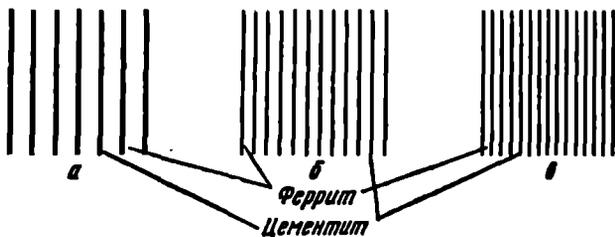


Рис. 98. Схемы феррито-цементитных структур:  
*a* — перлит; *б* — сорбит; *в* — троостит

является цементит. В результате образования пластинок цементита соседние участки аустенита обедняются углеродом, что в свою очередь

Рассмотрим структуры, образующиеся при превращении аустенита.

При температуре 650—700 °С образуется перлит. При перлитном превращении ведущей фазой

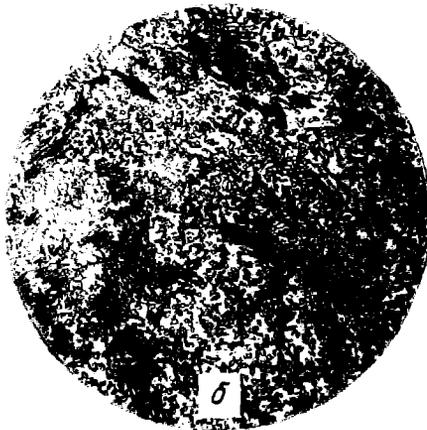
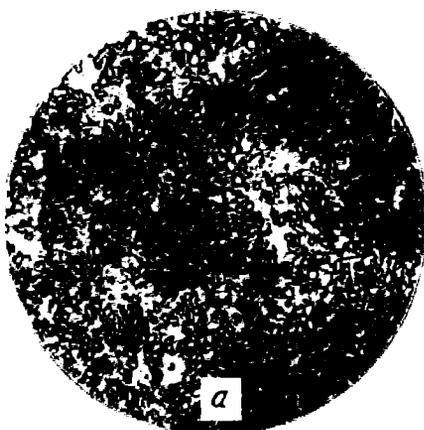


Рис. 99. Микроструктура углеродистой стали с 0,8 % С после нагрева до 800 °С и изотермической выдержки в течение 1 ч при температуре, °С:  
*a* — 700 (перлит); *б* — 600 (сорбит); *в* — 550 (троостит). × 800

приводит к образованию пластинок феррита. Появляются чередующиеся пластинки цементита и феррита.

При увеличении переохлаждения увеличивается количество зародышей новой фазы. Естественно, что с ростом числа

чередующихся пластин феррита и цементита уменьшаются их размеры и расстояния между ними. Другими словами, с понижением температуры растет дисперсность (рис. 98) продуктов превращения аустенита. Под степенью дисперсности понимают расстояние между соседними пластинками феррита и цементита. При температуре 600—650 °С образуется сорбит, а при 550—600 °С — троостит (рис. 99).

Перлит, сорбит, троостит являются структурами одной природы — механической смесью феррита и цементита и отличаются друг от друга лишь степенью дисперсности. С увеличением степени дисперсности пластин цементита растет твердость и прочность стали. Наибольшую пластичность имеют стали с сорбитной структурой. Троостит, образующийся при более низкой температуре превращения, характеризуется меньшей пластичностью (меньшими  $\delta$  и  $\psi$ ). Перлит, сорбит и троостит называют *перлитными структурами*.

Перлитные структуры в зависимости от формы цементита могут быть пластинчатыми или зернистыми. Пластинчатые структуры образуются при превращении однородного (гомогенного) аустенита, а зернистые — неоднородного аустенита. В первом случае нагрев доэвтектоидных сталей должен производиться выше  $A_{c3}$ , а заэвтектоидных — выше  $A_{cm}$ . Соответственно для получения зернистых структур нагрев должен производиться ниже  $A_{c3}$  ( $A_{cm}$ ).

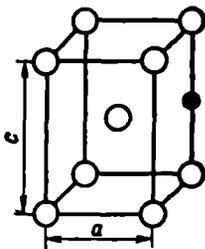
Таким образом, дисперсность перлитных структур определяется степенью переохлаждения, а форма цементита — гомогенностью исходного аустенита.

При охлаждении ниже 500 °С до температуры начала мартенситного превращения образуется игольчатая структура бейнита, иногда называемого игольчатым трооститом. Бейнит отличается от перлитных структур более высоким содержанием углерода в феррите. Это объясняется малыми скоростями диффузии при понижении температуры и неполным выделением углерода из  $\alpha$ -твердого раствора.

Бейнитные участки в отличие от перлитных структур имеют игольчатый характер. Зерна перлитных структур имеют округлую форму, так как образуются в сравнительно мягком аустените. При понижении температуры участки бейнита образуются в упругой среде, и структура приобретает игольчатую форму. При увеличении под электронным микроскопом можно видеть, что иглы бейнита состоят из мельчайших пластинок цементита и феррита.

## 5. Мартенситное превращение аустенита

При больших степенях переохлаждения возрастает термодинамическая неустойчивость аустенита, а скорость диффузии углерода резко падает. При переохлаждении аустенита в эвтектоидной стали до 240 °С подвиж-



○ Fe ● C

Рис. 100. Тетрагональная кристаллическая ячейка мартенсита

ность атомов углерода близка к нулю и происходит бездиффузионное превращение аустенита. При этом меняется лишь тип решетки  $\gamma \rightarrow \alpha$ , а весь углерод, ранее растворенный в решетке аустенита, остается в решетке феррита, хотя равновесная концентрация углерода в феррите не превышает 0,006 % при комнатной температуре.

Образуется мартенсит  $Fe\alpha(C)$  — пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. Мартенсит имеет ту же концентрацию углерода, как и исходный аустенит. Из-за пересыщенности углеродом решетка мартенсита сильно искажена и вместо кубической приобретает тетрагональную форму, при которой отношение параметров решетки существенно отличается от единицы, т.е.  $c/a \neq 1$ . Чем больше углерода, тем выше степень тетрагональности мартенсита (рис. 100).

Мартенсит имеет высокую твердость (до HRC 65) и хрупкость. Высокая твердость мартенсита обусловлена искажениями кристаллической решетки, связанными с большими внутренними напряжениями, а также возникновением фазового наклепа за счет увеличения объема при превращении аустенита в мартенсит.

Кристаллы мартенсита, образующиеся в виде пластин в малопластичном аустените, имеют на шлифе игольчатую форму (рис. 101).



Рис. 101. Микроструктура мартенсита после закалки стали 45 от температуры 840 °C в воде:

*a* — оптический микроскоп,  $\times 500$ ; *b* — электронный микроскоп,  $\times 5000$

Скорость образования кристаллов мартенсита очень велика: достигает 1000 м/с. Пластины мартенсита растут до границы аустенитного зерна либо до имеющегося в стали дефекта. Последующие пластины мартенсита, расположенные под углом к первым ( $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ), ограничены их размерами. Размер пластин мартенсита, имеющих в плоскости шлифа вид мартенситных игл, зависит от размера исходных зерен аустенита.

Высокая скорость образования кристаллов мартенсита при низкой температуре протекания превращения объясняется тем, что имеет место непрерывный переход от кристаллической решетки аустенита к решетке мартенсита.

При практически мгновенном (скорость в 3 раза больше скорости звука)  $\gamma \rightarrow \alpha$  переходе атомы смещаются упорядоченно, строго ориентированно, на расстояния, меньшие межатомных. При этом сохраняется общая сопрягающаяся плоскость решеток  $\gamma$ - и  $\alpha$ -Fe — так называемая когерентная связь. Когерентное превращение обуславливает перемещение атомов только на близкие расстояния при переходе атомов из одной решетки в другую. Поэтому кристаллическая решетка новой фазы мартенсита закономерно ориентирована относительно исходной фазы — аустенита. Из-за когерентного сопряжения решеток и различия удельных объемов фаз мартенситное превращение приводит к возникновению больших внутренних напряжений.

Мартенситное превращение идет в интервале температур начала и конца мартенситного превращения  $M_n$  и  $M_k$ . Для эвтектоидной стали оно начинается при  $240^\circ\text{C}$  и заканчивается при  $-50^\circ\text{C}$ . Однако при этой температуре в стали сохраняется еще некоторое количество непревращенного, так называемого остаточного аустенита. Охлаждение ниже температуры  $M_k$  не приводит к его окончательному превращению. Положение точек  $M_n$  и  $M_k$  не зависит от скорости охлаждения, но зависит от содержания углерода в стали (рис. 102).

Если эвтектоидную сталь охладить только до комнатной температуры, то в структуре кроме мартенсита будет присутствовать некоторое количество остаточного аустенита. Наличие остаточного аустенита нежелательно, так как это приводит к неоднородности свойств по сечению и изменению размеров деталей. Последнее обстоятельство объясняется тем, что мартенсит имеет наибольший удельный объем по сравнению с другими структурами, а аустенит — наименьший. Поэтому при переходе от аустенитной структуры к мартенситной объем и раз-

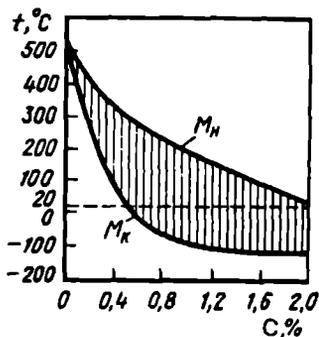


Рис. 102. Влияние содержания углерода в стали на температуру начала  $M_n$  и  $M_k$  конца мартенситного превращения

меры деталей увеличиваются. К особенностям мартенситного превращения относится то, что оно проходит только при непрерывном охлаждении. Задержка охлаждения при температуре выше температуры конца мартенситного превращения приводит к стабилизации аустенита. Аустенит становится более устойчивым. При последующем охлаждении его превращение затруднено и протекает с меньшей интенсивностью и полнотой. Эффект стабилизации аустенита зависит от температуры остановки при охлаждении.

Таким образом, особенностями мартенситного превращения являются его бездиффузионный характер, ориентированность кристаллов и прохождение при непрерывном охлаждении в интервале температур  $M_H - M_K$ .

## 6. Превращения при отпуске закаленной стали

Отпуск состоит в нагреве закаленного изделия ниже критических точек с целью снижения внутренних напряжений, повышения вязкости и пластичности стали.

Исходная структура закаленной стали состоит из тетрагонального мартенсита и некоторого количества остаточного аустенита. При нагреве эта структура претерпевает изменения.

Процессы, происходящие в закаленной стали при нагреве, исследуют с помощью дилатометрических кривых. Для их построения используют специальные приборы — дилатометры, в которые помещают испытуемый закаленный образец и образец той же стали в отожженном состоянии. В отожженном образце при нагреве до температур ниже  $A_{c1}$  превращения не имеют места и его размеры меняются только от

теплового расширения. Поэтому дилатометрическая кривая фиксирует только превращения при отпуске закаленной стали (рис. 103).

Мартенсит представляет собой структуру с наибольшим удельным объемом, а аустенит — с наименьшим. Поэтому превращение исходного мартенсита приводит к уменьшению удельного объема и сжатию образца, а превращение аустенита — наоборот, к его увеличению.

Первая стадия отпуска происходит при нагреве до 200 °С. Из мартенсита выделяются необособленные мельчайшие частицы карбида. Эти

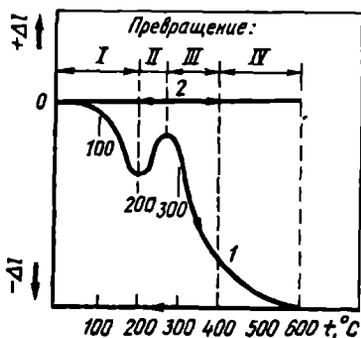


Рис. 103. Дилатометрическая кривая отпуски углеродистой стали с 1,2 % С:  
1 — закаленная сталь; 2 — отожженная сталь

зародыши карбидной фазы имеют вид пластинок толщиной несколько атомных слоев. Одновременно отношение параметров решетки уменьшается и приближается к единице, а решетка мартенсита из тетрагональной становится близкой к кубической. Образуется структура отпущенного мартенсита.

При нагреве до 300 °С происходит распад остаточного аустенита, сопровождающийся расширением стали. Остаточный аустенит превращается в смесь пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора и еще не обособившихся частиц карбидов, т.е. в отпущенный мартенсит.

При дальнейшем повышении температуры отпуска наблюдается сжатие образца. Углерод полностью выделяется из твердого раствора и частицы карбидов обособляются, образуя цементит. При нагреве до 400 °С сталь состоит из феррита и цементита, образующих структуру троостита.

При нагреве до 600 °С происходит коагуляция карбидов и образуется структура сорбита отпуска. Структура сорбита состоит из феррита и мелких зерен цементита.

Феррито-цементитные смеси, полученные при распаде аустенита (троостит или сорбит закалки), отличаются от феррито-цементитных смесей, образующихся при распаде мартенсита. Троостит и сорбит закалки имеют пластинчатую форму цементита, а цементит этих же структур отпуска имеет зернистую форму. Разная форма цементита обуславливает различие в свойствах структур. Зернистые структуры имеют более высокие механические свойства, характеризуются большей пластичностью и вязкостью при равной твердости.

## Глава 7

# ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

### 1. Отжиг и нормализация

Отжиг состоит в нагреве до определенной температуры с последующей выдержкой и медленным охлаждением в печи для получения равновесной, менее твердой структуры, свободной от остаточных напряжений.

Проведение отжига I рода связано с фазовыми превращениями в твердом состоянии. В зависимости от назначения различают следующие виды отжига I рода: диффузионный, рекристаллизационный и отжиг для снятия внутренних напряжений (рис. 104).

Диффузионный или гомогенизирующий отжиг применяют для устранения химической неоднородности, образовавшейся при кристалли-

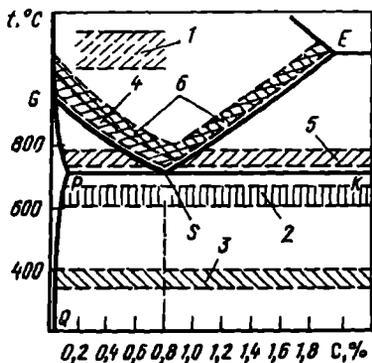


Рис. 104. Температура нагрева при отжиге и нормализации:

отжиг I рода (1 — диффузионный отжиг; 2 — рекристаллизационный отжиг; 3 — отжиг для снятия напряжений); отжиг II рода (4 — полный отжиг; 5 — неполный отжиг; 6 — нормализация)

нагреве на 30—50 °C выше  $A_{c3}$ , выдержке при этой температуре до полной рекристаллизации и медленном охлаждении. При полном отжиге образующаяся аустенитная структура полностью превращается в мелкозернистую феррито-цементитную смесь. Полный отжиг обычно применяют для доэвтектоидных сталей с целью измельчения зерна. Полный отжиг повышает пластические свойства литой стали. Он также применяется для улучшения обрабатываемости резанием.

Неполный отжиг производится при температуре выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$ . Неполному отжигу на зернистый перлит или сфероидизации обычно подвергают заэвтектоидные инструментальные стали. В результате такого неполного отжига карбиды приобретают округлую форму, исчезает сетка вторичного цементита, которая ухудшает обрабатываемость.

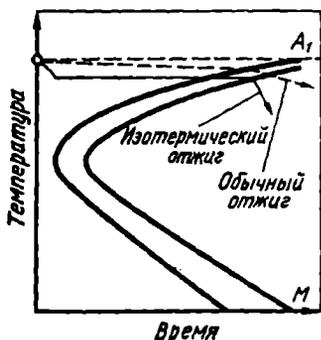


Рис. 105. Схема изотермического отжига

зации металла. Диффузионному отжигу подвергают обычно слитки или отливки высоколегированных сталей, склонных к ликвации. Его проводят при высокой температуре: 1000—1100 °C. Крупное зерно устраняется последующими операциями термообработки. Рекристаллизационный отжиг применяют для снятия наклепа после холодной пластической деформации. Отжиг для снятия внутренних напряжений производят с целью уменьшения напряжений, образовавшихся в металле при ковке, литье, сварке, способных вызвать коробление и разрушение деталей.

Отжиг II рода, или фазовая перекристаллизация, может быть полным и неполным. Полный отжиг состоит в

нагреве на 30—50 °C выше  $A_{c3}$ , выдержке при этой температуре до полной рекристаллизации и медленном охлаждении. При полном отжиге образующаяся аустенитная структура полностью превращается в мелкозернистую феррито-цементитную смесь. Полный отжиг обычно применяют для доэвтектоидных сталей с целью измельчения зерна. Полный отжиг повышает пластические свойства литой стали. Он также применяется для улучшения обрабатываемости резанием.

Для улучшения обрабатываемости легированных сталей применяют изотермический отжиг, состоящий в нагреве на 30—50 °C выше  $A_{c3}$ , охлаждении ниже  $A_{r1}$ , изотермической выдержке при этой температуре для получения равновесной перлитной структуры и последующем охлаждении на воздухе (рис. 105). Такой

изотермический отжиг более стабилен, так как температуру на заданном уровне легче поддерживать, чем регулировать скорость охлаждения.

Изотермический отжиг позволяет добиться превращения устойчивого аустенита легированной доэвтектоидной стали в перлит и феррит, что значительно облегчает ее обрабатываемость резанием.

Если охлаждение после нагрева производится на воздухе, то такая операция термической обработки носит название *нормализации*. При нормализации сталь нагревают до аустенитного состояния. В результате нормализации уменьшаются внутренние напряжения, эвтектоид приобретает более тонкое строение, в заэвтектоидных сталях устраняется грубая сетка цементита. Иными словами, сталь приобретает более «нормальную» структуру. Благодаря полной фазовой перекристаллизации при нормализации устраняется крупнозернистая структура, полученная при литье, прокатке или ковке.

Нормализация является более экономичной операцией, чем отжиг. Для низкоуглеродистых сталей нет разницы в свойствах между отожженным и нормализованным состояниями; различие в свойствах становится заметным с ростом содержания углерода. Нормализацию широко применяют вместо закалки и отпуска для улучшения свойств крупногабаритных стальных отливок.

Нормализация и особенно отжиг — обычно первичные операции термической обработки; их основное назначение состоит в устранении дефектов предыдущих технологических операций (ковки, литья) и в подготовке структуры с целью улучшения обрабатываемости режущим инструментом, улучшения штампуемости в холодном состоянии, а также в подготовке структуры к последующим процессам окончательной термической обработки. При получении удовлетворительных механических свойств или в случае сложности проведения закалки и отпуска отжиг и особенно нормализация могут быть окончательными операциями термической обработки.

## 2. Закалка стали

Закалка углеродистой стали состоит в нагреве ее выше температур фазовых превращений, выдержке для завершения всех превращений и охлаждении с высокой скоростью с целью сохранения при комнатной температуре неравновесных структур, обеспечивающих более высокую прочность и твердость стали.

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку. При полной закалке нагрев осуществляют на 30—50 °С выше  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$  и при быстром охлаждении достигается мартенситная структура с некоторым количеством остаточного аустенита.

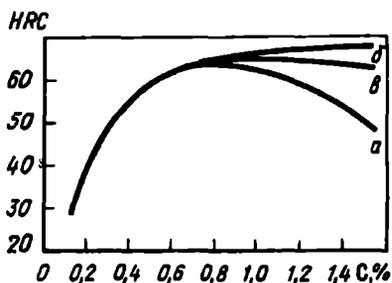


Рис. 106. Влияние содержания углерода и температуры закалки на твердость стали: а — нагрев выше  $A_{c3}$ ; б — твердость собственно мартенсита; в — нагрев выше  $A_{c1}$

При неполной закалке сталь нагревают на 30—50 °С выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$ . В этом случае в нагретом состоянии структура доэвтектоидных сталей состоит из аустенита и феррита, а заэвтектоидных — из аустенита и вторичного цементита. При быстром охлаждении аустенит превращается в мартенсит. Твердость мартенсита закалки зависит от содержания углерода в стали (рис. 106).

После неполной закалки в доэвтектоидных сталях структура состоит из мартенсита и зерен феррита, а в заэвтектоидных — из мартенсита и округлых зерен вторичного цементита. Наличие феррита в структуре закаленной доэвтектоидной стали снижает твердость; поэтому такая закалка применяется реже. Наличие избыточного цементита в структуре закаленной заэвтектоидной стали, наоборот, полезно.

Заэвтектоидные стали обычно используют для изготовления инструмента. Важнейшим требованием, предъявляемым к инструментальным сталям, является твердость. Твердость заэвтектоидных сталей после полной закалки снижается из-за резкого возрастания в структуре наряду с мартенситом остаточного аустенита. Остаточного аустенита тем больше, чем большее количество углерода переходит в твердый раствор при нагреве стали.

Округлые включения цементита не только не уменьшают, но даже увеличивают твердость, а следовательно, и износостойкость стали.

Кроме того, поскольку нагрев ведется при температурах ниже  $A_{cm}$ , уменьшается рост зерна, снижаются термические напряжения при закалке и менее интенсивно обезуглероживается поверхность металлов.

Наиболее благоприятная структура заэвтектоидных сталей достигается тогда, когда включения вторичного цементита имеют форму сфероидов — зернистую форму (рис. 107). Цементитная сетка по границам зерен недопустима, так как увеличивает хрупкость стали. Поэтому закалке заэвтектоидных сталей должен предшествовать отжиг — сфероидизация.

Таким образом, для доэвтектоидных сталей рационально применять полную закалку, для заэвтектоидных — неполную (рис. 108).

При закалке для достижения максимальной твердости стремятся получать мартенситную структуру. Минимальная скорость охлажде-

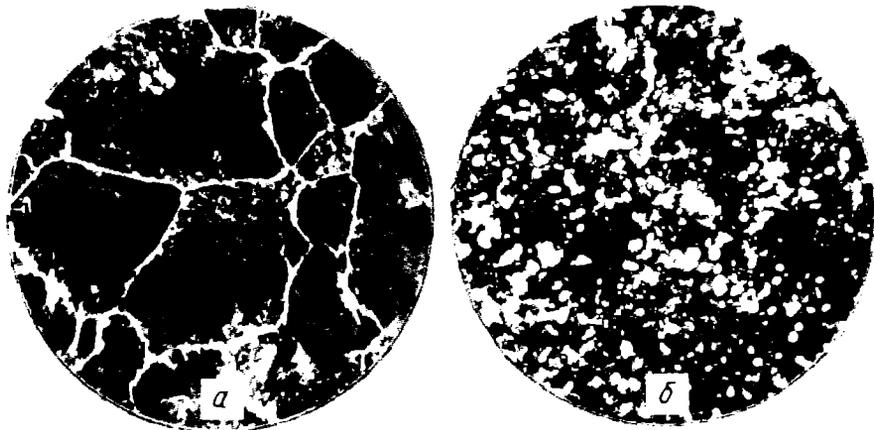


Рис. 107. Микроструктура заэвтектоидной стали с 1,2 % С:  
 а — избыточный цементит в виде сетки; б — зернистый цементит.  $\times 500$

ния, необходимая для переохлаждения аустенита до мартенситного превращения, называется *критической скоростью закалки*. Скорость охлаждения определяется видом охлаждающей среды. Критическая скорость закалки определяется по диаграмме изотермического распада аустенита. Из диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 96) следует, что быстрое охлаждение необходимо в области наименьшей устойчивости аустенита ( $500\text{—}650^\circ\text{C}$ ) с тем, чтобы предотвратить его превращение в феррито-цементитную смесь.

Ниже  $300^\circ\text{C}$ , наоборот, целесообразно медленное охлаждение. При чрезмерно высоких скоростях охлаждения в металле могут возникнуть такие внутренние напряжения, которые способны привести к короблению или растрескиванию деталей.

Внутренние напряжения при закалке образуются из-за разницы температур по сечению деталей при их охлаждении и различного по времени протекания фазовых превращений в разных участках детали. Возникновение фазовых напряжений обусловлено большим удельным объемом мартенсита по сравнению с аустени- том.

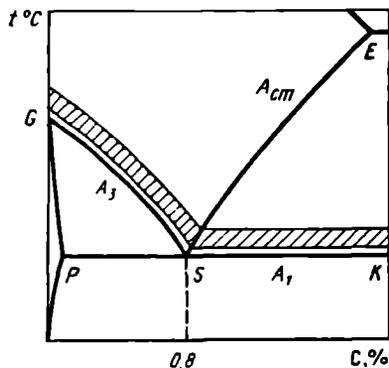


Рис. 108. Оптимальные температуры нагрева под закалку углеродистых сталей

При охлаждении закаливаемой детали в жидкой среде различают три периода, характеризующиеся разной скоростью охлаждения.

1. Период пленочного кипения, когда теплопередаче препятствует образование паровой рубашки, из-за чего скорость охлаждения сравнительно невелика.

2. Период пузырьчатого кипения, при котором паровая рубашка разрушается, и интенсивность охлаждения резко возрастает.

3. Период конвективного теплообмена, когда температура детали ниже температуры кипения жидкости, а скорость охлаждения резко падает.

Применение растворов солей и щелочей уменьшает период пленочного кипения. Скорость охлаждения сталей в различных средах приведена в табл. 9.

Т а б л и ц а 9. Характеристика различных закалочных сред

Закалочная среда	Скорость охлаждения, °C/с, в интервале температур, °C	
	650—550	300—200
Вода, 18 °C	600	270
Вода, 50 C	100	270
10 %-ный раствор NaOH в воде	1200	300
10 %-ный раствор NaCl в воде	1100	300
Минеральное масло	100—150	20—50
Спокойный воздух	3	1

Данные табл. 9 показывают, что нет идеальной закалочной среды, удовлетворяющей условию достижения оптимальной скорости охлаждения при закалке от разных температур. Растворы солей и щелочей при образовании мартенсита могут вызвать коробление и трещины, а масло, имеющее хорошие свойства при этих температурах, менее выгодно при температурах 650—550 °C.

*Прокаливаемостью* стали называется глубина проникновения закаленной зоны. Несквозная прокаливаемость обусловлена тем, что при закалке деталь охлаждается быстрее с поверхности и медленнее в сердцевине. Распределение скорости охлаждения по сечению детали показывает, что у поверхности скорость охлаждения максимальна, а в центре — минимальна (рис. 109). Глубина проникновения закаленной зоны соответствует заштрихованному слою, т.е. проходит до точки пересечения кривых критической скорости закалки  $v_{кр}$  и скорости охлаждения  $v_{охл}$ . Чем меньше  $v_{кр}$ , тем глубже прокаливаемость. Прокаливаемость, как и критическая скорость охлаждения, тесно связана со скоростью

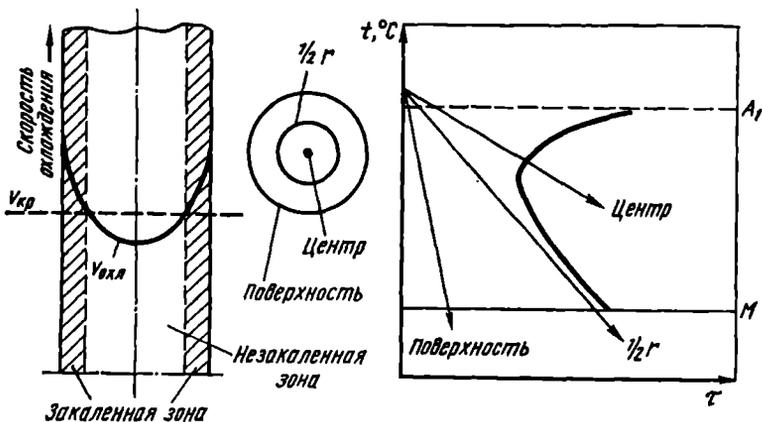


Рис. 109. Влияние скорости охлаждения на прокаливаемость стали

превращения аустенита и, следовательно, с положением кривых на диаграмме изотермического превращения.

**Критический диаметр  $D_{кр}$**  есть максимальный диаметр сечения, прокаливающегося в данном охладителе насквозь. В этом случае минимальная скорость охлаждения в центре детали  $v_{охл} > v_{кр}$ .

Критический диаметр при охлаждении в воде больше, чем при охлаждении в масле. Наиболее простой метод определения критического диаметра — метод торцевой закалки (рис. 110). После закалки измеряют твердость на боковой поверхности по высоте образца.

Прокаливаемость является важной характеристикой стали. При сквозной прокаливаемости по сечению изделий механические свойства одинаковы, при несквозной прокаливаемости в сердцевине наблюдается снижение прочности, пластичности и вязкости металла. Чем выше категория прочности, больше сечение и ответственнее деталь, тем большее значение имеет прокаливаемость.

На прокаливаемость оказывает влияние состав стали (содержание углерода и легирующих элементов) и характер закалочной среды. Легированные стали имеют значительно более высокую прокаливаемость по сравнению с углеродистыми. Прокаливаемость углеродистых сталей зависит от содержания углерода. С понижением углерода прокаливаемость падает. Уменьшение скорости охлаждения приводит к снижению прокаливаемости. При закалке в масле сквозная прокаливаемость

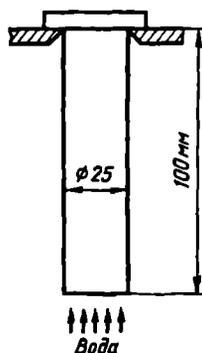


Рис. 110. Схема испытания на прокаливаемость методом торцевой пробы

мость деталей из среднеуглеродистой стали составляет всего лишь 3—4 мм, при закалке в воде — до 10—15 мм. С увеличением размеров заготовки прокаливаемость резко уменьшается. Так, в заготовке диаметром до 40 мм из стали 45 при закалке в воде мартенситная структура достигается на глубине всего лишь 4 мм.

Прокаливаемость является одним из основных критериев и при выборе марки стали рассматривается наряду с ее механическими свойствами, технологичностью и себестоимостью.

В некоторых случаях необходимая прокаливаемость может быть меньше сквозной. Если детали работают на кручение и изгиб, то возникающие в них напряжения уменьшаются от максимальных на поверхности до нуля в середине. Для таких деталей сквозная прокаливаемость необязательна, достаточно иметь прокаливаемость на расстоянии  $1/2$ — $1/4$  радиуса от поверхности.

*Способы закалки стали.* Выбор способа охлаждения нагретой под закалку стальной детали зависит от ее формы, размеров и химического состава стали.

Чем сложнее форма и больше сечение детали, тем выше напряжения, возникающие при закалке, и больше опасность образования трещин. Чем больше содержание углерода в стали, тем большие объемные изменения протекают при превращении, тем больше опасность деформации и образования трещин, тем тщательнее должен быть выбор способа охлаждения при закалке.

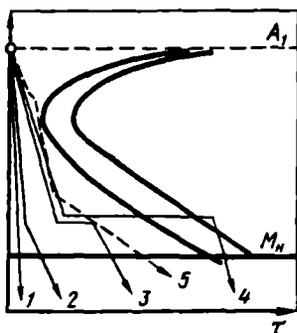


Рис. 111. Схема режимов при разных способах закалки:

1 — закалка в одном охладителе; 2 — закалка в двух средах; 3 — ступенчатая закалка; 4 — изотермическая закалка; 5 — идеальный режим охлаждения

Идеальная кривая охлаждения должна характеризоваться максимальной скоростью в начале охлаждения при прохождении интервала наименьшей устойчивости аустенита и минимальной скоростью в конце охлаждения при мартенситном превращении (рис. 111).

Наиболее простой способ закалки — это закалка в одном охладителе, при котором нагретая деталь погружается в охлаждающую жидкость и остается там до полного охлаждения. Недостатком этого способа является возникновение значительных внутренних напряжений. Для деталей из углеродистых сталей сечением более 5 мм закалочной средой является вода, для деталей меньших размеров и легированных сталей — масло.

Для уменьшения внутренних напряжений применяется закалка в двух средах, при

которой деталь сначала охлаждают в воде до 300—400 °С, а затем для окончательного охлаждения переносят в масло. Недостатком этого способа является трудность регулирования выдержки деталей в первой охлаждающей жидкости.

Точное регулирование времени выдержки детали в первой охлаждающей жидкости достигается при ступенчатой закалке (рис. 111, кривая 3). При этом способе деталь быстро охлаждается погружением в соляную ванну с температурой, немного превышающей (на 30—50 °С) температуру мартенситного превращения данной стали  $M_n$ , выдерживается при этой температуре до достижения одинаковой температуры по всему сечению, после чего охлаждается на воздухе. Мартенситное превращение происходит при медленном охлаждении на воздухе, что резко снижает внутренние напряжения и возможность коробления.

Недостатком этого способа является ограничение размера деталей. Из-за низкой скорости охлаждения в сравнительно нагретой среде при закалке крупных деталей в их центральных зонах скорость охлаждения может оказаться ниже критической. Максимальный диаметр деталей из углеродистых сталей, закаливаемых этим способом, составляет 10 мм, легированных 20—30 мм.

В отличие от ступенчатой при изотермической закалке сталь выдерживается в соляных ваннах до окончания изотермического превращения аустенита. Температура соляной ванны обычно составляет 250—350 °С. В результате изотермической закалки получается структура бейнита с твердостью  $HRC$  45—55 при сохранении повышенной пластичности и вязкости. Длительность выдержки определяется с помощью диаграмм изотермического превращения аустенита.

Закалка с самоотпуском применяется в случае термообработки инструмента типа зубил, молотков, в которых должны сочетаться высокие твердость и вязкость. В этом случае изделия выдерживают в закалочной ванне не до полного охлаждения. За счет тепла внутренних участков происходит нагрев поверхностных слоев до нужной температуры, то есть самоотпуск.

В структуре стали, закаленной при комнатной температуре, присутствует некоторое количество остаточного аустенита. Остаточный аустенит снижает твердость и износостойкость деталей и может приводить к изменению их размеров при эксплуатации при низких температурах из-за самопроизвольного образования мартенсита из аустенита. Для уменьшения остаточного аустенита в структуре применяют обработку холодом.

Обработка холодом состоит в охлаждении закаленной стали ниже 0 °С до температур конца мартенситного превращения  $M_k$  (обычно не ниже -75 °С), получаемых в смесях сухого льда со спиртом. Обработка

холодом должна производиться сразу же после закалки во избежание стабилизации аустенита.

### 3. Отпуск закаленной стали

Отпуск является заключительной операцией термической обработки, состоящей из нагрева ниже критической точки  $A_{c1}$  и последующего охлаждения, при которой формируется окончательная структура стали.

Изменения в структуре при нагреве закаленной стали приводят к изменению ее свойств (рис. 112).

Различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск проводят при 150—200 °С. Целью низкого отпуска является снижение внутренних напряжений и некоторое уменьшение хрупкости мартенсита при сохранении высокой твердости и износостойкости изделий. Структура стали после низкого отпуска представляет собой мартенсит отпуска. Основная область применения низкого отпуска — режущий и мерительный инструмент, а также машиностроительные детали, которые должны обладать высокой твердостью и износостойкостью.

Средний отпуск проводят при 350—450 °С. Цель среднего отпуска состоит в некотором снижении твердости при значительном увеличении предела упругости. Структура стали представляет собой троостит отпуска, обеспечивающий высокие пределы прочности, упругости и выносливости, а также улучшение сопротивляемости действию ударных нагрузок.

Высокий отпуск проводят при 550—650 °С. Цель высокого отпуска — достижение оптимального сочетания прочностных, пластических и вязких свойств. Структура стали представляет собой однородный сорбит отпуска с зернистым строением цементита. Область применения высокого отпуска — конструкционные стали, детали из которых подвергают действию высоких напряжений и ударным нагрузкам. Термическая обработка, состоящая из закалки с высоким отпуском, улучшающая общий комплекс механических свойств, является основным видом термической обработки конструкционных сталей. Она называется *улучшением*.

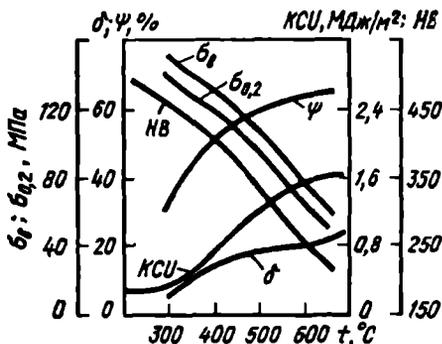


Рис. 112. Изменение механических свойств закаленной стали, содержащей 0,4 % С, в зависимости от температуры отпуска

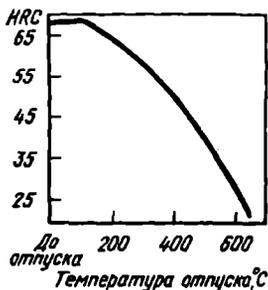


Рис. 113. Изменение твердости при отпуске закаленной эвтектоидной углеродистой стали



Рис. 114. Влияние температуры отпуска и скорости охлаждения после отпуска на ударную вязкость хромокремнистой стали

Температуру отпуска обычно выбирают в зависимости от заданной твердости. В этом случае изделие закалывают на максимальную твердость, а затем отпуском твердость снижают до заданной.

Изменение твердости при отпуске закаленной углеродистой стали, содержащей 0,8 % С, приведено на рис. 113.

**Отпускная хрупкость.** Вязкость сталей, особенно легированных, зависит от режима отпуска: температуры и скорости охлаждения после отпуска (рис. 114). При отпускной хрупкости наблюдается снижение ударной вязкости при определенной температуре отпуска или скорости охлаждения.

Принято различать отпускную хрупкость I и II рода. *Отпускная хрупкость I рода (необратимая)* наблюдается при отпуске как легированных, так и углеродистых сталей при температуре около 300 °С ( в диапазоне 250—400 °С).

Причина отпускной хрупкости I рода — неравномерность распада мартенсита по границам и внутри зерна при отпуске. Вблизи границ карбиды выделяются интенсивнее, там создается концентрация напряжений, что делает границы зерен более хрупкими. При повышении температуры отпуска или увеличении продолжительности нагрева структура по сечению зерна выравнивается и отпускная хрупкость I рода устраняется. Повторный отпуск при температуре 250—400 С не приводит к отпускной хрупкости.

*Отпускная хрупкость II рода (обратимая)* наблюдается при медленном охлаждении после отпуска при температурах 450—550 °С. Этот вид отпускной хрупкости обратим, так как при повторном нагреве, но быстром охлаждении при этой же температуре он исчезает.

При медленном охлаждении по границам зерен успевают выделить мелкие карбиды, фосфиды и нитриды, которые приводят к их орупчиванию. При быстром охлаждении эти частицы не выделяются.

Этот вид хрупкости более характерен для легированных сталей, причем чаще наблюдается в сталях с повышенным содержанием хрома и марганца. Введение в сталь даже небольших количеств молибдена (0,2—0,3 % Мо) или вольфрама (0,6—1,0 % W) резко снижает склонность к отпускной хрупкости II рода.

Мерами борьбы с отпускной хрупкостью II рода являются охлаждение после отпуска не на воздухе, а в масле, а для крупных деталей — даже в воде, а также дополнительное легирование стали молибденом или вольфрамом.

#### 4. Термомеханическая обработка (ТМО) стали

Высокая прочность в сочетании с удовлетворительной вязкостью, ослабление или даже устранение отпускной хрупкости первого и второго рода достигается при применении термомеханической обработки (ТМО), заключающейся в пластическом деформировании аустенита с последующей закалкой на мартенсит и низким отпуском.

В зависимости от температуры, при которой деформируют аустенит, различают высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО) и низкотемпературную (НТМО).

При ВТМО деформация аустенита происходит при температурах выше  $A_{c3}$ , при НТМО — при 400—500 °С, т.е. при температурах относительной стабильности аустенита (рис. 115).

В результате ТМО достигается высокая прочность при достаточной пластичности и вязкости (например, хромоникельмолибденовая сталь 50ХН4М после НТМО имеет следующие свойства:  $\sigma_B = 2700$  МПа при  $\delta = 10$  %,  $\psi = 40$  %,  $KCU = 0,40$  МДж/м<sup>2</sup>).

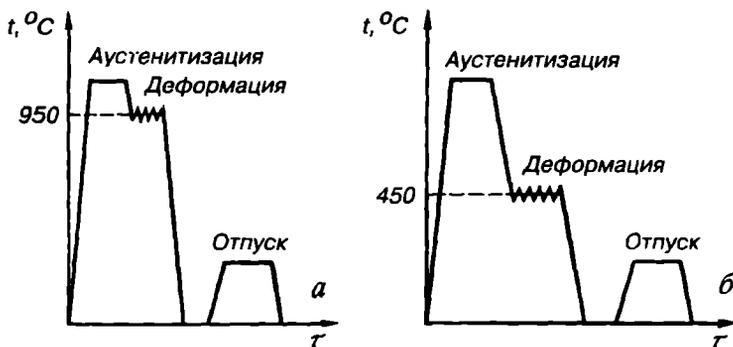


Рис. 115. Схема термомеханической обработки стали:  
а — ВТМО; б — НТМО

Причиной упрочнения при ТМО является то, что из предварительно деформированного аустенитного зерна образуются более мелкие пластины мартенсита. При дроблении зерна аустенита создается блочная структура, которая фиксируется при закалке. Углерод при отпуске около 200 °С выделяется в виде дисперсных карбидов.

По сравнению с обычной термообработкой ВТМО повышает прочность примерно на 40 % при одновременном увеличении характеристик пластичности в 2 раза. Возрастает сопротивление усталости, увеличивается ударная вязкость, уменьшается склонность к образованию трещин и порог хладноломкости.

Еще большая прочность достигается при НТМО, но НТМО может применяться только для сталей с широким временным интервалом устойчивости аустенита ниже температуры его рекристаллизации. Сочетание высокого предела упругости и высокой циклической прочности позволяет использовать НТМО при изготовлении высокопрочных пружин, рессор и подвесок.

Хотя при НТМО достигается наибольшее упрочнение, но ее проведение более сложно по сравнению с ВТМО. При температурах 400—500 °С аустенит менее пластичен, что требует применения более мощных деформирующих средств. ВТМО более технологична, ее можно применять при изготовлении деталей большого сечения и более сложной конфигурации.

Наибольшая прочность ( $\sigma_b$  до 3000 МПа) может быть достигнута сочетанием ВТМО с последующей холодной пластической деформацией.

## Глава 8.

### ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

#### 1. Упрочнение поверхности методом пластического деформирования

Эффективными способами упрочнения поверхностного слоя являются дробеструйная обработка, позволяющая прорабатывать стальные детали на глубину до 0,7 мм, и обкатка поверхности роликками на глубину до 15 мм. При этом происходит наклеп поверхности детали, позволяющий повысить ее усталостную прочность без изменения материала и режима термической обработки. Наклепу подвергают готовые детали, прошедшие механическую и термическую обработку.

При дробеструйной обработке на поверхность деталей из специальных дробемеров с большой скоростью направляют поток стальной или

реже чугуной дробью диаметром 0,5—1,5 мм. Удары дроби вызывают пластическую деформацию поверхностного слоя, вследствие чего он становится более твердым, в нем создаются остаточные напряжения сжатия и тем самым повышается усталостная прочность. Если в поверхностном слое присутствует остаточный аустенит, то благодаря наклепу происходит его фазовое превращение с образованием мартенсита, что дополнительно увеличивает твердость и износостойкость. Благодаря дробеструйной обработке сглаживаются мелкие поверхностные дефекты, являющиеся концентраторами напряжений.

Дробеструйной обработке подвергают поверхность рессор и пружин, зубчатых колес, звеньев гусениц, гильз и поршней. В результате дробеструйной обработки предел выносливости рессор увеличивается в 1,5 раза и в несколько раз возрастает их долговечность.

Обкатку роликами производят с помощью специальных приспособлений на обычных токарных или строгальных станках. Давление на ролики осуществляется гидравлически или с помощью пружин. Обкатку роликами применяют для обработки шеек валов, осей железнодорожных вагонов, коленчатых валов и других деталей. Помимо упрочнения обкатка повышает чистоту обрабатываемой поверхности.

## 2. Поверхностная закалка

Поверхностная закалка состоит в нагреве поверхностного слоя стали выше  $A_{c3}$  с последующим охлаждением для получения высокой твердости и прочности в поверхностном слое детали в сочетании с вязкой сердцевиной.

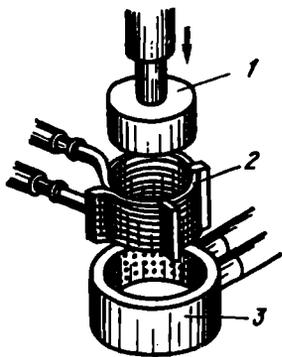


Рис. 116. Поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты:

1 — закаливаемая деталь;  
2 — индуктор; 3 — охладитель

Нагрев под закалку производят токами высокой частоты (ТВЧ) — наиболее распространенным способом, в расплавленных металлах или солях, пламенем газовых или кислород-ацетиленовых горелок, а также лазерным излучением.

При нагреве ТВЧ магнитный поток, создаваемый переменным током, проходящим по проводнику (индуктору), индуцирует вихревые токи в металле детали, помещенной внутри индуктора (рис. 116). Форма индуктора соответствует внешней форме изделия. Индуктор представляет собой медные трубки с циркулирующей внутри водой для охлаждения. Скорость нагрева зависит от количества выделившегося тепла, про-

порционального квадрату силы тока и сопротивлению металла.

Плотность тока по сечению детали неравномерна, на поверхности она значительно выше, чем в сердцевине. Основное количество тепла выделяется в тонком поверхностном слое. Глубина проникновения тока в металл зависит от свойств нагреваемого металла и обратно пропорциональна квадратному корню из частоты тока. Чем больше частота тока, тем тоньше получается закаленный слой. Обычно применяют машинные генераторы с частотой 500—15000 Гц и ламповые генераторы с частотой до  $10^6$  Гц. При использовании машинных генераторов толщина закаленного слоя составляет 2—10 мм, ламповых — от десятых долей миллиметра до 2 мм.

После нагрева в индукторе деталь охлаждают с помощью специального охлаждающего устройства. Через имеющиеся в нем отверстия на поверхность детали разбрызгивается охлаждающая жидкость.

Структура закаленного слоя состоит из мартенсита, а переходной зоны — из мартенсита и феррита. Глубинные слои нагреваются до температур ниже критических и при охлаждении не упрочняются. Для повышения прочности сердцевины перед поверхностной закалкой деталь иногда подвергают нормализации или улучшению. Нагрев длится обычно до 10 с, причем скорость нагрева составляет 100—1000 °С/с.

Преимуществами поверхностной закалки ТВЧ являются регулируемая глубина закаленного слоя; высокая производительность и возможность автоматизации; отсутствие обезуглероживания и окалинообразования; минимальное коробление детали. К недостаткам относятся высокая стоимость индуктора (индивидуальным для каждой детали) и, следовательно, малая применимость ТВЧ к условиям единичного производства.

Для поверхностной закалки применяют обычно углеродистые стали, содержащие около 0,4 % С. Глубокая прокаливаемость при этом методе не используется, поэтому легированные стали обычно не применяют. После закалки проводят низкий отпуск при 200 °С или даже самоотпуск. После закалки и отпуска твердость стали HRC 45—55 на поверхности и HRC 25—30 в сердцевине.

Высокочастотной закалке подвергают шейки коленчатых валов, кулачковых валов, гильзы цилиндров, поршневые пальцы, детали гусениц, пальцы рессоры и т.д. Выбор толщины упрочняемого слоя зависит от условий работы детали. Если от детали требуется только высокая износостойкость, толщина упрочняемого слоя составляет 1,5—3 мм, в случае высоких контактных нагрузок и возможной перешлифовки оптимальная толщина возрастает до 5—10 мм.

Для поверхностной закалки может использоваться нагрев лазером. Это позволяет избежать необходимости изготовления индивидуальных

индукторов. Лазеры — это квантовые генераторы оптического диапазона, в основу работы которых положено усиление электромагнитных колебаний за счет индуцированного излучения атомов (молекул). Лазерное излучение распространяется очень узким пучком и характеризуется высокой концентрацией энергии. Источниками генерируемого излучения служат твердые тела (рубины, алюминиевые граниты, иттрий, стекла) и газы (He, Ne, Ar, CO<sub>2</sub>).

Под действием лазерного излучения поверхность деталей за короткий промежуток времени ( $10^{-3}$ — $10^{-7}$  с) нагревается до высоких температур. После прекращения облучения нагретые участки быстро охлаждаются благодаря интенсивному отводу тепла холодными объемами металла. Происходит закалка тонкого поверхностного слоя.

Лазерная обработка поверхности стальных и чугуновых деталей существенно увеличивает их износостойкость, предел выносливости при изгибе и предел контактной выносливости. Лазерная обработка — перспективный метод поверхностного упрочнения изделий сложной формы, работающих в условиях износа и усталостного нагружения.

### 3. Химико-термическая обработка стали

#### 3.1. Общие сведения

Химико-термической обработкой (ХТО) называют процесс, сочетающий в себе поверхностное насыщение стали тем или иным элементом при высокой температуре и термическое воздействие, в результате которых происходит изменение химического состава, микроструктуры и свойств поверхностных слоев деталей.

Химико-термическая обработка включает в себя цементацию, азотирование, цианирование, алитирование, силицирование и т.д. Насыщение поверхностного слоя происходит при нагреве детали до определенной температуры в среде, легко выделяющей насыщающий элемент в активном состоянии, и выдержке при этой температуре. Среда, выделяющие насыщающий элемент, могут быть газообразными, жидкими и твердыми.

В отличие от поверхностной закалки при химико-термической обработке разница в свойствах достигается не только изменением структуры металла, но и его химического состава. ХТО не зависит от формы деталей. Она обеспечивает получение упрочненного слоя одинаковой толщины по всей поверхности. ХТО дает более существенное различие в свойствах поверхности и сердцевины деталей. ХТО изменяет химический состав и структуру поверхностного слоя, а поверхностная закалка — только структуру. Вместе с тем ХТО уступает поверхностной закалке по производительности.

Основными элементарными процессами любого вида химико-термической обработки являются следующие.

1. *Диссоциация* — выделение насыщающего элемента в активном атомарном состоянии в результате разложения исходных веществ:  $2CO \rightleftharpoons CO_2 + C$ ;  $2NH_3 \rightleftharpoons 3H_2 + 2N$  и т.д. Степень распада молекул газа (%) называют *степенью диссоциации*.

2. *Абсорбция* — захват поверхностью металла свободных атомов насыщающего элемента. Атомы металла, находящиеся на поверхности, имеют направленные наружу свободные связи. При подаче к поверхности детали атомов насыщающего элемента эти свободные связи вступают в действие, что уменьшает поверхностную энергию металла. С повышением температуры абсорбционная способность металла увеличивается. Развитию процесса абсорбции способствует способность диффундирующего элемента образовывать с основным металлом твердые растворы или химические соединения.

3. *Диффузия* — проникновение насыщающего элемента в глубь металла. В результате абсорбции химический состав поверхностного слоя меняется, образуя градиент концентраций насыщающего элемента в поверхностных и нижележащих слоях. Диффузия протекает легче при образовании твердых растворов внедрения (C, N), чем твердых растворов замещения (Al, Cr, Si). Поэтому при диффузионной металлизации процесс ведут при более высоких температурах.

Поверхностный слой детали, отличающийся от исходного материала по химическому составу, называется *диффузионным слоем*. Материал детали под диффузионным слоем с неизменившимся химическим составом называется *сердцевинной*.

### 3.2. Цементация стали

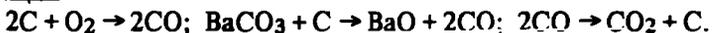
Цементацией называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом. Цель цементации — получение на поверхности детали высокой твердости и износостойкости в сочетании с вязкой сердцевиной. На цементацию поступают механически обработанные детали с припуском на шлифование 50—100 мкм. В тех случаях, когда цементации подвергается только часть детали, остальные участки защищают либо специальными огнеупорными обмазками, либо тонким слоем (20—40 мкм) меди, нанесенным электролитическим способом.

Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (0,1—0,2 %). На поверхности концентрация углерода достигает 1,0 %. Глубина цементованного слоя (при содержании углерода порядка 0,4 %) обычно лежит в пределах 0,5—2,5 мм. Для достижения высокой

твердости поверхности и вязкой сердцевины после цементации всегда проводится закалка с низким отпускком.

Различают два основных вида цементации: в твердой и газовой средах. Среда, поставляющая углерод к поверхности детали, подвергаемой цементации, называется *карбюризатором*.

Твердая цементация производится в специальных стальных ящиках, в которых детали укладываются попеременно с карбюризатором. Ящики закрываются крышками и замазываются огнеупорной глиной для предотвращения утечки газов. В качестве твердого карбюризатора используют дубовый или березовый древесный уголь и активизаторы  $\text{BaCO}_3$  или  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . При нагреве до температуры 930—950 °С идут реакции



Образующиеся активные атомы углерода диффундируют в решетку  $\gamma$ -железа.

Процесс цементации в твердом карбюризаторе проводят выше  $A_{c3}$ , когда сталь находится в аустенитном состоянии, в котором растворимость углерода выше. В течение 8—10 ч образуется слой толщиной около 1 мм.

Газовая цементация является основным процессом массового производства. Стальные детали нагревают в газовых смесях, содержащих  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и др. Газовая цементация проходит быстро, так как не требует времени на прогрев ящика и карбюризатора. Слой толщиной 1 мм образуется за 6—7 ч.

После цементации характерно неравномерное распределение углерода по сечению детали. Полученный в результате цементации наружный слой содержит более 0,8 % С и имеет структуру заэвтектоидных сталей — перлит и вторичный цементит. Глубже лежит слой эвтектоидного состава с перлитной структурой, а далее — слой с феррито-перлитной структурой. Кроме того, после цементации из-за длительной выдержки при высоких температурах стали приобретают крупнозернистость.

Эти обстоятельства необходимо учитывать при назначении обязательной после цементации термической обработки. Целью термической обработки является упрочнение поверхности с одновременным измельчением зерна и получением вязкой сердцевины.

В зависимости от назначения детали применяют различные варианты термической обработки (рис. 117).

Менее ответственные детали подвергают закалке непосредственно с цементационного нагрева с последующим низким отпускком (рис. 117, а). Крупное зерно аустенита, выросшее в результате длительной цементации, дает грубокристаллический мартенсит отпуска в поверхностном

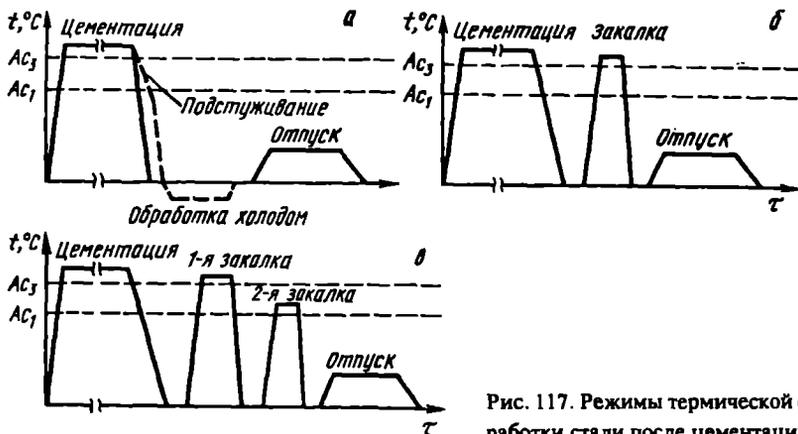


Рис. 117. Режимы термической обработки стали после цементации

слое и крупнозернистую феррито-перлитную структуру в сердцевине детали. Эти недостатки в определенной мере устраняются при использовании наследственно мелкозернистых сталей, применения газовой цементации, сокращающей время пребывания стали при высокой температуре. Использование подстуживания при закалке до  $750\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  снижает внутренние напряжения, а обработка холодом уменьшает количество остаточного аустенита в цементованном слое.

При более высоких требованиях к структуре детали после цементации подвергают охлаждению на воздухе, однократной закалке с нагрева выше  $A_{c3}$  и низкому отпуску (рис. 117, б). При этом в сердцевине и на поверхности детали происходит перекристаллизация и измельчение зерна. Однако в поверхностном высокоуглеродистом слое происходит некоторый перегрев, так как оптимальный закалочный нагрев заэвтектоидных сталей — это нагрев выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{cm}$ .

Особо ответственные детали после цементации подвергают двойной закалке с низким отпуском (рис. 117, в). При первой закалке с температуры на  $30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше  $A_{c3}$  происходит перекристаллизация сердцевинной детали с образованием мелкого аустенитного зерна, обеспечивающего мелкозернистость продуктов распада. Одновременно при этом цементитная сетка в поверхностном слое растворяется. При нагреве под вторую закалку мартенсит, полученный после первой закалки, претерпевает отпуск и при этом образуются глобулярные карбиды, увеличивающие твердость поверхностного заэвтектоидного слоя. Кроме того, при второй закалке с температуры выше  $A_{c1}$  на  $30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$  обеспечивается мелкое зерно в поверхностном слое.

После такой термообработки поверхностный заэвтектоидный слой будет иметь структуру отпущенного мартенсита с включениями глобу-

лярных карбидов. Структура сердцевины определяется химическим составом стали. При цементации углеродистой стали из-за низкой прокаливаемости сердцевина имеет феррито-перлитную структуру.

Легирующая сталь при цементации позволяет получать в сердцевине структуру сорбита, троостита или даже мартенсита, но благодаря низкой концентрации углерода сердцевина будет иметь высокую ударную вязкость.

### 3.3. Азотирование стали

Азотированием называется процесс насыщения поверхностного слоя азотом. Целью азотирования является создание поверхностного слоя с особо высокой твердостью, износостойкостью, повышенной усталостной прочностью и сопротивлением коррозии в водной среде, паровоздушной и влажной атмосфере.

Процесс азотирования состоит в выдержке в течение довольно длительного времени (до 60 ч) деталей в атмосфере аммиака при 500—600 °С. При более высокой температуре образуются более крупные нитриды, и твердость уменьшается. Азотирование проводят в стальных, герметически закрытых ретортах, в которые поступает аммиак. Реторту помещают в нагревательную печь. Поступающий из баллонов аммиак при нагреве разлагается на азот и водород:  $\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H} + \text{N}$ .

Активные атомы азота проникают в решетку  $\alpha$ -железа и диффундируют в ней. Образующиеся при этом нитриды железа еще не обеспечивают достаточно высокой твердости. Высокую твердость азотированному слою придают нитриды легирующих элементов, прежде всего хрома, молибдена, алюминия. При совместном легировании стали хромом, молибденом, алюминием твердость азотированного слоя по Виккерсу достигает  $HV 1200$ , в то время как после цементации и закалки твердость  $HV 900$ .

Благодаря высокой твердости нитридов легирующих элементов азотированию обычно подвергают легированные среднеуглеродистые стали. К таким сталям относятся 38Х2МЮА, 35ХМА, более дешевая 38Х2Ю6, а также некоторые штамповые стали, например, 3Х2В8, 5ХНМ.

Азотированию обычно подвергают готовые изделия, прошедшие механическую и окончательную термическую обработку (закалку с высоким отпуском 600—675 °С, температура которого выше максимальной температуры азотирования). После такой термической обработки металл приобретает структуру сорбита, имеющую высокую прочность и вязкость. Эта структура сохраняется в сердцевине детали и после азотирования. Высокая прочность металлической основы необходима для того, чтобы тонкий и хрупкий азотированный слой не продавливался при работе детали. Высокая твердость после азотирования достигается сразу

и не требует последующей термической обработки. Это важное преимущество процесса азотирования.

Участки, не подлежащие азотированию, защищают нанесением тонкого слоя олова (10—15 мкм) электролитическим методом или жидкого стекла. Глубина азотированного слоя составляет 0,3—0,6 мм. Из-за сравнительно низких температур скорость азотирования значительно меньше, чем скорость цементации и составляет всего 0,01 мм/ч и менее.

По сравнению с цементацией азотирование имеет ряд преимуществ и недостатков. Преимуществами азотирования являются более высокая твердость и износостойкость поверхностного слоя, сохранение им высоких свойств при нагреве до 500 °С, а также высокие коррозионные свойства. В азотированном слое создаются остаточные напряжения сжатия, что повышает усталостную прочность. Кроме того, после азотирования не требуется закалки, что позволяет избежать сопутствующих закалке дефектов.

Недостатками азотирования по сравнению с цементацией является более высокая длительность процесса и необходимость применения дорогостоящих легированных сталей. Поэтому азотирование применяют в случае изготовления более ответственных деталей, от которых требуется особо высокое качество поверхностного слоя.

Азотирование применяют в машиностроении для изготовления измерительного инструмента, гильз, цилиндров, зубчатых колес, шестерен, втулок, коленчатых валов и др.

### *3.4. Цианирование стали*

Цианированием (нитроцементацией) называется процесс совместного насыщения поверхности стальных деталей азотом и углеродом. Основная цель цианирования состоит в повышении твердости и износостойкости деталей.

При цианировании нагрев осуществляется либо в расплавленных солях, содержащих цианистые соли NaCN или KCN, либо в газовой среде, состоящей из смеси CH<sub>4</sub> и NH<sub>3</sub>. Состав и свойства цианированного слоя зависят от температуры проведения цианирования.

В зависимости от температуры процесса различают высокотемпературное (850—950 °С) и низкотемпературное (500—600 °С) цианирование. Чем выше температура цианирования, тем меньше насыщение поверхностного слоя азотом и больше углеродом. Совместная диффузия углерода и азота протекает быстрее, чем диффузия каждого из этих элементов в отдельности.

При низкотемпературном цианировании поверхностный слой насыщается преимущественно азотом. Низкотемпературному цианированию обычно подвергают окончательно изготовленный и заточенный

режущий инструмент из быстрорежущих марок стали с целью повышения его износостойкости и красностойкости. После низкотемпературного цианирования отпуск не производится. Глубина цианированного слоя 0,01—0,04 мм с твердостью *HV* 1000.

После высокотемпературного цианирования на глубину 0,6—1,8 мм в течение 3—10 ч детали подвергают закалке и низкому отпуску. Твердость после термообработки составляет *HRC* 59—62.

По сравнению с цементированным цианированным слой имеет несколько более высокую твердость и износостойкость, а также более высокое сопротивление коррозии. В ваннах можно подвергать цианированию мелкие детали, например детали часовых механизмов, для которых достаточно получение слоя небольшой толщины.

Недостатком цианирования является более высокая стоимость процесса, связанная с необходимостью строгого соблюдения правил техники безопасности из-за высокой токсичности цианистых солей.

### 3.5. Диффузионная металлизация

Диффузионной металлизацией называется процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев стали различными металлами. Детали, поверхность которых насыщена алюминием, хромом, кремнием, бором, приобретает ряд ценных свойств, например жаростойкость, коррозионную стойкость, повышенную износостойкость и твердость.

Металлизация бывает твердая, жидкостная и газовая. При жидкостной металлизации стальную деталь погружают в расплав металла. При твердой и газовой металлизации насыщение происходит с помощью летучих соединений хлора с металлом  $AlCl_3$ ,  $CrCl_3$ ,  $SiCl_4$ , которые при температуре 100—1100 °С вступают в обменную реакцию с железом с образованием диффундирующего элемента в активном состоянии.

При алитировании, т.е. насыщении алюминием, которое обычно проводится в порошкообразных смесях или расплавленном алюминии, детали приобретают повышенную коррозионную стойкость благодаря образованию плотной пленки  $Al_2O_3$ , предохраняющей металл от окисления. Толщина слоя составляет 0,2—0,5 мм.

При хромировании обеспечивается высокая стойкость против газовой коррозии до 800 °С, а также стойкость против коррозии в воде, морской воде и кислотах. Толщина слоя составляет до 0,2 мм.

Силицирование, т.е. насыщение кремнием, придает высокую кислотупорность в соляной, серной и азотной кислотах и применяется для деталей, используемых в химической и нефтяной промышленности. Толщина слоя колеблется в пределах 0,3—1,0 мм.

Борирование придает поверхностному слою исключительно высокую твердость (до *HV* 1800—2000), износостойкость и устойчивость

против коррозии в различных средах. Борирование часто проводят при электролизе расплавленных солей, например буры  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$ , когда стальная деталь служит катодом. При температуре около  $150^\circ\text{C}$  и выдержке 2—5 ч на поверхности образуется твердый борид железа и толщина слоя достигает 0,1—0,2 мм.

## Глава 9 ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

### 1. Влияние легирующих элементов

Легирующими элементами называют элементы, специально вводимые в сталь для изменения ее строения и свойств. Соответственно стали, содержащие легирующие элементы, называются легированными. При этом если содержание кремния превышает 0,4 % или марганца 0,8 %, то они также относятся к легирующим элементам.

Концентрация некоторых легирующих элементов может быть очень малой. В количестве до 0,1 % вводят Nb, Ti, а содержание бора обычно не превышает 0,005 %. Легирование стали, когда концентрация элемента составляет около 0,1 % и менее, принято называть микролегированием.

Появление и широкое распространение легированных сталей обусловлено непрерывным ростом требований, предъявляемых к материалам по мере прогресса техники. Легирование производится с целью изменения механических (прочности, пластичности, вязкости), физических (электропроводности, магнитных характеристик, радиационной стойкости) и химических (коррозионной стойкости в разных средах) свойств.

Необходимый комплекс свойств обычно обеспечивается не только легированием, но и термической обработкой, позволяющей получать наиболее оптимальную структуру металла. Легированные стали дороже углеродистых и поэтому применять их без термической обработки неэкономично.

Применение легирующих элементов существенно влияет на себестоимость стали. При использовании тех или иных легирующих элементов руководствуются не только их влиянием на свойства стали, но и экономическими соображениями, в частности распространенностью в земной коре, стоимостью добычи и получения, а также дефицитностью.

Основными легирующими элементами являются Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V, Al, Cu, Nb, В. Часто сталь легируют не одним, а несколькими

элементами, например Cr и Ni, получая хромоникелевую сталь, Cr и Mn — хромомарганцевую сталь, Cr, Ni, Mo, V — хромоникельмолибденованадиевую сталь.

Легирующие элементы, вступая во взаимодействие с железом и углеродом, могут участвовать в образовании различных фаз в легированных сталях:

легированного феррита — твердого раствора легирующего элемента в Fe $\alpha$ ;

легированного аустенита — твердого раствора легирующего элемента в Fe $\gamma$ ;

легированного цементита — твердого раствора легирующего элемента в цементите, или при увеличении содержания легирующего элемента сверх определенного предела — специальных карбидов.

### 1.1. Влияние легирующих элементов на свойства феррита

В большинстве конструкционных сталей феррит при температуре эксплуатации является основной структурной составляющей, занимающей не менее 90 % объема металла. Поэтому от свойств феррита во многом зависят свойства стали в целом. Чем больше разница в атомных размерах железа и легирующего элемента, тем больше искажение кристаллической решетки, тем выше твердость, прочность, но ниже пластичность и особенно вязкость феррита.

Из рис. 118 видно, что все основные легирующие элементы повышают твердость феррита. При этом хром и особенно никель почти не уменьшают вязкости стали. Никель наиболее сильно снижает порог хладноломкости. Кроме того, никель, хром, марганец и некоторые другие элементы, хорошо растворимые в аустените, повышают его устойчивость

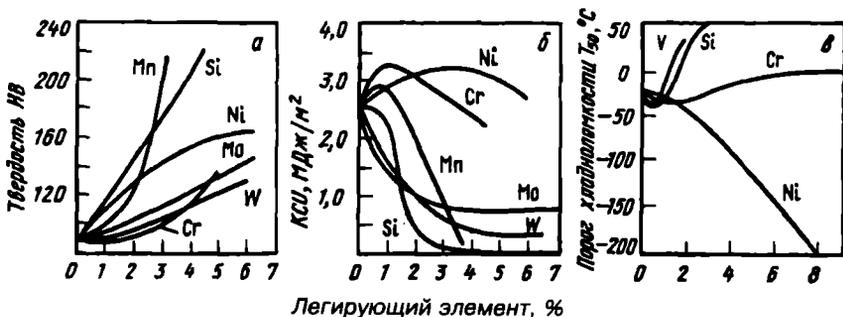


Рис. 118. Влияние легирующих элементов на свойства медленно охлажденного (нормализованного) феррита и порог хладноломкости:

а — твердость; б — ударная вязкость; в — порог хладноломкости (по А.П. Гуляеву)

при охлаждении, тем самым увеличивая прокаливаемость стали. Наиболее эффективно никель и хром увеличивают прокаливаемость стали при одновременном введении в сталь, т.е. при так называемом комплексном легировании.

Возможность достижения высокой прочности, пластичности, вязкости, прокаливаемости делает никель и хром важнейшими легирующими элементами в конструкционных сталях.

### *1.2. Карбиды в легированных сталях*

Карбидообразующими легирующими элементами называют элементы, обладающие большим, чем железо, сродством к углероду. По возрастанию сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз карбидообразующие элементы располагаются в следующий ряд: Fe—Mn—Cr—Mo—W—Nb—Zr—Ti. Чем устойчивее карбид, тем труднее он растворяется в аустените и выделяется при отпуске.

При введении сравнительно небольших количеств легирующего карбидообразующего элемента в сталь, он сначала растворяется в цементите, замещая часть атомов железа, например (Fe, Mn)<sub>3</sub>C. При этом образуется легированный цементит. С увеличением содержания легирующего элемента сверх предела растворимости образуются специальные карбиды типа Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Mn<sub>3</sub>C и др.

По строению кристаллической решетки карбиды бывают двух типов. К карбидам первой группы относятся Fe<sub>3</sub>C, Mn<sub>3</sub>C, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, имеющие сложные кристаллические решетки. Такие карбиды недостаточно прочны и при нагреве до высоких температур распадаются с образованием твердого раствора легирующих элементов в аустените.

Карбиды второй группы Mo<sub>2</sub>C, WC, VC, TiC имеют простые кристаллические решетки, которые характеризуются большой прочностью и не распадаются при нагреве. Все карбиды обладают высокой твердостью, но твердость карбидов второй группы несколько выше.

С повышением дисперсности карбидов растет твердость и прочность стали.

### *1.3. Влияние легирующих элементов на превращения в стали*

Большинство легирующих элементов замедляют превращение аустенита в перлитной области. Линии превращения на диаграмме изотермического распада смещаются вправо (рис. 119). Карбидообразующие элементы вносят в кинетику изотермического превращения не только количественные, но и качественные изменения. Они замедляют сорбитное и трооститное превращения, не меняя или даже ускоряя бейнитное. Образуется второй максимум скорости изотермического распада, разде-

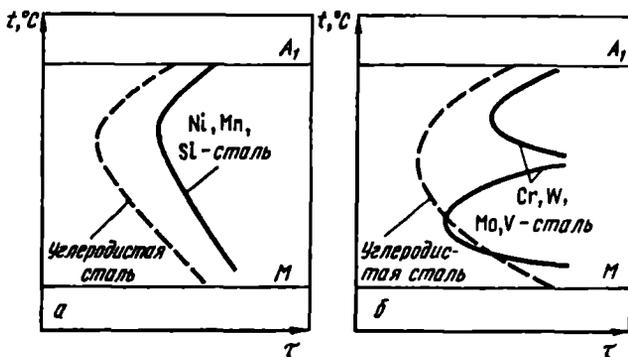


Рис. 119. Схемы диаграмм изотермического превращения аустенита сталей, легированных некарбидообразующими (а) и карбидообразующими (б) элементами

ленный с первым областью относительной устойчивости переохлажденного аустенита.

Смещение линий превращения аустенита вправо при введении легирующих элементов в сталь способствует снижению критической скорости закалки, улучшению прокаливаемости. Улучшение прокаливаемости при закалке углеродистой легированной стали позволяет проводить закалку не в воде, а в масле или даже на воздухе, что снижает коробление и опасность образования закалочных трещин. Наиболее сильно улучшают прокаливаемость Ni, Mo, Cr, Mn. Карбидообразующие элементы увеличивают прокаливаемость только в том случае, если они при нагреве растворяются в аустените. Труднорастворимые карбиды вольфрама, ванадия, ниобия, титана при обычных температурах закалки  $830\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$  не растворяются в аустените. Они растворяются только при более высоком нагреве. Эти карбиды, наоборот, снижают прокаливаемость, так как служат готовыми центрами кристаллизации при образовании перлита.

На прокаливаемость оказывают положительное влияние микродобавки бора в количестве  $0,001\text{--}0,005\text{ }%$ . Располагаясь по границам зерен аустенита, бор способствует его стабилизации.

Легирующие элементы могут повышать или понижать температуру мартенситного превращения. Алюминий и кобальт повышают температуру мартенситного превращения, уменьшая количество остаточного аустенита, кремний не влияет, а марганец, хром, никель и молибден — понижают температуру мартенситного превращения. Например, марганец в количестве до  $5\text{ }%$  снижает точку  $M_n$  до  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , следовательно при охлаждении стали с  $5\text{ }%$  Mn и более при комнатной температуре можно зафиксировать аустенитное состояние.

#### 1.4. Особенности закалки и отпуска легированных сталей

Температура нагрева под закалку легированных сталей обычно выше, чем углеродистых. Диффузионные процессы в легированных сталях протекают медленнее, так как углерод образует твердые растворы внедрения, а легирующие элементы — замещения. Нагрев под закалку до более высокой температуры сопровождается более длительной выдержкой при этой температуре. Это способствует диссоциации карбидов и лучшей растворимости легирующих элементов в аустените.

Нагрев легированных сталей до более высокой температуры и более длительная выдержка при закалке не сопровождается ростом зерна. Легирующие элементы, как правило, снижают склонность к росту зерен при нагреве.

После закалки структура состоит из легированного мартенсита, содержащего не только углерод, но и легирующие элементы.

Из-за пониженной теплопроводности легированных сталей их нагревают и охлаждают медленнее. Благодаря этому снижаются внутренние напряжения, которые могут приводить к короблению деталей и трещинам. Закалку легированных сталей обычно производят в масле.

Из-за затрудненной диффузии атомов легирующих элементов процессы отпуска протекают медленнее и отпуск обычно проводится при более высоких температурах.

Все легирующие элементы, особенно хром, молибден, кремний, затрудняют процесс распада мартенсита при нагреве. Структура отпущенного мартенсита может сохраняться при 400—600 °С. Легированные карбиды коагулируют также при более высоких температурах.

При одинаковой температуре отпуска прочность и пластичность легированных сталей выше, чем углеродистых.

## 2. Классификация легированных сталей

Легированные стали классифицируют по структуре в равновесном состоянии, по структуре после охлаждения на воздухе, по количеству легирующих элементов и по назначению.

По равновесной структуре стали делятся на доэвтектоидные стали с избыточным ферритом в структуре, эвтектоидные с перлитной структурой, заэвтектоидные с избыточными карбидами, ледебуритные стали, в структуре которых присутствуют первичные карбиды, выделившиеся из жидкой стали. Последнее обстоятельство объясняется тем, что легирующие элементы сдвигают влево точки  $S$ ,  $E$  диаграммы железо—углерод. Поэтому граница между перечисленными сталями проходит при меньшем содержании углерода.

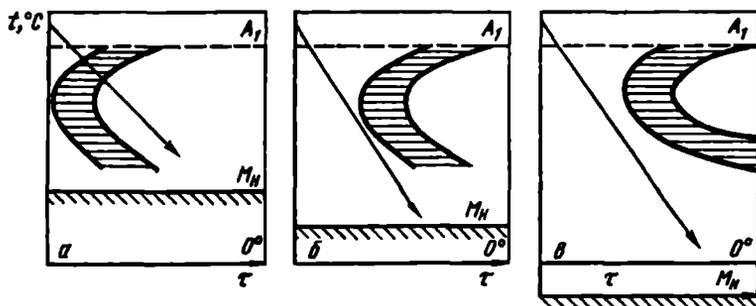


Рис. 120. Схемы диаграмм изотермического превращения аустенитных сталей разных классов:

*a* — перлитный; *b* — мартенситный; *v* — аустенитный

Учитывая, что некоторые элементы резко сужают или расширяют область  $\gamma$ -железа, кроме этих групп сталей различают аустенитные и ферритные стали.

Углеродистые стали бывают первых трех классов, легированные — всех шести классов.

По структуре после охлаждения на воздухе (рис. 120) различают перлитные стали, характеризующиеся невысокой устойчивостью переохлажденного аустенита; мартенситные стали с высокой устойчивостью аустенита и аустенитные стали, сохраняющие аустенитную структуру при комнатной температуре.

Легировующие элементы сдвигают вправо кривые изотермического превращения и понижают температуру мартенситного превращения. Одинаковая скорость охлаждения при различном содержании легирующих элементов приводит к различным структурам стали. Стали перлитного класса содержат сравнительно небольшие количества легирующих элементов, содержание легирующих увеличивается при переходе к мартенситному и особенно аустенитному классу.

По количеству легирующих элементов различают низколегированные стали, содержащие до 2,5 % легирующих, среднелегированные — до 2,5—10 % и высоколегированные стали, содержащие более 10 % легирующих элементов.

По назначению различают три группы сталей: конструкционные (машиностроительные и строительные), инструментальные (штамповые, для режущего и мерительного инструмента) и стали с особыми физическими и химическими свойствами (коррозионностойкие, жаропрочные, электротехнические, магнитные и др.).

### 3. Маркировка легированных сталей

В России принята буквенно-цифровая система маркировки легированных сталей. Каждая марка стали содержит определенное сочетание букв и цифр. Легирующие элементы обозначают следующими буквами русского алфавита: Х — хром, Н — никель, В — вольфрам, М — молибден, Ф — ванадий, Т — титан, Ю — алюминий, Д — медь, Г — марганец, С — кремний, К — кобальт, Ц — цирконий, Р — бор, Б — ниобий. Буква А в середине марки стали показывает содержание азота, а в конце — сталь высококачественная.

Для конструкционных марок стали первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента. Если содержание легирующего элемента больше 1 %, то после буквы указывается его среднее значение в целых процента. Если содержание легирующего элемента около 1 % или меньше, то после соответствующей буквы цифра не ставится.

В качестве основных легирующих элементов в конструкционных сталях применяют хром до 2 %, никель 1—4,5 %, марганец до 2 %, кремний 0,6—1,2 %. Такие легирующие элементы как Мо, W, V, Ti обычно вводят в сталь в сочетании с Cr, Ni с целью дополнительного улучшения тех или иных физико-механических свойств. В конструкционных сталях эти элементы обычно содержатся в следующих количествах: 0,2—0,4 % Мо; 0,5—1,2 % W; 0,1—0,3 % V; 0,1—0,2 % Ti.

Например, сталь 18ХГТ содержит: 0,18 % С, 1 % Cr, 1 % Mn, около 0,1 % Ti; сталь 38ХНЗМФА — 0,38 % С, 1,2—1,5 % Cr, 3 % Ni, 0,3—0,4 % Мо, 0,1—0,2 % V; сталь 30ХГСА — 0,30 % С, 0,8—1,1 % Cr, 0,9—1,2 % Mn, 0,8—1,2 Si; сталь 03Х13АГ19 — 0,03 % С, 13 % Cr, 0,2—0,3 % N, 19 % Mn.

В инструментальных сталях в начале обозначения марки стали ставится цифра, показывающая содержание углерода в десятых долях процента. Начальную цифру опускают, если содержание углерода около 1 % или более.

Например, сталь 3Х2В8Ф содержит: 0,3 % С, 2 % Cr, 8 % W, 0,2—0,5 % V; сталь 5ХНМ — 0,5 % С, 1 % Cr, 1 % Ni, до 0,3 % Мо; сталь ХВГ — 1 % С, 1 % Cr, 1 % W, 1 % Mn.

Для некоторых групп сталей принимают дополнительные обозначения. Марки автоматных сталей начинаются с буквы А, подшипниковых — с буквы Ш, быстрорежущих — с буквы Р, электротехнических — с буквы Э, магнито-твердых — с буквы Е.

Нестандартные легированные стали, выпускаемые заводом «Электросталь», обозначают сочетанием букв ЭИ (электросталь исследовательская) или ЭП (электросталь пробная). Легированную сталь, выпускаемую Златоустовским металлургическим заводом, маркируют буква-

ми ЗИ. Во всех случаях после сочетания букв идет порядковый номер стали, например ЭИ417, ЭП67, ЗИ8 и т.д. После освоения марки металлургическими и машиностроительными заводами условные обозначения заменяет общепринятая маркировка, отражающая химический состав стали.

## Глава 10 КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

### 1. Характеристика конструкционных сталей

Конструкционные стали должны обладать высокой конструктивной прочностью, обеспечивать длительную и надежную работу конструкции в условиях эксплуатации. Поэтому особенность требований, предъявляемых к конструкционным материалам, состоит в необходимости обеспечения комплекса высоких механических свойств, а не одной какой-либо характеристики.

Материалы, идущие на изготовление конструктивных элементов, деталей машин и механизмов, должны наряду с высокой прочностью и пластичностью хорошо сопротивляться ударным нагрузкам, обладая запасом вязкости. При знакопеременных нагрузках конструкционные материалы должны обладать высоким сопротивлением усталости, а при трении — сопротивлением износу. Во многих случаях необходимо сопротивление коррозии. Учитывая, что в деталях всегда имеются дефекты, являющиеся концентраторами напряжений, конструкционные материалы должны обладать высоким сопротивлением хрупкому разрушению и распространению трещин.

Помимо высокой надежности и конструктивной прочности конструкционные материалы должны иметь высокие технологические свойства — хорошие литейные свойства, обрабатываемость давлением, резанием, хорошую свариваемость. Конструкционные материалы должны быть дешевы и не содержать дефицитных легирующих элементов.

Из всех материалов, применяемых в настоящее время и прогнозируемых в будущем, только сталь позволяет получать сочетание высоких значений различных механических характеристик и хорошую технологичность при сравнительно невысокой стоимости. Поэтому сталь является основным и наиболее распространенным конструкционным материалом.

Легирование позволяет повысить уровень механических свойств. Основными преимуществами легированных конструкционных сталей

перед углеродистыми являются более высокая прочность за счет упрочнения феррита и большей прокаливаемости, меньший рост аустенитного зерна при нагреве и повышенная ударная вязкость, более высокая прокаливаемость и возможность применения более мягких охладителей после закалки, устойчивость против отпуска за счет торможения диффузионных процессов. Отпуск при более высокой температуре дополнительно снижает закалочные напряжения. Легированные стали обладают более высоким уровнем механических свойств после термической обработки. Поэтому детали из легированных сталей, как правило, должны подвергаться термической обработке.

Различают следующие виды конструкционных сталей: 1) углеродистые, в том числе автоматные стали; 2) строительные; 3) цементуемые; 4) улучшаемые; 5) высокопрочные; 6) рессорно-пружинные; 7) подшипниковые; 8) износостойкие.

*Автоматные стали* применяют для массового изготовления крепежа на станках-автоматах. Основное требование к ним — хорошая обрабатываемость резанием, достигаемая за счет увеличения содержания серы и фосфора до 0,1—0,2 %, а также добавления селена и свинца. Маркируются автоматные стали буквой А и двумя цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента: А12, А20, А30.

## 2. Стали для строительных конструкций

Эта группа сталей содержит относительно малые количества углерода: 0,1—0,25 %. По сравнению с углеродистыми сталями более высокая прочность строительных низколегированных сталей достигается упрочнением феррита за счет легирования сравнительно малыми количествами кремния и марганца, а также хрома, никеля, меди и некоторых других элементов.

Конструкционные низколегированные стали в горячекатаном или нормализованном состоянии применяют для строительных конструкций, армирования железобетона, магистральных нефте- и газопроводов. Для изготовления деталей машин их применяют сравнительно редко.

Детали строительных конструкций обычно соединяют сваркой. Поэтому основным требованием к строительным сталям является хорошая свариваемость. Это означает, что сталь при сварке не должна давать горячих и холодных трещин и свойства сварного соединения (металла шва и зоны термического влияния) не должны существенно отличаться от свойств основного металла.

Склонность стали к образованию горячих и холодных трещин зависит от содержания углерода. Горячие трещины образуются в сварном

шве в период кристаллизации. Образованию горячих трещин способствует расширение интервала кристаллизации металла шва. Интервал кристаллизации растет с увеличением содержания углерода. Металл шва и околошовной зоны нагревается выше критических точек. При охлаждении протекает процесс распада аустенита, сопровождающийся объемными изменениями. Чем выше содержание углерода, тем выше объемные изменения, тем больше опасность образования холодных трещин.

Поэтому стали, используемые для изготовления строительных конструкций, не должны содержать более 0,25 % С.

Строительные углеродистые стали обыкновенного качества марок Ст 2, Ст 3 имеют предел текучести  $\sigma_{0,2} = 240$  МПа. При содержании 1,5 % Мп и 0,7 % Si предел текучести увеличивается до 360 МПа, т.е. в 1,5 раза.

К низколегированным строительным сталям относятся стали марок 14Г2, 17ГС, 14ХГС, 15ХСНД. Сталь 15ХСНД, содержащая никель и медь, работает в конструкциях при температурах до  $-60$  °С без перехода в хрупкое состояние. Кроме того, введение этих элементов увеличивает коррозионную стойкость стали в атмосферных условиях.

Введение в сталь небольших добавок ванадия и ниобия (до 0,1 %) вместе или раздельно обеспечивает дополнительное упрочнение за счет образования карбонитридов этих элементов и измельчения зерна. К сталям такого типа относятся низколегированные стали марок 14Г2АФ, 17Г2АФБ и другие с  $\sigma_{0,2} = 450$  МПа после нормализации. Такие стали используют в строительстве и машиностроении в виде листов, сортового фасонного проката для изготовления сварных конструкций без дополнительной термической обработки.

Для армирования обычного и предварительно напряженного железобетона используют гладкий или периодический прокат из более прочных сталей с повышенным (до 0,3 %) содержанием углерода: 25Г2С, 30ХГСА.

Применение в строительных конструкциях более прочных низколегированных сталей вместо углеродистых дает возможность снизить расход металла на 15—25 %. Несмотря на несколько более высокую стоимость их использование экономически целесообразно.

Дополнительное повышение механических свойств и снижение порога хладноломкости может быть достигнуто с помощью контролируемой прокатки. Контролируемая прокатка состоит в проведении деформации, особенно в конце процесса, при более низкой температуре (800—850 °С) с увеличением степени деформации в последних проходах. Эффект контролируемой прокатки состоит в значительном измельчении зерна, а также дисперсном упрочнении частицами карбонитридов.

### 3. Цементуемые стали

При работе деталей под действием динамических нагрузок в условиях поверхностного износа для их изготовления применяют низкоуглеродистые стали, содержащие обычно не более 0,2 % С, подвергая их цементации, закалке и низкому отпуску.

Твердость поверхности готовой детали должна составлять около *HRC* 20—40. В отличие от слабопрокаливающихся углеродистых сталей при цементации и термообработке легированных сталей происходит дополнительное упрочнение сердцевины. Это упрочнение тем больше, чем более легирована сталь.

В зависимости от степени упрочняемости сердцевины различают три группы цементуемых сталей: с неупрочняемой, слабо- и сильноупрочняемой сердцевиной (табл. 10).

К первой группе относятся углеродистые стали марок 10, 15, 20. Их применяют для малоответственных деталей с неупрочняемой сердцевиной и деталей небольших размеров. Под цементованным слоем при закалке аустенит превращается в феррито-перлитную смесь.

Вторую группу составляют низколегированные хромистые стали марок 15Х, 20Х, имеющие слабоупрочняемую сердцевину. Дополнительное легирование малыми добавками ванадия (сталь 15ХФ) позволяет получить более мелкое зерно, что улучшает пластичность и вязкость стали.

Стали третьей группы используют для изготовления деталей, испытывающих значительные ударные нагрузки, имеющих большое сечение или сложную конфигурацию, или для деталей, подвергающихся действию больших знакопеременных напряжений. В состав этих сталей вводят никель: 20ХН, 12ХНЗА, 12Х2Н4А. Вследствие его дефицитности никель иногда заменяют марганцем, вводя кроме того небольшое количество титана или ванадия для измельчения зерна (18ХГТ).

Легирование хромоникелевых сталей вольфрамом или молибденом (например, сталь марки 18Х2Н4ВА или 18Х2Н4МА) дополнительно стабилизирует переохлажденный аустенит, а следовательно, еще больше увеличивает прокаливаемость стали. В результате закалки в масле сердцевина деталей приобретает структуру мартенсита. Такие стали применяют для крупных тяжело нагруженных деталей типа зубчатых колес, осей и др. Эти детали устойчивы к динамическим нагрузкам.

### 4. Улучшаемые стали

Улучшаемыми конструкционными сталями называют среднеуглеродистые стали, содержащие 0,3—0,5 % С и легирующие элементы обычно в количестве не более 5 %, которые используют после операции так называемого улучшения, состоящей из закалки и высокого отпуска.

Закалку таких сталей обычно проводят в масле. Температура отпуска составляет 550—650 °С.

После термообработки улучшаемые стали имеют структуру сорбита, хорошо воспринимающего ударные нагрузки.

Улучшаемые стали имеют высокую прочность, вязкость, малую чувствительность к концентраторам напряжений и хорошую прокаливаемость.

В случае сквозной прокаливаемости после одинаковой термообработки свойства различных марок улучшаемых сталей близки между собой. Поэтому выбор той или иной марки улучшаемой стали в каждом конкретном случае обусловлен прокаливаемостью стали, сечением детали и сложностью ее конфигурации, наличием концентраторов напряжений.

Улучшаемые стали могут быть условно разбиты на 5 групп. С увеличением номера группы растет степень легирования и размер сечения, в котором достигается сквозная прокаливаемость (табл. 11). В этой таблице порог хладноломкости представляет температура, при которой в изломе ударных надрезанных образцов не менее 50 % волокнистой составляющей.

Обычное содержание кремния в улучшаемых сталях составляет 0,17—0,37 %, марганца 0,5—0,8 %, менее 0,035 % Р и S.

К группе I относятся углеродистые стали марок 35, 40, 45, имеющие критический диаметр  $D_{95}$  (до 10 мм), при котором достигается сквозная прокаливаемость и в структуре присутствует не менее 95 % мартенсита.

Группа II представлена хромистыми сталями марок 30Х, 40Х. Критический диаметр  $D_{95} = 15—20$  мм. Недостатком сталей этой группы является склонность к отпускной хрупкости второго рода. Для них необходимо быстрое охлаждение после отпуска.

В группу III входят хромистые стали, дополнительно легированные еще одним или двумя элементами: 30ХМ, 40ХГ, 30ХГТ ( $D_{95} = 20—25$  мм).

Для увеличения прокаливаемости в хромистые стали дополнительно вводят марганец (40ХГ) и бор (40ХР); молибден (30ХМ) вводят для снижения отпускной хрупкости второго рода.

Высокими свойствами обладают принадлежащие к этой группе стали, называемые хромансилями 20ХГС, 30ХГС. Эти стали хорошо свариваются при высокой прочности  $\sigma_b = 1200$  МПа и  $KCU = 0,4$  МДж/м<sup>2</sup>. Их недостатком является склонность к отпускной хрупкости второго рода.

К группе IV относятся хромоникелевые стали, содержащие до 1,5 % Ni: 40ХН, 40ХНМ. Их критический диаметр  $D_{95} = 40$  мм. Эти стали при пониженной температуре эксплуатации обладают большим запасом вязкости, чем стали предыдущих групп.

Т а б л и ц а 10. Химический состав, %, и механические свойства цементуемых сталей после закалки и низкого отпуска (ГОСТ 1050—88, ГОСТ 4543—71)

Марка стали	С	Mn	Ni	Cr	Прочие	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, $\frac{2}{\text{МДж/м}}$
10 <sup>1)</sup>	0,07—0,14	0,35—0,65	—	$\leq 0,15$	—	205	330	31	55	—
20 <sup>1)</sup>	0,07—0,14	0,35—0,65	—	$\leq 0,25$	—	245	410	25	55	—
15X	0,12—0,18	0,4—0,7	—	0,7—1,0	—	490	690	12	45	0,7
20X	0,17—0,23	0,5—0,8	—	0,7—1,0	—	635	780	11	40	0,6
15XФ	0,12—0,18	0,4—0,7	—	0,8—1,1	0,06—0,12 V	540	740	13	50	0,8
20XН	0,17—0,23	0,4—0,7	1,0—1,4	0,45—0,75	—	590	780	14	50	0,8
18XГТ	0,17—0,23	0,8—1,1	—	1,0—1,3	0,03—0,09 Ti	885	980	9	50	0,8
12XН3А	0,09—0,16	0,3—0,6	2,75—3,15	0,6—0,9	—	685	930	11	55	0,9
12X2Н4А	0,09—0,15	0,3—0,6	3,25—3,65	1,25—1,65	—	930	1130	10	50	0,9

1) Свойства приведены для нормализованного состояния

Т а б л и ц а 11. Химический состав, %, и свойства улучшаемых конструкционных сталей после термообработки (ГОСТ 4543—71)

Группа	Марка стали	С	Mn	Si	Cr	Ni	Прочие легирующие элементы	Порог хладноломкости, T <sub>50</sub> , °C	Критический диаметр, D <sub>95</sub> , мм
I	40	0,37—0,44	—	—	—	—	—	-20	10
II	40X	0,36—0,44	—	—	0,8—1,1	—	—	-40	15
III	30XM	0,26—0,34	—	—	0,8—1,1	—	0,15—0,25 Mo	-50	25
	40XГ	0,36—0,45	0,9—1,2	—	0,9—1,2	—	—	-20	25
	30XГС	0,28—0,35	0,8—1,1	0,9—1,2	0,8—1,1	—	—	-20	25
IV	40XН	0,36—0,44	—	—	0,45—1,75	1,0—1,4	—	-60	35—40
	40XНМ	0,37—0,44	—	—	0,6—0,9	1,2—1,6	0,15—0,25 Mo	-70	50
V	38XН3МФ	0,30—0,42	—	—	1,2—1,5	3,0—3,4	0,35—0,45 Mo 0,1—0,2 V	100	100

Группу V составляют комплекснолегированные стали, содержащие 3—4 % Ni: 38ХНЗМ, 38ХНЗМФА. Эти стали, хотя и сравнительно дороги, относятся к лучшим маркам улучшаемых сталей. Критический диаметр  $D_{95}$  составляет 100 мм и более при низкой склонности к хрупкому разрушению. Из сталей этой группы изготавливаются сложные по конфигурации детали, подвергаемые ударным нагрузкам. Их недостаток состоит в склонности к флокенообразованию и трудности обработки резанием.

## 5. Высокопрочные стали

Высокопрочными называют стали с временным сопротивлением более 1500 МПа. Высокопрочное состояние может быть достигнуто при использовании средне- и высокоуглеродистых комплекснолегированных сталей после закалки и низкого отпуска. Однако при этом происходит снижение пластичности и вязкости стали, что может привести к хрупким разрушениям деталей и конструкций. Применение низкоотпущенных высокопрочных сталей возможно лишь в тех случаях, когда по условиям работы отсутствуют динамические нагрузки.

Современными направлениями достижения высокопрочного состояния без снижения работоспособности конструкций являются такие методы упрочняющей обработки стали, как термомеханическая обработка, и использование таких новых высокопрочных материалов, как мартенситностареющие стали (МСС) и ПНП-стали — (ПНП — пластичность, наведенная превращением).

*Высокопрочные мартенситностареющие стали* характеризуются высокими значениями прочности в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью ( $\sigma_b = 2000$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1200$  МПа). Опасность хрупких разрушений уменьшается благодаря минимальному содержанию углерода (не более 0,03 %).

Упрочнение сталей достигается совмещением двух механизмов упрочнения: мартенситного ( $\gamma \rightarrow \alpha$ )-превращения, сопровождающегося фазовым наклепом, и старения мартенсита. Основным легирующим элементом является никель, содержание которого составляет 17—26 %. Для более эффективного протекания процесса старения мартенсита стали дополнительно легированы титаном, алюминием, молибденом, ниобием, а также кобальтом.

Широкое распространение имеет сталь 03Н18К9М5Т, содержащая: не более 0,03 % С, 17—19 % Ni, 7—9 % Со, 4—6 % Мо, 0,5 % Ti.

Сталь 03Н18К9М5Т подвергают закалке на воздухе при 800—850 °С. После закалки сталь имеет структуру безуглеродистого мартенсита со следующими свойствами:  $\sigma_b = 1200$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1000$  МПа;  $\delta =$

20 %;  $\psi = 75$  %;  $KCU = 2,0$  МДж/м<sup>2</sup>. В закаленном состоянии сталь хорошо обрабатывается давлением, резанием и хорошо сваривается.

Мартенситностареющая сталь получает основное упрочнение при старении, т.е. отпуске при 450—500 °С. Упрочнение при старении связано с выделением из мартенсита дисперсных частиц интерметаллидов типа Ni<sub>3</sub>Ti, NiTi, Fe<sub>2</sub>Mo, Ni<sub>3</sub>(Ti,Al). Если интерметаллидные фазы находятся на стадии предвыделения, когда они еще когерентно связаны с твердым раствором и имеют очень малые размеры, то в этом случае достигается наибольшее упрочнение. Легирование кобальтом увеличивает эффект старения. Механические свойства после старения:  $\sigma_B = 2000$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1800$  МПа,  $\delta = 12$  %,  $\psi = 50$  %,  $KCU = 0,50$  МДж/м<sup>2</sup>. При высокой прочности сталь сохраняет высокое сопротивление хрупкому разрушению. Вязкость разрушения  $K_{Ic}$  мартенситностареющих сталей составляет 50—70 МПа·м<sup>1/2</sup>. При том же значении предела текучести вязкость разрушения обычных легированных сталей не превышает 30 МПа·м<sup>1/2</sup>. При температуре -196 °С сталь имеет свойства:  $\sigma_B = 2400$  МПа,  $\delta = 10$  %,  $KCU = 0,30$  МДж/м<sup>2</sup>. Сталь 03Н18К9М5Т теплоустойчива до 450 °С.

Мартенситностареющие стали применяют в самолетостроении, ракетостроении, т.е. в тех отраслях, в которых важна удельная прочность, а также в криогенной технике, где они нашли применение благодаря высокой пластичности и вязкости при низких температурах.

Высокопрочные ПНП-стали относятся к классу аустенитных сталей. Одна из применяемых марок содержит: 0,3 % С, 8—10 % Cr; 8—10 % Ni; 4 % Mo; 1—2,5 % Mn; до 2 % Si. После закалки от 1000—1100 °С и получения при комнатной температуре аустенитной структуры (точки  $M_d$  и  $M_n$  лежат ниже 0 °С) сталь подвергают деформации при 450—600 °С. При деформации происходит наклеп аустенита, выделение из него углерода и легирующих элементов с образованием дисперсных карбидов (дисперсионное упрочнение). Вследствие обеднения аустенита этими элементами точка  $M_d$  смещается в область положительных температур, а точка  $M_n$  остается ниже комнатной температуры. В результате такой обработки ПНП-стали приобретают высокую прочность ( $\sigma_B \geq 1800$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 1400$  МПа) при высокой пластичности ( $\delta \geq 30$  %).

Высокая пластичность обусловлена различием температурных уровней начала мартенситного превращения  $M_n$  и начала образования мартенсита деформации  $M_d$ . Так как ПНП-стали имеют точку  $M_n$  ниже, а точку  $M_d$  выше комнатной температуры, то при испытаниях на растяжение происходит локализация деформации, аустенит только на этом участке превращается в мартенсит и упрочняется, вследствие чего деформация сосредоточивается в соседних объемах. Превращение аусте-

нита в мартенсит не дает локализоваться деформации, шейка в образце при испытании на растяжение не образуется, благодаря чему реализуется высокая пластичность стали.

## 6. Рессорно-пружинные стали

Основными требованиями, предъявляемыми к рессорно-пружинным сталям, являются высокое сопротивление малым пластическим деформациям (высокий предел упругости), высокий предел выносливости и повышенная релаксационная стойкость с сохранением упругих свойств в течение длительного времени.

В пружинах и рессорах пластическая деформация не допускается, поэтому высокие значения пластичности и вязкости менее существенны.

Высокие упругие свойства обеспечиваются при содержании 0,5—0,7 % С и получении трооститной структуры за счет закалки и среднего отпуска при температуре 350—450 °С. Углеродистые пружинные стали после термической обработки на троостит имеют  $\sigma_{0,2} \geq 800$  МПа, легированные  $\sigma_{0,2} \geq 1000$  МПа.

Стали для пружин и рессор обычно легируют кремнием и марганцем, иногда в сочетании с другими элементами (табл. 12). Введение кремния задерживает распад мартенсита при отпуске. Кремний и марганец упорчняют феррит и увеличивают прокаливаемость стали.

Т а б л и ц а 12. Химический состав, пружинных сталей (ГОСТ 4543—71)

Марка стали	С	Mn	Si
65	0,62—0,70	0,5—0,8	0,17—0,37
70	0,67—0,75	0,5—0,8	0,17—0,37
65Г	0,62—0,70	0,9—1,2	0,17—0,37
60С2	0,57—0,65	0,6—0,9	1,5—2,0
70С3А	0,66—0,74	0,6—0,9	2,4—2,8
60СГ	0,57—0,65	0,8—1,0	1,3—1,8
40ХФА	0,37—0,44	0,5—0,8	0,17—0,37

П р и м е ч а н и я. 1. Содержание S и P должно быть меньше 0,035 % во всех марках.  
2. Сталь 40ХФА содержит 0,8—1,1 % Cr, 0,1—0,18 % V.

Рессорно-пружинные стали должны обладать хорошей закаливаемостью и прокаливаемостью. Присутствие после закалки в структуре продуктов перлитного превращения или остаточного аустенита ухудшает упругие свойства стали. Для повышения сопротивления пластическим деформациям важную роль играет получение мелкозернистой структуры.

Средние свойства углеродистых рессорно-пружинных сталей после термообработки:  $\sigma_{0,2} = 800 \dots 1000$  МПа,  $\sigma_b = 1000 \dots 1200$  МПа,  $\delta = 5 \dots 8$  %,  $\psi = 25 \dots 30$  %, предел выносливости при изгибающей нагрузке 500—650 МПа, при кручении 300 МПа. Величина предела выносливости уменьшается при наличии поверхностных дефектов и обезуглероживании. После дробеструйной обработки в поверхностных слоях создаются остаточные сжимающие напряжения, что увеличивает выносливость. Предел усталости в результате поверхностного наклепа повышается в 1,5—2 раза.

При легировании рессорно-пружинных сталей кремнием и другими элементами прочность возрастает до  $\sigma_b = 1300 \dots 1800$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1100 \dots 1600$  МПа при  $\delta = 5 \dots 8$  %,  $\psi = 20 \dots 35$  %.

Пружины из углеродистых, марганцевых, кремнистых сталей работают при температурах не более 200 °С. При нагреве до 300 °С используют пружины из стали 50ХФА, а при более высоких температурах — из более теплостойких сталей: до 500 °С — из стали 3Х2В8Ф, до 600 °С — из стали Р18.

Для работы в агрессивных средах пружины изготавливают из хромистых коррозионностойких сталей типа 40Х13, 95Х18 и др. В некоторых случаях для работы в агрессивных средах и в криогенных условиях целесообразно применение мартенситностареющих сталей.

## 7. Подшипниковые стали

В процессе работы детали подшипников качения (шарики, ролики, обоймы) испытывают высокие удельные знакопеременные нагрузки.

Стали для подшипников должны обладать высокой твердостью и износостойкостью в сочетании с высоким пределом контактной усталости. К сталям предъявляют требования по минимальному содержанию неметаллических включений, развитию карбидной неоднородности и пористости, так как эти дефекты, находясь в поверхностном слое, становятся концентраторами напряжений и вызывают преждевременное усталостное разрушение.

Стали маркируют буквой Ш — шарикоподшипниковая, Х — хромистая и цифрой, указывающей содержание хрома в десятых долях процента. Содержание углерода в подшипниковых сталях составляет около 1 %. Химический состав подшипниковых сталей приведен в табл. 13.

Термическая обработка состоит из закалки от 830—840 °С в масле и низкого отпуска при температуре ниже 200 °С. После термообработки твердость должна быть не менее *HRC* 62.

Сталь ШХ4 обычно используют для изготовления шариков диаметром до 13,5 мм, роликов диаметром до 10 мм, ШХ15 — шариков 22,5, роликов 15 мм, ШХ15СГ — шариков до 30 мм. При изготовлении роли-

ков большего диаметра применяют сталь ШХ20СГ. Подшипники, используемые для работы в агрессивных средах, изготовляют из нержавеющей стали 95Х18.

Т а б л и ц а 13. Химический состав подшипниковых сталей, % (ГОСТ 801—78)

Марка стали	С	Cr	Mn	Si
ШХ4	0,95—1,05	0,35—0,55	0,15—0,30	0,17—0,37
ШХ15	0,95—1,05	1,3—1,65	0,2—0,4	0,17—0,37
ШХ15СГ	0,95—1,05	1,3—1,65	0,9—1,2	0,40—0,65
ШХ20СГ	0,90—1,00	1,4—1,7	1,4—1,7	0,55—0,85

Долговечность сферических подшипников в значительной мере определяется отклонением от сферической формы, приводящим к биениям. Эти отклонения тщательно контролируются.

Здесь на помощь может прийти космическое производство. В невесомости под действием сил поверхностного натяжения порции расплавов получают практически идеальную округлую форму. Кроме того, можно внутрь жидкой капли впрыскивать газ и получать полые шары. Внутри шара под действием тех же поверхностных сил газовый пузырь в невесомости займет центральное положение. Полые шары более выносливы, так как способны упруго деформироваться под нагрузкой без разрушения. Их долговечность в 5—8 раз больше, чем сплошных.

В космосе можно изготовлять полые многослойные шары, последовательно покрывая сферу разными расплавами.

## 8. Износостойкая аустенитная высокомарганцевая сталь

К износостойким относится сталь 110Г13Л. Эта сталь, или сталь Гадфильда, является аустенитной высокомарганцевой сталью, из которой литьем (реже ковкой) изготовляют детали, от которых требуется высокая износостойкость в условиях ударных нагрузок.

К таким деталям относятся железнодорожные крестовины, траки гусеничных машин, щеки дробилок, зубья ковшей экскаваторов и т.д.

Сталь 110Г13Л содержит: 0,9—1,4 % С; 11,5—15,0 % Мп; 0,5—1,0 % Si. После литья структура состоит из аустенита и избыточных карбидов марганца в железе (Fe, Мп)<sub>3</sub>С. При нагреве карбиды растворяются в аустените, поэтому после закалки от температуры 1100 °С в воде сталь получает чисто аустенитную структуру с малой твердостью *HВ* 200.

Марганцевый аустенит хорошо наклепывается, особенно при ударных нагрузках и после деформации в процессе эксплуатации приобретает твердость до HRC 50—55. Характерно применение стали 110Г13Л

для тюремных решеток в начале 20 века. Их тогда называли Schwedische Gardinen (в переводе на русский язык — шведские шторы). Решетки представляли собой двухслойный пруток, в середине которого была сталь 110Г13Л. При попытке перепилить такую решетку внутренний слой упрочнялся и дальнейшая резка становилась невозможной.

При чисто абразивном износе (например трении по песку) эффективного наклепа стали 110Г13Л не происходит, что приводит к повышенному износу детали.

Кроме того, недостатком стали 110Г13Л является плохая обрабатываемость резанием, поэтому детали из нее чаще всего изготавливают литьем без механической обработки.

## Глава II ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

По назначению инструментальные стали делятся на стали для режущего, штампового и измерительного инструментов. Кроме того, для изготовления режущего инструмента, особенно при скоростной обработке, широко применяют твердые сплавы.

### 1. Стали для режущего инструмента

#### 1.1. Требования к сталям

Режущий инструмент работает в условиях длительного контакта и трения с обрабатываемым металлом. В процессе эксплуатации должны сохраняться неизменными конфигурация и свойства режущей кромки. Материал для изготовления режущего инструмента должен обладать высокой твердостью ( $HRC \geq 60-62$ ) и износостойкостью, т.е. способностью длительное время сохранять режущие свойства кромки в условиях трения.

Чем больше твердость обрабатываемых материалов, толще стружка, выше скорость резания, тем больше энергия, затрачиваемая на процесс обработки резанием. Механическая энергия переходит в тепловую. Выделяющееся тепло нагревает резец, деталь, стружку и частично рассеивается. Поэтому основным требованием, предъявляемым к инструментальным материалам, является высокая теплостойкость, т.е. способность сохранять твердость и режущие свойства при длительном нагреве в процессе работы. По теплостойкости различают три группы инструментальных сталей для режущего инструмента: нетеплостойкие, полутеплостойкие и теплостойкие.

При нагреве до 200—300 °С нетеплостойких сталей в процессе резания углерод выделяется из мартенсита закалки и начинается коагуляция карбидов цементитного типа. Это приводит к потере твердости и износостойкости режущего инструмента. К нетеплостойким относятся углеродистые и низколегированные стали, содержащие до 3—4 % легирующих элементов. Полутеплостойкие стали, к которым относятся некоторые среднелегированные стали, содержащие более 4 % хрома и другие карбидообразующие элементы, например 9Х5ВФ, сохраняют твердость до температур около 400 °С. Теплостойкие стали сохраняют твердость и износостойкость при нагреве до температур несколько выше 600 °С.

Углеродистые и низколегированные стали имеют сравнительно низкую теплостойкость и невысокую прокаливаемость, поэтому их используют для более легких условий работы при малых скоростях резания. Быстрорежущие стали, имеющие более высокую теплостойкость и прокаливаемость, применяют для более тяжелых условий работы. Еще более высокой скорости резания допускают твердые сплавы и керамические материалы. Из существующих материалов наибольшей теплостойкостью обладает нитрид бора — эльбор. Эльбор позволяет обрабатывать материалы высокой твердости, например закаленную сталь, при высоких скоростях.

## *1.2. Углеродистые стали*

Углеродистые инструментальные стали маркируются буквой У, а следующая за ней цифра показывает содержание углерода в десятых долях процента. Для изготовления инструмента применяют углеродистые качественные стали марок У7—У13 и высококачественные стали марок У7Ф—У13Ф. Высококачественные стали содержат не более 0,02 % серы и фосфора, качественные — не более 0,03 %.

По назначению различают углеродистые стали для работы при ударных нагрузках и для статически нагруженного инструмента.

Стали марок У7—У9 применяют для изготовления инструмента при работе с ударными нагрузками, от которого требуется высокая режущая способность (зубила, клейма по металлу, деревообделочный инструмент, в частности пилы, топоры и т.д.).

Стали марок У10—У13 идут на изготовление режущего инструмента, не испытывающего при работе толчков, ударов и обладающего высокой твердостью (напильники, шаберы, острый хирургический инструмент и т.п.). Из стали этих марок иногда изготавливают также простые штампы холодного деформирования.

Углеродистые доэвтектоидные стали после горячей пластической обработки (ковки или прокатки) и последующего охлаждения на возду-

хе имеют структуру, состоящую из пластинчатого перлита и небольшого количества феррита, а заэвтектоидные стали — пластинчатого перлита и избыточного цементита, который обычно образует сплошную или прерывистую сетку по границам бывших зерен аустенита.

Термическая обработка углеродистых инструментальных сталей состоит из двух операций: предварительной и окончательной обработок.

Предварительная термическая обработка сталей заключается в отжиге при 740—760 °С, цель которого — получить микроструктуру, состоящую из зернистого перлита — псевдоперлита, так как при такой микроструктуре после последующей закалки получают наиболее однородные свойства. Кроме того, при такой структуре облегчается механическая обработка инструмента.

Окончательная термическая обработка состоит из закалки и низкого отпуска. Закалку проводят в воде от 780—810 °С, т.е. от температур, для доэвтектоидных сталей лежащих несколько выше  $A_{c3}$ , а для заэвтектоидных — ниже  $A_{cm}$ .

Углеродистые стали имеют очень высокую критическую скорость закалки — порядка 200—300 °С/с. Поэтому недопустимо даже малейшее замедление охлаждения при закалке, так как это может привести к частичному распаду аустенита при температурах перлитного интервала и, как следствие, к появлению мягких пятен. Особенно быстро протекает распад аустенита в углеродистых сталях при температурах, близких к 500—550 °С, где он начинается почти мгновенно, протекает чрезвычайно интенсивно и в течение нескольких секунд полностью заканчивается.

Поэтому только инструменты малого диаметра могут после закалки в воде прокаливаться насквозь. Однако при этом в них возникают большие внутренние напряжения, которые могут вызвать существенные деформации.

Инструменты крупных размеров при закалке в воде и в водных растворах солей, кислот и щелочей, охлаждающая способность которых выше, чем воды, закаливаются на мартенсит лишь в тонком поверхностном слое. Структура же глубинных зон инструментов представляет собой продукты распада аустенита в перлитном интервале температур. Сердцевина инструментов, имеющая такую структуру, является менее хрупкой по сравнению с мартенситной структурой. Поэтому инструменты, имеющие такую сердцевину, лучше переносят толчки и удары по сравнению с инструментами, закаленными насквозь на мартенсит.

Углеродистые стали наиболее целесообразно применять для инструментов небольшого сечения (до 5 мм), которые можно закаливать в масле и достигать при этом сквозной прокаливаемости, а также для инструментов диаметром или наименьшей толщиной 18—25 мм, в кото-

рых режущая часть приходится только на поверхностный слой, например напильники, зенкера, метчики.

Углеродистые инструментальные стали отпускают при температурах не более 200 °С во избежание снижения твердости. Твердость окончательно термически обработанного инструмента из углеродистых сталей обычно лежит в интервале HRC 56—64.

Достоинствами углеродистых инструментальных сталей являются низкая стоимость, хорошая обрабатываемость давлением и резанием в отожженном состоянии.

Их недостатками являются невысокие скорости резания, ограниченные размеры инструмента из-за низкой прокаливаемости и его значительные деформации после закалки в воде.

### *1.3. Легированные стали*

Низколегированные стали для режущего инструмента (13Х6, 9ХС) также не обладают высокой теплостойкостью и обычно пригодны для работы при температурах не более 200—250 °С. Среднелегированные стали типа 9Х5ВФ, 8Х4В3М3Ф2 имеют более высокую теплостойкость (300—500 °С). В отличие от углеродистых легированные стали обладают большей устойчивостью переохлажденного аустенита, следовательно большей прокаливаемостью и несколько более высокой износостойкостью.

Их можно закачивать в масле до критического диаметра 40 мм и более. Применение масла или горячих закалочных сред позволяет уменьшить деформацию и коробление инструмента. Он может иметь большее сечение, а благодаря меньшему короблению — и большую длину.

Низколегированная сталь 13Х имеет сравнительно неглубокую прокаливаемость и рекомендована для инструментов диаметром до 15 мм. Из этой стали изготавливают хирургический, гравировальный инструменты, лезвия безопасных бритв.

Стали 9ХС, ХВГ, ХВСГ используют для изготовления инструментов крупного сечения: сверл, разверток, протяжек диаметром 60—80 мм (табл. 14, ГОСТ 5950—73).

Обычная термическая обработка легированных режущих сталей состоит из закалки от 830—870 °С в масле или ступенчатой закалки и отпуска при температуре 200 °С. Твердость после термообработки составляет HRC 61—65. Если необходимо увеличить вязкость, то температуру отпуска повышают до 200—300 °С. Вследствие некоторого распада мартенсита твердость после этого снижается до HRC 55—60.

Т а б л и ц а 14. Химический состав некоторых легированных инструментальных сталей, %

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	W	V
13X	1,25—1,40	0,30—0,60	0,15—0,35	0,40—0,70	—	—
9XC	0,85—0,95	0,30—0,60	1,20—1,60	0,95—1,25	—	—
XBG	0,90—1,05	0,80—1,10	0,15—0,35	0,90—1,20	1,20—1,60	—
XBCG	0,95—1,05	0,60—0,90	0,65—1,00	0,60—1,10	0,50—0,80	0,05—0,15
9X5BF	0,85—1,00	0,15—0,40	0,15—0,40	4,50—5,50	0,80—1,20	0,15—0,30

#### 1.4. Быстрорежущие стали

С увеличением скорости резания возрастают требования к теплостойкости стали. Этим требованиям в большей мере удовлетворяют быстрорежущие стали, впервые предложенные в 1902 г.

Быстрорежущие стали маркируют буквой P (rapid — быстрый, скорый), цифры показывают среднее содержание вольфрама, являющегося основным легирующим элементом. Среднее содержание углерода и хрома во всех быстрорежущих сталях обычно составляет значения, близкие к 1 и 4 %, поэтому эти элементы не указываются. Содержание остальных легирующих в целых процентах указывается как обычно в цифрах, следующих за их буквенным обозначением.

Быстрорежущая сталь после закалки и отпуска имеет структуру высоколегированного отпущенного мартенсита с карбидами. Она сохраняет первоначальную структуру практически неизменной при нагреве до 600—620 °С. Резцы из быстрорежущей стали позволяют увеличить скорость резания в 2—4 раза и стойкость инструментов в 10—30 раз по сравнению с теми же характеристиками инструмента из сталей с низкой теплостойкостью.

Химический состав некоторых быстрорежущих сталей приведен в табл. 15 (ГОСТ 19265—73).

Т а б л и ц а 15. Химический состав некоторых быстрорежущих сталей, %

Марка стали	C	Cr	W	V	Mo
P18	0,70—0,80	3,8—4,4	17,0—18,5	1,0—1,4	До 1,0
P9	0,85—0,95	3,8—4,4	8,5—10,0	2,0—2,6	До 1,0
P6M5	0,82—0,90	3,8—4,4	5,5—6,5	1,7—2,1	5,0—5,5
P6M3	0,85—0,95	3,0—3,5	5,5—6,5	2,0—2,5	3,0—3,6

Потеря твердости при нагреве обусловлена в первую очередь распадом мартенсита и коагуляцией выделившихся карбидов. Коагуляция карбидов в углеродистой и легированной сталях при температурах выше 300 °С ведет к быстрой потере твердости. Теплостойкость быстрорежущих сталей обусловлена легированием их карбидообразующими элементами — вольфрамом, ванадием и молибденом в количествах, достаточных для связывания почти всего углерода в специальные карбиды. Распад мартенсита и коагуляция специальных карбидов происходит при температурах 600—650 °С.

Микроструктура быстрорежущей стали приведена на рис. 121. При затвердевании литой быстрорежущей стали образуется эвтектика, напоминающая ледебурит и располагающаяся по границам зерен. Быстрорежущие стали относятся к ледебуритному классу. Послековки или прокатки сетка эвтектики подвергается дроблению с измельчением входящих в нее карбидов и более равномерным их распределением в основной матрице.

После прокатки иликовки быстрорежущую сталь подвергают изотермическому отжигу для уменьшения твердости и облегчения механической обработки. Сталь выдерживают при 740 °С до полного превращения аустенита в перлито-сорбитную структуру.

Высокую теплостойкость инструмент из быстрорежущих сталей приобретает после закалки и многократного отпуска. При нагреве под закалку необходимо обеспечить максимальное растворение карбидов и получение высоколегированного аустенита. Такая структура увеличивает прокаливаемость и позволяет получить после закалки мартенсит с высокой теплостойкостью. Температура закалки сталей составляет: P18 — 1270—1290, P9 — 1220—1240, P6M5 — 1210—1230 °С. Во избежание трещин и деформации инструмента из-за низкой теплопроводности сталей применяют ступенчатый нагрев под закалку в расплавленных солях, а закалку производят в масле.

После закалки структура быстрорежущей стали состоит из высоколегированного мартенсита, содержащего 0,3—0,4 % С, нерастворенных при нагреве избыточных карбидов и около 30 % остаточного аустенита. Остаточный аустенит снижает твердость, режущие свойства стали, ухудшает ее шлифуемость и его присутствие в структуре нежелательно.

При многократном отпуске из остаточного аустенита выделяются дисперсные карбиды, легированность аустенита уменьшается и он претерпевает мартенситное превращение. Обычно применяют трехкратный отпуск при 550—570 °С в течение 45—60 мин. Режим термической обработки инструмента из быстрорежущей стали P18 приведен на рис. 122. Число отпусков может быть сокращено при обработке холодом после закалки, в результате которой уменьшается содержание остаточного аустенита. Обработке холодом подвергают инструменты сравни-

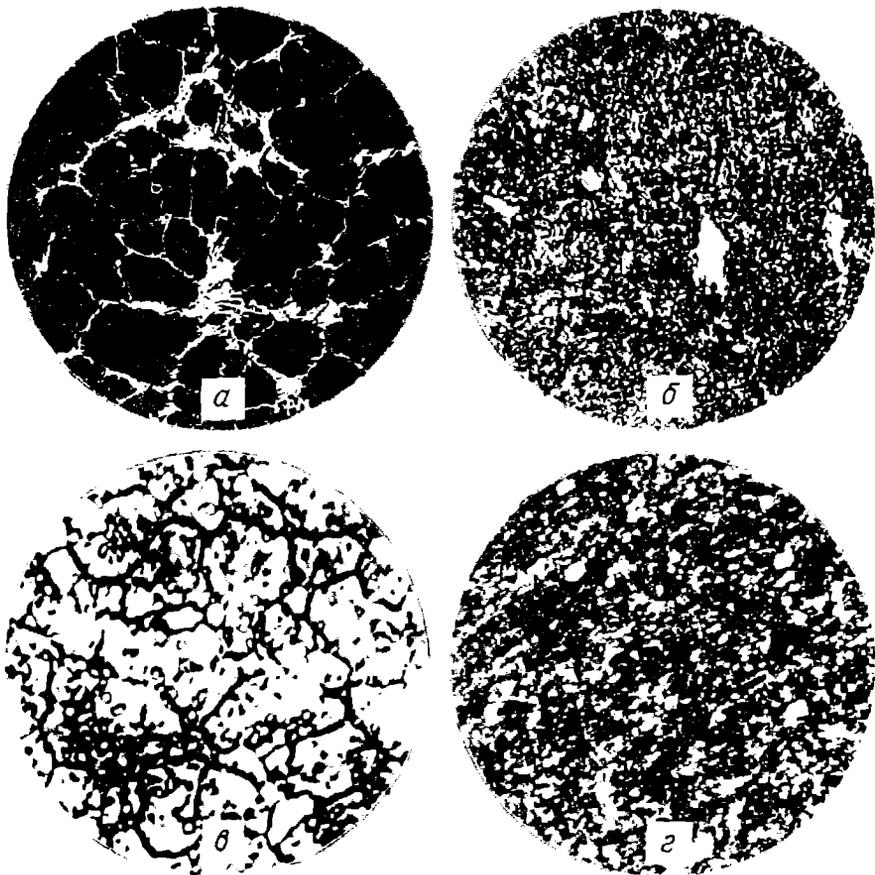


Рис. 121. Микроструктура быстрорежущей стали P6M5:

а — литое состояние; б — послековки и отжига; в — после закалки; г — после отпуска.  $\times 500$

тельно простой формы. Твердость после закалки HRC 62—63, а после отпуска она увеличивается до HRC 63—65.

Известно применение порошков быстрорежущих сталей для изготовления инструмента. Исходная шихта состоит из предварительно тонко измельченной стружки быстрорежущей стали, которую формуют в холодном состоянии с последующим спеканием сформованных заготовок. Спекание производят в вакууме при температуре 1200—1250 °C в течение 3—5 ч. Для уменьшения пористости порошковую быстрорежущую сталь подвергают горячей штамповке или горячему прессованию.

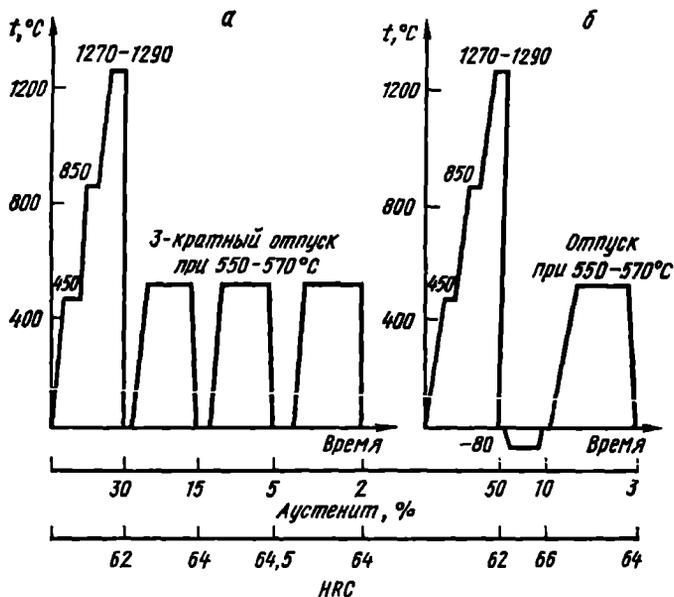


Рис. 122. Режимы термической обработки инструмента из быстрорежущей стали:  
 а — закалка и трехкратный отпуск; б — закалка, обработка холодом, отпуск

После этого изделия подвергают термической обработке, характерной для данной марки стали.

Порошковая быстрорежущая сталь обладает более высокой теплоустойчивостью, чем сталь, изготовленная традиционными методами, и, как следствие, большей износостойкостью. Это объясняется более высокой степенью легированности аустенита элементами, входящими в состав стали, мелкодисперсной структурой и равномерным распределением карбидной фазы. В структуре порошковой быстрорежущей стали отсутствует карбидная неоднородность. Быстрорежущая сталь, изготовленная методом порошковой металлургии, имеет стойкость в 1,5—2 раза выше, чем стойкость быстрорежущей стали, полученной традиционным способом.

Ниже указаны основные стали для режущего инструмента различного назначения (по данным Ю.А. Геллера):

Тип инструмента	Рекомендуемая марка стали
<i>Резцы и резцовые головки:</i>	
фасонные на автоматах	P18, P12Ф3
долбежные, строгальные, отрезные	P6M5, P12, P9
<i>Сверла:</i>	
для обработки металлов твердость, HB до 260	P6M5, P6M3

для обработки металлов большей твердости для труднообрабатываемых	P12Ф3 P12Ф3, P12Ф4К5
<b>Фрезы:</b> резьбовые червячные то же, для резания с повышенной скоростью то же для резания труднообрабатываемых сплавов	P6M5, P12, P8M3, P18 P6M5, P12Ф3, P12, P8M3 P12Ф4К5, P8M3К6С P12Ф4К5, P8M3К6С, P9M4К8Ф, P12M3Ф2К8 P6M5, P12, P8M3
<b>Долбяки</b> Протяжки диаметром, мм: до 80—100 > 100	P12, P6M5, P12Ф3, P8M3 XBCГ, P6M5
<b>Метчики:</b> машинные ручные	P6M5, P18 11ХФ, У11А, У12А
<b>Плашки круглые:</b> для нарезания мягких металлов то же, для твердых	XBCГ P6M5, P8M3
<b>Развертки:</b> машинные то же, для труднообрабатываемых сплавов ручные	P6M5, P8M3, P12Ф3, P12 P8M3К6С XBCГ, P6M5, P8M3
<b>Зенкеры:</b> для обработки мягких металлов для обработки твердых металлов	P6M5, P12, P8M3, 10P8M3 P9M4К8Ф, P8M3К6С
<b>Пилы:</b> сегменты к круглым пилам и ножовочные полотна машинные и ручные для обработки древесины	P9, P6M5 X6ВФ, 9ХФ, У10А
<b>Напильники:</b> для мягких металлов для твердых металлов	13Х, Х, У13А P6M5, P8M3
Стамески, долота, топоры для обработки древесины	7ХФ, У7А

## 2. Металлокерамические твердые сплавы

Металлокерамические твердые сплавы представляют инструментальные материалы, состоящие из карбидов тугоплавких металлов и цементующего металла — кобальта, играющего роль связки. На рис. 123 приведена зависимость твердости различных инструментальных материалов от температуры испытания. Твердые сплавы обладают наиболее высокой твердостью и сохраняют ее при нагреве до высоких температур.

Твердые сплавы изготовляют методом порошковой металлургии. Применяют карбиды вольфрама, титана и тантала, а за рубежом — также карбиды ниобия и ванадия. Сплавы получают спеканием порошков карбидов с порошком кобальта, являющегося связующим компонентом, при 1400—1550 °С после предварительного прессования.

Твердые сплавы изготавливают в виде пластин, которые медным припоем припаивают к державке из обычной углеродистой стали. Твердые сплавы применяют для резцов, сверл, фрез и другого инструмента.

Инструмент из металлокерамических твердых сплавов характеризуется высокой твердостью (HRA 80—97), износостойкостью в сочета-

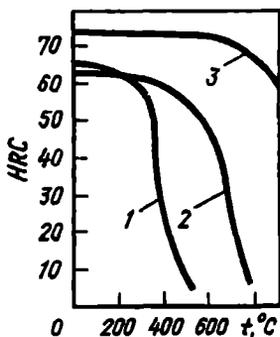


Рис. 123. Зависимость твердости различных инструментальных материалов от температуры испытания:

1 — углеродистая сталь; 2 — быстрорежущая сталь; 3 — твердый сплав

ВК8, ВК1). Чем больше содержание кобальта, тем выше прочность, хотя и несколько ниже твердость сплава. Твердые сплавы вольфрамовой группы имеют наибольшую прочность, но более низкую твердость, чем сплавы других групп. Они теплостойки до 800 °С. Их обычно применяют для обработки чугуна, сплавов цветных металлов и различных неметаллических материалов, дающих прерывистую стружку.

Сплавы второй группы (двухкарбидные) изготавливают на основе карбидов WC и TiC на кобальтовой связке. Их маркируют буквами Т, К и цифрами. Цифры после буквы Т указывают содержание карбидов титана в процентах, а цифры после буквы К — содержание кобальта. Например, в сплаве Т15К6 содержится 15 % TiC, 6 % Со, остальное, т.е. 79 % WC. Карбид вольфрама растворяется в карбиде титана при температуре спекания, образуя твердый раствор (Ti, W)C, имеющий более высокую твердость, чем WC. Сплавы этой группы имеют более высокую (до 900—1000 °С) теплостойкость, повышающуюся с увеличением содержания карбидов титана. Их в основном применяют для высокоскоростной обработки сталей.

Для изготовления сплавов третьей группы используют карбиды вольфрама, титана, тантала и порошок кобальта в качестве связки. Эти сплавы маркируют буквами ТТК и цифрами. Цифра, стоящая после букв ТТ указывает суммарное содержание карбидов титана TiC и тантала TaC, а цифра, стоящая после буквы К — содержание кобальта. Например, сплав ТТ7К12 содержит 4 % TiC, 3 % TaC, 12 % Со и 81 % WC. В их структуре присутствует твердый раствор (Ti, Ta, W)C и избыток WC. Сплавы этого типа имеют более высокую прочность, чем сплавы

нии с высокой теплостойкостью (до 800—1000 °С). Их недостатком является высокая хрупкость.

Скорость резания твердыми сплавами в 5—10 раз выше, чем при применении быстрорежущих сталей.

В зависимости от состава карбидной основы различают три группы твердых сплавов: вольфрамовые, титанвольфрамовые и титантанталвольфрамовые.

Вольфрамовые твердые сплавы изготавливают на основе карбида вольфрама WC и кобальта. Сплавы этой группы называют однокарбидными и обозначают буквами ВК и цифрой, показывающей содержание кобальта в процентах. Например, сплав ВК3 содержит 3 % Со и 97 % WC. Содержание кобальта может меняться (сплавы ВК6,

второй группы и лучшую сопротивляемость ударным воздействиям вибрации и выкрашиванию. Их применяют для более тяжелых условий резания (черновое точение стальных слитков, поковок, литья).

Общим недостатком рассмотренных сплавов помимо высокой крупности является повышенная дефицитность исходного вольфрамового сырья — основного компонента, определяющего их повышенные физико-механические характеристики. Поэтому перспективно направление использования безвольфрамовых твердых сплавов. Хорошо себя зарекомендовали сплавы, для которых в качестве основы используется карбид титана, а в качестве связки — никель и молибден. Они маркируются буквами КТС и ТН. Твердые сплавы КТС—1 и КТС—2 содержат 15—17 % Ni и 7—9 % Mo соответственно, остальное — карбид титана. В твердых сплавах типа ТН—20, ТН—25, ТН—30 в качестве связующего металла применяют в основном никель в количестве 16—30 %. Концентрация молибдена составляет 5—9 %, остальное — также карбид титана. Твердость подобных твердых сплавов составляет HRA 87—94, сплавы имеют высокую износостойкость и коррозионную стойкость. Их используют для изготовления режущего инструмента и быстроизнашивающихся деталей технологического оборудования.

Особо твердые инструментальные материалы созданы на основе нитрида бора и нитрида кремния. В них нет пластичной металлической связки. Изделия из этих материалов изготавливают либо с помощью взрыва, либо в условиях сверхвысоких давлений и высоких температур. Изделия из нитридов бора и кремния используют в качестве материала иденторов (наконечников) для измерения твердости тугоплавких материалов в интервале температур 700—1800 °С, как абразивный материал и в качестве сырья для изготовления сверхтвердых материалов, применяемых для оснащения режущей части инструментов для обработки закаленных сталей, твердых сплавов, стеклопластиков, цветных металлов. Они обладают высокой твердостью (HRA 94—96), прочностью, износостойкостью, теплопроводностью, высокой стабильностью физических свойств и структуры при повышении температуры до 1000 °С. Их преимуществом является доступность и дешевизна исходного продукта, благодаря чему они используются для замены вольфрамсодержащих твердых сплавов.

Для изготовления доводочных паст, шлифовальных кругов применяют абразивные материалы. Они представляют собой порошки, либо скрепленные связкой, либо нанесенные на гибкую основу — ткань или бумагу. Различают природные и искусственные абразивные материалы. К природным относятся алмазы, гранаты, корунд; к искусственным — искусственные алмазы, гексагональный нитрид бора (эльбор), карборунд.

### 3. Стали для измерительного инструмента

Стали этого назначения должны обладать высокой твердостью и износостойкостью, сохранять постоянство формы и размеров в течение длительного срока эксплуатации. Кроме того, от них требуется хорошая обрабатываемость для получения высокого класса чистоты поверхности и малая деформация при термической обработке.

Для измерительного инструмента обычно применяют высокоуглеродистые стали У8—У12 и низколегированные стали марок Х, ХГС, ХВГ, 9ХС, содержащие около 1 % С и до 1,5 % Сг. Их твердость после термообработки должна быть не менее *HRC* 60—64.

После обычной термической обработки в структуре высокоуглеродистых сталей обычно присутствует остаточный аустенит, из-за чего она не является стабильной. Для обеспечения высокой твердости стали и стабильности размеров инструмента в процессе эксплуатации проводится специальная термическая обработка. Она состоит из закалки в масле, для особо точных инструментов включает дополнительно обработку холодом при температуре  $-80^{\circ}\text{C}$  и длительного (до 30 ч) низкотемпературного отпуска — старения при  $120\text{—}170^{\circ}\text{C}$ . Нагрев при более высокой температуре недопустим из-за снижения твердости и износостойкости инструмента. Длительный отпуск предотвращает процессы старения и распад мартенсита в течение всего периода эксплуатации инструмента.

Для измерительных инструментов большого размера и сложной геометрии используют азотируемые стали типа 38Х2МЮА.

### 4. Штамповые стали

Штамповые стали применяют для изготовления штампов холодного и горячего деформирования, пуансонов, матриц, фильер, пресс-форм для литья под давлением. Химический состав некоторых марок штамповых сталей приведен в табл. 16.

В зависимости от температурных условий эксплуатации различают штамповые стали для деформирования в холодном и горячем состоянии.

#### 4.1. Стали для штампов холодного деформирования

Стали этого типа должны обладать высокой твердостью и износостойкостью, высокой прочностью и удовлетворительной вязкостью для работы при ударных нагрузках.

В зависимости от назначения различают три группы штамповых сталей для деформирования в холодном состоянии.

К первой группе относятся стали для вытяжных и вырубных штампов. Основные требования, предъявляемые к этим сталям, — высокая твердость и износостойкость. Для изготовления штампов этого типа применяют углеродистые стали марок У10—У12 и низколегированные 214

стали X, ХВГ, ХВСГ. После неполной закалки их отпускают при 150—180 °С на твердость HRC 60. На поверхности образуется твердый износостойкий слой за счет несковозной прокаливаемости, сравнительно вязкая сердцевина, позволяющая работать при умеренных ударных нагрузках.

Стали с повышенным содержанием хрома (6—12 %) (Х6ВФ, Х12, Х12М, Х12Ф1) имеют более высокую износостойкость и глубокую прокаливаемость. Высокая твердость этих сталей достигается благодаря присутствию в структуре большого количества карбидов хрома Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Однако повышенное содержание карбидов хрома приводит к росту карбидной неоднородности. Структура и свойства высокохромистых сталей в значительной мере определяются правильным выбором режима термической обработки, особенно температуры закалки. С ее увеличением возрастает концентрация углерода и хрома в аустените, что приводит к повышению твердости мартенсита. Однако при закалке с чрезмерно высокой температуры в структуре увеличивается содержание остаточного аустенита и твердость стали падает (рис. 124). После закалки обычно проводят низкий отпуск на твердость HRC 61—63.

Хорошо зарекомендовали себя стали Х12Ф4М, Х6Ф4М. Молибден и ванадий, дополнительно введенные в состав сталей, способствуют получению мелкозернистой структуры. Износостойкость штампов из стали Х12Ф4М в 1,5—2 раза выше по сравнению с износостойкостью штампов из стали Х12М.

Вторую группу составляют стали для штампов холодного выдавливания, испытывающие большие удельные давления. Эти стали должны хорошо сопротивляться деформации и иметь высокую прочность. Присутствие в их структуре остаточного аустенита недопустимо. Для этого необходимо проведение высокого отпуска при температуре не ниже 500 °С. Поэтому, хотя эти стали и относятся к сталям для штампов холодного деформирования, они должны иметь довольно высокую теплостойкость. Этим требованиям удовлетворяет сталь 6Х4М2ФС.

К третьей группе относятся стали для высадочных и чеканочных штампов, работающих при высоких ударных нагрузках. Сложность создания таких сталей состоит в том, что для повышения твердости необходимо увеличение содержания углерода, что может приводить к снижению ударной вязкости. Обычно для штампов этого назначения используют сталь 7Х3. Более высокую стойкость показала сталь марки 6Х3ФС.

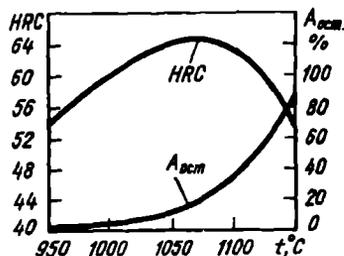


Рис. 124. Зависимость твердости и количества остаточного аустенита в стали Х12Ф1 от температуры закалки

Т а б л и ц а 16. Химический состав некоторых штамповых сталей<sup>1)</sup> (ГОСТ 5950—73), %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	W	V	Mo	Ni
	<i>Для деформирования в холодном состоянии</i>							
Х6ВФ	1,05—1,15	0,15—0,35	0,15—0,40	5,5—6,5	1,1—1,5	0,5—0,8	—	—
Х12	2,0—2,20	0,15—0,35	0,15—0,40	11,5—13,0	—	—	—	—
Х12М	1,45—1,65	0,15—0,35	0,15—0,40	11,0—12,5	—	0,15—0,3	0,4—0,6	—
Х12Ф1	1,25—1,45	0,15—0,35	0,15—0,40	11,0—12,5	—	0,7—0,9	—	—
	<i>Для деформирования в горячем состоянии</i>							
7Х3	0,65—0,75	0,15—0,35	0,15—0,40	3,2—3,8	—	—	—	—
5ХНМ	0,50—0,60	0,15—0,35	0,50—0,80	0,5—0,8	—	—	0,15—0,3	1,4—1,8
4ХМФС	0,37—0,45	0,50—0,80	0,50—0,80	1,5—1,8	—	0,3—0,5	0,9—1,2	—
3Х2В8Ф	0,30—0,40	0,15—0,40	0,15—0,40	2,2—2,7	7,5—8,5	0,2—1,2	—	—

<sup>1)</sup> Содержание серы и фосфора должно быть меньше 0,030 % во всех сталях.

#### 4.2. Стали для штампов горячего деформирования

В еще более тяжелых условиях работают штамповые инструменты для горячего формообразования. Материал штампов соприкасается с горячим металлом и нагревается, причем нагрев чередуется с охлаждением. Эффективность использования таких прогрессивных методов точного формообразования, как горячая объемная штамповка, прессование и литье под давлением, зависит от стойкости инструмента. С расширением номенклатуры обрабатываемых сплавов, увеличением производительности и мощности оборудования формообразующий инструмент испытывает возрастающие нагрузки. Требования к материалу инструмента непрерывно растут.

Материал для горячих штампов должен удовлетворять комплексу требований. К ним в первую очередь относятся высокая прочность (не менее 1000 МПа), необходимая для сохранения формы штампа при высоких удельных давлениях во время деформирования, и высокая теплостойкость, позволяющая сохранить высокие твердость и прочностные свойства при длительном температурном воздействии. Стали должны иметь достаточную вязкость для предупреждения поломок при ударном нагружении. Они должны обладать высоким сопротивлением термической усталости (разгаростойкости), сохраняя способность выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования сетки трещин. Горячештамповые стали должны иметь хорошую окалиностойкость и высокую прокаливаемость для обеспечения необходимых механических свойств по всему сечению, что особенно важно для массивных штампов.

В соответствии с указанными требованиями для штампов горячего формообразования применяют легированные стали, содержащие 0,3—0,6 % С, подвергаемые закалке и отпуску при 550—680 °С с целью получения трооститной и трооститно-сорбитной структуры.

Для молотовых штампов применяют сталь 5ХНМ и ее аналоги: 5ХНВ, 5ХНТ, 5ХГМ. После закалки и отпуска при 550 °С сталь 5ХНМ при комнатной температуре имеет следующие механические свойства:  $\sigma_b = 1200—1300$  МПа,  $\delta = 10—12$  %,  $KCU = 0,4$  МДж/м<sup>2</sup>. При нагреве до 500 °С  $\sigma_b = 850—900$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 600—650$  МПа. При температурах эксплуатации выше 500 °С стойкость инструмента из стали 5ХНМ резко падает.

Хорошо зарекомендовали себя на автотракторных машиностроительных заводах стали 4ХМФС, 5Х2СФ и 4ХСНМЦР. Внедрение этих сталей взамен 5ХНМ для штамповки углеродистых и низколегированных сталей позволило повысить стойкость инструмента в 2—3 раза. Для изготовления крупногабаритных прессовых и молотовых штампов применяют сталь 5Х2НМФС, обеспечивающую повышение стойкости более чем в 2 раза.

Для пресс-форм литья под давлением и прессования цветных металлов и сплавов до последнего времени использовали сталь 3Х2В8Ф. Ее недостатком является низкая технологичность, что ограничивает возможность ее применения для крупного инструмента. Кроме того, сталь 3Х2В8Ф чувствительна к ударным нагрузкам и содержит значительные количества дорогого и дефицитного вольфрама.

Взамен этой стали предложена сталь марки 3Х2М2Ф, используемая для изготовления пресс-форм литья под давлением медных и алюминиевых сплавов, а также для изготовления пресс-шайб и внутренних втулок контейнеров при прессовании медных сплавов. Применение стали 3Х2М2Ф позволило повысить стойкость инструмента в 1,5—3 раза.

Для изготовления крупного прессового инструмента — пресс-штемпелей, втулок контейнеров и матриц на заводах цветной металлургии применяют стали 3ХВ4СФ и 4ХСН2МВФ.

Прогресс техники требует расширения рабочего температурного диапазона штамповых сталей. Уже сейчас нужны стали с рабочей температурой 700—800 °С. Обычные жаропрочные сплавы нетехнологичны, так как плохо обрабатываются резанием. Разработан принципиально новый класс штамповых сталей для горячего формообразования — сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации. Примером такой стали служит 4Х2Н5М3К5Ф, сочетающая технологические преимущества сталей на ферритной основе с высокой эксплуатационной стойкостью, свойственной жаропрочным аустенитным сталям и сплавам. Внедрение этой стали взамен 3Х2В8Ф при изготовлении матриц для прессования медных сплавов позволило повысить их стойкость в 10 раз.

Для увеличения твердости при высоких температурах используют химико-термическую обработку: азотирование, диффузионное хромирование, борирование. На поверхность гравюры штампа из газовой фазы проводят осаждение карбидов титана, имеющих особо высокую твердость.

## Глава 12

### СТАЛИ И СПЛАВЫ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

#### 1. Коррозионностойкие стали

##### *1.1. Общие сведения*

Коррозией называется разрушение металла под действием окружающей среды в результате ее химического и электрохимического воздействия.

Ущерб, причиняемый коррозией, может быть прямым и косвенным. Прямой ущерб включает в себя стоимость замены подвергшихся коррозии частей машин, трубопроводов, устройств. Если проржавела крыша дома, труба парового отопления, кузов автомобиля, их меняют или ремонтируют. Для восстановления пораженных коррозией машин и конструкций в нашей стране ежегодно расходуется 20—25 млн. т металла, что составляет 12—15 % мощности металлургической промышленности.

Косвенный ущерб от коррозии связан с простоем оборудования в результате аварий, ухудшением качества продукции, например в результате ее загрязнения, увеличением расхода топлива, материалов и др. Так, при выходе из строя химической аппаратуры не выпускается продукция, отказ в работе двигателя приводит к простоем ценного оборудования, нарушение герметичности газо- или нефтепровода делает возможной утечку ценного сырья. Косвенный ущерб обычно значительно выше прямого. Если в результате коррозии водопроводной системы прекращается подача воды на металлургический завод, то ремонт водопровода будет стоить во много раз меньше, чем расходы, связанные с остановкой завода на несколько часов.

Проникновение вследствие коррозии газа, нефти и других продуктов в окружающую среду может приводить не только к материальным потерям, но и к угрозе жизнеобеспечения человека и природы. Такой ущерб не поддается расчету.

По внешнему виду коррозия обычно проявляется в потере металлического блеска и появлении на поверхности продуктов коррозии ( в случае стали — ржавчины бурого цвета), а также в резком падении механических свойств.

В зависимости от свойств окружающей среды различают:

1) химическую коррозию, обусловленную воздействием на металл сухих газов (газовая коррозия) и неэлектролитов (например, нефти или нефтепродуктов);

2) электрохимическую коррозию, обусловленную воздействием на металл жидких электролитов: водных растворов солей, кислот, щелочей или влажного воздуха (атмосферная коррозия), т.е. растворов, содержащих ионы и являющихся проводниками электричества.

Электрохимическая коррозия — наиболее распространенный вид коррозии металлов. Она представляет собой электрохимическую реакцию, состоящую из двух процессов — анодного и катодного. Поведение металлов, находящихся в электролите, зависит от значения их электродного потенциала. Если два разных соприкасающихся металла находятся в электролите, то металл, имеющий более отрицательный электродный потенциал (анод), отдает ионы в раствор и растворяется, а избыточные электроны перетекают в металл, имеющий более высокий



Рис. 125. Основные разновидности электрохимической коррозии (схема) и их относительное влияние на прочность листового дуралюмина:  
 а — равномерная коррозия; б — местная коррозия; в — межкристаллитная коррозия

электродный потенциал (катод). Катод при этом не разрушается, а электроны из него удаляются во внешнюю среду. Чем ниже электродный потенциал металла, тем легче металл отдает ионы в раствор, тем ниже его коррозионная стойкость.

Значения электрохимического потенциала:

Элемент	Au	Ag	Cu	H	Ni	Fe	Zn	Al
Потенциал, В	+1,42	+0,80	+0,34	0	-0,23	-0,44	-0,76	-1,66

Это же положение касается разных фазовых составляющих, которые могут быть в структуре сплава. Находясь в электролите, они приобретают разные по величине и знаку электродные потенциалы. Чем больше различие в электродных потенциалах отдельных фазовых составляющих, тем активнее будет протекать коррозионный процесс и коррозионное разрушение сплава. Электрохимическая гетерогенность поверхности металла является причиной коррозии. Поэтому коррозионностойкие сплавы должны иметь однофазное строение.

Схемы основных разновидностей электрохимической коррозии приведены на рис. 125.

В случае однофазного материала, например чистого металла или однородного твердого раствора, коррозия распределяется равномерно по всей поверхности — происходит так называемая равномерная коррозия. Однако металлы, имеющие такую структуру, встречаются редко.

В неоднородных металлах, которые встречаются значительно чаще, коррозия носит местный характер, охватывая отдельные участки его поверхности. К местной коррозии относятся так называемые точечная, пятнистая или язвенная ее разновидности. Очаги местной коррозии являются концентраторами напряжений.

Особенно опасна межкристаллитная (МКК) коррозия, почти незаметная с поверхности и распространяющаяся в глубь металла по грани-

цам зерен. В результате межкристаллитной коррозии нарушается связь между зернами, при постукивании по металлу пропадает характерный металлический звук и после приложения нагрузки металл легко разрушается.

При одновременном действии коррозионной среды и нагрузки или остаточных напряжений возникает коррозия под напряжением, проявляющаяся в виде коррозионного растрескивания или сетки трещин на поверхности металла.

Стали, устойчивые против газовой коррозии при высоких температурах, соответствующих температурам окалинообразования, называют *жаростойкими сталями*. Стали, устойчивые против электрохимической коррозии, называют *коррозионностойкими* или *нержавеющими сталями*.

Для защиты от коррозии широко применяют явление пассивации. Пассивность — это состояние повышенной коррозионной устойчивости металла или сплава, вызванное преимущественным торможением анодного процесса. Пассивное состояние наступает при образовании тонких прочных оксидных пленок, равномерно покрывающих всю поверхность металла. Переход из активного состояния в пассивное связан с повышением электродного потенциала.

Устойчивость стали против коррозии повышается при введении в ее состав таких элементов, как хром, алюминий, кремний, способствующих образованию на поверхности металла плотных защитных оксидных пленок и повышающих электрохимический потенциал стали. Алюминий и кремний повышают хрупкость стали и применяются реже, чем хром. При введении хрома в количестве 12—14 % на поверхности стали образуется защитная плотная пленка оксида  $Cr_2O_3$ , сталь становится пассивной, ее электрохимический потенциал становится положительным и коррозионная стойкость стали скачкообразно растет (рис. 126). Сталь с 12—14 % Cr устойчива против коррозии в атмосфере, воде, морской воде, ряде кислот, щелочей и солей. Кроме хрома, в состав коррозионностойкой стали входят и другие элементы. В машиностроении в основном применяют хромистые и хромоникелевые коррозионностойкие стали.

### 1.2. Хромистые стали

Хромистые стали после охлаждения на воздухе имеют ферритную, мартенситно-ферритную (с содержанием феррита более 10 %) и мартенситную структуры.

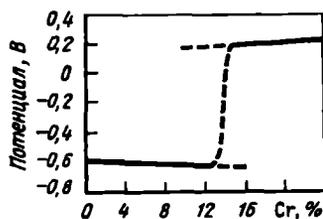


Рис. 126. Зависимость потенциала железохромистых сплавов от содержания хрома

Стали 20X13, 30X13, 40X13 и 95X18 относят к мартенситному, 12X13, 14X17H2 — к мартенситно-ферритному и 08X13, 12X17, 08X17T, 15X25T, 15X28 — к ферритному классам. С увеличением содержания хрома возрастает коррозионная стойкость сталей.

Термическая обработка сталей мартенситного класса 30X13, 40X13 состоит из закалки от температуры около 1000 °С в масле и низкого отпуска при 200—300 °С. После термообработки они имеют структуру отпускаемого мартенсита. Из них изготавливают режущий, мерительный и хирургический инструменты, пружины, предметы домашнего обихода.

Стали марок 12X13, 14X17H2 подвергают закалке и высокому отпуску при 600—700 °С с целью получения сорбитной структуры. Их применяют для изготовления деталей с повышенной пластичностью, подвергающихся ударным нагрузкам, работающих в слабоагрессивных средах. К таким деталям относятся клапаны гидравлических прессов, мешалки, шнеки, валы в пищевой промышленности.

Термообработка ферритных сталей с повышенным содержанием хрома состоит из отжига при температуре 700—780 °С. Отжиг проводится с целью получения более однородного твердого раствора и увеличения коррозионной стойкости. Стали марок 12X17, 15X25T, 15X28 применяют для изготовления оборудования заводов пищевой и легкой промышленности, труб теплообменной аппаратуры, работающей в агрессивных средах. Сварка ферритных сталей обычно не применяется, она приводит к росту зерна и снижает коррозионную стойкость.

### *1.3. Аустенитные хромоникелевые стали*

Хромоникелевые коррозионностойкие стали после охлаждения на воздухе имеют аустенитную, аустенитно-мартенситную и аустенитно-ферритную (феррита более 10 %) структуру. Широко применяемые стали типа 12X18H10T, 12X18H9, 04X18H10, 03X18H12, 17X18H9 обычно содержат 18 % Cr и 9—12 % Ni. Они имеют более высокую коррозионную стойкость по сравнению с хромистыми сталями. Термообработка этих сталей состоит из закалки от температуры 1100—1150 °С в воде без отпуска. После закалки стали имеют следующие основные свойства: чисто аустенитную структуру, низкую твердость, высокую пластичность; они немагнитны, хорошо деформируются и свариваются. Учитывая невысокую прочность (для стали 12X18H9  $\sigma_{0,2} = 200—250$  МПа,  $\sigma_b = 500—600$  МПа при  $\delta = 50$  %,  $\psi = 50—60$  %), стали подвергают холодной деформации с наклепом, после чего прочность повышается.

Содержание углерода в коррозионностойких аустенитных сталях ограничено и желательно, чтобы оно было ниже предела растворимости углерода в легированном никелем аустените при 20 °С, составляющего

0,04 %. Присутствие в стали более высоких концентраций углерода может приводить к образованию карбидов хрома типа  $Cr_{23}C_6$ , вследствие чего твердый раствор обедняется хромом и создается двухфазная структура. При этом снижается коррозионная стойкость стали. Для предотвращения образования карбидов хрома, особенно при технологических нагрехах, связанных с проведением операций сварки или пайки и опасностью возникновения межкристаллитной коррозии, в сталь вводят дополнительно титан, ниобий или тантал. Эти элементы связывают углерод в карбиды типа  $TiC$ ,  $NbC$ ,  $TaC$ , оставляя хром в твердом растворе. Необходимое количество титана для введения в сталь определяют по формуле  $Ti = (C - 0,02) \cdot 5$ , где  $C$  — содержание углерода в стали.

Пассивации  $Cr-Ni$  аустенитных сталей способствует введение 0,5—1,5 %  $Mo$ . Введение таких количеств молибдена в сталь 12X18H10T уменьшает плотность критического тока пассивации в 10 раз.

В пищевой промышленности хромоникелевые коррозионностойкие стали применяют в изделиях, контактирующих с агрессивными пищевыми средами (емкости, трубопроводы и т.д.).

В холодильной и криогенной технике они используются для изготовления сосудов для хранения жидких газов, корпусов адсорберов ацетилена, деталей центробежных машин.

Хромоникелевые коррозионностойкие стали содержат дефицитный и дорогостоящий никель и поэтому имеют высокую стоимость. В ряде случаев применяют более дешевые стали, в которых часть или весь никель заменены марганцем. До температур  $-196^\circ C$  и в слабоагрессивных пищевых средах вместо стали 10X18H10T может быть использована сталь 10X14Г14Н4Т.

Также в целях экономии никеля промышленность выпускает двухслойные стали, в которых в основном слое использованы низколегированные или углеродистые стали, а в плакирующем слое — хромоникелевые коррозионностойкие стали и цветные металлы.

#### *1.4. Другие методы защиты от коррозии*

Для защиты от коррозии металлических изделий применяют также нанесение на их поверхность как металлических, так и неметаллических покрытий.

Металлические покрытия наносят электроосаждением, погружением в расплавленные металлы, металлизацией напылением, химическим осаждением солей, диффузией и т.д. В последнее время все большее распространение получает нанесение покрытий в вакууме. В этом случае покрытия получают испарением металлов в вакууме с последующей конденсацией паров на защищаемой поверхности. Этим способом про-

изводят алюминирование, кадмирование и цинкование в вакууме стальных деталей.

Знание механизма коррозии позволило создать методы коррозионной защиты путем наложения на металл такого потенциала, при котором он становится термодинамически устойчивым. К таким методам относятся катодная защита и уменьшение агрессивности среды, окружающей металлоконструкцию.

Катодная защита состоит в присоединении к защищаемой конструкции анода протектора с более отрицательным электрохимическим потенциалом. Катодную или протекторную защиту широко применяют при защите от морской и подземной коррозии металлоконструкций, коммуникаций, трубопроводов, сосудов и т.д. В качестве анодов-протекторов для защиты стальных изделий обычно применяют сплавы магния или цинка.

Для уменьшения агрессивности окружающей среды в нее вводят добавки, называемые *ингибиторами коррозии*, которые или способствуют пассивации металла, или значительно снижают скорость коррозии металлов. Условием использования ингибиторов является эксплуатация изделия в замкнутой среде постоянного состава. В качестве ингибиторов коррозии используют различные органические и неорганические вещества.

## 2. Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы

Для материалов, используемых при высоких температурах, основными характеристиками являются жаростойкость (окалиностойкость) и жаропрочность.

Способность металла сопротивляться химическому действию окружающей газовой среды при высоких температурах называется *жаростойкостью* или *окалиностойкостью*. При нагреве выше 600 °С происходит интенсивное окисление сплавов на основе железа. Образующаяся на поверхности металла рыхлая пленка оксида FeO неспособна предотвратить диффузию кислорода в металл. Такие легирующие элементы, как Cr, Si, Al, улучшают состав и строение оксида пленки. Она становится плотной, хорошо прилегающей к металлу, что затрудняет диффузию кислорода.

Плотные защитные оксидные пленки чаще всего получают при введении в сталь достаточных количеств хрома. Поэтому коррозионностойкие стали одновременно являются жаростойкими сталями. При этом жаростойкие свойства растут с увеличением содержания хрома в стали. Сталь, содержащая 5 % Cr, сохраняет окалиностойкость до 600 °С (15X5), 9 % (40X9C2) — до 800 °С, 17 % (08X17T) — до 900 °С. Для

изготовления деталей газовых турбин и печного оборудования применяют сталь 20Х23Н18, имеющую окалиностойкость 1050—1100 °С.

Другой важнейшей характеристикой высокотемпературных материалов является жаропрочность. Способность материала сопротивляться пластической деформации и разрушению при высоких температурах называется *жаропрочностью*. При температурах, близких к началу рекристаллизации, приложение нагрузки, даже меньшей предела текучести, приводит к медленной пластической деформации, металл как бы «ползет». Это явление называется *ползучестью* или *крипом*. Учитывая, что развитие высокотемпературной ползучести совпадает с началом рекристаллизации, рост жаропрочности сплава может быть достигнут при повышении температуры его рекристаллизации.

Различают следующие виды жаропрочных сталей и сплавов.

1. Перлитные стали. Стали перлитного класса используют для изготовления крепежа, труб, паропроводов, пароперегревателей и коллекторов энергетических установок, длительно работающих при температурах 500—550 °С. Перлитные стали содержат относительно малые количества углерода и обычно легированы хромом, молибденом и ванадием (марки 12ХМ, 12Х1МФ). Стали этого класса используют в закаленном или нормализованном и высокоотпущенном состоянии.

2. Мартенситные стали. Стали мартенситного класса используют для изготовления деталей энергетического оборудования (лопатки, диафрагмы, турбинные диски, роторы), длительно работающих при температурах 600—620 °С. Стали более значительно легированы хромом, а также вольфрамом, молибденом, ванадием (марки 15Х11МФ, 15Х12ВМФ). Высокая жаропрочность этих сталей достигается при закалке от 1000—1050 °С в масле на мартенсит с последующим отпуском на сорбит или троостит.

Клапаны выхлопа двигателей внутреннего сгорания небольшой и средней мощности изготавливают из сильхромов — хромокремнистых сталей мартенситного класса типа 40Х9С2, 40Х10С2М. Клапаны мощных роторов изготавливают из аустенитных сталей.

3. Аустенитные стали. Из этих сталей изготавливают роторы, диски, лопатки газовых турбин, клапаны дизельных двигателей, работающие при температурах 600—700 °С. Хромоникелевые аустенитные стали для увеличения жаропрочности дополнительно легируют вольфрамом, молибденом, ванадием, ниобием, бором и другими элементами. Примером жаропрочных сталей аустенитного класса являются стали 09Х14Н16Б, 09Х14Н19В2БР, 45Х14Н14В2М.

Термообработка этих сталей состоит из закалки и старения при температурах выше эксплуатационных. При старении происходит выделение из аустенита мелкодисперсных избыточных фаз, что дополнительно увеличивает сопротивление стали ползучести.

4. Сплавы на никелевой основе. Эти сплавы работают при температурах до 700—900 °С. К сплавам на никелевой основе относятся:

нихромы, содержащие никель и хром, используемые как жаростойкие материалы для нагревательных элементов;

нимоники — стареющие сплавы на основе никеля, содержащие хром, титан и алюминий. Примером нимоника может служить сплав ХН77ТЮР, содержащий, %: 19—22 Cr, 2,4—2,8 Ti, 0,6—1,0 Al, остальное Ni. Максимальная жаропрочность нимоников достигается после закалки от 1100—1200 °С и старения при 700—750 °С в течение 15—20 ч.

5. Керамические материалы. Материалы на основе SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, системы Si—Al—O—N начинают применять в качестве жаропрочных для изготовления поршней, головок блока цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Керамические материалы имеют низкую плотность, они прочны, износостойки, хорошо сопротивляются коррозии и эрозии. Детали из этих материалов способны работать при температурах выше 1500—1700 °С, не боясь перегрева и не требуя принудительного охлаждения.

Недостатками керамических материалов являются хрупкость и относительная технологическая сложность изготовления деталей.

6. Тугоплавкие материалы. Для работы при температурах выше 1000 °С применяют тугоплавкие металлы и сплавы на их основе.

Тугоплавкими называются металлы, имеющие температуру плавления выше, чем у железа. Наибольшее применение в технике находят тугоплавкие металлы, имеющие следующие температуры плавления, °С: Cr 1900, Nb 2415, Mo 2620, Ta 3000, W 3410.

Расширение производства и применение тугоплавких металлов и сплавов связано с развитием атомной теплоэнергетики и ракетно-космической техники.

Сплавы на основе ниобия и молибдена имеют наиболее удовлетворительные технологические свойства. Кроме того, они охрупчиваются при сравнительно низких температурах (+100) — (–100) °С. Вольфрам переходит в хрупкое состояние при температуре 600 °С. Благодаря сравнительно высокой пластичности сплавы ниобия и молибдена имеют более широкое применение.

Все тугоплавкие металлы имеют низкую жаростойкость. Для защиты их от окисления применяют различные покрытия. Для молибденовых и вольфрамовых сплавов применяют различные термодиффузионные силицидные покрытия.

В качестве материала для вкладышей сопел в реактивных двигателях, работающих на твердом топливе, применяют графит, имеющий температуру плавления 3900 °С. Температура пламени в таких двигателях достигает 3500 °С. Недостатком графита является низкая эрози-

онная стойкость, приводящая к износу сопла из-за твердых частиц, содержащихся в отходящих газах.

Для изготовления сопел можно использовать пористый спеченый вольфрам, пропитанный материалами с высокой теплопроводностью — медью или серебром.

### 3. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами

#### 3.1. Магнитные стали и сплавы

В зависимости от назначения различают магнитно-твердые и магнитно-мягкие материалы.

Магнитно-твердые стали и сплавы применяют для изготовления постоянных магнитов. Они должны иметь высокие значения коэрцитивной силы и остаточной индукции. *Коэрцитивной силой* называется напряженность магнитного поля обратного знака, которая должна быть приложена к образцу для его размагничивания. *Остаточной индукцией* называют магнитную индукцию, остающуюся в образце после его намагничивания и снятия магнитного поля. К магнитно-твердым сталям относятся стали ЕХЗ (1 % С, 3 % Cr), ЕХ5К5 (1 % С, 5 % Cr, 5 % Со), подвергаемые закалке на мартенсит и старению при 100 °С. Одним из лучших материалов для магнитов является сплав алнико (8 % Al, 14 % Ni, 24 % Со, остальное Fe). Магниты из алнико изготовляют литьем, так как они плохо обрабатываются резанием.

Магнитно-мягкие стали используются для работы в переменных полях, т.е. в условиях непрерывного перемагничивания. Магнитно-мягкие материалы должны иметь малое значение коэрцитивной силы и высокую магнитную проницаемость. Из них изготовляют сердечники магнитных устройств, магнитопроводы. Для этой цели широко применяют низкоуглеродистые стали с добавлением 1—5 % Si.

Высокую магнитную проницаемость имеют специальные железоникелевые сплавы — пермаллой с определенными узкими пределами содержания никеля (около 78,5 %). Магнитная проницаемость пермаллоев почти в 10 раз больше, чем низкоуглеродистого технического железа, что позволяет использовать их для приборов, работающих в слабых полях (радио, телефон). Для тех же целей разработан заменитель дорогих пермаллоев — сплав альсифер, содержащий 5,4 % Al, 9,6 % Si, остальное железо. Недостатком сплава является его повышенная хрупкость. Альсифер обычно используют в виде порошка или тонкостенных фасонных отливок.

### 3.2. Электротехнические стали и сплавы

Стали и сплавы этого типа используют либо в качестве материалов, имеющих минимальное электросопротивление, либо, наоборот, для преобразования электрической энергии в тепловую. Вторая группа электротехнических сплавов имеет высокое электросопротивление и используется для изготовления электронагревательных элементов и реостатов.

В качестве проводниковых материалов применяют медь, алюминий, редко — серебро. Проводниковые материалы должны содержать мало примесей, так как легирование повышает электросопротивление.

Особую группу проводниковых материалов составляют сверхпроводники. С понижением температуры происходит монотонное падение электросопротивления. Однако при температурах, близких к абсолютному нулю (такие температуры называют критическими), сопротивление некоторых металлов и сплавов резко уменьшается. Это явление называется *сверхпроводимостью*. Оно было открыто в 1911 г. Каммерлинг-Оннесом, который наблюдал исчезновение сопротивления ртути при температуре около 4,2 К.

Установлено, что из всех элементов наиболее высокую критическую температуру перехода имеет ниобий: 9,17 К. В качестве сверхпроводников обычно используют сплавы на его основе: Nb—Ti, Nb—Zr, Nb—Zr—Cu, Nb—Zr—W, Nb—Zr—Sn. Сплав Nb—Ge способен оставаться в сверхпроводящем состоянии вплоть до 23 К.

Для электронагревателей используют ферритные низкоуглеродистые стали, легированные хромом и алюминием (хромали) и сплавы никеля и хрома (нихромы), работающие до температур 1100—1200 °С. Молибденовые нагреватели, хотя и имеют более высокую допустимую температуру эксплуатации (до 1500 °С), из-за низкой жаростойкости могут работать только в вакууме или среде инертных газов.

Для реостатов используют медноникелевые сплавы с добавками марганца (константат, копель), электросопротивление которых мало изменяется при колебаниях температуры. Константан МнМц40—1,5 содержит 40 % Ni и 1,5 % Мп, а копель МнМц45—0,5 — соответственно 43 % Ni и 0,5 % Мп.

### 3.3. Сплавы с малым температурным коэффициентом линейного расширения

Малый температурный коэффициент линейного расширения имеют сплавы системы Fe—Ni в интервале концентраций 29—45 % Ni. На рис. 127 приведена зависимость температурного коэффициента линейного расширения от содержания никеля. Наименьшее значение коэффициента  $\alpha$  имеет инвар 36Н — сплав, содержащий 36 % никеля

( $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ). Еще более низкое значение коэффициента линейного расширения ( $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) в температурном интервале от  $-60$  до  $+100$  °С достигается при использовании суперинвара 32НКД — сплава, дополнительно легированного кобальтом и медью (31,5—33 % Ni, 3,2—4,2 % Co, 0,6—0,8 % Cu).

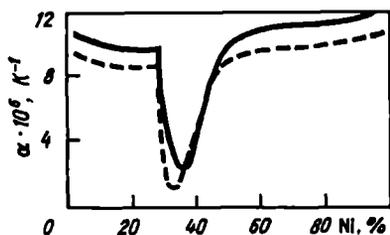


Рис. 127. Зависимость температурного коэффициента линейного расширения от содержания никеля в Fe—Ni сплавах

### 3.4. Сплавы для упругих элементов

Для изготовления различных упругих элементов в приборостроении (сильфонов, пружин, мембран) применяют материалы с высокими упругими свойствами, не меняющимися в широком температурном диапазоне (до 200 °С). К ним относят элинвар — Fe—Cr—Ni сплав, содержащий около 40 % Ni, 6 % Cr с добавками Ti и Al. Элинвар упрочняется в результате закалки и старения при 700 °С, при котором выделяются дисперсные частицы.

### 3.5. Сплавы с эффектом памяти формы

Эффектом памяти формы называется способность металлов и сплавов, пластически деформированных в мартенситном состоянии или в интервале температур мартенситного превращения, восстанавливать при нагреве исходную форму. Нагрев приводит к восстановлению кристаллов исходной высокотемпературной фазы и устраняет пластическую деформацию.

В зависимости от степени восстановления формы различают сплавы с полной и неполной памятью. Неполное восстановление формы характерно для сплавов на основе железа. Полное восстановление свойственно сплавам с термоупругим мартенситом. К таким сплавам относятся сплавы систем Ni—Ti, Cu—Al—Ni, Au—Cd.

Сплавы этого типа в определенных температурных пределах характеризуются сверхупругими свойствами. Если упругая деформация пружинных материалов обычно не превышает 1 %, то у этих сплавов упругая деформация может достигать 15 % и более.

Широкое применение нашел титаноникелевый сплав, известный также под названием нитинола, содержащий 55 % Ni. Сплавы такого типа можно применять для создания заклепочных соединений в труднодоступных местах, например при соединении заклепками крыла с каркасом, для подводных домкратов, в приборах автоматики и контроля, чувствительные элементы которых реагируют на повышение температуры.

Цветные металлы и сплавы, хотя и имеют более высокую стоимость по сравнению с черными, обладают рядом ценных свойств и находят широкое применение в различных отраслях техники.

Из сплавов цветных металлов в машиностроении наибольшее промышленное применение нашли конструкционные сплавы на основе меди и легких металлов — титана, алюминия, магния.

Сплавы легких металлов характеризуются высокой удельной прочностью, измеряемой отношением прочностных характеристик к плотности материала.

### 1. Титан и его сплавы

Титан широко распространен в земной коре, где его содержится около 0,6 %, а по распространенности он занимает четвертое место после алюминия, железа и магния. Однако промышленный способ его извлечения был разработан лишь в 40-х годах XX века. Благодаря прогрессу в области самолето- и ракетостроения производство титана и его сплавов интенсивно развивалось. Это объясняется сочетанием таких ценных свойств титана, как малая плотность, высокая удельная прочность ( $\sigma_b/\gamma$ ) и коррозионная стойкость. Символично, что облицовка монумента покорителям космоса у входа на ВДНХ в Москве изготовлена из листового титана.

Титан — металл серебристо-белого цвета, имеющий малую плотность ( $4,5 \text{ г/см}^3$ ). Температура плавления титана  $1672 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  в зависимости от степени его чистоты.

Титан имеет две полиморфные модификации:  $\alpha$ -титана с гексагональной плотноупакованной решеткой и высокотемпературную модификацию  $\beta$ -титана с кубической объемно-центрированной решеткой.

Температура полиморфного  $\alpha \rightleftharpoons \beta$  превращения составляет  $882 \text{ }^\circ\text{C}$ .

По удельной прочности в интервале температур  $300\text{—}600 \text{ }^\circ\text{C}$  титан не имеет себе равных; при температуре ниже  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  сплавы титана уступают алюминиевым сплавам, а выше  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  — сплавам на основе железа и никеля.

Титан имеет низкий модуль нормальной упругости  $E = 112\,000 \text{ МПа}$ , почти в 2 раза меньший, чем у железа и никеля, что затрудняет изготовление жестких конструкций. Для повышения жесткости приходится увеличивать толщину деталей и их массу.

Хотя титан относится к числу химически активных металлов, он обладает высокой коррозионной стойкостью, так как на его поверхности

образуется стойкая пассивирующая пленка  $TiO_2$ . Благодаря этому титан и его сплавы не корродируют в атмосфере, пресной и морской воде, устойчивы против кавитационной коррозии и коррозии под напряжением, а также в кислотах органического происхождения.

Производство изделий из титана и его сплавов имеет ряд технологических особенностей. Из-за высокой химической активности расплавленного титана его выплавку, разливку и дуговую сварку производят в вакууме или в атмосфере инертных газов.

Сплавы титана имеют несколько меньшую жаропрочность, чем специальные стали. Рабочая температура их использования не превышает  $550\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ . При увеличении температуры выше  $500\text{ }^\circ\text{C}$  титан и его сплавы легко окисляются и интенсивно поглощают водород и другие газы (азот, кислород). Газы образуют с титаном твердые растворы внедрения разной предельной концентрации, в то время, как легирующие элементы (алюминий, ванадий, олово и др.) образуют твердые растворы замещения. Примеси внедрения оказывают сильное влияние на свойства титана, увеличивая прочность и резко уменьшая вязкость и пластичность. При технических и эксплуатационных нагревах необходимо принимать меры для защиты титана от газонасыщения. Кроме газов, вредной примесью для титана является углерод, образующий карбиды.

Высокая способность к газопоглощению обусловила применение титана в качестве геттерного материала для повышения вакуума в электронных лампах.

Титан пластичен и легко обрабатывается давлением при комнатной и повышенной температурах. Титан и его сплавы хорошо свариваются, обеспечивая высокую прочность и пластичность сварного соединения.

Основной целью легирования титановых сплавов является повышение механических свойств. Широкое применение нашли сплавы титана с алюминием, хромом, молибденом, ванадием, марганцем. Основным легирующим элементом является алюминий, который обычно содержится во всех сплавах.

По структуре различают три класса титановых сплавов.

1. Сплавы с  $\alpha$ -структурой, легированные  $\alpha$ -стабилизаторами, из которых наиболее широко используется алюминий. Сплавы обычно содержат  $4\text{--}6\%$  Al, находящегося в виде твердого раствора в  $\alpha$ -титане. К сплавам этой группы относятся сплавы марок ВТ5, ВТ46, имеющие  $\sigma_b = 700\text{--}900$  МПа,  $\delta = 10\text{--}12\%$ .

2. Сплавы с  $(\alpha + \beta)$ -структурой (двухфазные), содержащие  $4\text{--}6\%$  Al и  $2\text{--}4\%$   $\beta$ -стабилизаторов: Cr, V, Mn, Mo. К ним относятся сплавы марок ВТ3—1, ВТ6, имеющие  $\sigma_b = 1000\text{--}1200$  МПа и  $\delta = 8\%$ . Сплавы этой группы упрочняются с помощью термической обработки.

3. Сплавы с устойчивой  $\beta$ -структурой имеют меньшее промышленное применение из-за необходимости использования большого количества дорогих легирующих V, Mo, Nb, Ta, к тому же обладающих высокой плотностью. Сплавы этого типа менее пластичны и дороже.

Состав и свойства некоторых титановых сплавов приведены в табл. 17.

Таблица 17. Химический состав и свойства некоторых титановых сплавов (ГОСТ 19807—74)

Марка сплава	Класс по структуре	Содержание легирующих элементов, %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	KCU, $2$ МДж/м <sup>2</sup>
Технический титан, BT1—0	$\alpha$	—	390—540	20	1,0
BT5	$\alpha$	4,3—6,2 Al	700—950	10—15	0,5
BT5—1	$\alpha$	4,3—6,0 Al, 2,0—3,0 Sn	750—950	10—15	0,4
OT4	$\alpha$	3,5—5,0 Al, 0,8—2,0 Mn	700—900	12—20	0,4
BT6C	$\alpha + \beta$	5,3—6,8 Al, 3,5—5,0 V	850—1050	10	0,3
BT3—1	$\alpha + \beta$	5,5—7,0 Al, 0,8—2,3 Cr, 2,0—3,0 Mo, 0,2—0,7 Fe, 0,15—0,40 Si	980—1170	6	0,2

Упрочнение титановых сплавов может достигаться легированием, наклепом или термической обработкой в результате протекания полиморфного превращения.

В титановых сплавах  $\alpha$ -стабилизаторы повышают температуру  $\alpha \rightleftharpoons \beta$  полиморфного превращения. В сплавах с устойчивой  $\alpha$ -структурой нельзя переохладить  $\beta$ -фазу до низких температур даже при очень высоких скоростях охлаждения. Поэтому такие сплавы не упрочняются термической обработкой.

Наоборот,  $\beta$ -стабилизаторы снижают температуру полиморфного превращения титана и расширяют область твердых растворов на основе  $\beta$ -титана. При закалке титановых сплавов от температуры  $\beta$ -области протекает мартенситное превращение  $\beta \rightarrow \alpha$ . Образующаяся фаза является пересыщенным твердым раствором легирующих элементов в  $\alpha$ -титане. Кристаллы этой фазы, как и в сталях, образуются бездиффузионным путем по сдвиговому механизму. Они имеют игольчатое строение и ГП решетку.

Термообработка титановых сплавов подобна термообработке стали и состоит из закалки от температуры 800—950 °С и отпуска (старения) при 450—600 °С, но в отличие от стали в результате термообработки достигается меньшее упрочнение.

Титановые сплавы склонны к повышенному налипанию на инструмент, что в сочетании с их низкой теплопроводностью затрудняет процесс механической обработки. При обработке резанием целесообразно применение инструмента с твердосплавными пластинами.

При проведении сварки титановых сплавов во избежание появления дефектов в швах, основными из которых являются поры и холодные трещины, необходимо тщательное удаление поверхностной оксидной пленки основного и присадочного материалов. Из-за химической активности титана обязательна защита инертными газами сварочной ванны и осылающих участков от соприкосновения с воздушной атмосферой.

В настоящее время титан широко используется в ракетно-космической и авиационной технике, в судостроении и транспортном машиностроении, где особенно важную роль играют малая плотность в сочетании с высокой прочностью и сопротивляемостью коррозии. Из сплавов титана делают обшивку фюзеляжа и крыльев сверхскоростных самолетов, панели и шпангоуты ракет, морскую аппаратуру и обшивку корпусов судов, диски и лопатки турбин. Титановая обшивка морских судов не обрастает ракушками. Благодаря пластичности и вязкости при низких температурах, титановые сплавы начинают применяться в холодильной и криогенной технике.

Высокая коррозионная стойкость в различных средах делает сплавы титана перспективными для применения в пищевой промышленности. Некоторые пищевые продукты могут портиться от контакта со сталью, тогда как титан не придает им постороннего запаха, цвета или вкуса.

Титан используется в медицине благодаря высокой устойчивости в тканях человеческого организма. Титан не отторгается костной и мышечной тканями и легко обрастает ими. По своей биологической инертности превосходит все известные коррозионностойкие стали и сплавы.

Несмотря на то, что пока стоимость титановых сплавов примерно в 8 раз превышает стоимость коррозионностойких хромоникелевых сталей, они имеют широкие перспективы применения в различных отраслях народного хозяйства, являясь важнейшими конструкционными материалами недалекого будущего.

## 2. Алюминий и его сплавы

### 2.1. Применение и основные свойства

Алюминий и алюминиевые сплавы были первыми конструкционными металлами, которые были использованы в самолетостроении. Свое зна-

чение в самолетостроении алюминий сохранил и в наше время, занимая первое место среди применяемых металлов (до 3/4 массы пассажирских самолетов типа ИЛ—62, ТУ—134). В планере сверхзвуковых самолетов используют до 90 % алюминиевых сплавов.

Практически нет ни одной отрасли машиностроения, в которой бы не использовали в той или иной мере алюминиевые сплавы. Их применяют в строительных конструкциях, судостроении, железнодорожном и автомобильном транспорте, летательных аппаратах, нефтяном и химическом машиностроении, электротехнике и т.д.

Из алюминиевых сплавов изготавливают самые разнообразные детали холодильной и криогенной техники. Их применяют для изготовления хранилищ и емкостей для транспортировки жидких газов: кислорода, азота, водорода и гелия, не говоря уже об установках сжижения и хранения природного газа. Алюминиевые сплавы используют в качестве материала для ректификационных колонн и трубных систем.

Алюминиевые сплавы находят широкое применения для криогенного оборудования, используемого в космосе. Из них изготавливают баки для жидкого кислорода и водорода диаметром 6,5 м и более, баллоны для сжатого гелия.

Для низкотемпературной арматуры и трубопроводов используют алюминиевые сплавы типа АЛ4, АЛ9, обладающие хорошей свариваемостью и высокими механическими свойствами при температурах до  $-196^{\circ}\text{C}$  и ниже.

Из всех легких металлов алюминий характеризуется наибольшим объемом производства, занимая в мировой промышленности второе место после производства стали. Алюминиевые сплавы имеют сравнительно невысокую стоимость, близкую к стоимости коррозионностойкой хромоникелевой стали.

До конца 80-х гг. прошлого века алюминий почти не производился и был немногим дешевле золота. Сохранилось описание банкета, данного Наполеоном III, на котором только гости королевской крови были удостоены чести есть алюминиевыми ложками и вилками. Остальные пользовались обычными золотыми и серебряными приборами.

В 1886 г. американский студент Чарльз Холл и молодой французский инженер Поль Эру разработали современный способ производства алюминия электролизом криолитно-глиноземного расплава. После этого производство алюминия стало расти, а цена его начала резко падать.

В 1890 г. в мире было произведено 200 т алюминия, в 1900 г. — около 6 тыс. т, а во время второй мировой войны только капиталистические страны производили 2 млн. т алюминия. Современное мировое производство алюминия без России составляет более 10 млн. т в год.

Алюминий кристаллизуется в гранцентрированной решетке, не имеет полиморфных превращений, обладает малой плотностью

( $2,7 \text{ г/см}^3$ ), низкой температурой плавления  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ , высокой электро- и теплопроводностью, низкой прочностью ( $\sigma_b = 100 \text{ МПа}$ ) и высокой пластичностью ( $\delta = 35 \%$ ), а также высокой коррозионной стойкостью. Хорошая коррозионная стойкость алюминия обусловлена образованием на его поверхности тонкой, но плотной пленки оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Чем меньше примесей содержит алюминий, тем выше его коррозионная стойкость.

Алюминий высокой чистоты, применяемый для лабораторных целей, содержит  $99,99 \%$  Al, для технических целей —  $99,50 \%$  Al. Постоянными примесями алюминия являются железо и кремний. Алюминий хорошо деформируется и сваривается, но плохо обрабатывается резанием. Из него прокаткой можно получать тонкую фольгу, применяемую в качестве оберточного материала.

Технический алюминий применяется в электротехнике в качестве проводникового материала. Электропроводность алюминия составляет  $65 \%$  от электропроводности меди при значительно меньшей плотности.

Высокая коррозионная стойкость в органических кислотах обусловила широкое применение алюминия для бытовой посуды, для транспортировки и хранения продуктов питания, изготовления фольги для упаковки продуктов. В алюминиевой посуде сохраняются все витамины. Все шире используется алюминий для производства консервных банок. Алюминиевые консервные банки значительно дешевле и легче жестяных. Для их изготовления не нужно использовать дорогое дефицитное олово, которое необходимо для покрытия жести. Искользованные алюминиевые банки легко подвергаются переплавке, что облегчает решение проблемы переработки отходов.

Тончайший слой алюминия, нанесенный на ткань, позволяет задерживать тепловые лучи, пропуская лишь световые. Из такой ткани изготавливают палатки, защитные костюмы, комбинезоны и т.д.

## *2.2. Классификация алюминиевых сплавов*

Из-за низкой прочности технический алюминий применяется для изготовления малонагруженных элементов конструкций. Широкое применение в качестве конструкционных материалов имеют сплавы на основе алюминия.

Основными легирующими элементами в алюминиевых сплавах являются Cu, Si, Mg, Mn. В условиях равновесия сплавы представляют собой равновесный твердый раствор с выделениями интерметаллидных фаз типа  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ -фаза),  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  и др. Принципы маркировки алюминиевых сплавов следующие. Буква А в начале марки обозначает технический алюминий. Буквы АК обозначают ковкие алю-

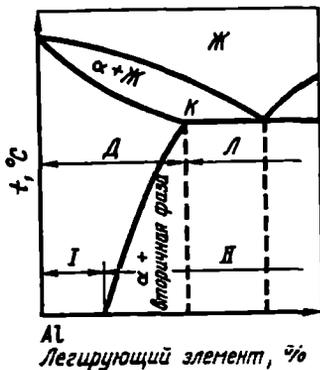


Рис. 128. Типовая диаграмма состояния сплавов Al — легирующий элемент (схема):

Д — деформируемые сплавы; Л — литейные сплавы; I — сплавы, не упрочняемые термической обработкой; II — сплавы, упрочняемые термической обработкой

Сплавы левее точки К имеют при нагреве однофазную структуру  $\alpha$ -твердого раствора, высокую пластичность и низкую прочность. Поэтому сплавы этого типа легко обрабатываются давлением и относятся к категории деформируемых сплавов. В свою очередь деформируемые сплавы бывают двух типов: I — не упрочняемые термической обработкой и II — упрочняемые термической обработкой.

В деформируемых алюминиевых сплавах, не упрочняемых термической обработкой, содержание легирующих элементов меньше предела насыщения твердого раствора при комнатной температуре. В термически упрочняемых алюминиевых сплавах содержание легирующих элементов превышает их равновесную концентрацию.

Сплавы, по содержанию легирующего элемента находящиеся правее точки К, имеют структуру, состоящую из  $\alpha$ -твердого раствора и эвтектики. Они плохо деформируются, но благодаря наличию эвтектики обладают хорошими литейными свойствами: жидкотекучестью и высокой концентрацией литейной пористости. Наилучшая жидкотекучесть наблюдается у сплавов, кристаллизующихся при постоянной температуре (эвтектические сплавы).

Характер литейных пор зависит от ширины температурного интервала кристаллизации, хотя общий объем пор остается постоянным или плавно меняется. Чем меньше интервал кристаллизации, тем концентрированнее усадочная раковина, выводимая в прибыльную часть, и соответственно плотнее металл самой отливки. Однако при чрезмерно

малые сплавы, буква В присвоена высокопрочным алюминиевым сплавам. Буквы АЛ обозначают литейные алюминиевые сплавы. После этих букв следует условный номер сплава. Часто за условным номером дают обозначения, характеризующие состояние сплава: М — мягкий (отожженный); Т — термически обработанный (закалка и старение); Н — нагартованный и др.

В соответствии с диаграммой состояния (рис. 128) алюминиевые сплавы по технологическим свойствам подразделяются на деформируемые и литейные сплавы. Точка К соответствует предельной растворимости легирующего элемента в алюминии при эвтектической температуре.

Сплавы левее точки К имеют при нагре

большом количестве эвтектической составляющей ухудшаются механические свойства.

Состав и свойства некоторых алюминиевых сплавов приведен в табл. 18.

### 2.3. Деформируемые алюминиевые сплавы

Деформируемые сплавы содержат меньше, чем литейные, легирующих элементов, находящихся в твердом растворе.

Сплавы, не упрочняемые термообработкой, имеют сравнительно низкую прочность, но более высокую пластичность и коррозионную стойкость. Их применяют в отожженном состоянии. К таким сплавам относятся сплавы типа АМц (система Al—Mn) и типа АМг (система Al—Mg).

Эти сплавы хорошо обрабатываются давлением и свариваются. Из них обычно изготавливают изделия, получаемые глубокой вытяжкой из листового материала. Благодаря меньшей плотности и достаточной прочности чаще применяют алюминиево-магниевые сплавы.

Широкое распространение получили деформируемые сплавы, упрочняемые термообработкой. Примером деформируемых термоупрочняемых алюминиевых сплавов являются сплавы алюминия с медью. Из диаграммы состояния Al—Cu (рис. 129) видно, что максимальная растворимость меди в твердом алюминии составляет 5,7 % при 548 °С. При понижении температуры растворимость падает, составляя 0,2 % при 20 °С. Наличие линии переменной растворимости АВ показывает возможность упрочнения сплава. После нагрева выше линии АВ и закалки в воде микроструктура сплавов, содержащих более 0,2 % Cu, состоит из однородных зерен пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора. Охлаждение при закалке должно производиться со скоростью, предотвращающей распад пересыщенного твердого раствора. Закалку обычно производят в воде. После закалки сплавы имеют невысокую прочность. С целью дальнейшего упрочнения сплавы подвергают естественному в течение нескольких суток или искусственному старению при температуре около 150 °С в течение 10—24 ч. На рис. 130 представлены микроструктуры дуралюмина после закалки и после закалки и старения.

В начальный период старения образуются зоны Гинье—Престона. В этот пери-

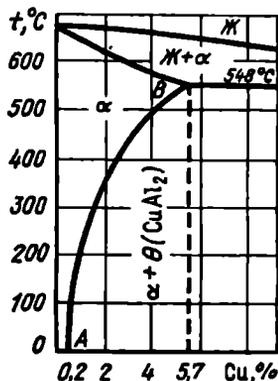


Рис. 129. Левый участок диаграммы состояния сплавов Al—Cu

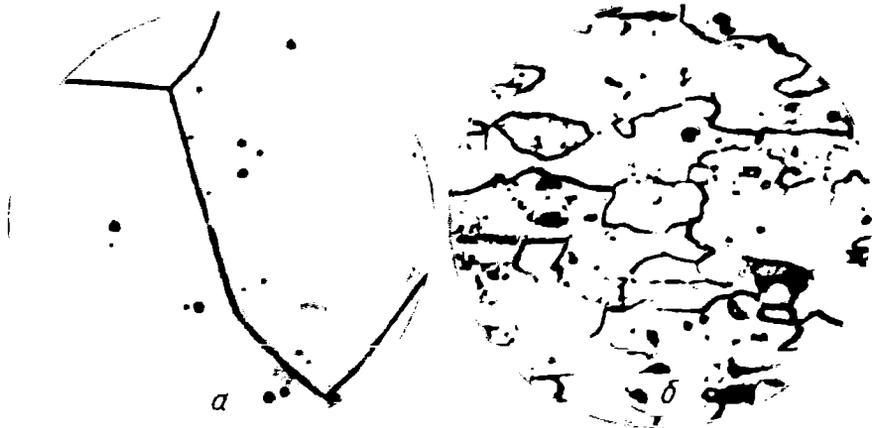


Рис. 130. Микроструктура дуралюмина Д16:  
*а* — после закалки; *б* — после закалки и старения.  $\times 200$

од атомы меди еще не выделяются из раствора. В зонах повышенной концентрации меди кристаллическая решетка искажена, в кристалле возникают большие напряжения, что увеличивает твердость и прочность металла. При дальнейшем развитии старения зоны Гинье—Престона увеличиваются, а затем выделяются мельчайшие частицы  $\theta$ -фазы ( $\text{CuAl}_2$ ), которые впоследствии коагулируют. Процесс образования зон Гинье-Престона и достижение стадии так называемого предвыделения приводит к максимальному упрочнению.

Наиболее распространенными деформируемыми алюминиевыми сплавами являются дуралюмины. Они содержат, %: 2,5—5 Cu, 0,4—1,8 Mg, 0,4—0,9 Mn. Медь и магний вводят в сплав для его упрочнения, марганец повышает его коррозионную стойкость. Наибольшее упрочнение достигается после старения.

Дуралюмин был изобретен в 1906 г. немецким ученым А. Вильмом. Явление естественного старения сплава было открыто Вильмом случайно и вначале не имело научного обоснования.

Достоинством дуралюминов является высокая удельная прочность, благодаря чему они относятся к числу наиболее широко применяемых материалов в самолетостроении. Дуралюмины используют во многих отраслях техники. Их также применяют в пищевой и холодильной промышленности для изготовления емкостей, тестомесильных аппаратов, сепараторов, поплавковых камер, арматуры, трубопроводов и т.д.

Дуралюмины имеют пониженную коррозионную стойкость. Для повышения коррозионной стойкости листы дуралюмина плакируют, т.е. покрывают слоем чистого алюминия и производят совместную прокатку

Т а б л и ц а 1 8. Химический состав, %, и свойства некоторых алюминиевых сплавов (ГОСТ 4784—74, ГОСТ 1583—89Е)

Марка сплава	Cu	Mg	Mn	Si	Прочие	Режим термообработки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
Технический Al	—	—	—	—	—	—	75	30	36	—
<i>Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой</i>										
АМц	0,1	0,2	1,0—1,6	0,6	0,1 Zn, 0,7 Fe	Отжиг	130	50	20	300
АМг2	0,1	1,8—2,6	0,2—0,6	0,4	0,2 Zn, 0,4 Fe	Отжиг	190	90	24	450
АМг5	0,1	4,8—5,8	0,3—0,8	0,5	0,02—0,1 Ti, 0,0002—0,005 Be	Отжиг	270	120	18	550
<i>Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой</i>										
Д1	3,8—4,8	0,4—0,8	0,4—0,8	0,7	0,1 Ni, 0,7 Fe	Отжиг	210	110	18	—
						Закалка—старение	410	240	20	950
Д16	3,8—4,9	1,2—1,8	0,3—0,9	0,5	0,1 Ni, 0,5 Fe	Закалка—старение	440	330	18	1050
В95	1,4—2,0	1,8—2,8	0,2—0,6	0,5	0,01—0,25 Cr, 5,0—7,0 Zn	Закалка—старение	540	470	10	1050
АК6	1,8—2,6	0,4—0,8	0,4—0,8	0,7—1,2	—	Закалка—старение	420	300	13	1000
<i>Литейные сплавы</i>										
АК12 (АЛ2)	—	—	—	10—13	—	Литье в землю	180	80	7	500
						Литье в кокиль	220	90	5	500
АК9 (АЛ4)	—	0,17—0,30	0,2—0,5	8—10,5	—	Литье в землю, закалка—старение	260	200	4	750
АМ5 (АЛ19)	4,5—5,3	—	0,6—1,0	—	0,15—0,35 Ti	Литье в землю, закалка—старение	360	360	3	1000

листов. Алюминий, толщина слоя которого составляет 2—5 %, сваривается с основным металлом и защищает его от коррозии.

Для повышения коррозионной стойкости деталей из дуралюмина их подвергают анодной поляризации в 10 %-ном растворе серной кислоты. Выделяющийся кислород способствует образованию на поверхности дуралюминовой детали оксидной пленки, предохраняющей ее от окисления.

Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы на Al—Zn—Mg—Cu основе (типа В95) имеют еще более высокую прочность ( $\sigma_B = 500...650$  МПа), но меньшую пластичность ( $\delta = 10$  %) и используются в самолетостроении для тяжелонагруженных деталей.

Снижение полетной массы машин является важнейшей задачей конструкторов, работающих в области самолето- и ракетостроения. В настоящее время разработаны сплавы системы Al—Li—Mg и режим их упрочнения при термической обработке. Сплавы имеют прочность, близкую к прочности дуралюминов ( $\sigma_B = 400$  МПа), но являются самыми легкими из всех известных алюминиевых сплавов (на 12 % легче сплава Д16 и на 15 % — сплава В95).

Для снижения массы летательных аппаратов в ряде случаев применяют специально разработанные технологические методы. При изготовлении корпусных частей самолетов (фюзеляжа, крыльев) и управляемых ракет это может достигаться использованием сотовых конструкций. Наружные оболочки делают из высокопрочных материалов, а в качестве наполнителя применяют клеевые сотовые конструкции из обычных алюминиевых сплавов.

Разработан авиационный материал — пеноалюминий, получаемый в виде лент и листов толщиной до 100 мм. Его изготавливают присадкой в жидкий алюминий или его сплавы порошкообразных газообразующих веществ, например гидридов титана и циркония. Гидриды вводят под давлением, но, как только начинается выделение водорода и вспенивание, давление снимают. Во избежание спадания пены полученный пеноалюминий охлаждают опрыскиванием водой. Объемная масса пеноалюминия 0,2—0,6 г/см<sup>3</sup>. Пеноалюминий можно обрабатывать резанием, клепать, прибивать гвоздями, паять.

Известен способ получения пористого алюминия заливкой сплава в емкость — форму, заполненную гранулами поваренной соли, с последующим растворением соли в воде.

#### 2.4. Литейные алюминиевые сплавы

Литейные сплавы должны обладать высокой жидкотекучестью, малой склонностью к образованию горячих трещин и пористости. Высокие литейные свойства имеют сплавы, имеющие в своей структуре эвтекти-

ку. Наиболее распространенными литейными сплавами являются сплавы алюминия с кремнием, называемые силуминами.

На рис. 131 приведена левая часть диаграммы состояния системы алюминий—кремний. Силумины имеют состав, близкий к эвтектическому, и поэтому обладают высокими литейными свойствами. Широкое распространение получил силумин марки АЛ2, содержащий 10—13 % Si. Его структура состоит из  $\alpha$ -твердого раствора (светлый фон шлифа) и эвтектики  $\alpha + \text{Si}$  (темные участки). Прочность силуминов невелика:  $\sigma_B \approx 140$  МПа.

Кроме силуминов применяют литейные сплавы, легированные медью и магнием. Они имеют несколько худшие литейные свойства, но более высокие механические характеристики.

Для измельчения зерна и улучшения механических свойств литейные алюминиевые сплавы подвергают модифицированию. В качестве модификаторов применяют смеси солей NaF и NaCl. После модифицирования прочность силуминов увеличивается на 25 %, а относительное удлинение — в 2 раза.

### 3. Композиционные материалы

#### 3.1. Общие сведения

Традиционно применяемые сплавы в известной мере достигли своего предела конструктивной прочности. Развитие современной техники требует создания материалов, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред, излучений, глубокого вакуума и высоких давлений. Эту задачу можно осуществить путем создания композиционных материалов.

Композиционными материалами или композитами называют материалы, состоящие из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов. Композиционные материалы позволяют:

создавать элементы конструкций с заранее заданными свойствами, высокой эффективностью по массе и высокой технологичностью;

создавать материалы с качественно новыми свойствами и не только повышать эксплуатационные характеристики существующих конст-

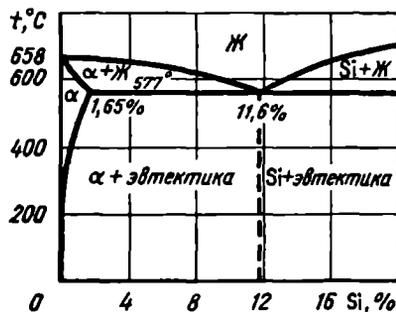


Рис. 131. Диаграмма состояния сплавов Al—Si

рукций, но и создавать принципиально новые конструкции, недоступные при применении традиционных материалов.

Композиционные материалы используют для производства летательных аппаратов, в машиностроении, приборостроении, энергетике, в электронной, радиотехнической и электротехнической промышленности, а также на транспорте, в строительстве и других отраслях народного хозяйства.

### 3.2. Структура композиционных материалов

Композиционные материалы состоят из сравнительно пластичного матричного материала и более твердых и прочных веществ, являющихся упрочняющими наполнителями. Матрица связывает композицию и придает ей нужную форму. В зависимости от материала матрицы различают композиционные материалы с металлической матрицей, или металлические композиционные материалы (МКМ), с полимерной — полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической — керамические композиционные материалы (ККМ). По типу упрочняющих наполнителей композиционные материалы подразделяют на дисперсноупрочненные, армированные или волокнистые и слоистые (рис. 132).

В дисперсноупрочненные композиционные материалы искусственно вводят мельчайшие, равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и другие, не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние между ними, тем прочнее композиционный материал. В дисперсноупрочненных композиционных материалах матрица является основным несущим элементом.

Арматурой в армированных композиционных материалах могут быть волокна различной формы (нити, ленты, сетки разного плетения). Прочность таких композиционных материалов определяется прочно-

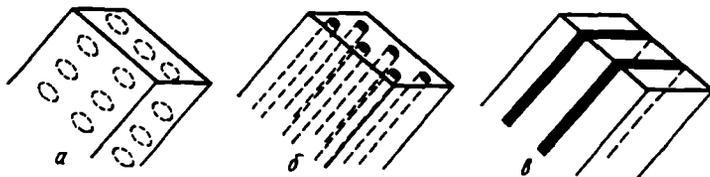


Рис. 132. Схемы строения композиционных материалов:

а — дисперсноупрочненные; б — волокнистые; в — слоистые

стью армирующих волокон, которые воспринимают основную нагрузку. Армирование дает большой прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо.

Слоистые композиционные материалы набираются из чередующихся слоев волокон и листов матричного материала (типа «сэндвич»). Слои волокон в таком композиционном материале могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев матрицы из сплавов с различными механическими свойствами. Слоистые композиты обычно изготавливают на основе неметаллических материалов.

Из освоенных промышленностью композиционных материалов ведущее место занимают металлические композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов. Использование алюминия в качестве матричного материала обусловлено широким распространением его в технике, низкой плотностью, коррозионной стойкостью, возможностью регулировать механические свойства алюминиевых сплавов термической обработкой и подвергать их различным видам обработки давлением и литья.

Применяют также композиционные материалы на основе магневых, никелевых и титановых сплавов.

### *3.3. Дисперсноупрочненные композиционные материалы на основе алюминия*

К этому виду композиционных материалов относятся материалы типа САП (спеченная алюминиевая пудра), которые представляют собой алюминий, упрочненный дисперсными частицами оксида алюминия. Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера около 1 мкм в присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче и в ней повышается содержание оксида алюминия. Дальнейшая технология производства изделий и полуфабрикатов из САП включает холодное прессование, предварительное спекание, горячее прессование, прокатку или выдавливание спеченной алюминиевой заготовки в форме готовых изделий, которые можно подвергать дополнительной термической обработке.

Все марки отечественных и зарубежных сплавов типа САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии, а сплавы с 6—9 %  $Al_2O_3$  — и при комнатной температуре. Из сплава САП—1 холодным волочением можно получить фольгу толщиной до 0,03 мм. Эти материалы хорошо обрабатываются резанием и обладают высокой коррозионной стойкостью.

Отечественные марки САП содержат 6—23 %  $Al_2O_3$ . Различают САП—1 с содержанием 6—9, САП—2 с 9—13, САП—3 с 13—18 %

$Al_2O_3$ . С увеличением объемной концентрации оксида алюминия возрастает прочность композиционных материалов. При комнатной температуре характеристики прочности САП—1:  $\sigma_b = 280$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 220$  МПа; САП—3:  $\sigma_b = 420$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 340$  МПа.

Материалы типа САП обладают высокой жаропрочностью и превосходят все деформируемые алюминиевые сплавы. Даже при температуре  $500^\circ C$  их  $\sigma_b$  не менее  $60—110$  МПа. Жаропрочность объясняется тормозящим действием дисперсных частиц на процесс рекристаллизации. Характеристики прочности сплавов типа САП весьма стабильны. Испытания длительной прочности сплавов типа САП—3 в течение двух лет практически не повлияли на уровень свойств как при комнатной температуре, так и при нагреве до  $500^\circ C$ . При  $400^\circ C$  прочность САП в 5 раз выше прочности стареющих алюминиевых сплавов:

Температура испытаний, $^\circ C$	20	100	200	300	400	500
$\sigma_{0,2}$ , МПа	265	235	190	155	120	105
$\sigma_b$ , МПа	380	315	235	175	130	105
$\delta$ , %	7,0	6,5	5,0	3,5	2,0	2,5

Сплавы типа САП применяют в авиационной технике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температурах до  $300—500^\circ C$ . Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников.

#### 3.4. Армированные композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов

Волокна, используемые в качестве арматуры, должны иметь следующие свойства: высокую температуру плавления, малую плотность, высокую прочность во всем интервале рабочих температур, минимальную растворимость в матрице, высокую химическую стойкость, отсутствие фазовых превращений при рабочих температурах, отсутствие токсичности при изготовлении и эксплуатации. Для армирования алюминиевых сплавов используют стальную, бериллиевую или вольфрамовую проволоку, нитевидные кристаллы оксидов алюминия и магния, карбида кремния и неорганические поликристаллические волокна (углеродные, борные, алюмосиликатные).

Матрица в армированных композициях придает изделию форму и делает материал монолитным. Кроме того, матрица должна обеспечивать прочность и жесткость композиционной системы при действии растягивающей или сжимающей нагрузки.

*Композиция алюминий — металлическая проволока.* Армирование алюминия и его сплавов стальной проволокой повышает их прочность,

увеличивает модуль упругости, сопротивление усталости и расширяет температурный интервал службы материала.

Армирование короткими волокнами проводят методами порошковой металлургии, состоящими из прессования с последующей гидроэкструзией или прокаткой заготовок. При армировании непрерывными волокнами композиций типа сэндвич, состоящих из чередующихся слоев алюминиевой фольги и волокон, применяют прокатку, горячее прессование, сварку взрывом, диффузионную сварку. Прочность композиционных материалов на основе алюминия, армированных стальной проволокой:  $\sigma_b = 1500$  МПа при  $KCU = 0,4...0,6$  МДж/м<sup>2</sup>.

Весьма перспективным материалом является композиция алюминий — бериллиевая проволока, в которой реализуются высокие физико-механические свойства бериллиевой арматуры и в первую очередь ее низкая плотность и высокая удельная жесткость. Получают композиции с бериллиевой проволокой диффузионной сваркой пакетов из чередующихся слоев бериллиевой проволоки и матричных листов. Из алюминиевых сплавов, армированных стальной и бериллиевой проволоками, изготавливают корпусные детали ракет и топливные баки.

*Композиция алюминий — волокна бора.* Волокна бора являются наиболее перспективным высокопрочным армирующим материалом. В них высокая прочность (2800—3500 МПа) сочетается с высоким модулем упругости (390—450 ГПа) при относительно низкой плотности (2,5—2,65 г/см<sup>3</sup>). Композиционные материалы получают в виде различных полуфабрикатов: лент, прутков, профилей, труб и листов. Для их изготовления применяют методы непрерывного литья или протягивания волокон через расплав, плазменного напыления, горячего прессования, волочения и прокатки пакетов.

Композиционные материалы алюминий — волокна бора характеризуются сочетанием высоких значений прочности, предела выносливости, модуля упругости с высокой работой разрушения. Ниже приведены значения механических свойств композиционных материалов на основе алюминия, упрочненного различными количествами борных волокон:

Объемная доля волокна, %	0	10	20	30	40	50
$\sigma_b$ , МПа	70—140	300—380	500—650	700—900	900—1140	1100—1400
E, ГПа	70	105	135	180	205	230
$\delta$ , %	—	—	—	0,7	0,7	0,6

Плотность композиций алюминий — волокна бора составляет 2,63—2,65 г/см<sup>3</sup>. Их применяют в самолетостроении для изготовления горизонтальных и вертикальных стабилизаторов, рулей, обшивки крыльев, элементов хвостового оперения, лонжеронов.

*Композиция алюминий — углеродные волокна.* Сочетание низкой плотности арматуры и матрицы позволяет создавать композиционные материалы с высокой удельной прочностью и жесткостью. Недостатком углеродистых волокон является их хрупкость и высокая реакционная способность. Композицию алюминий — углерод получают пропиткой углеродных волокон жидким металлом или методами порошковой металлургии. Технологически наиболее просто осуществимо протягивание пучков углеродных волокон через расплав алюминия.

Композит алюминий—углерод применяют в конструкциях топливных баков современных истребителей. Благодаря высокой удельной прочности и жесткости материала масса топливных баков уменьшается на 30 %. Этот материал используют также для изготовления лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей.

#### 4. Магний и его сплавы

Магний — металл светло-серого цвета. Он имеет низкую плотность ( $1,74 \text{ г/см}^3$ ). Температура плавления магния составляет  $650^\circ\text{C}$ . Магний имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку и не претерпевает полиморфных превращений. Технический магний используется в пиротехнике и химической промышленности.

Сплавы магния характеризуются низкой плотностью, высокой удельной прочностью, способностью хорошо поглощать вибрации. Недостатком магниевых сплавов является их меньшая прочность, по сравнению с алюминиевыми, меньшая коррозионная стойкость и легкая воспламеняемость при нагреве. Снижение коррозионной стойкости объясняется тем, что пленка  $\text{MgO}$  имеет большую плотность, чем магний и легко растрескивается. Достоинством магниевых сплавов является их хорошая обрабатываемость резанием и свариваемость. Их недостаток — трудность обработки давлением и литья.

Основными легирующими добавками в магниевых сплавах являются алюминий, марганец, цинк, которые могут давать твердые растворы с магнием.

Различают деформируемые и литейные магниевые сплавы.

Деформируемые магниевые сплавы маркируются буквами МА, литейные буквами МЛ, а далее идет условный номер сплава.

К деформируемым магниевым сплавам относится, например, сплав марки МА2, содержащий, %: 3,0—4,0 Al; 0,2—0,8 Zn; 0,15—0,5 Mn. Алюминий и цинк повышают прочность сплава, а марганец способствует увеличению его коррозионной стойкости. В отожженном состоянии сплав имеет следующие свойства:  $\sigma_{\text{в}} = 280 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2} = 180 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 10 \%$ .

При увеличении содержания легирующих элементов в магниевых сплавах возрастает их способность к упрочнению при термической обработке.

Деформируемый магниевый сплав МА10 содержит, %: 8—9,Al, 7—8 Cd, 2—2,5 Ag. После закалки от 400 °С и старения при 175 °С имеет наиболее высокую прочность:  $\sigma_b = 430$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 300$  МПа,  $\delta = 6$  %.

Наибольшее распространение из литейных сплавов получил сплав марки МЛ5, содержащий, %: 7,5—9,0 Al, 0,15—0,5 Mn, 0,2—0,8 Zn. Сплав подвергается закалке от 415 °С на воздухе и старению при 175 °С. При старении закаленного сплава магниевый твердый раствор распадается с выделением упрочняющего интерметаллидного соединения  $Mg_4Al_3$ . Сплав МЛ5 после термической обработки имеет следующие свойства:  $\sigma_b = 250$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 120$  МПа,  $\delta = 6$  %.

Благодаря высокой удельной прочности  $\sigma_b/\gamma$  магниевые сплавы нашли применение в самолето- и ракетостроении, в автостроении (для изготовления картеров двигателей, коробок передач), в электротехнике и радиотехнике для изготовления корпусов приборов и т.д. Благодаря высокой теплоемкости (в 2,5 раза выше, чем у стали) магниевые сплавы не успевают перегреться при кратковременной длительности полета.

Для защиты от коррозии детали из магниевых сплавов подвергают оксидированию или нанесению лакокрасочных покрытий и эмалей.

## 5. Медь и ее сплавы

### 5.1. Основные свойства меди

Медь — металл красного цвета, плотность меди 8,9 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 1083 °С. Медь кристаллизуется в гранецентрированной решетке и не имеет полиморфных превращений.

Чистая медь обладает высокой электрической проводимостью (на втором месте после серебра), пластичностью, коррозионной стойкостью в пресной и морской воде, а также в ряде химических сред. Медь принято считать эталоном электрической проводимости и теплопроводности по отношению к другим металлам. Характеристики этих свойств меди оцениваются 100 %, в то время как у алюминия, магния и железа они составляют соответственно 60, 40 и 17 % от соответствующих свойств меди. Механические свойства меди в литом состоянии:  $\sigma_b = 150...200$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 35$  МПа,  $\delta = 20...25$  %; в горячедеформированном:  $\sigma_b = 250$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 95$  МПа,  $\delta = 50$  %. Из-за низких значений предела текучести и высокой стоимости чистая медь как конструкционный материал не применяется. Около половины производимой меди используется в электро- и радиотехнике.

Электрическая проводимость меди зависит от содержания примесей. При наличии даже небольшого количества примесей электрическая проводимость резко падает. Для проводов применяют электролитическую медь марок МЗ, содержащую 99,5 % Cu, М2 — 99,7 %, М1 — 99,9 % Cu, М0 — 99,95 %, М00 — 99,99 % Cu.

Для повышения прочности проводов, например трамвайных или троллейбусных, их дополнительно легируют кадмием в количестве около 1 %. При этом электрическая проводимость уменьшается на 10 %, но прочность увеличивается почти в 2 раза.

Медь и ее сплавы являются традиционными материалами, используемыми в технике низких температур. Применение меди и ее сплавов обусловлено их высокими характеристиками механических свойств при низких температурах, хорошей коррозионной стойкостью и высокой теплопроводностью.

Вредными примесями, снижающими механические и технологические свойства меди и ее сплавов, являются висмут, свинец, сера и кислород. Висмут и свинец почти не растворимы в меди и образуют легкоплавкие эвтектики по границам зерен, что способствует красноточности и ухудшает способность к горячей деформации. Сера с медью образует эвтектику  $\text{Cu—Cu}_2\text{S}$ , обладающую повышенной хрупкостью. Особо вредной примесью является кислород, образующий даже в небольших количествах хрупкую эвтектику  $\text{Cu—Cu}_2\text{O}$  по границам зерен. При нагреве металла с включениями эвтектики в атмосфере, содержащей водород, диффундирующий в глубь меди, проявляется ее так называемая «водородная болезнь»:  $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$ , в результате чего пары воды создают высокое давление и возможно образование трещин.

Медь и ее сплавы имеют удовлетворительную технологичность. Медь хорошо деформируется, хорошо сваривается и паяется. Ее недостатком является сравнительно плохая обрабатываемость резанием.

Соединение деталей из меди и ее сплавов часто выполняют посредством твердой и мягкой пайки. Твердые припои изготавливают на основе меди и цинка с добавкой серебра; их температура плавления составляет 600—1000 °С. Мягкие припои изготавливают из сплавов олова со свинцом; их температура плавления 200—300 °С. Паяные медные соединения обычно применяют в криостатах исследовательских установок.

Сплавы меди устойчивы против коррозии, обладают хорошими антифрикционными, технологическими и механическими свойствами и широко используются в качестве конструкционных материалов. По технологическим характеристикам различают деформируемые и литейные медные сплавы, по химическому составу их делят на латуни и бронзы. Латуни представляют собой сплавы меди с цинком, а бронзы — сплавы меди с другими элементами.

Медные сплавы обозначают начальной буквой сплава Л — латунь или Бр — бронза, после чего следуют первые буквы основных элементов, образующих сплав: О — олово, Ц — цинк, Мц — марганец, А — алюминий, Ж — железо, Ф — фосфор, Б — бериллий, Х — хром, Н — никель и т.д., а после них цифры, указывающие содержание легирующих элементов. В латунях не указывается содержание цинка, а в бронзах — меди, их концентрации определяются по разности. Например, ЛЖМц—59—1—1 — латунь, содержащая, %: 59 Cu, 1 Fe, 1 Mn и остальное — цинк, или БрОФб,5—0,15 — бронза: 6,5 Sn, 0,15 P, остальное — медь.

## 5.2. Сплавы меди с цинком, или латуни

Двойные или многокомпонентные сплавы меди, в которых основным легирующим элементом является цинк, называют латунями.

В системе Cu—Zn образуется шесть твердых растворов:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\eta$ , но практическое применение имеют сплавы, содержащие до 45 % Zn.

На рис. 133, а приведена левая часть диаграммы состояния Cu—Zn, включающей область однофазных ( $\alpha$ )- и двухфазных ( $\alpha + \beta$ )-латуней.

Однофазная  $\alpha$ -латунь представляет собой твердый раствор цинка в меди с решеткой ГЦК и может содержать до 39 % Zn. Однофазная  $\alpha$ -латунь характеризуется высокой пластичностью. При содержании более 39 % Zn в структуре проявляется хрупкая  $\beta$ -фаза, представляющая собой твердый раствор с решеткой ОЦК на базе электронного соединения CuZn.

Существуют две модификации  $\beta$ -фазы: выше 454—486 °С устойчива гомогенная пластичная  $\beta$ -фаза, имеющая неупорядоченное расположение атомов, ниже этих температур — более твердая и хрупкая  $\beta'$ -фаза, характеризующаяся упорядоченным расположением атомов меди и цинка.

Двухфазные ( $\alpha + \beta$ )-латуни могут содержать до 45 % Zn. Так как  $\beta'$ -фаза, существующая при комнатной температуре, имеет большую хрупкость и твердость, то двухфазные латуни менее пластичны и более прочны.

Влияние химического состава на свойства латуней показано на рис. 133, б. В отличие от равновесного состояния  $\beta'$ -фаза практически появляется уже при концентрации цинка 30 %. Поэтому в сплавах, содержащих менее 30 % Zn, увеличение его концентрации повышает и прочность, и пластичность.

Затем пластичность начинает уменьшаться, а после появления в структуре значительных количеств  $\beta'$ -фазы происходит резкое падение

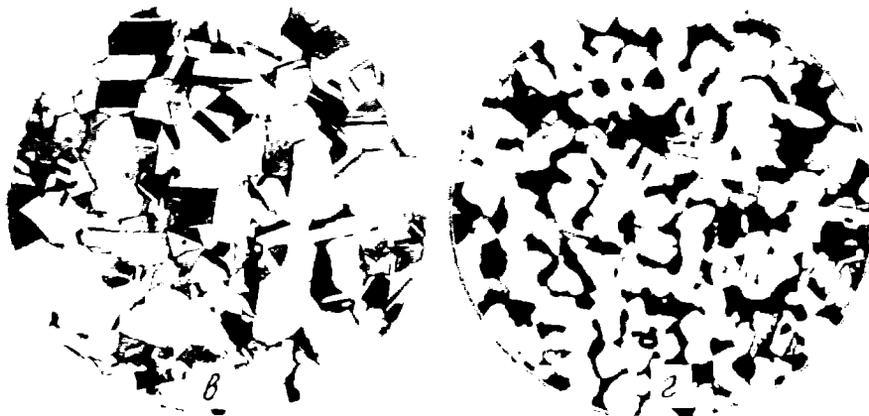
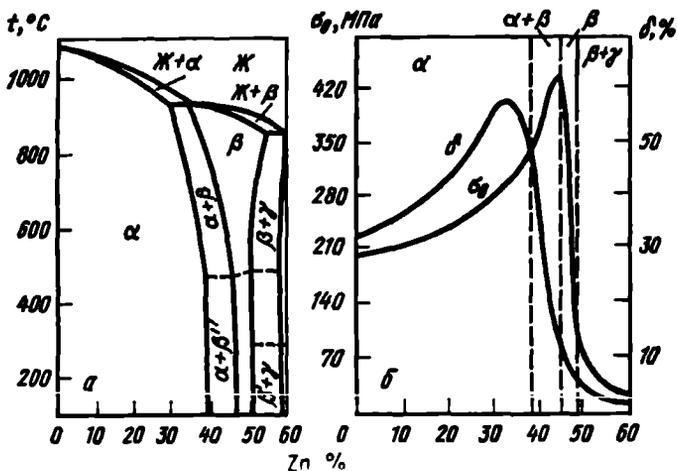


Рис. 133. Диаграмма состояния системы Cu—Zn (а), влияние содержания цинка на механические свойства латуни (б) и микроструктуры  $\alpha$ -латуни (а) и ( $\alpha+\beta$ )-латуни (б).  $\times 200$

пластичности. Прочность при увеличении содержания цинка растет до 45 %, а потом также резко падает. При дальнейшем увеличении содержания цинка (области  $\beta$ ,  $\alpha+\beta$ , и т.д.) свойства сохраняют свои низкие значения.

Латуни обычно хорошо обрабатываются давлением. Однофазные  $\alpha$ -латуни высокопластичны и хорошо деформируются в холодном состоянии. Двухфазные ( $\alpha+\beta'$ )-латуни лучше деформируются при нагреве выше температуры  $\beta \rightarrow \beta'$ -превращения. Обычно их деформируют при температуре несколько выше  $700^\circ\text{C}$ .

Т а б л и ц а 19. Химический состав и механические свойства некоторых марок латуней (ГОСТ 15527—70, ГОСТ 17711—80)

Марка латуни	Структура	Химический состав, %		$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость НВ	Назначение
		Сu	легирующие элементы				
<i>Деформируемые латуни</i>							
Л90 (томпак)	$\alpha$	88—91	—	260	45	530	Ленты, листы, трубы
Л80	$\alpha$	79—81	—	320	52	550	Ленты, проволока
Л63	$\alpha + \beta$	62—65	—	330	50	560	Ленты, проволока, прутки
ЛС59-1	$\alpha + \beta$	57—60	0,8—1,9 Рь	400	45	900	Полосы, прутки
ЛЖМц59-1-1	$\alpha + \beta$	57—60	0,6—1,2 Fe; 0,1—0,4 Al; 0,3—0,7 Sn; 0,5—0,8 Mn	450	50	880	Проволока, трубы
ЛАЖ60-1-1	$\alpha + \beta$	58—61	0,75—1,5 Al; 0,75—1,5 Fe	450	45		Трубы, прутки
<i>Литейные латуни</i>							
ЛЦ16К4	$\alpha + \beta$	78—81	3,0—4,5 Si	300	15	100	Арматура, детали приборов
ЛЦ40Мц3Ж	$\alpha + \beta$	53—58	3,0—4,0 Mn; 0,5—1,5 Fe	500	10	100	Детали ответственного назначения, гребневые винты
ЛЦ23А6Ж3Мц2	$\alpha + \beta$	64—68	4,0—7,0 Al; 2,0—4,0 Fe; 1,5—3,0 Mn	700	7	160	Гайки нажимных винтов, червячные винты

По технологическим признакам различают литейные и деформируемые латуни (табл. 19).

$\alpha$ -латуни редко легируют дополнительно другими элементами; они представляют собой обычно двойные сплавы меди с цинком. В марках этих латуней Л62, Л68, Л80, Л90 цифры показывают содержание меди. Цинк дешевле меди. Чем больше цинка в латуни, тем ниже ее стоимость. Из однофазных  $\alpha$ -латуней холодным деформированием изготавливают ленты, гильзы патронов, трубки теплообменников, проволоку.

$(\alpha + \beta')$ -латуни легируют дополнительно алюминием, железом, никелем для увеличения прочности, а также для улучшения обрабатываемости на станках. Высокими коррозионными свойствами обладают латуни, легированные оловом ЛО70—1, ЛО62—1 и называемые морскими латунями. Наибольшей прочностью обладают латуни, дополнительно легированные алюминием, железом, марганцем.

Отрицательным свойством деформированных латуней, содержащих более 20 % Zn, является склонность к растрескиванию при вылеживании во влажной атмосфере, содержащей следы аммиака. «Сезонное растрескивание» обусловлено коррозией по границам зерен в местах неравномерной концентрации примесей. Для снижения этого дефекта после деформации латуни подвергают отжигу при температурах ниже температуры рекристаллизации (обычно около 250 °С).

Из деформируемых латуней изготавливают трубы, прутки, полосы, проволоку. Литейные латуни отливают в землю, в кокиль и идут они на изготовление арматуры и деталей для судостроения, гаек нажимных болтов для сложных условий работы, втулок, вкладышей и подшипников.

### 5.3. Бронзы

Двойные или многокомпонентные сплавы меди с оловом, алюминием, свинцом, бериллием, кремнием, хромом и другими элементами, среди которых цинк не является основным легирующим, называются бронзами.

Особенно широко применяются в машиностроении оловянные бронзы, в которых олово является основным легирующим элементом, а также в качестве легирующих добавок используют цинк, свинец, никель и др.

Диаграмма состояния системы медь—олово (рис. 134) характеризуется сравнительно большим расстоянием между линиями ликвидус и солидус. Поэтому особенностью двухкомпонентных оловянных бронз является их повышенная склонность к ликвации, вызванная медленно проходящим процессом диффузии, низкая жидкотекучесть, рассеянная пористость.

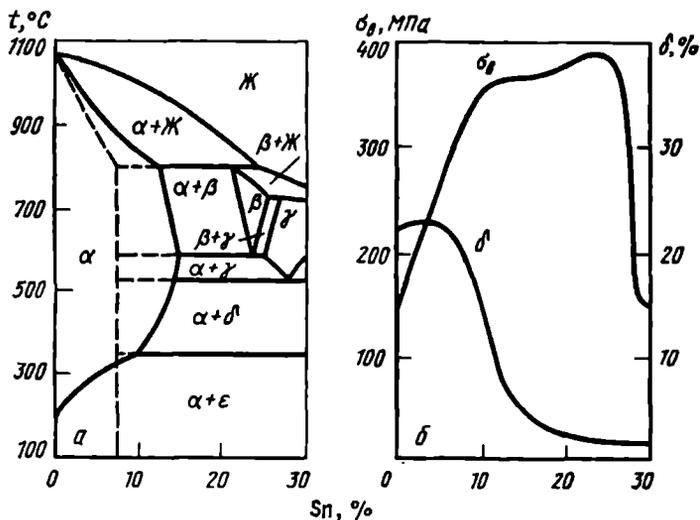


Рис. 134. Диаграмма состояния системы Cu—Sn (а), влияние содержания олова на механические свойства сплавов Cu—Sn (б) и микроструктуры бронзы с 6 % Sn после литья (1) и после отжига (2).  $\times 250$

В соответствии с диаграммой состояния предельная растворимость олова в меди составляет 15,8 %. Учитывая склонность сплавов системы Cu—Sn к неравновесной кристаллизации, при обычных условиях охлаждения область  $\alpha$ -твердого раствора сужается (пунктирные линии). Уже при содержании олова 5—6 % в структуре появляется ( $\alpha + \delta$ )-эвтектоид, в котором  $\delta$ -фаза представляет собой твердое и хрупкое электронное соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ . С появлением  $\delta$ -фазы снижается пластич-

ность и вязкость сплавов. Бронзы с  $\text{Sn} > 12\%$  из-за повышенной хрупкости практически не применяются.

Двойные оловянные бронзы дороги и имеют пониженные литейные свойства. Их обычно дополнительно легируют цинком, свинцом, никелем, фосфором.

Различают деформируемые и литейные оловянные бронзы (табл. 20).

Деформируемые оловянные бронзы содержат 3—7 % Sn, до 5 % Zn и Pb и до 0,4 % P. Они состоят из однородного твердого раствора и после отжига имеют однофазную структуру. Благодаря хорошей пластичности они легко подвергаются обработке давлением и поставляются в виде прутков, труб и лент. Этот вид бронз используется также для изготовления различных деталей с высокими упругими свойствами. Их прочность  $\sigma_b = 320\text{—}350$  МПа при относительном удлинении  $\delta = 30\text{—}50\%$ .

При концентрации олова 9—11 % в структуре увеличивается количество крупной составляющей — эвтектоида, содержащего соединение  $\text{Cu}_31\text{Sn}_8$ , что исключает возможность пластической деформации. Такие бронзы применяются только в литом состоянии.

Литые оловянные бронзы с цинком и свинцом имеют высокие литейные свойства: малую объемную усадку (менее 1 %) и хорошую жидкотекучесть. Из бронзы изготавливают сложные отливки, в частности художественное литье.

Высокая коррозионная стойкость позволяет использовать литейные бронзы в качестве арматуры, работающей в агрессивных средах и обладающей высокой электрической проводимостью и теплопроводностью.

Наличие включений твердого эвтектоида обеспечивает высокую стойкость против истирания, а мягкие частицы облегчают приработку и образуют на поверхности мельчайшие каналы, по которым может циркулировать смазка. Поэтому бронзы, содержащие 9—10 % Sn, являются одним из лучших антифрикционных материалов и применяются для изготовления подшипников. Для улучшения антифрикционных свойств в состав бронз также вводят свинец.

Литые оловянные бронзы имеют предел прочности  $\sigma_b = 170\text{—}200$  МПа при относительном удлинении  $\delta = 5\text{—}10\%$ .

Из безоловянных бронз наибольшее применение нашли алюминиевые, кремнистые и бериллиевые бронзы.

Алюминиевые бронзы, например БрАЖ9—4, БрАЖН11—6, содержат 5—11 % Al, имеют удовлетворительную жидкотекучесть, отличаются высокими механическими свойствами ( $\sigma_b = 550\text{—}650$  МПа,  $\delta = 10\text{—}15\%$ ) и коррозионной стойкостью. По сравнению с оловянной алюминиевая бронза имеет несколько большую усадку. Из алюми-

Т а б л и ц а 20. Химический состав, %, и механические свойства некоторых марок оловянных бронз (ГОСТ 5017—74, ГОСТ 613—79)

Марка сплава	Sn	Zn	Pb	P	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	Назначение
<i>Бронзы, обрабатываемые давлением</i>								
БрОФ4—0,25	3,5—4,0	—	—	0,2—0,3	340	52	650	Трубки аппаратов и приборов
БрОФ6,5—0,15	6—7	—	—	0,1—0,15	400	65	800	Ленты, полосы, прутки
БрОЦ4—3	3,5—4,0	2,7—3,3	—	—	350	40	600	Ленты, полосы, прутки, проволока для пружин
БрОЦС4—4—2,5	3—5	3—5	1,5—3,5	—	350	40	600	Ленты и полосы для прокладок во втулках и подшипниках
<i>Литейные бронзы</i>								
БрО10Ф1	9—11	—	—	0,4—1,1	250	7	800	Сложное литье, подшипники, шестерни
БрО5Ц5С5	4—6	4—6	4—6	—	180	4	600	Водяная и паровая арматура, шестерни
БрО6Ц6С2	5—7	5—7	1—4	—	—	—	—	Художественное литье

вых бронз изготавливают различные втулки, фланцы, шестерни и другие ответственные детали.

Кремнистые бронзы, например БрКМцЗ—1, содержащие до 4 % Si, используют как заменитель оловянных бронз. Имея большую величину усадки, чем оловянные бронзы, они превосходят их по коррозионной стойкости и механическим свойствам. Из них изготавливают детали, работающие в таких агрессивных средах, как морская вода, а также детали, работающие при нагреве до 500 °С.

Особый интерес представляют бериллиевые бронзы, хотя их стоимость в 6—7 раз выше стоимости латуни и бронз других марок. Они содержат 2—2,5 % Ве, например БрБ2. Бериллиевая бронза является дисперсионотвердеющим сплавом. После закалки от 800 °С в воде она сохраняет однофазную структуру, хотя растворимость бериллия в меди составляет всего 0,2 %. После закалки прочность БрБ2  $\sigma_b = 500$  МПа при  $\delta = 30$  %. При искусственном старении при температуре 300—350 °С из пересыщенного твердого раствора выделяются мелкодисперсные частицы фазы CuВе. После термообработки бронза имеет  $\sigma_b = 1200$  МПа,  $\delta = 4$  %.

Бериллиевые бронзы хорошо сопротивляются коррозии, свариваются и обрабатываются резанием. Они применяются для изготовления ответственных деталей авиационных приборов — мембран, пружин. Бериллиевые бронзы — искробезопасный материал, поэтому из них делают контакты и некоторые инструменты для работы во взрывоопасных условиях.

## 6. Антифрикционные сплавы

В машиностроении применяют как подшипники качения, так и подшипники скольжения. Подшипники скольжения применяют в виде вкладышей. Для их изготовления используют антифрикционные сплавы.

Основные требования, предъявляемые к антифрикционным сплавам, — низкие значения коэффициента трения со стальной поверхностью вала и высокая износостойкость подшипников. Для их удовлетворения необходимо, чтобы поверхности вала и вкладыша были разделены пленкой смазки. Высокие антифрикционные свойства обеспечиваются гетерогенной структурой сплава, состоящей из мягкой и пластичной основы и включений твердых частиц. Мягкая основа прирабатывается к валу и вместе с твердыми включениями образует оптимальный антифрикционный микрорельеф с пространством для удерживания смазочных материалов.

Для повышения износостойкости вкладыши должны иметь высокие механические свойства и выдерживать достаточные удельные давления.

Антифрикционные материалы должны иметь высокую теплопроводность для хорошего отвода тепла от трущихся поверхностей. Для изготовления подшипников скольжения заливкой трущихся поверхностей заливаемые сплавы должны иметь низкую температуру плавления (но не настолько низкую, чтобы подшипники оплавлялись в процессе работы).

Для подшипников скольжения используют чугунные вкладыши, бронзовые вкладыши и баббиты.

Чугунные вкладыши для подшипников являются наиболее дешевым антифрикционным материалом. Для этой цели используют высококачественные чугуны, имеющие перлитную основу и повышенное количество графита. Графит сам является смазкой и одновременно впитывает смазочные масла, тем самым дополнительно снижая коэффициент трения. Присутствие феррита в структуре недопустимо, так как при этом увеличивается износ подшипников. Чугунные вкладыши применяют для неответственных подшипников в тихоходных двигателях из-за сравнительно высокого коэффициента трения сталь—чугун (по сравнению с парами бронза—сталь или баббит—сталь).

Бронзовые вкладыши применяют для подшипников более ответственного назначения, используемых в быстроходных двигателях, при высоких удельных давлениях и значительных динамических нагрузках.

Для изготовления бронзовых вкладышей применяют оловянные и свинцовые бронзы, например марок БрОС8—12 (8 % Sn, 12 % Pb), БрОС5—25 (5 % Sn, 25 % Pb), БрС30 (30 % Pb). В оловянных бронзах  $\alpha$ -твердый раствор служит в качестве мягкой основы (на шлифе он имеет вид темных овальных дендритов), а  $\alpha + \beta$  — эвтектид (светлые участки) — твердыми включениями.

В чисто свинцовой бронзе БрС30 (70 % Cu, 30 % Pb) получают мягкую медную основу с еще более мягкими включениями свинца, так как свинец совершенно не растворим в меди. Такие антифрикционные сплавы характеризуются высокими значениями предела выносливости, пластичности и теплопроводности.

Недостатком бронз является их высокая стоимость и сравнительно невысокая механическая прочность. Поэтому их иногда наплавляют на стальную ленту. Наплавку производят в защитной атмосфере.

Специальные подшипниковые сплавы — баббиты (ГОСТ 1320—74) имеют минимальный коэффициент трения со сталью, хорошо прирабатываются к валу и легко удерживают смазку; благодаря вязкой основе они легко поглощают посторонние твердые частицы, не образуя задиров вала.

Обычно применяют баббиты на оловянной либо на свинцовой основе (табл. 21).

Т а б л и ц а 21. Химический состав, %, и назначение баббитов (ГОСТ 1320—74)

Марка баббита	Sn	Sb	Cu	Pb	Прочие	Условия работы и примерное назначение
Б88	Ост.	7,3—7,8	2,5—3,5	—	0,8—1,2 Cd; 0,15—0,25 Ni	Большие скорости и высокие динамические нагрузки. Подшипники для быстроходных и среднеоборотных дизелей.
Б83	—	10—12	5,5—6,5	—	—	Большие скорости и средние нагрузки. Подшипники турбин малооборотных дизелей, гребных валов
Б83С	—	9—11	5—6	1,0—1,5	—	Большие скорости и средние нагрузки. Подшипники турбин малооборотных двигателей, гребных валов
БН	9—11	5—6	1,5—2,0	1,0—1,5	0,1—0,7 Cd; 0,1—0,5 Ni; 0,5—0,9 As	Средние скорости и средние нагрузки. Подшипники компрессоров
Б16	15—17	15—17	1,5—2,0	Ост.	—	Моторно-осевые подшипники электровозов, путевых машин, детали паровозов
БС6	5,5—6,5	5,5—6,5	0,1—0,3	—	—	Подшипники автотракторных двигателей

Наилучшими антифрикционными и механическими свойствами обладают оловянистые баббиты.

Для более легких условий работы применяют баббиты, у которых значительная часть олова заменена свинцом. Например, баббит Б16 имеет меньшую пластичность, и как более хрупкий материал, не может использоваться для высоконагруженных машин.

## 7. Припой

Сплавы, применяемые для пайки металлов, называют припоями. Припой должны обладать сравнительно невысокой температурой плавления и в расплавленном состоянии хорошо смачивать паяемый металл.

Припой бывают двух видов: мягкие и твердые. Мягкие оловянные припой имеют низкую температуру плавления (200—300) °С и обеспечивают лишь герметичность спая без высоких механических свойств ( $\sigma_b = 50 \dots 70$  МПа). Из-за низкой прочности соединения паяная деталь не должна подвергаться высоким механическим нагрузкам. В качестве мягких припоев чаще всего применяют сплавы свинца и олова, обозначаемые ПОС—60, ПОС—40, ПОС—30 и т.д., где цифры указывают на содержание олова в процентах.

Твердые припой имеют высокую температуру плавления, их применение для пайки сложнее, но спай имеет значительно более высокие механические свойства. При пайке медных сплавов свойства припоев близки к свойствам основного металла. В качестве твердых припоев используют латуни Cu—Zn или сплавы Cu—Zn—Ag, так называемые серебряные припой с температурой плавления 800—900 °С. Серебряные припой обычно применяют тогда, когда электрическая проводимость спая должна быть близка к проводимости основного металла.

## Глава 14 ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 1. Общие сведения

Современное машиностроение широко использует детали из порошковых материалов. Методы порошковой металлургии позволяют создавать принципиально новые материалы, которые сложно или даже невозможно получить другими способами. С помощью этих методов можно получать многослойные композиции, различные комбинации металлических и неметаллических компонентов, пористые материалы с широким диапазоном контролируемой пористости, изделия из тугоплавких ме-

таллов и т.д. Порошковая металлургия дает возможность свести к минимуму отходы металла в стружку, упростить технологию изготовления деталей и снизить трудоемкость их производства.

Технологический процесс изготовления изделий из порошков включает получение порошков, подготовку шихты, формование, спекание, горячее прессование и штамповку. Иногда применяют дополнительную обработку, состоящую из пропитки деталей смазками, термической и химико-термической обработки, калибровки и обработки резанием.

Размеры частиц порошка обычно составляют 0,1 мкм—0,1 мм. Более крупные фракции называют гранулами, а более мелкие — пудрой.

Металлические порошки получают физико-механическими и химико-металлургическими способами. В основе физико-механических способов получения порошков лежат методы механического измельчения металлов в твердом и жидком состояниях. К ним относятся дробление и размол стружки в мельницах, распыление расплавленного металла струей сжатого воздуха, газа или жидкости, грануляция при литье расплавленного металла в жидкость и пр.

К химико-металлургическим способам относятся способы восстановления металлов из оксидов, электролитическое осаждение металлов из водных растворов их солей, термическая диссоциация карбонильных соединений металлов.

При формовании заготовок из порошков определенного химического состава прессованием им придают форму и размеры готовых деталей, после чего направляют на спекание. При спекании непрочные прессованные заготовки превращаются в прочное спеченное тело со свойствами, приближающимися к свойствам беспористого компактного материала. Температура спекания деталей из конструкционных материалов на основе железа с добавками графита, никеля и других компонентов составляет 1100—1200 °С. Температура спекания изделий антифрикционного назначения на основе железа составляет 1000—1050 °С, на основе бронзы — 850—950 °С. Спекание проводят в течение 0,5—1,5 ч в нагревательных печах, как правило, в защитной атмосфере или в вакууме для предотвращения окисления частиц порошка. Для получения более высоких характеристик механических и служебных свойств материалов и повышения точности размеров после формования и спекания дополнительно производят горячее прессование, штамповку, прокатку.

Термической обработке порошковых деталей присущи некоторые специфические особенности. Пористость повышает окисляемость порошковых материалов, вследствие чего их нагрев целесообразно проводить в защитной атмосфере. Поры, заполненные газом, снижают теплопроводность, что ухудшает прокаливаемость пористых материалов по сравнению с компактными. Для пористых деталей целесообразно применение закалки с резким охлаждением в струе воды или с энергичным

перемешиванием для ускорения срыва паровой рубашки, затрудняющей охлаждение. После закалки детали должны подвергаться обязательной просушке до полного удаления влаги из пор.

В ряде случаев дополнительно проводят химико-термическую обработку деталей из порошковых материалов. Цементацию и нитроцементацию применяют с целью повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя. Азотирование позволяет получать высокую твердость, усталостную прочность и коррозионную стойкость деталей.

Сульфидирование применяется с целью уменьшения коэффициента трения для повышения износостойкости и твердости железных и железо-графитовых изделий. Наиболее простым способом сульфидирования является пропитка серой путем погружения пористых изделий в расплавленную серу при 140—160 °С (выдержка 10—15 мин) с последующим нагревом до 400—500 °С в герметизированной печи с азотводородной атмосферой.

Оксидирование обработкой паром применяется для повышения износостойкости и коррозионной стойкости порошковых деталей на железной основе. Обычно используется обработка паром при 550 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением в масле. При взаимодействии паров воды с железом на поверхности деталей и на поверхности открытых пор образуется прочная коррозионностойкая пленка.

Порошковые материалы находят применение во многих отраслях народного хозяйства.

## 2. Конструкционные материалы

Конструкционные детали являются наиболее распространенным видом продукции порошковой металлургии. Учитывая почти полное отсутствие отходов, они имеют минимальную стоимость и трудоемкость. Различают конструкционные порошковые материалы общего назначения, заменяющие обычные углеродистые и легированные стали, чугуны и цветные металлы, и материалы, обладающие специальными свойствами — высокой износостойкостью, твердостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, специфическими магнитными и электрическими характеристиками. В зависимости от условий нагружения различают мало-, средне- и тяжелонагруженные детали, которые в свою очередь делятся на тяжелонагруженные статическими и динамическими усилиями.

В зависимости от пористости детали из порошковых материалов делятся на пористые с плотностью 6,0; 6,4; 6,8 г/см<sup>3</sup> и плотные с плотностью 7,2; 7,4; 7,7 г/см<sup>3</sup>.

Пористые материалы изготовляют путем холодного прессования и спекания или двукратным холодным прессованием и спеканием. Пористость материала при этом должна составлять 10—25 %.

Плотные материалы получают холодным прессованием и спеканием с последующей дополнительной горячей обработкой давлением (горячей штамповкой, горячим прессованием). Применяют также последующую термическую обработку или химико-термическую обработку. Пористость материала должна составлять 2—9 %.

Чем выше требования по прочности, тем меньше должна быть пористость металла. Порошковые детали делятся на четыре группы по плотности (пористости).

Малонагруженные детали обычно имеют пористость 16—25 %, соответствующую 1-й группе плотности. Их изготовляют путем холодного прессования и спекания из железного порошка с добавкой графита, либо из порошков углеродистых сталей.

Средненагруженные порошковые детали изготовляют двукратным холодным прессованием и спеканием из порошков углеродистых или низколегированных сталей, а также из железного порошка с добавкой углерода, меди, никеля. Пористость материала при этом должна составлять 10—15 %, что соответствует 2-й группе плотности.

Тяжелонагруженные статическими усилиями детали изготовляют из порошков углеродистых или легированных сталей и цветных сплавов. Пористость материала не должна превышать 9 % (группа плотности 3). Изделия получают холодным прессованием и спеканием с последующей

дополнительной горячей и холодной штамповкой или горячим прессованием. Применяют также пропитку легкоплавкими металлическими расплавами с последующей термической обработкой.

Тяжелонагруженные динамическими нагрузками детали изготавливают из порошков углеродистых и легированных сталей и сплавов цветных металлов с пористостью не более 2 % (группа плотности 4). В этом случае проводят холодное прессование, спекание, горячую штамповку, горячее прессование или химико-термическую обработку.

На рис. 135 представлена зависимость относительной прочности  $\sigma_{отн} = (\sigma_{пор} / \sigma_{комп}) \cdot 100$  от относительной плотности  $\gamma_{отн} = (\gamma_{пор} / \gamma_{комп}) \cdot 100$  порошковых материалов при различных технологических

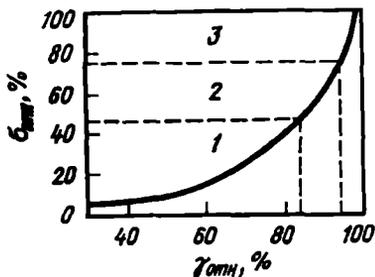


Рис. 135. Зависимость относительной прочности порошковых конструкционных материалов от их относительной плотности и технологии формообразования:

1 — статическое холодное прессование; 2 — высокоскоростное холодное прессование; 3 — горячая штамповка

процессах формообразования, где  $\sigma_{\text{пор}}$ ,  $\gamma_{\text{пор}}$  — прочность и плотность порошковых материалов, а  $\sigma_{\text{комп}}$ ,  $\gamma_{\text{комп}}$  — прочность и плотность компактных материалов.

С увеличением плотности одновременно возрастают пластичность и ударная вязкость. Изменяя пористость, можно регулировать плотность и механические свойства, подбирать материалы с заданным уровнем свойств для конкретных условий работы изделий.

Условное обозначение марок конструкционных материалов на основе порошков железа состоит из букв и цифр. Буквы указывают: П — на принадлежность материала к порошковому, К — на назначение материала — конструкционный, остальные буквы — на содержание легирующих компонентов (Д — медь, Х — хром, Ф — фосфор, К — сера, М — молибден, Г — марганец, Т — титан, Н — никель).

Цифры, стоящие после букв ПК, указывают на среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента. Массовую долю углерода, равную 1 %, в обозначении марок материала не указывают. Цифры, стоящие после букв, указывают на массовую долю в материале легирующих компонентов в процентах, отсутствие цифр означает, что массовая доля компонента менее или равна единице.

Условное обозначение конструкционного порошкового материала состоит из обозначения его марки и через дефис — минимальной плотности ( $\text{г/см}^3$ ). Например, ПК10—6,8 означает сталь порошковая конструкционная со средней массовой долей углерода 0,1 % и минимальной плотностью 6,8  $\text{г/см}^3$ ; ПК40Н2Д2—6,4 — сталь порошковая конструкционная со средней массовой долей углерода 0,4 %, никеля 2 %, меди 2 % и минимальной плотностью 6,4  $\text{г/см}^3$ ; ПК10Х18Н9Т—7,6 — сталь порошковая конструкционная со средней массовой долей углерода 0,1 %, хрома 18 %, никеля 9 %, титана до 1 %. В табл. 22 приведены механические свойства некоторых марок порошковых материалов для различных условий нагружения.

Основой для получения порошковых коррозионностойких материалов обычно служат порошки сталей и сплавов определенного состава. Иногда для их изготовления используют смеси разных металлических порошков, однако такие материалы значительно уступают по свойствам, особенно коррозионным, материалам такого же состава из порошков сталей и сплавов. Детали из порошков сталей марок 10Х13М2, 10Х25, 20Х13, 40Х13М2, 10Х18Н9Т, 10Х18Н15 получают после одного и двукратного прессования с последующей горячей обработкой давлением. Дополнительная обработка давлением позволяет снизить пористость до 2 % и менее и тем самым повысить как механические свойства, так и коррозионную стойкость коррозионностойких сталей (рис. 136). С увеличением степени деформации возрастает плотность стали и уменьшается пористость.

Т а б л и ц а 22. Механические свойства и назначение порошковых конструкционных общемашиностроительных материалов

Марка материала	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	Область применения
<i>Малонагруженные детали, пористые</i>				
ПК40ДЗ-6,0	220	—	800	Крышки, шайбы, кольца, втулки,
ПК40ДЗ-6,4	280	—	1000	кулачки
ПК40Н2Д2-6,4	300	1	1000	
<i>Малонагруженные детали, плотные</i>				
ПК10-7,2	220	6	800	То же
ПК10-7,6	260	20	900	
ПК10ДЗ-7,4	500	15	900	
<i>Среднеагруженные детали, пористые</i>				
ПК40Н2Д2-6,8	360	2	1200	Пальцы, кулачки, рычаги,
ПК40Х2-6,8	400	2	1100	поршневые кольца
<i>Среднеагруженные детали, плотные</i>				
ПК40-7,2	290	4	1000	То же
ПК10Н2Д2-7,6	500	15	1300	
<i>Тяжелонагруженные детали, пористые</i>				
ПК40Н2Д2М-6,8	440	3	1500	Шатунные корпуса, детали насосов
ПК40Н3Д2Х-6,8	500	2	1500	пишущих и счетных машинок и др.
<i>Тяжелонагруженные детали, плотные</i>				
ПК40НМ-7,6	600	10	1300	То же
ПК10Н2Д6М-7,4	800	3	1800	
ПК40Н2Д2-7,4	700	5	1500	

П р и м е ч а н и е. Свойства указаны после отжига.

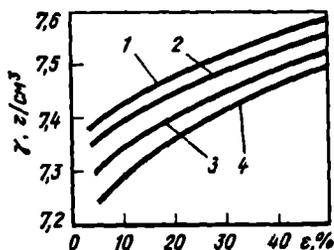


Рис. 136. Зависимость плотности порошковой стали 08Х13 от степени деформации при холодном прессовании при различных давлениях прессования, МПа:

1 — 1400; 2 — 1200; 3 — 1000; 4 — 800

Для увеличения коррозионной стойкости необходимо уменьшать пористость. Отрицательное влияние пористости на коррозионную стойкость обусловлено развитой поверхностью открытых сообщающихся пор. Например, скорость коррозии стали 08Х17Н15 с 30 % пор в кипящей 25 %-ной азотной кислоте в 100 раз больше, чем компактной стали. Скорость коррозии

образцов с 5,5—7 % пор в три раза, с 4,4 % пор — вдвое, а с 2,7 % — всего лишь на 2 % выше по сравнению со скоростью коррозии компактной деформированной стали. Поэтому конструкционные детали из порошковых коррозионностойких сталей, предназначенные для работы в агрессивных средах, должны иметь пористость не более 3 %.

Беспористые и низкопористые порошковые коррозионностойкие стали, полученные методами двукратного прессования и спекания, горячего вакуумного прессования и горячей штамповки, рекомендуются для коррозионностойких деталей ответственного назначения. Они не уступают по свойствам компактным сталям тех же составов.

Конструкционные материалы на основе цветных металлов и сплавов изготавливают из порошков алюминия, магния, бериллия, меди, никеля, бронз, латуней, титана, хрома и других металлов и сплавов.

Марки порошковых конструкционных материалов на основе цветных металлов также обозначают сочетанием буквенных и цифровых индексов. Первый буквенный индекс указывает класс материалов: Ал — алюминий, Бе — бериллий, Бр — бронза, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, Ж — железо, Л — латунь, М — молибден, Мг — магний, Н — никель, О — олово, П — фосфор, С — кремний, Св — свинец, Ср — серебро, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Ц — цинк, Цр — цирконий. Второй буквенный индекс «П» указывает, что материал получен методами порошковой металлургии. Следующие после него буквы обозначают легирующие элементы, а цифры после них — массовую долю элемента в процентах. Цифра в конце марки после тире, как и для черных металлов, обозначает группу пористости материала (табл. 23).

Перспективно использование порошков титана и его сплавов для изготовления тяжело нагруженных деталей. Высокие механические свойства порошковых изделий на основе титана ( $\sigma_b = 650\text{—}900$  МПа,  $\delta = 8\text{—}16$  %) позволили применить их для изготовления шатунов автомобильных двигателей. Это дало возможность существенно уменьшить массу, снизить инерционные силы и повысить мощность двигателя. Из порошков титана организовано серийное производство деталей типа втулок, крышек, труб, для химического и пищевого машиностроения, приборостроения и др.

### 3. Антифрикционные материалы

Для изготовления подшипников скольжения, уплотнений, подпятников наряду с литыми сплавами типа бронз, баббитов и чугунов, используют антифрикционные материалы, изготовленные методом порошковой металлургии. Они создаются на основе меди или железа и в своем составе содержат вещества типа твердых смазок (графит, сульфиды и др.), что обеспечивает им заданные механические и эксплуатационные свойства.

Т а б л и ц а 23. Механические свойства и назначение порошковых материалов и сплавов цветных металлов

Марка материала	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	Область применения
АлПМг6Г4-4	500	6	0,08	Крепежные детали, детали при- боров, детали для химического и пищевого машиностроения
АлПМг6-4	300	15	0,15	
БрПО-4	300	15	0,15	Детали приборов судостроения, гайки, втулки, червячные вин- ты, фильтры, подшипники
ЛП80-4	200	25	0,5	
ТПАл4-4	650	8	0,15	Компрессорные диски, шестерни, трубчатые фильтры, крепеж, ша- туны, лопатки турбин, коленвалы
ТП-4	500	20	0,5	
ТПАл6М2-4	900—1000	16—18	0,3	

Антифрикционные порошковые материалы характеризуются низким коэффициентом трения, хорошей износостойкостью, способностью легко прирабатываться к валу и выдерживать значительные нагрузки. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными антифрикционными материалами. Их износостойкость в несколько раз выше, чем у бронз и баббитов. Они работают при более высоких скоростях и давлениях. Наличие в структуре пористости, регулируемой в широких пределах (до 35 %), позволяет их предварительно пропитывать смазочными маслами. Во время работы по мере нагревания масло, удерживаемое в порах и мельчайших каналах материала капиллярными силами, постепенно вытесняется наружу и образует смазочную пленку на рабочей поверхности. При остановке и последующем охлаждении подшипника масло частично всасывается обратно в поры. Поэтому пористые подшипники могут работать длительное время без дополнительной смазки. Эффект самосмазываемости в пропитанных маслом пористых подшипниках, без подвода смазки извне, может сохраняться в течение 3000—5000 ч.

Композиционные антифрикционные порошковые материалы позволяют иметь равномерно распределенные включения из веществ, играющих роль твердой смазки. К таким веществам относятся графит, сульфиды, пластмассы и некоторые другие соединения. Такие материалы имеют сравнительно низкий коэффициент трения при работе без жидкой смазки (в режиме сухого трения). Сочетание повышенных антифрикционных свойств твердых смазок и пластмасс со свойствами металлов позволяют получать материалы, способные работать в воде, агрессивных жидкостях, бензине, различных газовых средах, в вакууме, а также в условиях высоких и низких температур.

Порошковые антифрикционные материалы могут представлять собой каркасные конструкции, в которых каркас выполнен из прочного материала, а промежутки заполнены более мягким материалом. Можно, наоборот, иметь мягкую матрицу с равномерно распределенными твердыми включениями разной степени дисперсности, повышающими работоспособность подшипников. Эти особенности позволяют осуществлять направленное регулирование свойств порошковых антифрикционных материалов применительно к конкретным условиям эксплуатации.

Широко используют следующие основные группы порошковых антифрикционных материалов.

Антифрикционные материалы на основе железа содержат графит, молибден, сульфиды, серу и т.д., что обеспечивает им заданную прочность, твердость, структуру и эксплуатационные свойства. В обозначении марок перед дефисом буквы указывают: П — на принадлежность материала к порошковому, А — на назначение материала — антифрикционный. После дефиса следует буквенное обозначение основы материала и легирующих элементов: Ж — железо, Д — медь, О — олово, Г — графит, Х — хром, Н — никель, Ф — фосфор, Б — бор, К — сера, Мс — десульфид молибдена, Цс — сернистый цинк, Л — латунь, М — молибден. Цифры, стоящие после букв, указывают на содержание определенного элемента в материалах сходных композиций, различающихся процентным содержанием одних и тех же элементов.

Для работы в тяжелых условиях трения без смазки или ограниченной смазки при высоких скоростях, повышенных нагрузках и температурах применяется железографитовый материал ПА-ЖГрЗЦс (3 % графита, 4 % сернистого цинка). Износостойкость подшипников из такого материала в 3—10 раз больше, чем из литых бронз или баббитов.

Высоколегированный железографит марки ПА-ЖГрЗМ15 (графит 3 %, молибден 15 %), ПА-ЖНГрЗМ (никеля 39,0—43,0 %; молибдена 13,0—16,0 %, углерода 1,8—3,0 %) применяется для работы в режиме самосмазывания, при трении без смазки на воздухе, при температурах до 450 °С и давлении до 18 МПа. Его износостойкость вдвое больше износостойкости сульфидированных железографитовых материалов. Он находит применение в подшипниках скольжения электрооборудования, в узлах трения компрессоров.

Высокие характеристики приобретает металлографит при введении его в состав стеклопорошка в количестве 5—10 %. Коэффициент трения уменьшается почти в два раза при одновременном увеличении допустимой рабочей температуры. На рис. 137 приведена зависимость долговечности подшипников из обычного железографита и того же материала со стеклопорошком. Железографит со стеклопорошком применяют в узлах трения, работающих при высоких нагрузках, в условиях глубокого вакуума и при воздействии коррозионных сред. Бронзографитовые мате-

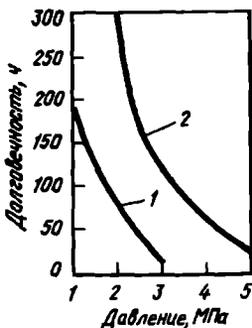


Рис. 137. Зависимость долговечности пористых антифрикционных материалов от давления:

1 — железуграфит; 2 — железуграфит + стеклопорошок

10X23H15, 08X18H9, 14X17H2 характеризуются высокой коррозионной стойкостью, прочностью и жаропрочностью и применяются для изготовления подшипников, работающих в воде, агрессивных жидких и газовых средах, в условиях сгорания топлива при повышенных температурах.

Металлопластмассовые антифрикционные материалы представляют собой высокопористый каркас из бронзы, железа, коррозионностойкой стали и т.д., пропитанный фторопластом или пластмассой другого вида. Сочетание повышенных антифрикционных свойств пластмасс со свойствами металлов позволяет получать материалы, способные работать в вакууме, различных газовых средах, воде, агрессивных жидкостях, бензине, некоторых кислотах, а также в условиях низких температур. Для повышения антифрикционных свойств к этим материалам добавляют тонкие порошки свинца, сульфидов, молибдена, стекловолокна и т.д. Эти наполнители выполняют роль сухой смазки и упрочняют пластмассовый слой. Металлопластмассовые подшипники работают без смазки при температурах от +280 до -200 °С.

Внедрение порошковых подшипников повышает надежность и долговечность работающего оборудования, снижает трудоемкость процесса их изготовления, позволяет уменьшить отходы металла в стружку, обеспечивает экономию дефицитных цветных металлов и сплавов.

риалы ПА-БрОгр, ПА-БрГр2, ПА-БрОГр4 имеют прочность  $\sigma_b = 60-80$  МПа при пористости 10—28 %. Применяют при работе во влажных и слабоагрессивных средах. Подшипники из бронзоуграфита по сравнению с железуграфитом допускают меньшие удельные механические и тепловые нагрузки.

В обозначении марок перед дефисом указывают: П — принадлежность материала к порошковому, А — на назначение материала — антифрикционный. После дефиса следуют буквенные обозначения основы материала и легирующих компонентов: Бр — бронза, Д — медь, О — олово, Гр — графит, Ж — железо, Х — хром.

Сульфидированные и сульфоборированные антифрикционные материалы на основе порошков коррозионностойких сталей марок

#### 4. Фрикционные материалы

Порошковые фрикционные материалы предназначены для работы в различных тормозных и передаточных узлах автомобилей, гусеничных машин, дорожных и строительных механизмов, самолетов, станков, прессов и т.п. Фрикционные элементы из порошковых материалов изготавливают в виде дисков, секторных накладок и колодок различной конфигурации. Применяют порошковые фрикционные материалы на основе меди и на основе железа.

Порошковые материалы на основе оловянистых и алюминиевых бронз, содержащие свинец, графит и железо, предназначены преимущественно для работы в условиях трения со среднеуглеродистыми сталями с твердостью *HRC* 40—45 при давлении до 35 МПа и скорости скольжения до 50 м/с. При меньших давлениях и скоростях до 5 м/с используют металлопластмассовые материалы.

Порошковые материалы на основе железа, содержащие добавки меди, графита, оксида кремния, асбеста, сернокислого бария, предназначены для работы в условиях трения при давлениях до 3,00 МПа и скоростях до 60 м/с в паре с чугуном либо легированной сталью в тормозных устройствах различной конструкции (дисковых, колодочных, ленточных тормозах).

В сравнении с асбофрикционными материалами порошковые материалы обладают более высокими значениями термо- и износостойкости — в 2—4 раза, а в некоторых случаях, например при работе с легированным чугуном, и более высоким (на 15—25 %) коэффициентом трения.

Применение порошковых фрикционных материалов в тормозных передаточных устройствах взамен применяемых литых (сталь, чугун) либо асбофрикционных деталей позволяет повысить долговечность, надежность и эффективность фрикционных узлов машин и механизмов, создать новые конструкции фрикционных узлов, имеющих более высокий коэффициент трения, высокую стабильность, износостойкость и термостойкость.

#### 5. Пористые фильтрующие элементы

Для изготовления фильтрующих элементов обычно применяют ткани, войлок, керамику, фарфор, а также сетчатые фильтры из различных материалов. Их недостатками являются низкая коррозионная стойкость, недостаточная механическая прочность, низкая термостойкость и жаропрочность. В большинстве случаев они не допускают высокие перепады давлений и с трудом поддаются регенерации.

Высокопористые порошковые металлические материалы благодаря жесткому пространственному каркасу имеют более высокую прочность.

Они выдерживают резкие колебания температур, легко обрабатываются, свариваются и паяются, обеспечивают необходимую коррозионную стойкость, жаростойкость, теплопроводность. Вследствие высокой пористости они имеют хорошую проницаемость для жидкостей и газов при достаточно тонкой фильтрации (до 30 мкм). Эти материалы легко регенерируются и при этом почти полностью восстанавливают свои первоначальные свойства. Они не засоряют фильтрующиеся жидкости или газы материалами фильтра.

Технология изготовления металлических пористых элементов зависит от их формы и размеров. Фильтры небольших размеров изготавливают спеканием свободно засыпанного порошка. Для более крупных применяют холодное прессование и последующее спекание. Для получения тонких пористых лент применяют прокатку.

Для изготовления пористых проницаемых элементов применяют порошки различных металлов и сплавов: углеродистых и коррозионно-стойких сталей различных марок, сплавов никеля с хромом и молибденом, сплавов меди, титана, алюминия, вольфрама, молибдена и др. В технике наибольшее распространение получили фильтры из коррозионно-стойкой стали, бронзы, сплавов никеля и титана.

Проницаемость пористого материала характеризуется количеством жидкости или газа, прошедшего в единицу времени через единицу фильтрующей поверхности определенной толщины при заданном равномерном давлении на фильтре.

Фильтры из порошков коррозионно-стойких сталей марок 14X17H2, 10X18H10 и других изготавливают прессованием или прокаткой с последующим спеканием при температуре 1200—1250 °С. Фильтры имеют пористость 35—70 % с диаметром пор 4—100 мкм и толщиной очистки 2—20 мкм. Интервал рабочих температур составляет от -90 до 250 °С. Стальные пористые фильтры применяют для очистки воздуха от пыли, водяного и масляного тумана, очистки различных жидкостей и газов, для изготовления перегородок, отделяющих газы от жидкостей.

Бронзовые пористые фильтры изготавливают либо свободной засыпкой порошка, либо с приложением давления прессования и спекают при 800—860 °С. Пористость фильтров составляет 25—40 % при диаметре пор 40—160 мкм и тонкости очистки 16—60 мкм. Фильтры из порошка бронзы применяют для защиты различных приборов (топливных насосов, форсунок и др.) от попадания в них загрязнений из гидросистемы и трубопроводов, а также для очистки жидкостей и газов. Их применяют для очистки дизельного топлива в качестве влагомаслоотделителей.

Все более широкое применение начинают находить пористые фильтры, изготовленные из порошка титана. Пористость титановых фильтров составляет 25—65 % с диаметром пор 5—100 мкм и толщиной очистки 4—20 мкм. Сочетание высокой коррозионной стойкости с хоро-

шими эксплуатационными характеристиками позволяет использовать пористые фильтры из порошка титана в химической промышленности, медицине, авиационной технике. Они применяются для очистки агрессивных водных растворов кислот и различных растворов в химико-фармацевтической промышленности. Из порошка титана изготавливают пламягасящие элементы, паронепроницаемые пластины и др.

Применение порошковых пористых материалов позволяет увеличить срок службы насосов, двигателей и других агрегатов, работающих на очищенных жидкостях. С их помощью повышается эффективность химических процессов и улучшается качество вакуумной продукции, создаются предпосылки для получения материалов с новыми свойствами.

Порошковые твердые сплавы для режущего инструмента рассмотрены в главе 11 настоящего раздела.

## Глава 15

### **МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

#### **1. Общие сведения**

Широко известны случаи хрупких разрушений машин и конструкций с понижением температуры.

Явление хладноломкости, т.е. хрупкого разрушения, связанного с действием низких температур, впервые стало предметом широкого обсуждения в связи с бурным строительством железных дорог в конце XIX века.

После замены пудлингового способа производства на бессемеровский и мартеновский было отмечено, что рельсы, изготовленные из литого металла, внезапно разрушались при понижении температуры. Уже тогда была признана актуальной проблема хладноломкости металлов, необходимость изучения ее природы и выработки мероприятий по ее устранению.

После введения в инженерную практику такого производительного технологического процесса, как сварка, начались крупные аварии сварных железнодорожных мостов, морских судов, резервуаров для хранения нефти, магистральных газопроводов. При этом аварии чаще происходили в высоких широтах в зимнее время года при совместном действии низкой температуры и ветра. Анализ разрушений показал, что почти в половине случаев разрушение начиналось в дефектных местах сварных

швов. Особую актуальность проблема хладноломкости приобрела в связи с освоением Сибири, Крайнего Севера, Арктики и Антарктиды.

Эффективность работы оборудования и транспорта в зимнее время в этих районах резко падает. Анализ работы автохозяйств арктической зоны показал, что срок службы автомобилей обычного типа по сравнению с Европейской частью России сокращается в два раза, а аварии и поломки, связанные с климатическими условиями, выводят из строя до 25 % парка машин. Число поломок горных экскаваторов в Черемхово в зимние месяцы возрастает в 5—7 раз. При этом особенно опасным является период пуска машин в работу после остановки.

Для последних лет характерно бурное развитие холодильного машиностроения, кондиционирования и криогенной техники.

Важным стимулом для развития криогенной техники явилось осуществление в мире космических и ядерных программ. Криогеника имеет огромные перспективы в различных хозяйственных и научных отраслях. Важнейшим фактором дальнейшего развития техники низких температур является создание материалов, пригодных для работы в этих условиях.

Конструирование и выпуск хладостойкой и криогенной техники должны быть основаны на глубоком знании поведения материалов при низких температурах, надежных методах оценки работоспособности и долговечности материалов, научно обоснованных рекомендациях по их выбору.

Особенностью низкотемпературной службы является ужесточение требований к материалу по пластичности и вязкости. Определенную сложность представляет выбор необходимого уровня пластических и вязких свойств. Обычно минимальная рабочая температура определяется температурой вязко-хрупкого перехода, при которой вязкость падает до неприемлемо малых значений. Сложность количественной интерпретации влияния различных конструкторско-технологических факторов, размеров деталей, уровня остаточных напряжений, вида напряженного состояния и условий нагружения на надежность машин и конструкций затрудняют создание нормативных рекомендаций по применению материалов для работы в конкретных условиях.

По хладостойкости металлические материалы, используемые при низких температурах, условно могут быть разбиты на четыре основные группы.

1 группа. Металлы и сплавы, характеристики механических свойств которых позволяют использовать их до 210 К, т.е. до низких климатических температур, для изготовления изделий так называемого северного исполнения. К этой группе относятся качественные углеродистые и низколегированные стали ферритного и перлитного классов с ОЦК решеткой.

2 группа. Сплавы, сохраняющие вязкость и пластичность при охлаждении до 170 К. Это стали с 0,2—0,3 % С, дополнительно легированные никелем, хромом, титаном, молибденом. К этой группе относятся, например, низкоуглеродистые ферритные стали с 2—5 % Ni, используемые при температурах 210—150 К.

3 группа. Сплавы, способные без ухудшения свойств выдерживать температуры до 77 К ( температура кипения жидкого азота). Сюда относятся стали типа 12X18H10T, 0H9A, большинство сплавов на основе Al, Ti, Cu, не обнаруживающих склонности к хрупкому разрушению. Для ненагруженных конструкций с целью экономии никеля применяют Cr—Mn и Cr—Ni—Mn стали типа 10X14Г14Н4Т (ЭИ711), 03X13AG19 (ЧС36), 07X21Г7АН5 (ЭП222).

4 группа. Сплавы, используемые для работы при температуре ниже 77 К. К этой группе принадлежат материалы, используемые в космической технике, производстве и потреблении водорода, экспериментальной физике. Для работы при таких температурах пригодны лишь высоколегированные коррозионностойкие стали типа 03X20H16AG6, 10X11H23T3MP (ЭП33), некоторые бронзы, никелевые, алюминиевые сплавы, легированные магнием, и сплавы титана на основе  $\alpha$ -фазы.

## 2. Свойства и применение сталей при низких температурах

Стали, работающие в условиях низких температур, должны обеспечивать необходимую прочность в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью, обладать малой чувствительностью к концентраторам напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению. Учитывая технологию изготовления изделий, работающих при низких температурах, такие стали должны обладать хорошей свариваемостью.

Ранее отмечалось, что при низкой температуре прочностные характеристики растут, а вязкость и пластичность падают. Поэтому при выборе стали для работы в этих условиях определяющими показателями будут прочность при высокой температуре эксплуатации (обычно комнатной), а вязкость и пластичность — при низкой температуре.

Механические свойства и работоспособность сталей, эксплуатируемых при низких температурах, зависят от многих факторов. К ним прежде всего относятся тип кристаллической решетки, размер зерна и состояние его границ, содержание легирующих элементов и примесей, форма, размер, состав и количество неметаллических включений. Насыщение металла водородом увеличивает хрупкость стали. Сварка способствует росту зерна и дополнительному наводороживанию, что увеличивает хладноломкость сварных соединений. Кроме того, нагрев при сварке может способствовать фазовым превращениям и выделению примесей по границам зерен, что также повышает хрупкость стали.

Вязкость стали при низких температурах зависит от технологии выплавки. При использовании вакуумирования, обработки жидкими шлаками, электрошлакового переплава вязкость растет. Это связано с уменьшением количества неметаллических включений, понижением концентрации вредных примесей и газов. Рациональная организация раскисления и введение малых добавок ниобия, ванадия и титана способствуют измельчению зерна, повышению прочности и вязкости стали.

### *2.1. Влияние легирующих элементов на хладноломкость сталей климатического холода*

Легирующие элементы оказывают влияние на размеры зерен, состояние их границ, количество, форму и распределение фаз в стали.

Механические свойства и хладноломкость (хладостойкость) стали определяются прежде всего тремя механизмами упрочнения: 1) измельчением зерна; 2) упрочнением феррита атомами легирующих элементов и примесей, образующими твердые растворы внедрения и замещения; 3) упрочнением выделениями частиц второй фазы различной степени дисперсности. Этот вид упрочнения называется дисперсионным. Влияние легирующих элементов на свойства стали обусловлено их воздействием на эти основные механизмы упрочнения.

Эффективное упрочнение достигается за счет введения углерода, образующего твердые растворы внедрения. Однако его растворимость в феррите сравнительно невелика, что приводит к снижению упрочняющего эффекта. Высокая прочность мартенсита закалки сопровождается снижением вязкости и необходимостью проведения отпуска. При отпуске образуются карбиды, мартенсит обедняется углеродом и снижается действие твердорастворного механизма упрочнения. При этом, хотя и реализуется третий механизм упрочнения — дисперсными частицами второй фазы, образуются довольно крупные частицы цементитного типа в ферритной матрице. Эти частицы более тверды и хрупки, чем ферритная матрица, и при нагружении на поверхности раздела создается объемнонапряженное состояние, приводящее к образованию микротрещин. Принято считать, что увеличение в стали содержания углерода на каждые 0,1 % повышает порог хладноломкости на 20 К.

Снижение содержания углерода предотвращает образование при сварке в зоне термического влияния хрупких закалочных мартенситных структур. В свариваемых хладостойких сталях содержание углерода должно быть ниже 0,2 % и в структуре должно быть мало перлита (малоperlитные стали).

Введение в углеродистую сталь марганца до 2 % и кремния до 0,8 % упрочняет ферритную матрицу благодаря образованию твердого раствора замещения. Легирование марганцем измельчает зерно и увеличивает

вязкость феррита, что повышает величину работы распространения трещины при низких температурах.

Легирование стали небольшими добавками титана, ниобия и ванадия (до 0,1—0,15 %) позволяет получать мелкодисперсные выделения второй фазы типа VC, TiC, Nb(CN), V(CN), эффективно упрочняющие матрицу. Эти же элементы участвуют в упрочнении по первому механизму. Они способствуют измельчению зерна и снижают склонность к его росту. На границах зерен образуются дисперсные частицы карбидов и карбонитридов ниобия, титана и ванадия, тормозящие рост зерен при нагревании. Увеличение содержания этих элементов более 0,15 % значительно увеличивает прочность, но одновременно повышает склонность стали к хрупкому разрушению.

Для повышения хладостойкости и свариваемости строительных сталей применяют малоперлитные стали с низким содержанием углерода с микролегированием сильными карбидообразующими элементами.

Кроме того, используют стали, легированные азотом в сочетании с различными сильными нитридообразующими элементами. В качестве таких элементов чаще всего применяют ванадий, алюминий, ниобий и титан. Выделение азота из твердого раствора в виде нитридов уменьшает его охрупчивающее действие. Это позволяет увеличить прочность стали и, способствуя измельчению зерна, не ухудшает хладостойкость стали.

К сталям этой группы относятся стали марок 09Г2, 09Г2С, 09Г2СД, 15Г2СФ, 14Г2СФ, 14Г2АФ и др. (табл. 24). Из-за дефицитности никеля его применение в сталях этого типа ограничено.

Хром несколько повышает прочность стали и при содержании до 1 % увеличивает ее вязкость. Увеличение концентрации хрома более 1,5 % приводит к повышению порога хладноломкости.

Прочность стали может быть повышена при легировании медью за счет упрочнения твердого раствора, дополнительно измельченного зерна, а при более высоких концентрациях (до 0,8 %) за счет дисперсионного упрочнения. Одновременно может быть снижена критическая температура хрупкости. Однако стали с медью пока не нашли широкого применения из-за опасности возникновения красноломкости.

Таблица 24. Механические свойства низколегированных свариваемых сталей марок 09Г2С, 14Г2АФ (лист толщиной << 20 мм)

Марка стали	Термообработка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup> , при температуре, К		
					293	233	203
09Г2С	Состояние поставки	480	330	21	0,6	0,4	0,3
14Г2АФ	Нормализация при 930 °С	600	460	28	1,9	1,8	0,6

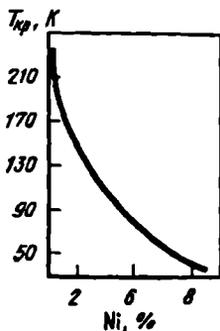


Рис. 138. Влияние содержания никеля на критическую температуру хрупкости низкоуглеродистой стали

Из всех легирующих элементов в наибольшей степени никель понижает хладноломкость стали. Никель и железо полностью растворимы друг в друге, имеют близкое кристаллическое строение решеток. Никель не является карбидообразующим элементом, он находится в твердом растворе в феррите или аустените. Никель упрочняет феррит и одновременно увеличивает его вязкость. Никель увеличивает прокаливаемость стали, измельчает зерно, а также снижает концентрацию примесей на дислокациях и уменьшает блокирование дислокаций примесными атомами внедрения.

На рис. 138 приведена зависимость критической температуры хрупкости от содержания никеля в стали. Введение 1 % Ni снижает порог хладноломкости примерно на 20 К.

Введение молибдена до 0,5 % существенно снижает порог хладноломкости. Молибден оказывает сдерживающее влияние на диффузионную подвижность фосфора и уменьшает отпускную хрупкость. Действие никеля на хладноломкость особенно эффективно в сочетании с молибденом.

Резко отрицательное действие на хладноломкость оказывают фосфор, сера, растворенные газы: кислород, азот, водород.

С увеличением содержания серы растет количество сульфидных включений, играющих роль концентраторов напряжений. Так, увеличение содержания серы в литой стали 25Л от 0,02 до 0,05 % более чем в два раза снижает ударную вязкость при 233 К. Повышение содержания серы на 0,01 % увеличивает порог хладноломкости примерно на 15 К.

Охрупчивающее влияние фосфора сказывается в обогащении им межзеренных границ благодаря сильной ликвации, а также благодаря образованию концентраторов напряжений — фосфидной эвтектики. При увеличении содержания углерода охрупчивающее влияние фосфора возрастает. Повышение содержания фосфора на 0,01 % для литой стали 35Л увеличивает критическую температуру хрупкости примерно на 20 К. Вредное влияние фосфора может быть существенно подавлено за счет легирования молибденом.

Глубокая десульфация и дефосфорация являются необходимыми условиями обеспечения высокой сопротивляемости хрупкому разрушению.

Отрицательное влияние вредных примесей уменьшается при введении редкоземельных металлов, а также кальция и циркония. Добавки РЗМ оказывают положительное действие на хладостойкость и снижают

отпускную хрупкость конструкционных сталей. При этом РЗМ, ЩЗМ не входят в твердый раствор и не загрязняют границ зерен, а полностью переходят в неметаллические включения, связывая вредные примеси.

## 2.2. Ферритные низкоуглеродистые никелевые стали

Ферритные низкоуглеродистые стали содержат до 9 % Ni. Содержание углерода в них ограничено 0,06 %, а концентрация остальных элементов также невелика. Поэтому фактически эти стали представляют собой железоникелевые сплавы. Стали этого типа сравнительно дешевы, они технологичны, хорошо свариваются и имеют вязкий характер разрушения при низких температурах (табл. 25).

Используя положительное влияние никеля на хладноломкость, можно получать низкоуглеродистые никельсодержащие стали с различным значением порога хладноломкости:

Содержание никеля, %	0	1	2	3	4	5	6	7	9
$T_{90}$ , К	0	250	230	220	200	280	270	250	140
$T_{50}$ , К	230	210	170	150	130	120	90	77	77
КСУ при 77 К, МДж/м <sup>2</sup>	0,05	0,1	0,15	0,23	0,31	0,38	0,8	1,2	1,2
$\sigma_b$ при 293 К, МПа	420	450	500	500	520	550	600	600	650

Порог хладноломкости  $T_{90}$  соответствует началу появления хрупкой составляющей в изломе, а  $T_{50}$  — температуре, когда она занимает 50 % площади излома. В первом приближении допустимая рабочая температура конструкций, испытывающих статическую нагрузку, может быть установлена по критерию  $T_{50}$ , а для динамически нагруженных материалов — по критерию  $T_{90}$ .

Отсюда ориентировочные преимущественные температурные области ферритных сталей в зависимости от содержания никеля составляют:

Марка стали	0Н3А	0Н6А	0Н9А
Содержание никеля, %	3	6	9
Температура применения, К, не ниже:			
при статической нагрузке	150	90	77
при динамической нагрузке	220	170	140

Термическая обработка стали с 9 % Ni производится по двум режимам: двойная нормализация с нагревом до 900 и 800 °С и отпуск при 600 °С с охлаждением на воздухе; закалка от 830 °С в воде и отпуск при 580 °С с охлаждением в воде или на воздухе.

После термообработки сталь имеет структуру феррита с небольшим количеством остаточного аустенита и карбидов. Из-за отсутствия хрома сталь 0Н9А так же, как ее менее легированные аналоги 0Н3А и 0Н6А, склонна к атмосферной коррозии. Это необходимо учитывать при изготовлении и эксплуатации установок.

Ферритные никельсодержащие стали хорошо свариваются всеми видами сварки и не требуют после нее термической обработки. В качестве присадочного материала используют проволоку Св-10Х16Н25АМ6.

Коэффициент прочности сварного соединения составляет около 0,95. Сварное соединение сохраняет высокую ударную вязкость при 77 К: в центре шва не менее 1,5 МДж/м<sup>2</sup>, в зоне термического влияния 0,8 МДж/м<sup>2</sup>.

По сравнению с хромоникелевыми аустенитными сталями ферритные никельсодержащие стали имеют значительно более высокую (в 3—4 раза) теплопроводность. Их температурный коэффициент линейного расширения на 30 % ниже ТКЛ хромоникелевых аустенитных сталей, что необходимо учитывать при конструировании соединений из разных марок сталей.

Т а б л и ц а 25. Механические свойства ферритных никельсодержащих сталей

Марка стали	Температура испытания, К	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
ОНЗА	293	550	450	25	65	1,50
	120	—	—	—	—	1,00
	90	850	700	30	55	0,40
ОН6А	293	600	450	25	70	1,50
	77	900	750	22	60	0,80
ОН9А	293	650	480	30	75	1,80
	77	1000	850	26	60	1,00

### 2.3. Аустенитные стали

Хромоникелевые аустенитные стали благодаря сохранению высокой пластичности и вязкости вплоть до температур, близких к абсолютному нулю, высокой коррозионной стойкости и хорошим технологическим свойствам являются основным материалом для многих областей применения в холодильной и криогенной технике.

Аустенитное состояние стали в широком температурном диапазоне стабилизируется благодаря введению в железохромистую основу достаточных количеств никеля.

Стабильность аустенитной структуры зависит от химического состава и внешних условий: температуры и деформации. Под влиянием низких температур и деформации хромоникелевые аустенитные стали могут испытывать мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. Это приводит к увеличению твердости, снижает пластичность и вязкость стали.

В зависимости от содержания основных легирующих элементов различают два типа хромоникелевых сталей. К первому типу относятся метастабильные стали, претерпевающие заметное мартенситное превращение при охлаждении и деформации. Они содержат 18—20 % Cr и 8—12 % Ni. К ним относятся стали марок 12X18H8, 12X18H9T, 12X18H10T, 12X18H12T. При необходимости полного подавления мартенситного превращения и сохранения аустенитной структуры вплоть до самых низких температур используют хромоникелевые стали, содержащие 18—25 % Cr и 14—25 % Ni. К сталям этого типа относятся 08X25H20, 08X18H20, 10X15H25MT2 и др.

Все хромоникелевые аустенитные стали благодаря высокому содержанию хрома имеют высокую коррозионную стойкость. Однако при повторных нагревах, например при сварке, из-за образования карбидов хрома по границам зерен и обеднения границ хромом эти стали склонны к межкристаллитной коррозии. Склонность к межкристаллитной коррозии может быть устранена снижением содержания углерода и введением стабилизаторов — сильных карбидообразователей: титана и ниобия.

Хромоникелевые аустенитные стали характеризуются высокой технологичностью. Они хорошо деформируются в горячем и холодном состоянии. В холодном состоянии они допускают глубокую вытяжку. Эти стали хорошо подвергаются пайке и свариваются. После сварки хромоникелевые аустенитные стали не образуют охрупченных околошовных зон и не требуют термической обработки после изготовления конструкции. Для сварки используют присадочную проволоку состава, близкого к основному металлу.

Хромоникелевые аустенитные стали сохраняют высокую вязкость после значительного пластического деформирования. Они нечувствительны к эффектам старения во времени и их ударная вязкость остается на высоком уровне даже после многолетней эксплуатации в условиях низких температур. Эти стали характеризуются высокими значениями вязкости разрушения в широком температурном диапазоне.

Широкое распространение получила сталь 12X18H10T и ее заменители — экономнолегированные аустенитные стали на Cr—Ni—Mn и Cr—Mn основе (табл. 26).

На рис. 139 приведены кривые изменения усталостной прочности при комнатной температуре и 77 К сталей 12X18H10T и 0H9A, алюминиевого сплава АМгб.

Сталь 12X18H10T, наиболее широко применяемая в технике низких температур, обладает высоким сопротивлением ползучести, термической усталости под нагрузкой и высокой усталостной прочностью. При температуре 77 К накапливаемая пластическая деформация при расчетном напряжении 130—140 МПа для десятилетнего срока эксплуатации

не превышает 0,2 %. При температуре 20 К напряжение 200 МПа вызывает крайне незначительную деформацию (0,02 %), находящуюся на грани точности измерений и практически не изменяющуюся во времени. Лишь напряжение 500 МПа дает начальную пластическую деформацию 0,5 %, увеличивающуюся при продолжительности испытания 100 ч до 0,7 %. Однако даже при таком высоком уровне напряжений суммарная деформация за период эксплуатации не превышает 2 %.

Т а б л и ц а 26. Механические свойства аустенитных сталей

Марка стали	Температура испытания, К	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, $\frac{2}{\text{МДж/м}}$
12Х18Н10Т	293	660	250	58	72	3,1
	77	1520	450	43	55	2,5
	20	1420	520	28	26	2,3
10Х14Г14Н4Т	293	710	270	61	67	2,1
	77	1360	430	40	55	2,0
	20	1400	450	20	35	1,7
03Х13АГ19	293	770	370	64	74	2,4
	77	1300	690	28	29	1,6
	20	1340	810	16	17	—
03Х20Н16АГ6	293	780	410	52	75	2,2
	77	1550	900	48	44	1,2
	20	1930	1360	31	27	1,0
	4	1500	1000	25	21	0,8

К недостаткам хромоникелевых сталей относятся низкая прочность, особенно по пределу текучести при комнатной температуре, а также сравнительно высокая стоимость, обусловленная высоким содержанием дорогого и дефицитного никеля. Для повышения прочности эти стали дополнительно легируют элементами, способствующими дисперсионному упрочнению при старении. Так, высокая прочность стали 10Х15Н25МТ2 достигается за счет образования упрочняющей фазы NiTi после термообработки, состоящей из аустенитизации при 1000 °С и старения в течение 16 ч при 700 °С.

Высокая стоимость никеля привела к созданию сталей, в которых никель полностью или частично заменен марганцем, также являющимся стабилизатором аустенита.

Исследования отдельного и совместного влияния марганца и хрома на механические свойства при низких температурах показали, что оптимальными по составу являются стали, содержащие 12—14 % Сг и 17—20 % Мп. Сталь отечественного производства 03Х13АГ19 рекомендована к применению до температуры 77 К для статически нагруженных сварных конструкций.

Более перспективными являются хромомарганцевые аустенитные стали, содержащие некоторое количество никеля. Как показывают эксперименты по оценке работоспособности при усталостном нагружении, содержание никеля должно быть не менее 3—4 %.

В России нашла применение сталь 10X14Г14Н4Т. Эта сталь, обладая высокой вязкостью, уменьшающей опасность хрупкого разрушения, при сложных условиях нагружения имеет, как и сталь 12X18Н10Т, относительно невысокий предел текучести при 293 К ( $\sigma_{0,2} > 250$  МПа), слабо увеличивающийся при понижении температуры.

Одним из путей повышения прочности аустенитных сталей для криогенной техники является легирование их азотом, образующим, как и углерод, твердые растворы внедрения. Присутствие хрома и особенно марганца способствует увеличению растворимости азота в стали. Азот упрочняет аустенитные стали за счет воздействия на их дислокационную структуру, образуя зоны с упорядоченной структурой наряду с неупорядоченной матрицей. С введением азота в сталь ее пластичность и вязкость несколько снижаются, но остаются на достаточно высоком уровне, характерном для аустенитных сталей. В отличие от углерода азот в количестве до 0,25 % не ухудшает коррозионную стойкость стали.

#### 2.4. Железоникелевые сплавы

Для изготовления некоторых узлов криогенных установок, размеры которых не должны меняться с изменением температуры, используют высоколегированные инвары — сплавы железа с никелем. Сплав с 36 % Ni имеет величину коэффициента линейного расширения при температурах 50—100 К в 10—20 раз меньшую, чем для никелевых и хромоникелевых сталей, а также алюминиевых сплавов.

Из инваров изготавливают жесткозакрепленные трубопроводы сложной пространственной формы, работающие при температурах до 20 К (например, трубопроводы ЖРД), некоторые элементы арматуры,

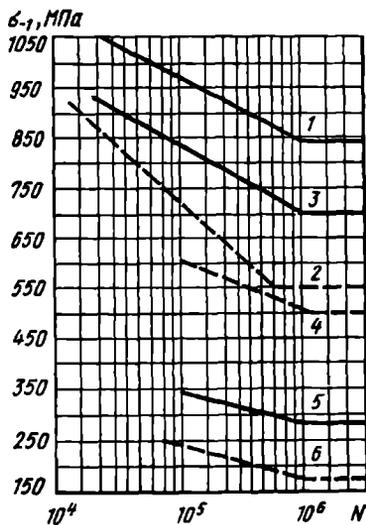


Рис. 139. Усталостная прочность конструкционных материалов:

1, 2 — 12X18Н10Т; 3, 4 — 0Н9А; 5, 6 — АМг6; 1, 3, 5 — при 77 К; 2, 4, 6 — при 293 К

которые по условиям работы должны иметь минимальные изменения размеров при изменении температуры. Малая величина коэффициента линейного расширения материала позволит уменьшить напряжения в трубопроводах и предотвратить возможность их разрушения. Отпадает необходимость установки сильфонных узлов для компенсации деформации, что упрощает конструкцию и делает ее более надежной.

Инвары ферромагнитны, имеют кристаллическую гранецентрированную решетку. Они не упрочняются термической обработкой и слабо упрочняются при пластической деформации. Инвар имеет низкую теплопроводность, почти вдвое меньшую, чем у аустенитных сталей, что особенно важно при использовании его в узлах, где необходимо уменьшить притоки теплоты.

Прочностные свойства инвара невысоки: предел текучести составляет около 240 МПа, временное сопротивление 420 МПа. При охлаждении до 20 К величина  $\sigma_{0,2}$  возрастает в 3,  $\sigma_b$  — в 2 раза. Модуль упругости сплава ниже модуля упругости стали: при 293 К  $E = 14,5 \times 10^4$  МПа. По циклической прочности инвар близок к коррозионной стали 12Х18Н10Т. Ударная вязкость, хотя и уменьшается с понижением температуры, однако сплав сохраняет высокие значения KCV и разрушается вязко при температурах вплоть до 4 К.

Дополнительное легирование инвара ниобием, танталом, титаном, молибденом улучшает прочностные характеристики, но при этом несколько увеличивается температурный коэффициент линейного расширения и возрастает стоимость металла.

По сравнению с хромоникелевыми аустенитными сталями инвар имеет пониженную коррозионную стойкость. Никель, хотя и в меньшей степени чем железо, склонен к коррозии, в том числе в атмосферных условиях. Скорость коррозии инвара в 5—6 раз меньше скорости коррозии углеродистых сталей.

Железоникелевые сплавы удовлетворительно штампуются, куются, прокатываются, обрабатываются резанием. С целью дополнительного снижения температурного коэффициента линейного расширения проводят термическую обработку инваров, состоящую из закалки от 840 °С в воде, отпуска при 315 °С и старения в течение 50—100 ч при 100 °С. Железоникелевые сплавы удовлетворительно свариваются. Обычно применяется дуговая сварка в среде аргона. В качестве присадочного материала используют проволоку близкого состава. Сварные соединения не требуют термической обработки, их прочность близка к прочности основного металла.

Недостатком железоникелевых сплавов является их высокая стоимость, превышающая стоимость сталей типа 12Х18Н10Т в 5—10 раз.

### 3. Свойства и применение алюминиевых сплавов при низких температурах

Алюминиевые сплавы имеют низкую плотность, коррозионную стойкость и высокий уровень механических свойств, благодаря чему они находят широкое применение. Способность алюминия и его сплавов сохранять пластичность вплоть до криогенных температур послужили основой для их широкого использования при изготовлении низкотемпературного оборудования. Применимость алюминиевых сплавов для работы при низких температурах обусловлена кристаллической структурой алюминия. Он кристаллизуется в решетке гранецентрированного куба и не имеет полиморфных превращений.

В холодильной и криогенной технике применяют как технический алюминий, так и его сплавы. Технический алюминий широко используют для изготовления малонагруженных элементов конструкций. В общем объеме потребления его достаточно велико. Из алюминия изготавливают такие детали, как насадки регенераторов, паяные теплообменники аппаратов воздухоразделительных установок и др. Алюминиевые сплавы применяют для изготовления емкостей и трубопроводов для хранения и транспортировки жидких газов: природного газа, кислорода, азота, водорода и гелия, а также в качестве материала для ректификационных колонн и трубных систем. При температурах ниже 120 К объем потребления алюминиевых сплавов, главным образом в виде горячекатанного листа, составляет около 30 % от объема всего используемого металла.

Высокий коэффициент теплопроводности алюминиевых сплавов часто заставляет отказываться от применения их в деталях, которые определяют притоки теплоты к охлаждаемым элементам. Например, горловины криостатов выполняют из аустенитных сталей или полимерных материалов, хотя сам внутренний сосуд изготавливают из алюминиевого сплава.

Алюминиевые сплавы имеют более высокий температурный коэффициент линейного расширения, чем аустенитные стали. Это определяет более высокий уровень термических напряжений, особенно в жесткозакрепленных элементах конструкций при их охлаждении. Поэтому в трубопроводах для перекачки сжиженных газов при отсутствии возможности применения компенсаторов деформации предпочтительно использовать сплавы на основе железа.

В технике низких температур применяют деформируемые и литейные алюминиевые сплавы.

Временное сопротивление деформируемых термообработанных алюминиевых сплавов может достигать 500 МПа и более при плотности менее 2,85 г/см<sup>3</sup>. Удельная прочность  $\sigma_b/\delta$  алюминиевых сплавов имсст

высокие значения и приближается к удельной прочности высокопрочных сталей.

Прочность при растяжении деформируемых алюминиевых сплавов с понижением температуры от 293 до 77 К увеличивается на 35—60 %, а предел текучести — на 15—25 %. Пластичность при снижении температуры обычно даже несколько возрастает или остается на уровне пластичности при комнатной температуре.

Алюминиевые сплавы не имеют порога хладноломкости: вязкость при ударном изгибе у них равномерно понижается с падением температуры; по сравнению с аустенитными сталями значения ее существенно ниже. При низких температурах алюминиевые сплавы имеют вязкий излом при относительно малой ударной вязкости.

Усталостная прочность, определенная как на гладких, так и надрезанных образцах, с понижением температуры также увеличивается. Вязкость алюминиевых сплавов в условиях плоской деформации почти не уменьшается, а иногда даже увеличивается при криогенных температурах по сравнению с вязкостью разрушения при комнатной температуре. Величина вязкости разрушения зависит от чистоты металла.

Наибольшее применение в технике низких температур получили сплавы алюминия с магнием — магналии — вследствие удачного сочетания в них прочности, пластичности, свариваемости, коррозионной стойкости. Увеличение содержания магния ведет к росту прочности сплава. Применяемые термически неупрочняемые сплавы содержат не более 7 % Mg.

Из магналиев как за рубежом, так и в России предпочтение в машиностроении отдается сплаву АМг5: по свариваемости он превосходит сплав АМг2, хотя несколько уступает ему по пластичности. По прочности он мало уступает сплаву АМг, выгодно отличаясь от него большей пластичностью.

В холодильной и криогенной технике также используют термоупрочняемые алюминиевые сплавы, легированные медью, магнием, марганцем и другими элементами (табл. 27). Оптимальные механические свойства эти сплавы приобретают после термической обработки, состоящей из закалки в воде от температуры около 500 °С и последующего естественного или искусственного старения за счет дисперсионного выделения при старении интерметаллидных фаз.

Прочность термоупрочняемых алюминиевых сплавов приближается к прочности аустенитных сталей, и поэтому во многих случаях они могли бы быть их заменителями. Их недостатком является склонность к коррозии под напряжением. Кроме того, эти сплавы разупрочняются в зоне сварного шва.

Т а б л и ц а 27. Механические свойства деформируемых термоупрочняемых алюминиевых сплавов

Марка сплава	Температура испытания, К	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	Марка сплава	Температура испытания, К	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
Д16 <sup>*)</sup>	293	470	300	19	АК6 <sup>*)</sup>	293	410	300	15
	77	560	380	27		77	500	380	18
	20	660	450	16					
Д20 <sup>**)</sup>	293	400	280	15	АК8 <sup>*)</sup>	293	450	310	13
	77	510	380	15		77	530	410	13
	20	660	420	16		20	550	360	18
1201 <sup>**)</sup> (Д20-1)	293	440	350	18	1915 <sup>**)</sup>	293	340	200	15
	77	550	400	10		203	370	240	16
	20	650	450	12		77	470	290	24

<sup>\*)</sup> Свойства после закалки и естественного старения.

<sup>\*\*)</sup> Свойства после закалки и старения.

Наряду с деформируемыми в технике низких температур применяются литейные алюминиевые сплавы. Их используют главным образом для изготовления деталей сложной конфигурации типа корпусов арматуры. Наибольшее распространение получили сплавы, легированные 8—13 % кремния — силумины, обладающие высокими литейными свойствами.

Сварка изделий из алюминиевых сплавов имеет ряд особенностей, зависящих от свойств алюминия. Высокая теплопроводность и теплоемкость алюминия обуславливает необходимость обеспечения достаточно интенсивного и концентрированного нагрева при сварке и выбор соответствующих источников нагрева. При проведении сварки плавлением дуга должна быть надежно защищена инертным газом.

#### 4. Свойства и применение сплавов титана при низких температурах

Титановые сплавы относятся к числу наиболее перспективных материалов для техники низких температур. Титановые сплавы определенных марок обладают удовлетворительной пластичностью и вязкостью при температурах вплоть до 4 К. Благодаря низкой плотности в сочетании с высокой прочностью и достаточной пластичностью применение титановых сплавов при низких температурах позволяет уменьшить массу конструкций по сравнению с массой коррозионностойких сталей на 20—25 и алюминиевых сплавов на 40—45 %. Поэтому титановые сплавы все



Вязкость разрушения титановых сплавов при понижении температуры уменьшается. Так, для сплава типа ВТ5-1 при переходе от испытания при 293 К к испытанию в жидком водороде значение коэффициента интенсивности напряжений падает вдвое: с 124 до 62 МПа · м<sup>1/2</sup>. Аналогично и поведение сплава ВТ3-1, хотя для него значение величины  $K_{Ic}$  значительно меньше (ВТ3-1 более прочный сплав) 52 МПа · м<sup>1/2</sup> при 293 К и 34 МПа · м<sup>1/2</sup> при 20 К.

## 5. Свойства и применение сплавов меди при низких температурах

Медь и ее сплавы являются материалами, одними из первых нашедшими применение в холодильном и криогенном оборудовании. Медь не имеет порога хладноломкости и нижний температурный предел ее использования близок к абсолютному нулю. Однако из-за высокой стоимости и дефицитности меди применение медных сплавов в технике низких температур в последнее время сокращается.

Технически чистую медь используют в установках разделения газов методом глубокого охлаждения для изготовления различных трубчатых конструкций: витых и прямотрубных теплообменников, трубчатых конденсаторов и др. Листовую медь используют для изготовления внутренних емкостей и экранов сосудов Дьюара, в которых хранятся и транспортируются жидкие газы, для изготовления обечаск ректификационных колонн жидкого воздуха. Широкое применение находят сплавы меди — латуни и бронзы. Их применяют в корпусах холодильной и криогенной арматуры, для изготовления отливок, пружин и других разнообразных деталей.

Медь кристаллизуется в решетке ГЦК и не имеет полиморфных превращений. Тип кристаллической решетки обусловил применимость меди и ее сплавов при низких температурах.

Медь и ее сплавы имеют высокое значение температурного коэффициента линейного расширения. С понижением температуры до 120 К этот коэффициент уменьшается, но это уменьшение значительно меньше, чем у коррозионностойких сталей и алюминиевых сплавов.

Технически чистая медь имеет невысокие прочностные свойства. При снижении температуры от 293 до 20 К прочность и твердость меди повышаются почти в два раза. Пластичность сохраняется на том же уровне. Ударная вязкость даже увеличивается, сохраняя при 20 К столь высокие значения, что надрезанные образцы не разбиваются копром, а протягиваются между его опорами. Усталостная прочность меди и ее сплавов с понижением температуры растет также, как модуль упругости и модуль сдвига.

Широкое применение в холодильном и криогенном машиностроении находят латуни марок Л63, Л68, ЛЖМц59-1-1, ЛЦ59, ЛК80-3Л и бронзы марок БрАЖМц10-3-1,5; БрКМц3-1, БрБ2 (табл. 29).

Т а б л и ц а 29. Механические свойства медных сплавов при низких температурах

Сплав и его состояние	Температура испытания, К	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
Медь М1, отожженная	293	230	50	40	3,2
	77	350	90	42	4,2
	20	410	80	64	3,8
Латунь Л68, отожженная при 550 °С в течение 2 ч	293	400	280	50	1,4
	195	430	310	50	1,7
	77	540	400	51	1,4
Латунь ЛЖМц59-1-1, горячекатанное состояние	293	460	200	34	1,2
	77	600	280	37	1,0
	20	710	320	38	1,0
Латунь ЛК80-3, отожженная при 500 °С в течение 5 ч	293	390	130	37	1,0
	77	430	210	23	0,6
Бронза БрАЖМц10-3-1,5 ковальный пруток 12×12 мм после закалки от 850 °С в воде и отпуска при 350 °С	293	830	360	18	0,5
	77	940	430	15	0,4
Бронза БрБ2 после закалки от 760 °С в воде и старения при 320 °С	293	1400	1260	9	0,2
	77	1600	1470	10	0,3
	20	1720	1440	9	0,3

Латунь Л68 применяют для изготовления различных трубопроводов, сеток, прокладок, работающих при температурах 520—20 К.

Латунь марки ЛС59-1 применяется для изготовления различных крепежных изделий, работающих в интервале температур 520—20 К. Для более ответственных крепежных деталей, работающих в этом же температурном диапазоне, применяют латунь марки ЛЖМц59-1-1.

Из литейной латуни ЛК80-3 изготавливают арматуру, корпуса трубопроводов и другие литые детали, работающие при температурах 520—20 К.

Бронза марки БрАЖМц10-3-1,5 применяется для изготовления втулок, шестерен, вентилялей, деталей клапанной арматуры, работающих при температурах 520—77 К.

Наибольшую прочность имеют меднобериллиевые сплавы, временное сопротивление которых в термообработанном состоянии более 1000 МПа при удовлетворительной вязкости и пластичности при низких температурах. Поэтому бронза БрБ2, сочетающая высокую прочность с высокой релаксационной стойкостью, нашла применение для изготовления пружинящих элементов криогенной арматуры; они хорошо рабо-

тают при температурах вплоть до 4 К. Основной недостаток бериллиевых бронз состоит в их высокой стоимости. Легирование добавками никеля и титана позволяет несколько уменьшить содержание бериллия (БрБНТ1,7) без существенного снижения механических свойств.

## 6. Выбор конструкционных материалов для работы при низких температурах

Плохое качество конструкций и изделий часто является следствием неправильного выбора материала для заданных условий их эксплуатации. Особенности, характерные для низкотемпературной работы оборудования, предъявляют ряд специфических требований к материалам.

Выбор конструкционных материалов производится на основе их механических, физико-химических и технологических свойств. При выборе материалов необходима информация об их стоимости и дефицитности.

### 6.1. Механические свойства

Высокопрочные и некоторые среднепрочные материалы характеризуются низкими значениями вязкости разрушения. Для таких материалов расчет допустимых напряжений должен производиться на основе механики разрушения с учетом максимальных размеров дефектов. Вязкость большинства материалов, работающих при низких температурах, достаточно высока, что затрудняет при расчете использование методов механики разрушения.

Расчет конструкций на прочность производится по допускаемым напряжениям  $[\sigma]$ , определяемым из условий прочности при статическом или долговечности при циклическом нагружении. При статическом нагружении допускаемое напряжение получается делением предельных для каждого данного материала напряжений на коэффициент безопасности, называемый коэффициентом запаса прочности. Для пластичных материалов за предельное напряжение принимают предел текучести, для сравнительно хрупких — временное сопротивление:  $[\sigma] = \sigma_T/n_T$  или  $[\sigma] = \sigma_B/n_B$ .

Значение коэффициента запаса прочности зависит от многих факторов: разброса характеристик прочности, присутствия в материале дефектов, допускаемых техническими условиями, степени схематизации расчетной процедуры и т.д. В соответствии с ГОСТ 14249—80 коэффициенты запаса прочности по временному сопротивлению для сталей  $n_B = 2,4$ ; титановых сплавов  $n_B = 3,0$ ; алюминиевых сплавов  $n_B = 3,5$ . Для сталей коэффициент запаса прочности по пределу текучести  $n_T = 1,5$ .

Величина коэффициента запаса не имеет достаточного теоретического обоснования и обычно принимается с учетом сложившихся традиций расчета.

Повышение прочности с понижением температуры обычно сопровождается уменьшением пластичности и вязкости материала. Пластичность характеризует способность металла подвергаться остаточной деформации, а вязкость — способность поглощать работу внешних сил при разрушении. Некоторые пластичные металлы, например алюминий, могут иметь малую вязкость при высоком относительном удлинении, наоборот, термообработанная легированная сталь при сравнительно небольшом относительном удлинении может иметь высокую вязкость.

Пластичность и вязкость в конструкторские расчеты не входят и являются качественными показателями.

Пластичность характеризует способность металла к перераспределению напряжений в зонах их концентрации. Пластическая деформация как бы предохраняет металл от резких локальных перегрузок вблизи концентраторов напряжений. В машиностроении принято считать пластичность удовлетворительной, если относительное удлинение металла  $\delta_5 \geq 15\%$ . Вместе с тем, хотя при 20—70 К аустенитные хромоникелевые стали имеют  $\delta_5 \geq 40\%$ , а аустенитные дисперсионнотвердеющие  $\delta_5 \geq 10\%$ , стали обоих типов достаточно надежны при эксплуатации.

Широко принятым критерием работоспособности металлов и их сварных соединений при низких температурах является ударная вязкость надрезанных образцов. Определенную сложность представляет выбор необходимого уровня вязкости и методов ее оценки. В разных странах принят различный приемлемый уровень вязкости. За рубежом сталь обычно допускается к эксплуатации, если ее ударная вязкость, определенная на образцах  $10 \times 10 \times 55$  мм с надрезом радиусом 0,25 мм (образец типа 11 по ГОСТ 9454—78),  $KCV \geq 0,2$  МДж/м<sup>2</sup>.

Надежность низкотемпературных конструкций, работающих в условиях многократного подъема и сброса давления, зависит от сопротивления материалов усталостному разрушению. База испытаний выбирается в зависимости от условий эксплуатации оборудования. Металл холодильных и криогенных установок, подвергаемых многократному захлаживанию, испытывается на сопротивление термической усталости. В случае длительного нагружения конструкций при низких температурах производятся испытания ползучести и длительной прочности материала.

При циклическом или длительном статическом нагружении выбор номинальных эксплуатационных напряжений производится с введением

ем коэффициентов запаса  $n_d$  и  $n_p$  по пределам длительной прочности и ползучести.

## 6.2. Совместимость с рабочей средой

Использование материалов в любой конструкции возможно только в случае их совместимости с рабочей средой. Коррозия, коррозионная усталость, коррозия под напряжением, водородное охрупчивание и т.д. могут вызвать повреждения в металле и привести конструкцию к хрупкому разрушению. Сочетание низких температур и радиоактивного облучения, имеющее место в пузырьковых камерах и установках для физических исследований, из-за изменения механических свойств материалов также может создать проблему совместимости.

Для криогенных конструкций особенно важную роль играет химическое воздействие низкокипящих продуктов на свойства конструкционных сталей и сплавов. Особую сложность проблема совместимости приобретает при выборе материалов для работы в контакте с жидким или газообразным кислородом и другими, менее распространенными окислителями на основе фтора, используемыми в жидкостных ракетных двигателях. Известно, что такие химически активные металлы, как титан и его сплавы, магниевые сплавы, алюминиевые сплавы при ударном нагружении, могут самопроизвольно загораться при контакте с кислородом.

Основными отборочными испытаниями на совместимость с жидким кислородом являются испытания на ударное сжатие и на прокол падающим бойком находящейся под давлением диафрагмы. У титановых сплавов в обоих случаях возникает активная реакция, алюминиевые сплавы активно реагируют с кислородом только при ударном нагружении, а медные и никелевые сплавы, а также нержавеющие сплавы не вступают в реакцию при обоих видах испытаний. Алюминиевые сплавы можно рассматривать как совместимые с жидким кислородом, что обуславливает их довольно широкое применение в качестве материала для изготовления стационарных и транспортных кислородных резервуаров.

Материалы толщиной до 5 мм для изготовления оборудования, работающего с газообразным кислородом, имеют следующие значения предельного давления кислорода и скорости газового потока, при которых возможно их горение при комнатной температуре:

Скорость потока, м/с	0	до 0,5	> 0,5
Давление кислорода, МПа, для материалов:			
стали углеродистые и легированные	0,64	0,64	0,64
чугун	3,20	0,80	0,40
коррозионностойкие стали типа 30X13, 12X18H10T	16,0	4,00	2,00
алюминиевые сплавы АМг, АМц, АД1	3,20	0,64	0,40
медь, никель и их сплавы	42,00	42,00	42,00

При контакте с жидким кислородом вероятность загорания ниже, чем в случае газообразного кислорода.

В тех криогенных установках, в которых вакуум используется в качестве изоляции, важно знать величину газовыделения металлов в вакууме в процессе длительной эксплуатации. Обеспечение вакуума в таких конструкциях является условием их нормальной работоспособности.

### 6.3. Физические свойства

При проектировании некоторых видов низкотемпературного оборудования критериями выбора материалов могут быть их физические свойства.

Важность плотности как физической характеристики материала обусловлена использованием установок в таких отраслях техники, как судостроение, транспортное машиностроение и особенно авиационная и ракетно-космическая техника. Для таких объемов одним из решающих условий применения того или иного материала является минимизация массы.

В случаях минимизации массы критерием пригодности материалов является их высокая удельная прочность, определяемая по отношению прочности к плотности. При этом более тяжелые, но более прочные сплавы типа мартенситностареющих сталей или титана, могут успешно конкурировать с алюминиевыми сплавами.

При эксплуатации холодильного и криогенного оборудования существенную роль играет количество теплоты, которое необходимо отвести при захолаживании объекта. Количество отводимой теплоты особенно важно в случае, когда оборудование подвергается большому числу циклов нагрева и охлаждения.

Известно, что при высоких температурах теплоемкость металлов и других кристаллических тел почти не меняется и близка к постоянному значению. С понижением температуры теплоемкость начинает быстро падать. При криогенных температурах даже малые количества теплоты существенно меняют температуру материала.

Термическое расширение является одним из наиболее важных свойств конструкционных материалов, применяемых в криогенной технике. Показателями термического расширения материалов являются температурные коэффициенты объемного и линейного расширения.

Температурный коэффициент расширения определяется характером межатомных взаимодействий в материале. При абсолютном нуле расстояние между атомами неизменно. С увеличением температуры амплитуда колебаний атомов растет, расстояние между атомами увеличивается и материал расширяется, т.е. происходит увеличение объема тела (рис. 140).

Величина  $\alpha$  имеет довольно высокое значение при повышенных и умеренных температурах, с понижением температуры резко падает и принимает весьма низкие значения уже при температурах жидкого азота. Ниже этих температур большинство металлов почти перестает сжиматься.

Некоторые типичные ошибки (рис. 141) при проектировании криогенных емкостей могут привести к их разрушению из-за различий температурных коэффициентов двух деталей. В первом случае два вставленных один в другой коаксиальных сосуда, соединенные верхними кромками и имеющие зазор для теплоизоляции, изготовлены из одного и того же материала. Внутренний сосуд, контактирующий с криогенной жидкостью, сжимается относительно внешнего, более теплого сосуда, что приводит к развиту напряжений и может быть причиной разрушения.

Во втором случае рассмотрены коаксиальные трубки из различных материалов, соединенные на концах и находящиеся в одинаковых температурных условиях. Учитывая различие температурных коэффициентов расширения материалов при охлаждении, одна из трубок окажется

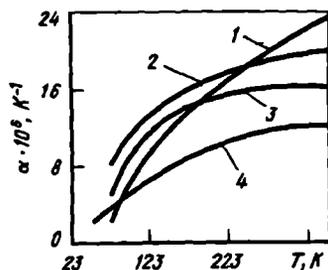


Рис. 140. Температурная зависимость коэффициента линейного расширения некоторых металлов: 1 — Al; 2 — Ag; 3 — Cu; 4 — Fe

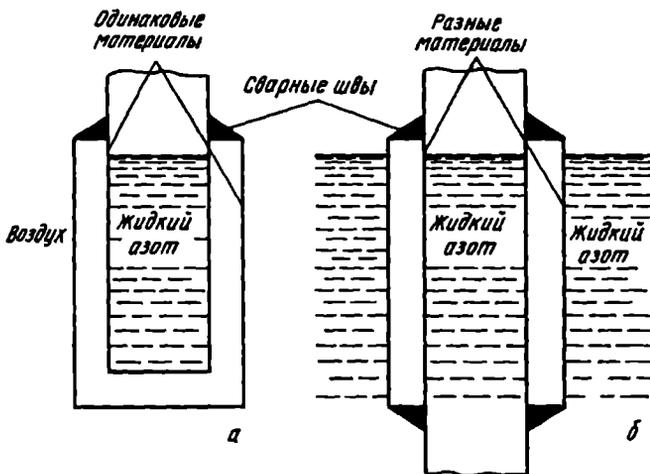


Рис. 141. Схема неправильной конструкции:

а — с использованием одного материала при разных температурах; б — с использованием разных материалов при одной низкой температуре

ся сжатой, а другая — растянутой. Повторные термические циклы могут либо привести к разрушению соединения, либо к выпучиванию одной из трубок.

Сопротивление прохождению электрического тока обусловлено рассеянием электронов при столкновении с положительными ионами кристаллической решетки, примесными атомами и несовершенствами кристаллического строения. У большинства металлов при 20 К удельное электросопротивление меньше  $10^{-10}$  Ом · м и с дальнейшим понижением температуры почти не меняется. Таким образом, электросопротивление, измеренное при температурах ниже 20 К, является остаточным сопротивлением. Определение остаточного электросопротивления является простым и точным методом оценки чистоты металла от примесей и совершенства его кристаллического строения. Например, для меди обычной очистки отношение сопротивления при комнатной к сопротивлению при криогенной температуре может составлять 100. При лучшей очистке меди это отношение может возрасти до 200.

#### *6.4. Технологические свойства*

Технологические свойства (литейные свойства, обрабатываемость давлением и резанием, свариваемость) в основном оцениваются качественно, так как количественные методы оценки пока не совершенны или вообще отсутствуют. Несмотря на отсутствие количественной оценки эти свойства весьма важны и могут быть решающими при выборе материала.

Важнейшим фактором надежной работы оборудования является обеспечение прочных и плотных соединений отдельных узлов и деталей. В технике низких температур широкое распространение получили сварные и паяные соединения. Сварку применяют для изготовления труб, крупных резервуаров, баков и контейнеров, предназначенных для получения, хранения и транспортировки криогенных жидкостей. По существу все многообразие низкотемпературного оборудования представляет собой те или иные сварные конструкции. Поэтому исследования свариваемости являются обязательными при решении вопроса о внедрении новых материалов в практику.

Оценка свариваемости конструкционных материалов криогенной техники должна включать в себя анализ уровня механических свойств сварного соединения и основного металла, определение склонности к образованию дефектов, прежде всего трещин в металле шва и зоне термического влияния, определение чувствительности сварного соединения к концентраторам напряжений и склонности к хрупкому разрушению.

При проектировании низкотемпературной техники принимают во внимание не только технические, но и экономические соображения. Экономические критерии рассматривают как стоимость самих конструкционных материалов, так и их дефицитность, сортамент металлопродукции, затраты на обработку деталей, сварку и контроль качества изделий. Стоимость меди непрерывно растет, что обуславливает необходимость ее замены алюминием. Из-за дефицитности никеля наблюдается тенденция в замене там, где возможно, сталей типа 12Х18Н10Т аустенитными сталями, легированными никелем и марганцем или даже одним марганцем.

Прогресс техники низких температур и увеличение рабочих давлений в системе потребует в ближайшем будущем создания новых сплавов, более прочных в широком температурном диапазоне и менее дорогостоящих.

По прогнозу НПО «Криогенмаш» разработка свариваемых сталей — заменителей стали 12Х18Н10Т — должна ориентироваться на достижение предела текучести 400—500 МПа и временного сопротивления более 800—1000 МПа. Разработка алюминиевых сплавов должна ориентироваться на временное сопротивление 400—500 МПа в сварном соединении, в котором обычно применяемые высокопрочные алюминиевые сплавы имеют разупрочненную зону.

В 50-х годах криогенные конструкции в основном изготавливались из медных сплавов, прежде всего латуней. В последнее время их потребление сократилось за счет расширения использования сталей и алюминиевых сплавов. Сокращение обусловлено дефицитностью меди, специфическим коррозионным растрескиванием латуни, а также освоением технологии производства сварных конструкций из аустенитных сталей и алюминиевых сплавов.

В настоящее время аустенитные коррозионностойкие стали и алюминиевые сплавы являются основными материалами для изготовления криогенного оборудования. Из-за дефицитности никеля в последние годы алюминиевые сплавы начинают вытеснять коррозионностойкие стали. Применение титановых сплавов ограничивается их высокой стоимостью и склонностью к воспламенению в кислороде.

Таким образом, основными критериями выбора материалов являются назначение и условия работы конструкции. Важную роль играет опыт конструирования и эксплуатации изделий данного профиля, уровень технологии производства и контроля, а также экономические соображения.

Использование по методу аналогии материалов, ранее зарекомендовавших себя в подобных машинах, вполне допустимо, но может привести, с одной стороны, к отказу от совершенствования конструкции, с другой — к повторениям уже сделанных ошибок. Конструктор должен

ясно представлять себе причины использования данного материала, возможности его замены, технологические особенности и методы контроля изделий.

## Глава 16 НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### 1. Общие сведения

Неметаллические материалы (пластмасса, резина, керамика, стекло, клеи, лакокрасочные покрытия, древесина, ткань и др.) в качестве конструктивных материалов служат важным дополнением к металлам, в ряде случаев с успехом заменяют их, а иногда неметаллические материалы сами являются незаменимыми. Двигатели внутреннего сгорания из керамики обходятся без водяного охлаждения, что невозможно при изготовлении их из металла; обтекатели ракет делают только из неметаллических материалов (графита, керамики). Обувь и одежда вообще не могут быть изготовлены из металла.

Достоинством неметаллических материалов является сочетание требуемого уровня химических, физических и механических свойств с низкой стоимостью и высокой технологичностью при изготовлении изделий сложной конфигурации. Трудоемкость при изготовлении изделий из неметаллических материалов в 5—6 раз ниже, и они в 4—5 раз дешевле по сравнению с металлическими. В связи с этим непрерывно возрастает использование неметаллических материалов в пищевой, торговой, холодильной и криогенной технике.

#### 1.1. Состав и строение полимеров

В основе неметаллических материалов лежат полимеры. Полимеры — это химические соединения, представляющие собой длинные цепные молекулы, состоящие из многочисленных последовательно соединенных звеньев (мономеров) одинакового строения. Отдельные атомы в звеньях соединены между собой довольно прочными ковалентными химическими связями. Между макромолекулами полимеров действуют значительно более слабые физические связи.

Особенностью молекул полимеров является их большая молекулярная масса ( $M \geq 5 \cdot 10^3$ ). Соединения с меньшей молекулярной массой ( $M = 5000 \dots 500$ ) называются *олигомерами*, у низкомолекулярных соединений  $M \leq 500$ . Это разделение по молекулярной массе условно, так

как в ряде случаев к полимерам относятся соединения с  $M = 2 \cdot 10^3$  и выше (полиэтилен и др.).

Различают полимеры природные и искусственные (или синтетические). К полимерам, встречающимся в природе, относятся натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, шерсть и т.д. Однако ведущее место занимают синтетические полимеры, получаемые в процессе химического синтеза из низкомолекулярных соединений.

По составу все полимеры делятся на органические, элементоорганические и неорганические. Органические полимеры, составляющие наиболее обширную группу соединений, состоят из атомов углерода, водорода, серы и галогенов. Элементоорганические соединения содержат в составе основной цепи, кроме перечисленных, атомы кремния, титана, алюминия и других элементов, сочетающихся с органическими радикалами. В природе таких соединений нет. Это чисто синтетические полимеры. Их характерными представителями являются кремнийорганические соединения, основная цепь которых построена из атомов кремния и кислорода. Неорганические полимеры (силикатное стекло, керамика, слюда, асбест и др.) не содержат атомов углерода. Основой их являются оксиды кремния, алюминия, магния и др.

Для получения материалов с заданными свойствами в технике часто используют не отдельные полимеры, а их сочетания с другими материалами как органического, так и неорганического происхождения (металлопласты, пластмассы, полимербетоны, стеклопластики и др.). Своеобразие свойств полимеров обусловлено их структурой. Различают следующие типы полимерных структур: линейную, линейно-разветвленную, лестничную и пространственную с громоздкими молекулярными группами и специфическими геометрическими построениями (рис. 142).

Полимеры с линейной структурой представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки (рис. 142, а). Их макромолекулы характеризуются повторениями вдоль цепи одной и той же структурной группы — звена или химической единицы цепи. Существенным для полимеров с линейной структурой является наличие достаточно длинных макромолекул с резким различием характера связи вдоль цепи и между цепями (химические и межмолекулярные связи). Для макромолекул полимеров с линейной структурой характерна высокая гибкость. Гибкость — основное свойство полимерных цепей, приводящее к качественно новым свойствам — высокой эластичности и отсутствию хрупкости в твердом состоянии. Полимеры с линейно-разветвленной структурой помимо основной цепи имеют боковые ответвления (рис. 142, б). К типичным полимерам с линейной структурой относится полиэтилен, с линейно-разветвленной — полиизобутилен и пслипропилен с соответствующими химическими формулами:

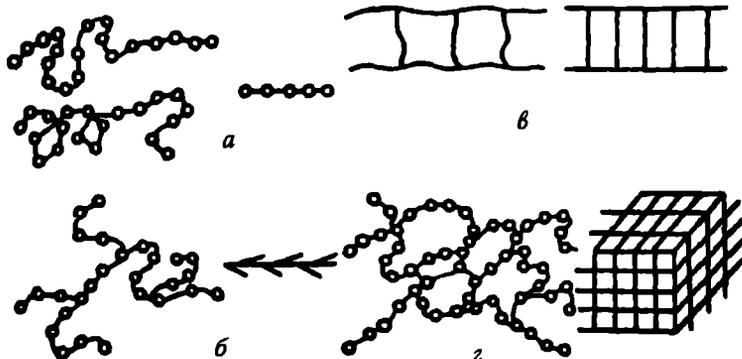


Рис. 142. Различные типы структур полимеров:

*a* — линейная; *б* — линейно-разветвленная; *в* — лестничная; *г* — пространственная сетчатая

$[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$  (полиэтилен);  $[-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_2-]_n$  (полиизобутилен);  $[-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-]_n$  (полипропилен); где в скобках приведена химическая структура звена, а индекс «*n*» указывает на степень полимеризации.

Молекула полимера с лестничной структурой (рис. 142, *в*) состоит из двух цепей, соединенных химическими связями. Полимеры с лестничной структурой, к которым относятся, например, кремнийорганические полимеры, характеризуются повышенной термостойкостью, жесткостью, они нерастворимы в органических растворителях.

Полимеры с пространственной структурой (рис. 142, *г*) образуют при соединении макромолекул между собой в поперечном направлении прочные химические связи. В результате такого соединения макромолекул образуется сетчатая структура с различной плотностью сетки или пространственная сетчатая структура.

Полимеры с пространственной структурой обладают большей жесткостью и теплостойкостью, чем полимеры с линейной структурой. Полимеры с пространственной структурой являются основой конструкционных неметаллических материалов.

По фазовому составу полимеры представляют собой системы, состоящие из кристаллических и аморфных областей. Кристаллическое состояние характеризуется наличием дальнего порядка в расположении макромолекул. Такое упорядочение кристаллических полимеров приводит к образованию монокристаллов, первичными элементами которых являются кристаллические ячейки. Для кристаллического состояния характерны различные структуры образований (надмолекулярные структуры) — ленты. Из лент строятся плоскости, которые представля-

ют собой структурный элемент кристаллического полимера, из плоскостей образуется сферолитная структура — лепестки, могут образовываться хорошо ограненные единичные кристаллы.

Кристаллические полимеры по своему строению похожи на обычные кристаллические твердые тела, но сложнее, поскольку наряду с кристаллической фазой имеют в объеме аморфную фазу с межфазными слоями.

Аморфные полимеры по своему строению близки к жидкостям. В них существуют упорядоченные участки, в которых наблюдается ближний порядок в расположении молекул. Эти участки термодинамически неустойчивы, имеют флуктуационный характер, могут многократно разрушаться и вновь возникать. Но и в аморфном состоянии полимер может быть достаточно упорядоченным.

Кристаллическая форма полимеров способствует повышению их твердости, прочности, модуля упругости и других механических характеристик, одновременно снижая гибкость молекул. Аморфная фаза уменьшает жесткость, делает полимер более эластичным, т.е. способным к большим обратимым деформациям. Отношение объема всех кристаллических областей к общему объему называют *степенью кристалличности*. Высокую степень кристалличности (60—80 %) имеют фторопласты, полипропилен, полиэтилен высокой плотности. Меньшей степенью кристалличности обладает поливинилхлорид, полиэтилен низкой плотности.

В зависимости от того, как ведут себя полимеры при нагреве, они делятся на термопластичные и термореактивные. Термопластичные полимеры при нагреве размягчаются и плавятся, а при охлаждении затвердевают. При этом материал не претерпевает никаких химических превращений, что делает процесс плавления-затвердевания полностью обратимым. Термопластичные полимеры имеют линейную или линейно-разветвленную структуру макромолекул. Между молекулами действуют слабые силы и нет химических связей. К термопластам относятся полиэтилен, полистирол, полиамиды и др. Изделия из термопластичных полимеров изготавливают литьем под давлением в водоохлаждаемые формы, прессованием, экструзией, выдуванием и другими способами.

Термореактивные полимеры сначала имеют линейную структуру и при нагреве размягчаются, затем в результате протекания химических реакций приобретают пространственную структуру и превращаются в твердое вещество, сохраняя и в дальнейшем высокую твердость. Последующий нагрев не размягчает их и может привести только к их разложению. Готовый термореактивный полимер не плавится и не растворяется, поэтому в отличие от термопластичного не может подвергаться повторной переработке. К термореактивным полимерам относятся фе-

нолформальдегидная, кремнийорганическая, эпоксидная и другие смолы.

## 1.2. Основные свойства полимеров

Полимеры могут находиться в твердом и жидком состояниях (газообразное состояние для них нехарактерно), кристаллическом и аморфном фазовых состояниях, а также в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем деформационных физических состояниях.

Особенности химической природы, строения и размеров молекул, их взаимного расположения и упаковки оказывают большое влияние на физико-механические свойства полимеров.

Полимеры имеют высокую стойкость в отношении окисления и концентрированные кислоты. В отличие от металлов они не подвержены электрохимической коррозии. С увеличением молекулярной массы снижается растворимость полимеров в растворителях органического происхождения. Полимеры с пространственной структурой практически не подвержены действию органических растворителей.

Большинство полимеров является диэлектриками. Полимеры в основном относятся к немагнитным веществам. Из всех применяемых конструкционных материалов полимеры имеют наименьшую теплопроводность и наибольшие теплоемкости и тепловую усадку. Тепловая усадка полимеров примерно в 10—20 раз больше, чем металлов. Причиной потери герметичности уплотнительными узлами при низких температурах является стеклование резины и резкое различие коэффициентов расширения металла и резины в застеклованном состоянии.

Для полимеров характерен широкий диапазон механических характеристик, сильно зависящий от их структуры. Кроме структурных параметров большое влияние на механические свойства полимеров оказывают внешние факторы: температура, длительность и частота или скорость нагружения, давление, вид напряженного состояния, термообработка, характер окружающей среды и др.

Особенностями механических свойств полимеров являются их удельная прочность, но малая жесткость по сравнению с металлическими материалами.

Полимерные материалы подразделяются на твердые с модулем упругости  $E = 1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$  МПа (пластмассы, волокна, пленки) и мягкие высокоэластичные материалы с модулем упругости  $E = 1 - 10$  МПа (резины). Механизм и закономерности разрушения тех и других существенно различны.

Для полимеров характерна ярко выраженная анизотропия свойств, снижение прочности и развитие ползучести при длительном нагружении. Вместе с тем полимеры обладают высоким сопротивлением уста-

лости. Для полимеров характерна более резко выраженная температурная зависимость механических свойств по сравнению с металлами.

Среди разных свойств полимеров деформируемость является их основной характеристикой. По деформируемости (или податливости) полимеров в широком температурном интервале чаще всего оценивают их основные технологические и эксплуатационные свойства.

Значение деформируемости определяют методом термомеханических кривых деформация—температура (рис. 143).

Термомеханические кривые получают при нагреве с заданной скоростью нагруженного образца полимера. Действующая нагрузка должна быть постоянной по величине и малой по значению, чтобы механические воздействия на полимер не приводили к изменению его структуры.

Анализ кривой на рис. 143 показывает, что полимер может находиться в трех физических состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

В стеклообразном состоянии при малых напряжениях наблюдается только упругая деформация с высоким модулем упругости ( $E = 2,2 \cdot 10^3 — 5 \cdot 10^3$  МПа). Стеклообразное состояние является одной из форм твердого состояния высокомолекулярных веществ. Выше температуры стеклования к этой деформации добавляется высокоэластическая составляющая, которая значительно превосходит упругую и характеризуется модулем высокоэластичности  $E = 0,1 — 1$  МПа. Выше температуры текучести проявляется еще одна составляющая деформации, которая приводит к постепенному накоплению остаточной деформации образца полимера.

Границы между этими физическими состояниями характеризуются значениями температур стеклования  $T_c$  и текучести  $T_T$ . Критические температуры  $T_c$  и  $T_T$  являются основными характеристиками полимеров.

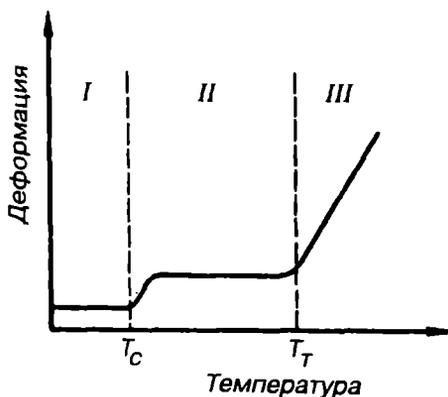


Рис. 143. Термомеханическая кривая аморфного полимера с линейной структурой:

$T_0$  и  $T_T$  — температуры соответственно стеклования и начала вязкого течения; I, II, III — участки соответственно стеклообразного, высокоэластического и вязкотекучего состояний

Важность этих характеристик хорошо иллюстрируется следующими примерами. Волокна и полимеры должны иметь высокую прочность. Поэтому лежащие в их основе полимеры должны находиться в стеклообразном состоянии. Резиновой промышленности, наоборот, необходимы высокоэластичные полимеры, сохраняющие это состояние в широком температурном диапазоне. Процесс технологической переработки полимеров происходит, как правило, в области вязкотекучего состояния. Поэтому для переработки они должны быть нагреты выше соответствующей температуры  $T_T$ .

Низкомолекулярные вещества не могут находиться в высокоэластическом состоянии, для них характерны только стеклообразное и вязкотекучее состояния. Высокоэластическое состояние занимает тем больший температурный интервал  $T_C - T_T$ , чем больше молекулярная масса полимера.

Все полимеры в большей или меньшей степени подвержены процессу старения во времени. Старением полимеров называют самопроизвольное необратимое изменение важнейших технических характеристик, происходящее в результате сложных химических и физических процессов, развивающихся в материале при эксплуатации и хранении.

Старению способствуют свет, частая смена циклов нагрев—охлаждение, воздействие кислорода, озона и другие факторы. Старение ускоряется при многократных деформациях, менее существенное влияние на старение оказывает влага. При старении повышается твердость, хрупкость, теряется эластичность. При высоких температурах (200—250 °С) происходит термическая деструкция — разложение органических полимеров, сопровождающееся испарением летучих веществ.

Ускоренное старение наблюдается при действии механических напряжений, когда не успевают протекать процессы релаксации напряжений, в результате чего ослабевают или нарушаются химические связи. При длительной работе резин в растянутом состоянии на их поверхности под действием атмосферного кислорода образуется хрупкая пленка, склонная к расслаиванию.

Для замедления старения в полимерные материалы добавляют стабилизаторы. Обычно применяют стабилизаторы двух типов: термо-

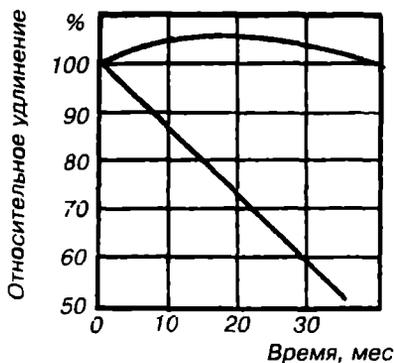


Рис. 144. Влияние длительности атмосферного старения на относительное удлинение поливинилхлоридного пластика (исходное удлинение принято за 100 %):

1 — стабилизированное состояние; 2 — нестабилизированное состояние

стабилизаторы (амины, фенолы) и светостабилизаторы (например, сажу).

Длительность эксплуатации стабилизированных полимеров значительно возрастает (рис. 144). Срок наступления хрупкости полиэтилена, стабилизированного сажой, составляет свыше 5 лет. Трубы из поливинилхлорида могут работать 10—25 лет.

## 2. Пластические массы

Пластмассы — это синтетические материалы, получаемые на основе органических и элементоорганических полимеров. Свойства пластмасс определяются свойствами полимеров, являющихся их основой.

Пластмассы состоят из нескольких компонентов: связующего вещества, наполнителя, пластификатора и др. Обязательным компонентом является связующее вещество. Такие простые пластмассы, как полиэтилен, вообще состоят из одного связующего вещества.

Наполнителями служат твердые материалы органического и неорганического происхождения. Они придают пластмассам прочность, твердость, теплостойкость, а также некоторые специальные свойства, например антифрикционные или, наоборот, фрикционные. Кроме того, наполнители снимают усадку при прессовании.

Пластификаторы представляют собой нелетучие жидкости с низкой температурой замерзания. Они вводятся для расширения температурной области высокоэластического состояния, снижают жесткость пластмасс и температуру хрупкости.

В состав пластмасс могут также входить стабилизаторы, применяемые для предотвращения старения, красители и другие вещества.

Для пластмасс характерны следующие свойства.

1. Малая плотность (обычно 1,0—1,8 г/см<sup>3</sup>, в некоторых случаях до 0,02—0,04 г/см<sup>3</sup>).

2. Высокая коррозионная стойкость. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии, на них не действуют слабые кислоты и щелочи. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и щелочей. Большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении.

3. Высокие диэлектрические свойства.

4. Хорошая окрашиваемость в любые цвета. Некоторые пластмассы могут быть изготовлены прозрачными, не уступающими по своим оптическим свойствам стеклам.

5. Механические свойства широкого диапазона. В зависимости от природы выбранных полимеров и наполнителей пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими. Ряд пластиков по своей механической прочности превосходит чугун и бронзу. При одной

и той же массе пластмассовая конструкция может по прочности соответствовать стальной.

6. Антифрикционные свойства. Пластмассы могут служить полноценными заменителями антифрикционных сплавов (оловянистых бронз, баббитов и др.). Например, полиамидные подшипники скольжения длительное время могут работать без смазки.

7. Высокие теплоизоляционные свойства. Все пластмассы, как правило, плохо проводят тепло, а такие теплоизоляторы, как пено- и поропласты, обладают теплопроводностью почти в 10 раз меньшей, чем обычные пластмассы.

8. Высокие адгезионные свойства.

9. Хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии (без снятия стружки) — литьем, прессованием, формованием с применением невысоких давлений и в вакууме.

Недостатком большинства пластмасс является их невысокая теплоустойчивость (до 100—120 °С). В настоящее время температурный потолок для некоторых видов поднялся до 300—400 °С. Пластмассы могут работать при умеренно низких температурах (до -70 °С), а в отдельных случаях — при криогенных температурах. Недостатками пластмасс также являются их низкая твердость, склонность к старению, ползучесть, нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам. Однако положительные свойства значительно превышают их недостатки, что обуславливает высокие темпы роста ежегодного производства пластмасс.

По характеру связующего вещества пластмассы подразделяют на термопластичные (термопласты), получаемые на основе термопластичных полимеров (табл. 30), и термореактивные (реактопласты), т.е. неразмягчающиеся (табл. 31).

Т а б л и ц а 30. Основные свойства и области применения некоторых термопластов

Наименование	Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , МПа	$\psi$ , %	Интервал рабочих тем- ператур, °С	Область применения
1	2	3	4	5	6
Полиэтилен:					
высокого давления	0,92	14	600	-70...+70	Упаковочный материал, конструкционные несиловые детали
низкого давления	0,96	27	600	-70...+80	(вентили, емкости), чехлы, покрытия, стек- ла для парников и др.

1	2	3	4	5	6
Полипропилен	0,9	25—40	500	-20...+130	Трубы, конструкционные детали автомобилей, холодильников и других механизмов, емкости, упаковочный материал и др.
Полистирол	1,06	45	2,0	-40...+65	Радиотехнические детали, детали фотооборудования, электроизоляционные изделия, теплоизолирующие пенопласты и др.
Винипласт	1,39	50	30	-40...+70	Детали химического оборудования, трубы, профили, фланцы, муфты, элементы насосов и вентиляторов, упаковочный материал и др.
Фторопласт—4	2,15	30	200	-269...+260	Изделия с высокими диэлектрическими свойствами, детали химического оборудования, стойкие в агрессивных средах, антифрикционные покрытия и др.
Стекло органическое конструкционное	1,18	80	3,0	-60...+100	Светотехнические и оптические детали, стекла для воздушного, наземного и водного транспорта и др.
Поликарбонат	1,20	70	100	-100...+135	Детали точных станков и приборов, вычислительных машин, радио- и электротехнической промышленности, машино- и приборостроения

Т а б л и ц а 31. Основные свойства в области применения термореактивных пластмасс

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{в}$ , МПа	Интервал рабочих температур, °С	Область применения
Фенопласт	1,7	30	-60...+140	Малонагруженные детали, корпуса приборов, панели, электроизоляционные детали и др.
Аминопласт	1,8	80	-60...+130	Детали осветительной аппаратуры, электротехнические и электроизоляционные детали, цветные изделия бытового назначения и др.
Волокнит	1,6	50	-60...+200	Шкивы, маховики, втулки, диски, кожухи, детали с повышенными антифрикционными свойствами и др.
Текстолит	1,3	95	-40...+160	Шестерни, втулки, подшипники скольжения, конструкционные и электроизоляционные детали и др.
Стекло-текстолит	1,9	300	-60...+200	Конструкционные силовые детали, корпусные детали, кузова и кабины автомашин, трубы, емкости, электро- и теплоизоляция и др.

## 2.1. Термопластичные пластмассы

Наибольшее применение находят термопластичные пластмассы на основе полиэтилена, полипропилена, полистирола, поливинилхлорида, фторопластов, полиамидов и других полимеров.

*Полиэтилен* имеет линейную структуру макромолекул  $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]$  и является продуктом полимеризации этилена. Свойства полиэтилена зависят от условий полимеризации. По способу изготовления различают полиэтилен низкой плотности ( $0,918-0,930 \text{ г/см}^3$ ), получаемый полимеризацией при высоком давлении (ГОСТ 16337—77Е), и полиэтилен высокой плотности ( $0,946-0,970 \text{ г/см}^3$ ), получаемый полимеризацией при низком давлении (ГОСТ 16338—85Е). Полиэтилен высокой плотности имеет степень кристалличности до 75—95 %. Чем выше плотность и степень кристалличности полиэтилена, тем выше его прочность, модуль упругости и теплостойкость. Разрушающее напряжение при растяжении полиэтилена низкой плотности составляет 10—17 МПа, полиэтилена высокой плотности 18—35 МПа.

Полиэтилен имеет высокие диэлектрические свойства, практически не поглощает влагу. Он химически стоек к действию кислот, щелочей и растворителей, нетоксичен и легко сваривается, обладает хорошей технологичностью (поддается экструзии, литью, напылению, заливке и т.д.), невысокой стоимостью и сочетает высокую прочность с пластичностью. Недостатком полиэтилена является склонность к старению под действием ультрафиолетовых лучей.

Полиэтилен (ГОСТ 25951—83, 20477—86, 10354—82) выпускается в виде пленок толщиной 0,03—0,30 мм, шириной 1400 мм и длиной 300 м, а также в виде листов толщиной 1—6 мм и шириной до 1400 мм. Полиэтилен применяют для изоляции электропроводов и кабелей, в качестве упаковочного материала для пищевых продуктов, для защиты от коррозии магистральных нефте- и газопроводов, в качестве заменителя стекла, для изготовления предметов домашнего обихода, для защиты металлов от коррозии. Полиэтиленовые трубы могут работать при температурах до  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ , они не подвержены почвенной коррозии. Из полиэтилена изготавливают крышки подшипников, уплотнительные прокладки, детали вентиляторов и насосов, гайки, шайбы, полые изделия вместимостью до 200 л, тару для хранения и транспортировки кислот и щелочей.

*Полипропилен* (ТУ 6—05—1105—78) является производным этилена. Макромолекула полипропилена имеет следующую химическую формулу:  $[-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-]_n$ .

По сравнению с полиэтиленом полипропилен имеет более высокую механическую прочность и жесткость, большую теплостойкость и меньшую склонность к старению. Разрушающее напряжение при растяже-

нии полипропилена достигает 25—40 МПа. Недостатком полипропилена является его невысокая морозостойкость (–20 °С).

Полипропилен применяют для изготовления антикоррозионной футеровки резервуаров, труб и арматуры трубопроводов, электроизоляционных деталей, а также для изготовления деталей, применяемых при работе в агрессивных средах. Из полипропилена изготавливают корпуса автомобилей и аккумуляторов, прокладки, трубы, фланцы, водонапорную арматуру, пленки, пленочные покрытия бумаги и картона, корпуса воздушных фильтров, конденсаторы, вставки демпфирующих глушителей, зубчатые и червячные колеса, ролики, подшипники скольжения, фильтры масляных и воздушных систем, рабочие детали вентиляторов, насосов, уплотнения, детали приборов и автоматов точной механики, кулачковые механизмы, детали телевизоров, магнитофонов, холодильников, стиральных машин, изоляцию проводов и кабелей. Полипропилен обладает хорошими технологическими свойствами — способностью к литью, экструзии, прессованию, сварке и обработке резанием. Отходы при производстве полипропилена и отработавшие изделия из него используют для повторной переработки.

*Полистирол* (ГОСТ 20282—86Е) относится к числу наиболее известных и широко применяемых пластмасс. Его макромолекула имеет следующую формулу:  $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]_n$ .

Полистирол — твердый, жесткий, бесцветный, прозрачный, аморфный полимер, легко окрашиваемый в различные цвета. Обладает высокой водостойкостью, хорошей химической стойкостью в растворах солей, кислот и щелочей. По сравнению с другими термопластами имеет наиболее высокую стойкость к радиации. Недостатками полистирола являются повышенная хрупкость при ударных нагрузках, склонность к старению, невысокая тепло- и морозостойкость. Интервал рабочих температур +65...–40 °С. Полистирол применяют для изготовления деталей радио- и электроаппаратуры, предметов домашнего обихода, детских игрушек, трубок для изоляции проводов, пленок для изоляции электрических кабелей и конденсаторов, открытых емкостей (лотков, тарелок, подносов), прокладок, втулок, светофильтров, крупногабаритных изделий радиотехники (корпусов транзисторных приемников), деталей электропылесосов (колодок, щелевых сопел, прокладок, ручек), мебельной фурнитуры, конструкционных изделий с антистатическими свойствами. Ударопрочным полистиролом (механическая смесь полистирола с каучуком) облицовывают пассажирские вагоны, салоны автобусов и самолетов. Из него изготавливают крупногабаритные детали холодильников, корпуса радиоприемников, телефонных аппаратов и др.

Пластмассы на основе *поливинилхлорида* (ГОСТ 5960—72, 9639—71, 9998—80, 16214—86, 16272—79) имеют хорошие электроизоляционные свойства. Они стойки к воздействию химических, не поддержива-

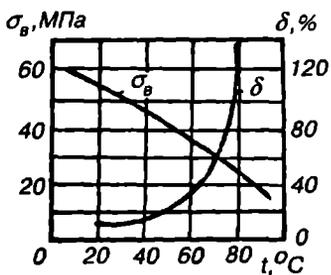


Рис. 145. Зависимость механических свойств винипласта от температуры

Винипласт выпускается в виде листов, прутков, труб. Винипластовые детали хорошо механически обрабатываются и хорошо свариваются. Из него изготавливают трубы для транспортировки воды, агрессивных жидкостей и газов, коррозионностойкие емкости, защитные покрытия для электропроводки, детали вентиляционных установок, теплообменников, шланги вакуум-проводов, защитные покрытия для металлических емкостей, изоляцию проводов и кабелей. Поливинилхлорид используют для получения пенопластов, линолеума, искусственной кожи, объемной тары, товаров бытовой химии, вибропоглощающих материалов в машиностроении и на всех видах транспорта, водо-, бензо- и антифризостойких трубок, прокладок и т.д.

**Фторопласты** (ГОСТ 21000—81, 10007—80Е, 14906—77, 25428—82) — полимеры фторпроизводных этиленового ряда. Фторопласты имеют прочность при растяжении 15—35 МПа, при изгибе 10-15 МПа; относительное удлинение при разрыве 250—350 %.

Наиболее широкое распространение получил фторопласт—4 (тефлон) или политетрафторэтилен. Он имеет структурную формулу  $[-\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$ . Характеризуется высокой плотностью ( $\gamma = 2,1...2,3 \text{ г/см}^3$ ), термо- и морозостойкостью. Интервал рабочих температур при эксплуатации изделий из фторопласта—4 составляет  $-269...+260 \text{ }^\circ\text{C}$ . Пленка из него не охрупчивается даже в среде жидкого гелия. Фторопласт—4 имеет хорошие диэлектрические свойства и высокую коррозионную стойкость. По химической стойкости фторопласт—4 превосходит все известные материалы, включая золото и платину. Он стоек к воздействию всех минеральных и органических щелочей, кислот, органических растворителей, не набухает в воде, не смачивается жидкостями и вязкотекучими средами пищевых производств (тестом, патокой, вареньем и т.д.). При температуре  $260 \text{ }^\circ\text{C}$  невзрывоопасен, негорюч, при непосредственном контакте не оказывает влияния на организм человека, разрушается только под действием расплавленных щелочных метал-

лов и элементарного фтора. Фторопласт—4 имеет низкий коэффициент трения и применяется для изготовления подшипников скольжения без смазки. Для уменьшения износа подшипников во фторопласт вводят 15—30 % наполнителя (графита, дисульфита молибдена, стеклянного волокна и др.).

Фторопласты широко применяются в электро- и радиотехнической промышленности, а также для изготовления химически стойких труб, кранов, мембран, насосов, подшипников, деталей медицинской техники, коррозионно-стойких конструкций, тепло- и морозостойких деталей (штулок, пластин, дисков, прокладок, сальников, клапанов), для облицовки внутренних поверхностей различных криогенных емкостей.

*Полиамиды* (ГОСТ 10589—87, 17648—83) включают группу известных термопластичных пластмасс (таких, как нейлон, капрон и др.). Макромолекула полиамида состоит из амидной  $—NH—CO—$  и метиленовой  $—CH_2$  групп и имеет общий вид  $[—NH—CO—(CH_2)—]_n$ , где число метиленовых групп повторяется от 2 до 100 раз. Ориентированные полиамиды характеризуются высокой прочностью на растяжение (более 400 МПа), ударопрочностью, способностью к поглощению вибрационных нагрузок. Они имеют низкий коэффициент трения и могут использоваться в качестве подшипников как без смазки, так и при применении смазочных материалов. Полиамиды используют для изготовления конструкционных и электроизоляционных изделий, эксплуатируемых при температурах  $-60...+100$  °С (зубчатых передач, уплотнительных устройств, штулок, муфт, подшипников скольжения, лопастей винтов, стойких к действию щелочей, масел, жиров и углеводородов, технических изделий и товаров культурно-бытового назначения, антифрикционных покрытий металлов).

*Полиуретаны* (ТУ 6—05—221—479—79) — наиболее ценные и широко производимые промышленностью термопластичные полимеры. Полиуретаны содержат уретановую группу  $[—NH—COO—]_n$ . Они характеризуются высоким модулем упругости, износостойкостью, вязким коэффициентом трения, стойкостью к вибрациям, атмосферостойкостью, а также стойкостью к воздействию масла и бензина. Изделия из полиуретана можно эксплуатировать при понижении температуры до  $-60...-70$  °С. Волокна из полиуретана малогигроскопичны и имеют высокую химическую стойкость. Их используют для изготовления изоляции, фильтровальных и парашютных тканей.

*Стекло органическое* (ГОСТ 9784—75Е, 10667—90Е, 15809—70Е, 17622—73Е) получают на основе сложных эфиров и метакриловой кислоты. Обычно применяют полиметилакрилат, имеющий структурную формулу  $[—CH_2—C(CH_3)(COOCH_3)—]_n$ .

Этот термопласт оптически прозрачен (светопрозрачность до 92 %), имеет низкую плотность, высокую атмосферостойкость, стоек к воздей-

ствию разбавленных кислот и щелочей, углеводородного топлива и смазок. Стекло органическое выпускается в виде листов толщиной до 25 мм. Его недостаток — низкая поверхностная твердость.

*Поликарбонат* (ТУ 6—06—68—89, ТУ 6—06—95—90) — термопластичный полимер на основе дифенилпропана, выпускаемый под названием дифлон. Поликарбонат характеризуется низкой водопоглощаемостью и газопроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами, высокой жесткостью, теплостойкостью и химической стойкостью, не имеет запаха и вкуса, физиологически безвреден, бесцветен, прозрачен, хорошо окрашивается. Стоек к световому старению и действию окислителей даже при нагреве до 120 °С. Это один из наиболее ударопрочных термопластов, что обеспечило возможность его использования в качестве конструкционного материала, заменяющего металлы. Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, корпуса, крышки, клапаны и другие детали, сосуды для транспортировки фруктовых соков, молока, вин и т.д. Его можно использовать в криогенной технике для работы в среде жидких газов.

Физико-механические свойства поликарбонатов улучшаются при введении в них армирующих волокон. Например, при введении в поликарбонат стекловолокна (до 30 %) его модуль упругости при растяжении увеличивается в 3 раза, а твердость по Бринелю — в 1,5 раза. Теплостойкость материала также увеличивается, а термический коэффициент линейного расширения снижается в 3 раза, усадка материала уменьшается в 2 раза.

Из отечественных марок заслуживают внимания пластмассы типа «Эстеран». По составу материал типа «Эстеран» представляет собой модификацию дифлона с наполнителем — дисульфидом молибдена, модифицированным фторопластом. Пластмассы типа «Эстеран» предназначены для изготовления мелко модульных зубчатых колес, сепараторов, подшипников качения и скольжения, кулачков. Изделия из этих пластмасс имеют высокие физико-механические свойства и хорошую работоспособность при высоких (до 110 °С) и низких (до -200 °С) температурах, а также в вакууме.

В нашей стране кроме стеклонаполненного поликарбоната хорошо зарекомендовали себя наполненные стекловолокном полипропилен, полистирол и некоторые другие термопласты. Термопласты, армированные стекловолокном, имеют более высокие механические свойства и обеспечивают неизменность формы изделий в условиях повышенных температур. Производство таких термопластичных материалов с каждым годом растет на 25—30 %. Они применяются при изготовлении самых различных деталей в электронной и электротехнической промышленности, оптическом и точном приборостроении, автомобилестроении, текстильном машиностроении и т.д.

## 2.2. Термореактивные пластмассы

Основу всякого реактопласта составляет химически затвердевающая термореактивная смола — связующее вещество. Кроме того, в состав реактопластов входят наполнители, пластификаторы, отвердители, ускорители или замедлители, растворители. Наполнителями могут быть порошковые, волокнистые и гибкие листовые материалы. В качестве порошковых наполнителей используют молотый кварц, тальк, графит, древесную муку, целлюлозу. Из пластмасс с порошковыми наполнителями [фенопласты (ГОСТ 5689—79), аминопласты (ГОСТ 9359—80)] изготавливают несилловые конструкционные и электроизоляционные детали (рукоятки, детали приборов, кнопки и т.д.), различные вытяжные и формовочные штампы, корпуса сборочных и контрольных приспособлений, литейные модели и другую оснастку.

Реактопласты с волокнистыми наполнителями представляют собой композиции, состоящие из связующего (смолы) и волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка (волокниты), асбеста (асбоволокниты), стекловолокна (стекловолокниты).

*Волокниты* применяют для изготовления деталей с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, работающих на изгиб и кручение (втулок, шкивов, маховиков и др.).

*Стекловолокниты* негорючи, стойки к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойки, имеют стабильные размеры. Некоторые марки стекловолокнитов применяются для изготовления силовых электротехнических деталей в машиностроении, а также крупногабаритных изделий простых форм (кузовов автомашин, лодок, корпусов приборов и т.п.). Стекловолокниты имеют высокие физико-механические характеристики и применяются для изготовления деталей высокого класса точности и сложной конфигурации. Стекловолокниты могут работать при температурах  $-60...+200$  °С, имеют прочность при разрыве 80—500 МПа.

Большую группу реактопластов составляют слоистые пластмассы, которые содержат листовые наполнители, уложенные слоями. В качестве наполнителей для слоистых пластиков используют материалы органического (бумагу, хлопчатобумажные ткани, древесный шпон, ткани из синтетических волокон) и неорганического (асбестовую бумагу, картон, ткань, стеклянную ткань, ткань из кварцевых или кремнеземных волокон) происхождения. В зависимости от вида наполнителя различают следующие слоистые пластики: гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, древесно-слоистые пластики. Связующими при производстве слоистых пластиков служат фенолформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические и некоторые другие смолы.

Свойства слоистых пластиков зависят от соотношения компонентов (наполнителя и связующего), характера подготовки наполнителя, режимов прессования и термообработки и других технологических факторов. Благодаря слоистому расположению армирующего наполнителя слоистые пластики обладают анизотропией механических, физических и диэлектрических свойств.

Механические свойства слоистых пластиков определяются прежде всего видом используемого наполнителя. Наибольшей механической прочностью обладают слоистые пластики на основе стеклянной ткани или стеклянных жгутов. Эти материалы, а также слоистые пластики на основе асболокнистых наполнителей имеют более высокую теплоустойчивость по сравнению с пластиками на основе органических наполнителей.

Физические и диэлектрические свойства слоистых пластиков зависят в основном от типа используемого полимерного связующего.

Пластик на основе бумаги — *гетинакс* (ГОСТ 2718—74) — применяют в качестве электроизоляционного материала, работающего длительно при температурах  $-65...+105$  °С, а также как конструкционный и декоративный материал. Гетинаксы широко применяют в электрических машинах, трансформаторах (в качестве высоковольтной изоляции) и других аппаратах, при производстве телефонной арматуры, в радиотехнике (для изготовления печатных схем). Из гетинакса изготавливают панели, щитки, прокладки, крышки, шайбы, малонагруженные изделия и т. д.

Древесно-слоистые пластики (ДСП) используют при изготовлении мебели, для внутренней облицовки пассажирских поездов, судов, самолетов, при строительстве — в качестве облицовочного материала.

Пластики на основе хлопчатобумажных тканей — *текстолиты* (ГОСТ 5—78Е, 2910—74) — применяют для изготовления различных конструкционных деталей, электроизоляционного материала, вкладышей подшипников прокатного оборудования, прокладок, герметизирующих фланцевые соединения. Текстолитовые детали могут работать не только в воздушной среде, но и в масле, керосине или бензине и т. д. Текстолит производят в виде листов, плит, стержней и трубок.

*Стеклотекстолитами* (ГОСТ 10292—74Е, 12652—74) называют слоистые пластики на основе тканых стекловолоконных материалов. Они характеризуются высокой тепло- и хладостойкостью, стойкостью к действию окислителей и других химических активных реагентов, высокими механическими свойствами. Стеклотекстолиты применяют для изготовления крупногабаритных изделий, радиотехнических и электроизоляционных деталей, длительное время работающих при температуре 200 °С и кратковременно — при 250 °С. Стеклопластики являются конструкционными материалами, применяемыми для изготовления си-

ловых изделий в различных отраслях техники (несущих деталей летательных аппаратов, кузовов и кабин машин, железнодорожных вагонов, корпусов лодок, судов и т.п.).

### 3. Резины

Резинотехнические изделия получают при специальной термической обработке (вулканизации) прессованных деталей из сырой резины, являющейся смесью каучука с серой и другими добавками (табл. 32).

Т а б л и ц а 32. Основные типы резин и характеристики каучуков

Тип резины	Тип каучука	Плотность г/см <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Остаточное удлинение после разрыва, %	Интервал рабочих температур, °С
Общего назначения	Натуральный (НК)	0,91	29	650	32	-50...+130
	Бутадиеновый синтетический (СКБ)	0,91	17	470	60	-50...+150
	Изопреновый синтетический (СКИ)	0,91	30	700	28	-50...+130
Специального назначения:	бензомаслостойкая	0,96	26	600	20	-40...+170
	теплостойкая	1,85	6	250	4	-70...+300
	теплохимическостойкая	1,85	17	200	8	-40...+300
	морозостойкая	0,94	31	800	16	-80...+130
	Бутадиенстирольный (СКМС) и бутадиенстирольный (СКС)					

Главным исходным компонентом резины, придающим ей высокие эластические свойства, является каучук. Каучуки бывают натуральные (НК) и синтетические (СК). Натуральный каучук получают коагуляцией латекса (молочного сока) каучуконосных деревьев, растущих в Бразилии, Юго-Восточной Азии, на Малайском архипелаге. Синтетические каучуки (бутадиеновые, бутадиен-стирольные и др.) получают методами полимеризации. Впервые синтез бутадиенового каучука из этилового спирта осуществлен в 1921 г. советским ученым С.В.Лебеде-

вым. Разработаны методы получения синтетических каучуков из более дешевого сырья, например из нефти и ацетилена.

Каучуки являются полимерами с линейной структурой. При вулканизации они превращаются в высокоэластичные редкосетчатые материалы — резины. Вулканизирующими добавками служат сера и другие вещества. С увеличением содержания вулканизатора (серы) сетчатая структура резины становится более частой и менее эластичной. При максимальном насыщении серой (до 30—50 %) получают твердую резину (эбонит), при насыщении серой до 10—15 % — полутвердую резину. Обычно в резине содержится 5—8 % S.

Кроме серы в состав резин входят наполнители, пластификаторы, противостарители и красители.

Введение этих компонентов позволяет существенно менять специальные свойства резины, увеличивая ее износо-, морозо-, масло- и бензостойкость. Резиновые изделия часто армируют тканью или металлической сеткой. Для улучшения адгезии металлической арматуры к резине на поверхность металла наносят клеющую пленку.

Резина имеет высокие эластические свойства, высокую упругость и сопротивляемость разрыву. Кроме того, резина обладает малой плотностью, высокой стойкостью против истирания, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами.

Совокупность химических, физических и механических свойств позволяет использовать резиновые материалы для амортизации, демпфирования, уплотнения, герметизации, химической защиты деталей машин, при производстве тары для хранения масла и горючего, различных трубопроводов (шлангов), для изготовления покрышек и камер колес автотранспорта, декоративных изделий и т.д. Номенклатура резиновых изделий чрезвычайно разнообразна.

В зависимости от условий эксплуатации различают резины общего и специального назначения. Резины общего назначения применяют для изготовления камер и шин, ремней, транспортных лент, рукавов, изоляции кабелей и проводов, производства товаров народного потребления и др. Из резин специального назначения различают бензомаслостойкие, морозостойкие, теплостойкие, стойкие к действию агрессивных сред. Нижней границей рабочих температур резин специального назначения является температура до  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , резин общего назначения — минус  $35\text{...}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 146—149 приведены уплотнительные и прокладочные резиновые детали, резинометаллические детали, рукав высокого давления с металлической оплеткой и камерная пневматическая шина.

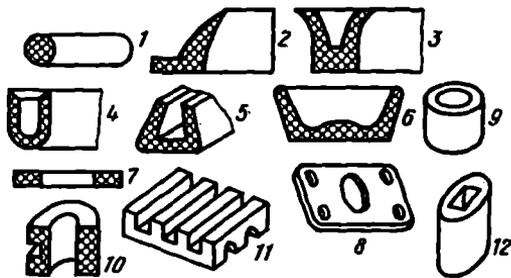


Рис. 146. Разновидности резиновых деталей:

1—5 — уплотнительные профили; 6 — чашечная манжета;  
7—11 — уплотнительные прокладки; 12 — втулка

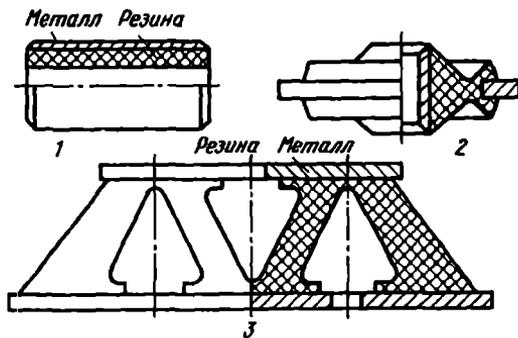


Рис. 147. Резинометаллические детали:

1 — подшипник; 2 — пластинчатый амортизатор; 3 — амортизатор «ферма»

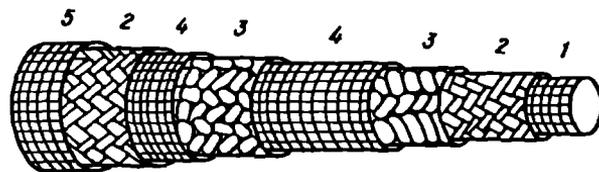


Рис. 148. Конструкция рукава высокого давления с металлической оплеткой:

1 — внутренний резиновый слой; 2 — хлопчатобумажная оплетка;  
3 — металлическая оплетка; 4 — резиновый слой; 5 — наружный резиновый слой

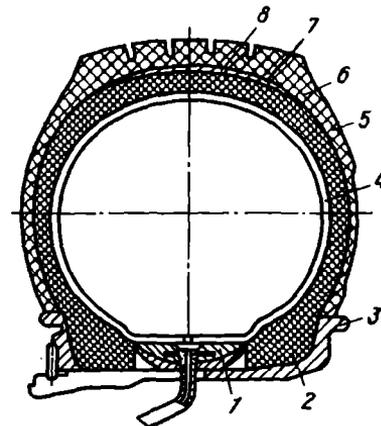


Рис. 149. Разрез камерной пневматической шины:

1 — ободная лента; 2 — борт; 3 — обод; 4 — резиновая камера; 5 — резинокордная покрывка; 6 — каркас; 7 — протектор; 8 — брекер

#### 4. Клеящие материалы

Клеями называют сложные вещества на основе полимеров, способные при затвердевании образовывать прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам. По сравнению с другими видами соединений (клепкой, сваркой, механическим креплением) клеевые соединения имеют ряд преимуществ. Клеи позволяют соединять разнородные материалы (металл, керамику, пластмассу, дерево) в различных сочетаниях. Клеевые швы атмосферостойки, не подвержены коррозии, позволяют обеспечивать герметичность соединений. Масса конструкции при клеевой сборке почти не увеличивается, отсутствуют снижающие прочность и являющиеся концентраторами напряжений отверстия под болты, заклепки, гвозди. Во многих случаях клеевое соединение металлических и неметаллических материалов является единственно возможным решением, обеспечивающим высокую прочность конструкции. Клеи могут выдерживать высокие и низкие температуры, сохраняя достаточную прочность соединения.

Недостатками клеевых соединений являются сравнительно невысокая теплостойкость при длительной эксплуатации и низкая прочность при несимметричном нагружении и неравномерном отрыве.

Работоспособность клеевых соединений зависит прежде всего от процессов адгезии и когезии. Адгезия характеризует прочность сцепления клеевой пленки со склеиваемой поверхностью, когезия — прочность собственно клеевого слоя.

Для приготовления клеев используют термопластичные или термореактивные полимеры. Клеи на основе термопластичных полимеров дают менее прочные соединения и используются ограниченно, обычно для склеивания материалов, не подвергающихся тепловому воздействию (бумаги, картона, тканей). С повышением температуры клеевой слой размягчается и склеенные поверхности разъединяются. Клеи на основе термореактивных полимеров, содержащие также отвердители и ускорители процессов отверждения, наполнители и пластификаторы, дают более прочные соединения. Клеи этой группы могут быть холодного и горячего отверждения. Клеи холодного отверждения смешиваются с отвердителями и ускорителями непосредственно перед процессом склеивания. Клеи горячего отверждения приготавливаются на заводе-изготовителе, поставляются потребителю в готовом виде и могут храниться несколько месяцев.

Из клеев на основе термореактивных полимеров наиболее широкое применение находят клеи на основе эпоксидных смол. Их применяют для склеивания различных металлов, металлических и неметаллических материалов. Клеи на эпоксидной основе могут работать в широком температурном диапазоне. Отдельные марки таких клеев выдерживают

воздействие температур от  $-253$  до  $+800...+1000$  °С. Клеи на эпоксидной основе длительно сохраняют прочность в условиях эксплуатации, обеспечивают вакуумную плотность соединений и стойкость к циклическому температурному воздействию. Их существенными преимуществами являются низкая (до 2 %) усадка при отверждении, высокая адгезия к большинству конструкционных материалов и небольшой объем газовыделений в вакууме. Эти свойства позволяют широко использовать клеи на основе эпоксидных смол при склеивании холодильного и криогенного оборудования.

По внешнему виду клеи бывают жидкими, пастообразными, пленочными. Широкое распространение получили пленочные клеи на эпоксидной основе, использование которых позволяет получать не только прочные клеевые соединения, но и дает существенные технологические преимущества. При применении пленочных клеев часто используют армирующие материалы — полиамидные, стеклянные и другие синтетические ткани.

Кроме клеев на эпоксидной основе широко используют кремнийорганические, алмохромфосфатные клеевые композиции, а также полиуретановые (ПУ—2; ВК—20), резиновые и некоторые другие клеи. На основе жидких полиуретановых, карбоксилатных, фторированных каучуков разработан способ герметизации вакуумно-плотных узлов при криогенных температурах. Клеи на основе полиуретановых каучуков в настоящее время широко используются в мировой практике при криогенных температурах из-за их высокой эластичности. В радиоэлектронике применяются галлиевые клеи (клеи-припой). Получаемые на основе этих клеев соединения имеют высокую тепло- и электропроводность, достаточно высокую механическую прочность, повышенную стабильность в процессе эксплуатации и выдерживают воздействие температур в интервале  $-196...+800$  °С.

Прочность клеевого соединения зависит от качества подготовки поверхности склеиваемых материалов. Для улучшения механического сцепления клеевой пленки с шероховатой поверхностью детали поверхность детали зачищают наждачной бумагой, фрезеруют, подвергают пескоструйной обработке. Повышение чистоты поверхности материала оказывает положительное влияние на смачиваемость, а следовательно, и на прочность клеевой пленки. Для улучшения чистоты поверхности производится ее обезжиривание растворителем (спиртом, ацетоном). Важную роль играет правильный выбор толщины пленки. Толщина пленки должна составлять в среднем  $0,1—0,6$  мм. При меньшей толщине микронеровности поверхности материала затрудняют пластическую деформацию и нарушают сплошность пленки. Слишком большая толщина пленки снижает прочность клеевого шва.

## 5. Лакокрасочные материалы

Лакокрасочные материалы представляют собой многокомпонентные составы, в жидком состоянии наносимые на поверхность изделий и высыхающие с образованием пленок, удерживаемых силами адгезии. Высыхающие пленки называют лакокрасочными покрытиями. Назначение лакокрасочных покрытий — защита металлов от коррозии, дерева и тканей — от гниения и набухания. Кроме того, они служат декоративным целям, придавая изделиям желаемый внешний вид. В некоторых случаях покрытия могут иметь специальные свойства: электроизоляционные, теплозащитные, светостойкие и др. Защитные покрытия в несколько раз увеличивают срок службы аппаратуры, металлоконструкций и оборудования.

Основными требованиями, предъявляемыми к лакокрасочным покрытиям, являются высокая адгезия к защищаемым поверхностям; близкие значения температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и металла; высокая плотность, беспористость и водогазонепроницаемость; высокая эластичность пленки при достаточной твердости и механической прочности; теплоустойчивость, химическая стойкость и светостойкость.

Качество и срок службы лакокрасочных покрытий зависят от их состава, природы окрашиваемого материала, подготовки поверхности, технологии и качества нанесения покрытия (табл. 33).

Т а б л и ц а 33. Характеристики и области применения некоторых лакокрасочных материалов

Лакокрасочные материалы	Обозначение	Основные пленкообразующие вещества	Характеристика	Покрываемые материалы и изделия
1	2	3	4	5
Масляные	МА	Масла растительные, олифы натуральные, «оксоль» и комбинированные	Атмосферостойкие. Для внутренних и внешних работ	Деревянные и металлические конструкции, станки, вагоны, аппараты
Глифталевые	ГФ	Смолы алкидные глицерофтальатные (глифтали)	Атмосферостойкие и маслостойкие	Сельхозмашины, тракторы подъемно-транспортные машины

1	2	3	4	5
Нитроцеллюлозные	НЦ	Нитроглифтали, смолы нитроцеллюлозоуретановые, нитроаминоформальдегидные	Атмосферо- и бензостойкие	Металлические детали, кузова автомашин и тракторов
Эпоксидные	ЭП	Смолы эпоксидные, алкидно-эпоксидные, нитроцеллюлозо-эпоксидные	Атмосферостойкие. Для внутренних и внешних работ. Стойкие к воздействию масла, бензина и воды	То же
Перхлорвиниловые	ХВ	Смолы перхлорвиниловые и винилхлоридные	Атмосферо- и химически стойкие. Выдерживают кратковременное воздействие масла, воды	Металлические поверхности химической аппаратуры
Кремнийорганические	КО	Смолы кремнийорганические	Термостойкие до 200—300 °С. Химически водостойкие	Машины и оборудование

Основные компоненты лакокрасочных материалов — пленкообразователи, растворители и пигменты.

Пленкообразователи сообщают лакокрасочным материалам способность к образованию пленки и определяют ее основные свойства. Пленкообразующими веществами могут быть высыхающие растительные масла, синтетические смолы и эфиры целлюлозы. Различают неотверждаемые термопластичные и отверждаемые термореактивные пленкообразователи.

Растворителями лакокрасочных материалов служат скипидар, уайт-спирит, ацетон, спирты. Растворители подбирают в зависимости от пленкообразующего вещества: для масел используют скипидар и уайт-спирит, для смол — спирты, ацетон и ароматические углеводороды типа бензола и толуола, для эфиров целлюлозы — ацетон. Растворители при сушке полностью улетучиваются. Для ускорения высыхания покрытий применяют каталитически действующие сиккативы, представляющие собой растворы оксидов кобальта, цинка, свинца, марганца в растительном масле.

Пигменты (или красители) применяют для получения определенного цвета лакокрасочного материала. Одновременно пигменты улучшают адгезию, повышают антикоррозионные свойства и водостойкость пле-

нок. По химическому составу они представляют собой оксиды или соли металлов (охра, железный сурик, цинковые и титановые белила), порошки алюминия, цинка и элементарного углерода (графит, сажа). Применяют также пигменты органического происхождения (пигмент алый и др.), сообщающие покрытиям красивые яркие тона.

Для удешевления лакокрасочных материалов в них добавляют наполнители. Наполнителями служат мел, каолин, тальк и другие вещества. Применение в качестве наполнителей слюды и асбеста способствует повышению термостойкости покрытий.

В зависимости от состава и назначения лакокрасочные материалы делятся на лаки, краски (в том числе эмали), грунты и шпаклевки.

Лаком называют раствор пленкообразующих веществ в органических растворителях или в воде, образующий после высыхания твердую прозрачную однородную пленку. Лаки используют для получения прозрачных покрытий, защищающих поверхность от внешней среды. Иногда лаки наносят на слой краски для большего блеска покрытия.

Грунтами, шпаклевками и красками называют пигментированные лаки и олифы — высыхающие масла с добавкой сиккатива, являющегося катализатором высыхания. Краски, изготовленные на лаках, называют эмалями, а на олифах — масляными красками.

Грунты являются нижними слоями покрытия. Они обеспечивают прочную адгезию с окрашиваемой поверхностью. В качестве пигмента в грунтах применяют соли хромовой кислоты, свинцовый или железный сурик, цинковые белила и др.

Шпаклевкой называют густую и вязкую массу, состоящую из смеси пигментов с наполнителями в связующем веществе. Шпаклевки применяют для сглаживания неровностей поверхности изделий. Они имеют значительно большую вязкость, чем остальные лакокрасочные материалы за счет более высокой концентрации пигмента и наполнителя.

Надежность защиты поверхности изделий обычно достигается использованием многослойных покрытий. Сочетание слоев последовательно нанесенных лакокрасочных материалов различного целевого назначения (грунта, шпаклевки, краски, лака) называется системой покрытия (рис. 150). Общее число слоев составляет от 2—6 до 14. Толщина каждого слоя грунта, эмали, лака составляет 10—26 мкм, шпаклевки —

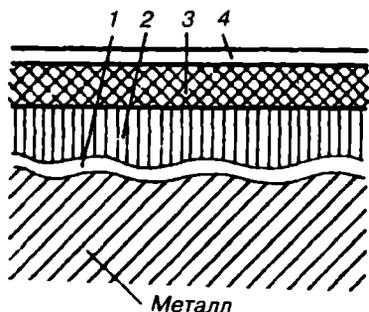


Рис. 150. Схема системы лакокрасочного покрытия:

1 — грунт; 2 — шпаклевка; 3 — эмаль; 4 — покрывной лак

до 1 мм. Выбор грунта производится с учетом окрашиваемого материала и покрывного материала. Покрывной материал выбирают в зависимости от условий эксплуатации и требуемого внешнего вида изделия.

## 6. Стекло

Стекло — это однородное аморфное вещество, полученное при затвердевании расплава оксидов. В составе стекла могут присутствовать оксиды трех типов: стеклообразующие, модифицирующие и промежуточные. Стеклообразующими являются оксиды кремния, бора, фосфора, германия, мышьяка. К модифицирующим оксидам, введение которых понижает температуру плавления стекла и существенно меняет его свойства, относятся оксиды щелочных (Na, K) и щелочноземельных (Ca, Mg, Ba) металлов. Промежуточными являются оксиды алюминия, свинца, титана, железа. Они могут замещать часть стеклообразующих оксидов. Стеклообразующий каркас стекла представляет собой непрерывную пространственную решетку, в узлах которой расположены ионы, атомы или группировки атомов (рис. 151). Химический состав стекла можно изменять в широких пределах, поэтому и свойства стекла могут быть различными.

По химическому составу и назначению различают следующие виды стекла. По составу в зависимости от природы стеклообразующих оксидов различают силикатное, алюмосиликатное, боросиликатное, алюмоборосиликатное и другие виды стекла. В зависимости от содержания модификаторов стекло может быть щелочным и бесщелочным. По назначению различают строительное (оконное, стеклоблоки), бытовое (стеклотара, посуда) и техническое (оптическое, электротехническое, химическое и др.) стекло.

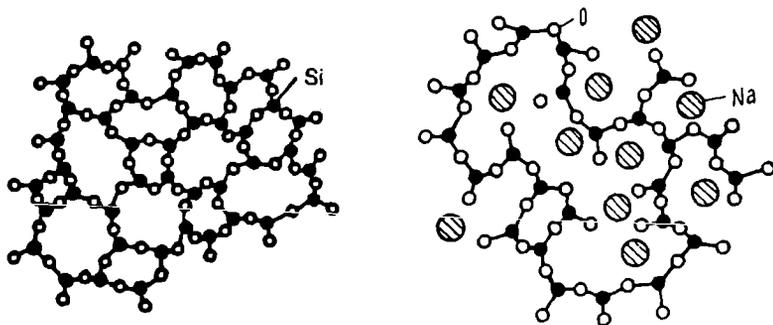


Рис. 151. Схема непрерывной структурной сетки стекла:  
а — кварцевого; б — натрийсиликатного

Структура и свойства стекла определяется его химическим составом, условиями варки, охлаждения и обработки (табл. 34).

Т а б л и ц а 34. Основные характеристики некоторых видов стекла

Стекло	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность, МПа, при			Темпера- тура раз- мягчения, °С	Тепло- стой- кость, °С	Свето- про- пуска- емость, °С
		сжатии	растяжении	изгибе			
Силикат- ное	2,5—2,6	500—200	30—90	25—80	—	40—80	82—90
Кварцевое: прозрач- ное	2,2	650—180	49—65	110—120	1250—1300	1100	90
непрозрач- ное	2,02	310—900	23—40	45—90	1200	1000	—
Пено- стекло	0,15—0,40	80—250	50—100	50—100	300—400	110—170	—
Ситалл	2,4—2,7	1000—2000	110—160	70—350	1200—1350	—	—

Стекло — термопластичный материал, при нагреве оно постепенно размягчается и переходит в жидкость. Плавление происходит в некотором температурном интервале, величина которого зависит от химического состава стекла. Ниже температуры стеклования  $T_c$  стекло приобретает хрупкость. Для обычного силикатного стекла  $T_c = 425—600$  °С. Выше температуры плавления стекло становится жидкостью. При этих температурах стекломасса перерабатывается в изделия.

Плотность стекла составляет 2,2—8,0 г/см<sup>3</sup>. Стекло высокой плотности содержит значительные количества оксидов свинца и бария.

Стекло — жесткий, твердый, но очень хрупкий материал. Стекло хорошо сопротивляется сжатию ( $\sigma_{сж} = 400—600$  МПа), но характеризуется низким временным сопротивлением при испытаниях на растяжение (30—90 МПа) и изгиб (50—150 МПа). Более прочным является бесцелочное и кварцевое стекло.

Механические свойства стекла повышаются при термической и химической обработке. Термическая закалка стекла состоит в нагреве до температур, близких к точке размягчения, и быстром равномерном охлаждении поверхности в потоке воздуха или в масле. При этом в поверхностных слоях возникают напряжения сжатия, и прочность стекла возрастает в 2—4 раза. Для изготовления приборов, работающих при повышенном давлении, применяют бесцелочное стекло — триплекс.

Триплекс представляет собой комбинированное стекло, состоящее из двух и более закаленных слоев, склеенных прозрачной эластичной пленкой. Химическая обработка состоит в травлении поверхностного слоя раствором плавиковой кислоты с уничтожением поверхностных дефектов. Еще больший эффект достигается при комбинированной химико-термической обработке.

Важнейшим свойством стекла является прозрачность в диапазоне длин волн видимого света. Обычное листовое стекло пропускает до 90 %, а отражает около 8 % и поглощает около 1 % видимого света. Ультрафиолетовые лучи почти полностью поглощаются оконным стеклом.

Стекло имеет высокую химическую стойкость в агрессивных средах (за исключением плавиковой кислоты и щелочей). Вода постепенно разрушает стекло вследствие образования щелочных растворов. Чем выше температура и концентрация щелочных оксидов в стекле, тем сильнее проявляется действие воды. Стекло является техническим материалом, широко распространенным в разных областях техники и народного хозяйства. Это объясняется благоприятным сочетанием физико-химических и механических свойств, возможностью изменять эти свойства в широких пределах в зависимости от состава стекла и способов термического воздействия, а также способностью стекла легко поддаваться разным способам горячей и холодной обработки.

Кварцевое стекло, состоящее практически из чистого кремнезема (99,5 %  $\text{SiO}_2$ ), в зависимости от способа получения бывает двух типов: оптически прозрачное и непрозрачное. Кварцевое стекло отличается от всех известных стекол высокими физико-химическими свойствами: высокой жаростойкостью (1400 °C), низким температурным коэффициентом линейного расширения [(0,5... 0,55)  $\cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ], высокой термической (выдерживает перепад температур 800—1000 °C) и химической стойкостью, особенно к действию кислот (кроме плавиковой) и воды. Кварцевое стекло имеет высокие диэлектрические характеристики, прозрачно в видимой, ультрафиолетовой и частично инфракрасной областях. Кварцевое стекло, имеющее особенно высокую термическую и химическую стойкость в сочетании с низким температурным коэффициентом линейного расширения, применяется для изготовления тиглей, чехлов для термодар, электровакуумных изделий, химически стойкой аппаратуры, труб, лабораторной посуды. Для защиты деталей от коррозии при температурах до 500—600 °C в машиностроении применяют стеклоэмали.

Пеностекло получают вспениванием жидкой стекольной массы при высокой температуре за счет введения газотвердых веществ — измельченных известняка, мела, угля. Пеностекло имеет малую плотность,

низкую теплопроводность и характеризуется высоким звукопоглощением. Это негорючий, термостойкий и химически стойкий материал.

Стеклокристаллические материалы (ситаллы) получают из стекла путем его полной или частичной кристаллизации. Название «ситаллы» образованно из слов «стекло» и «кристаллы». Ситаллы иногда называют стеклокерамикой. Содержание кристаллической фазы в ситаллах может составлять до 95 %. Размер кристаллов обычно не превышает 1—2 мкм.

Ситаллы являются плотными, непрозрачными, газонепроницаемыми, жесткими и твердыми материалами. Их механическая прочность в 2—3 раза выше, чем прочность стекла. Они хорошо сопротивляются абразивному износу. Сочетание низкого температурного коэффициента линейного расширения и высокой механической прочности придает им высокую термостойкость. Ситаллы характеризуются высокой химической стойкостью к действию кислот и щелочей и не подвержены коррозии при нагреве до высоких температур. Ситаллы совершенно не поглощают влагу.

Благодаря сочетанию легкости, прочности, твердости и технологичности ситаллы находят широкое применение в машиностроении. Из них изготавливают подшипники скольжения, работающие без смазки при температуре до 550 °С, поршни и детали выхлопа двигателей внутреннего сгорания, химическую аппаратуру, фильтры для вытягивания синтетических волокон, рабочие колеса и лопатки насосов, перекачивающих агрессивные жидкости с абразивами. Ситаллы используют в качестве жаро- и износостойких эмалей для защиты металлических деталей. Ситалловые эмали могут работать при температурах до 800—900 °С.

## 7. Керамические материалы

Керамикой называют материал, полученный спеканием отформованных смесей минеральных веществ. Исходными веществами для получения керамики служат глины, полевой шпат, кварц, каолины, оксиды алюминия, бария, титана, циркония и других элементов, а также некоторые бескислородные соединения металлов - карбиды и нитриды. При обжиге исходные вещества взаимодействуют между собой, в результате чего образуется многофазная структура, состоящая из кристаллической, аморфной стекловидной фаз и газовых пор.

Свойства керамики зависят от свойств фаз и их соотношения. Кристаллическая фаза определяет механическую прочность и термостойкость керамики. Стекловидная фаза выполняет роль связки, объемное содержание которой колеблется в широких пределах (1—40 %). С увеличением ее количества снижается прочность керамики. Еще более снижает прочность газовая пористость. В зависимости от степени разви-

тия пористости различают пористую и плотную керамики. В плотной керамике остаточная пористость не превышает нескольких процентов.

Оба вида керамических материалов широко используются в различных областях техники. Керамика с плотной структурой представлена различными материалами, применяемыми для изготовления хозяйственной посуды, предметов декоративно-художественного назначения, в качестве огнеупорного футеровочного материала, в электроизоляционной, электровakuумной технике и радиотехнической промышленности, в строительной промышленности для изготовления санитарно-строительных изделий, керамических плиток, труб, химически стойких (кислотоупорных) изделий. Пористые керамические изделия предназначены для фильтрации газов и жидкостей, для стерилизации минеральных вод и пищевых продуктов, звукопоглощения, теплоизоляции и теплозащиты.

В керамике отсутствуют свободные электроны, вследствие чего она характеризуется низкой электро- и теплопроводностью. Благодаря этим свойствам керамику используют для изготовления электро- и теплоизоляторов.

Высокая прочность химических связей в керамике обуславливает ее высокую температуру плавления и высокую химическую стойкость. Поэтому керамика широко применяется для футеровки печей и высокотемпературных реакторов.

Керамика имеет высокую твердость, жесткость, относительно высокую прочность при сжатии, недостаточную пластичность. В отличие от пластмасс керамические материалы не дают остаточных деформаций под действием механической нагрузки. Кроме того, они практически не подвержены старению.

К традиционной керамике относятся такие изделия, как глиняная посуда, черепица, фарфор, фаянс (табл. 35). Фарфоровую и фаянсовую массу получают из порошка каолина, кварца, полевого шпата, смешанных с водой. Вязкую массу прессуют в формах, сушат и обжигают при высокой температуре. Из фарфора изготавливают бытовую и химическую посуду, детали электрической и радиотехнической аппаратуры. Фаянс идет для изготовления менее ответственных деталей, например санитарно-технических изделий.

В процессе обжига формируется структура фарфора, определяющая его основные показатели и свойства. Различают твердый фарфор, обжигаемый при температуре 1380—1420 °С и выше, и мягкий фарфор, температура обжига которого ниже 1350 °С. По сравнению с мягким твердый фарфор содержит больше каолина и меньше полевого шпата.

Перспективным материалом для применения во многих отраслях техники является кварцевая керамика. Кварцевой керамикой называют материал, получаемый преимущественно из кварцевого стекла по кера-

мической технологии. Она обладает комплексом ценных физико-химических свойств, термостойкостью (способностью выдерживать резкие смены температуры без разрушения), огнеупорностью (способностью не разрушаться при высоких температурах), высокими электро- и теплоизоляционными свойствами, способностью сохранять свои размеры при высоких температурах. Кварцевая керамика по термостойкости является уникальным материалом. Ее термостойкость превышает термостойкость кварцевого стекла.

Т а б л и ц а 35. Свойства и области применения некоторых видов керамики

Вид керамики	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность, МПа, при			Огнеупорность	Область применения
		сжатии	растяжении	изгибе		
<b>Фарфор:</b>						
мягкий	2,3—2,5	270—300	—	50—65	1650	Широкий ассортимент хозяйственной посуды, предметы декоративно-художественного назначения, фильтры, изоляторы, санитарно-строительные изделия, химическое машиностроение
твердый	2,3—2,6	260—430	13—53	55—90	1670	
Кварцевая	1,9—2,1	250—500	19—26	32—42	1690—1700	Огнеупоры общего и специального назначения, материалы для ракетно-космической и ядерной техники, изделия высокой химической стойкости
Корундовая	3,1—4,0	100—570	—	—	1850—2000	Тигли, электроизоляция, каркасы трубчатых нагревателей, изоляция и челлы для термопар, футеровка индукционных печей
Из магнетита	3,4—3,5	1050—1400	90—100	145—165	2000—2200	
Плитка кислотоупорная	—	100—130	—	20—30	1580—1670	Футеровка реакционных аппаратов, емкостей, защита строительных конструкций, аппаратов в гидролизной промышленности

Большой интерес представляет техническая керамика, включающая искусственно синтезированные керамические материалы различного химического и фазового состава, большинство из которых обладает плотной структурой поликристаллического строения.

Области применения керамики постоянно расширяются (табл. 36). Ее применяют в транспорте при изготовлении стекол для подвижного состава и летательных аппаратов, элементов тормозов, свечей зажигания, газовых и температурных датчиков. В электрической промышленности и энергетике из керамики изготавливают электроды, нагревательные элементы сопротивления, лопатки высокотемпературных газовых турбин, контакты, теплоизоляторы. В медицине керамику применяют при изготовлении искусственных зубов, суставов, датчиков кровяного давления; в строительстве — при производстве цемента, стекла, теплоизоляционных материалов.

Т а б л и ц а 36. Основные классы и виды технической керамики, области ее применения

Класс	Вид	Область применения
1	2	3
I. Из высокоогнеупорных оксидов (оксидная керамика)	Из оксида алюминия (корундовая керамика)	Огнеупорные изделия, вакуумная техника, конструкционные детали, химически стойкие и электроизоляционные изделия
	Из диоксида циркония	Огнеупорные изделия, конструкционные детали
	Из оксида магния	Огнеупорные, химически стойкие изделия
	Из оксида кальция	То же
II. На основе силикатов и алюмосиликатов	На основе диоксида кремния	Авиация, металлургия
	Муллитовая и муллитокорундовая	Электроника, радиотехника
	Клиноэстатитовая	Вакуумная и радиотехника, электроника
	Форстеритовая	Вакуумная техника
III. На основе диоксида титана, титанатов, цирконатов	Кордиеритовая	Электроника
	Цирконовая	Электро- и радиотехника
	На основе диоксида титана (рутиловая)	Радиотехника, электроника
	На основе титанатов	Конденсаторы и пьезоэлементы, радиоэлектроника

1	2	3
	На основе цирконатов и соединений с пьезоэлектрическими свойствами	То же
IV. На основе шпинелей	Магнезиальная шпинель Феррошпинель	Огнеупорные изделия, электровакуумная и радиотехника Электроника и радиотехника
V. На основе хромитов редкоземельных элементов (РЗМ)	Хромитлантан	Высокотемпературные нагреватели, электропроводящие элементы
VI. На основе тугоплавких бескислородных соединений	Карбиды, нитриды, бориды, силициды	Огнеупорные изделия, электронагреватели конструкционные детали
VII. Конструкционные материалы	—	Конструкционные детали, огнеупорные изделия

Керамика, применяемая в машиностроении, должна иметь высокую прочность при обычной и повышенной температурах, высокую ударную прочность, твердость и износостойкость. Из керамики на основе оксида алюминия изготавливают рабочие органы шаровых, вибрационных мельниц, резцы и прочие инструменты, измерительные приборы, подшипники, механические уплотнения, трубки сопла, детали химического оборудования, валы и зубчатые колеса. Керамические материалы на основе диоксида циркония (рис. 152) применяют вместо инструментальных сталей и сверхтвердых сплавов. Это позволяет повысить к.п.д. процесса волочения, качество поверхности и стабильность размеров готовых изделий.

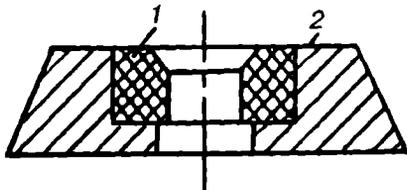


Рис. 152. Конструкция волоки:

1 — очко волоки (из диоксида циркония); 2 — корпус волоки (металлический)

Разрабатываются транспортеры и конвейеры с керамическими цепями из оксида алюминия. Эти конвейеры и транспортеры сборные, в них не применяют болтов, шарниров и других крепежных деталей. Они пред-

назначены для работы в агрессивных средах в случаях большого износа и высокотемпературных средах в пищевой и химической промышленности, где нельзя применять пластические массы из-за высоких температур.

Изучается возможность применения керамики из карбидов и нитридов кремния, оксида кремния и диоксида циркония при изготовлении цилиндров и поршней, применяемых для литья алюминия под давлением.

Японской фирмой «Киото серамикс» изготовлен экспериментальный керамический двигатель, не нуждающийся в охлаждении и защите от коррозии. Цилиндры двигателя изготовлены из нитрида кремния, фирма «Исудзу» выполняет из керамики головки, днища поршней, клапаны, внутренние стенки цилиндров, турбоагнетатели и коллекторы дизельных двигателей.

Керамику из оксидов кремния, циркония и карбида кремния предполагают применять для деталей нагнетательных гидравлических и пневматических насосов и даже компрессоров для рефрижераторов. Во всех случаях точность керамических деталей на порядок выше, чем металлических. Однако до сих пор область применения керамики в качестве материала для изготовления деталей машин и оборудования ограничена из-за хрупкости керамических материалов и их чувствительности к термическому удару. Преодоление хрупкости и повышение надежности керамики — одна из важнейших задач, решение которой теснейшим образом связано с процессами формования, спекания керамики и другими процессами.

## **8. Применение неметаллических материалов в криогенной, холодильной, пищевой и торговой технике**

При выборе неметаллических материалов для различных машин и механизмов необходимо прежде всего определить техническую и экономическую целесообразность применения этих материалов. Кроме того, для применения в пищевой промышленности необходимо учитывать требования, предъявляемые к материалам, находящимся в контакте с пищевыми продуктами и рабочими средами.

В криогенной технике широкое применение находят пластмассы, характеризующиеся низкой теплопроводностью, высокой удельной прочностью, эластичностью при криогенных температурах, высокой адгезией к металлам, хорошими антифрикционными свойствами при различных давлениях. Применение пластмасс позволяет существенно уменьшить теплоприток через тепловые мосты и теплоизоляцию, повысить герметичность арматуры, долговечность узлов трения, изготовить немагнитные криостаты, необходимые для сверхпроводящих систем,

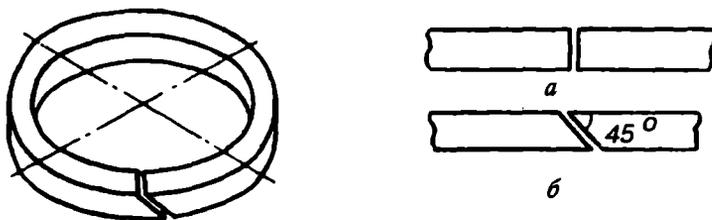


Рис. 153. Эскиз поршневых колец из фторопласта-4, применяемые в компрессорах холодильных машин:

*a* — прямой стык; *б* — косой стык

снизить металлоемкость арматуры. При криогенных температурах применяют фторопласты, поликарбонаты, полиамиды, полиакрилы, стеклопластики, вспененные пластмассы и др.

Так, фторопласты и поликарбонаты применяют при изготовлении уплотнений клапанов, стеклопластики нашли применение в качестве силовой теплоизоляции для изготовления опор, стержней-фиксаторов в криогенных резервуарах и других изделий. В стеклопластиках, используемых для изготовления криогенного оборудования, широко применяют эпоксидные смолы. Объемная доля смолы находится в пределах 17—20 %. С применением стеклопластиков в криогенной арматуре теплопритоки снизились в 2,5 раза при одновременном уменьшении габаритов арматуры на 20—25 %. В узлах трения при низких температурах используют антифрикционные материалы на основе фторопласта—4 (АМИП—15М; 4К20; 4С15М5 и др.). При высоких удельных нагрузках (до 200 МПа) направляющие втулки арматуры изготавливают из пластмасс на основе полиамидов с добавлением графита и нитрида бора.

В холодильной технике пластмассы благодаря их низкой теплопроводности, малой плотности, морозостойкости также являются перспективными конструкционными материалами. Пластмассы (полиэтилен, полипропилен, полистирол, фторопласты, винилпласты, поликарбонаты, стеклопластики и др.) используют для изготовления деталей машин и аппаратов холодильного машиностроения: уплотнительных прокладок, трубопроводов, емкостей, внутренних облицовочных деталей бытовых и промышленных холодильников и т.д. (рис. 153, 154).

Большое значение в холодильной и криогенной технике имеют термопластичные вспененные конструкционные пластмассы, применяемые для ответственных деталей различных конструкций. Вспененные пластмассы называют пенопластами, если большая часть ячеек изоли-

рована одна от другой, или поропластами, если большая часть ячеек сообщается. Пенопласты обладают хорошими теплоизоляционными и влагозащитными свойствами.

Конструкционные пенопласты получают на основе термопластов (полистирола, полиэтилена, полипропилена и др.) с добавлением химических и физических пенообразователей. Конструкционные пенопласты не только заменяют дорогие и дефицитные материалы (металл, древесину и др.), но и позволяют изготавливать изделия, производство которых из других материалов является трудоемким или вообще невозможным. Они наиболее эффективны для получения крупногабаритных и вместе с тем точных изделий.

В холодильной технике пенопласты (пенополистирол, пенополиуретан и др.) используют для изготовления стационарных и передвижных установок, ими заполняют полости между внутренней и внешней обшивками в изотермических вагонах, автофургонах, судах-рефрижераторах, цистернах для перевозки продуктов, они применяются для изготовления производственного и торгового холодильного оборудования. Использование пенополиуретанов при изготовлении промышленных и бытовых холодильников позволяет (при сохранении внешних размеров холодильников, за счет уменьшения толщины стенок) увеличивать полезный объем. Использование, например, пенополиуретана ППУ—309 в качестве материала для изоляции промышленных бытовых холодильников уменьшает толщину изоляции с 50—60 до 25—30 мм. Это позволяет увеличить полезный объем холодильников на 25 %. Благодаря высокой удельной прочности пенополиуретанов и их хорошей адгезии к металлам в качестве облицовок таких холодильников можно использовать тонкую жесть или пластмассы. В пищевом и торговом машиностроении очень широко используются различные виды термопластов и реактопластов. Пластмассы, применяемые в этих областях техники, непосредственно контактируют с пищевыми продуктами. Они не должны содержать вредных для здоровья человека элементов или вступать в реакцию химического взаимодействия с продуктами, разрушаться под действием пищевых сред, моющих и дезинфицирующих растворов.

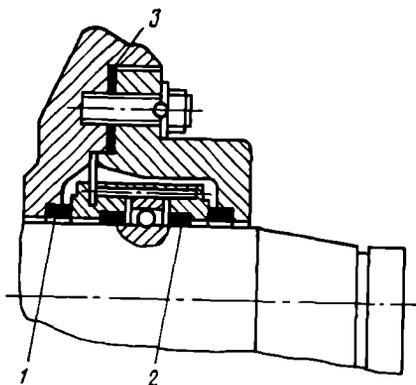


Рис. 154. Эскиз сальника уплотнения конца вала поршневого холодильного компрессора:

1 — графит; 2 — бензомаслостойкая резина; 3 — паронит

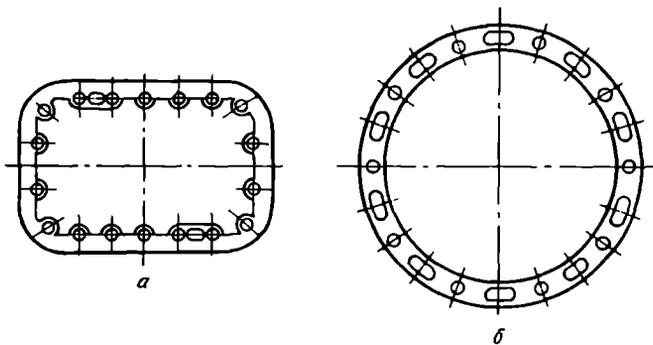


Рис. 155. Виды прокладок холодильного компрессора для:  
*a* — крышки цилиндра; *б* — крышки сальника

К пластмассам, разрешенным Минздравом России к использованию в пищевом и торговом машиностроении, относятся аминопласты, винилпласты, поликарбонаты, полипропилен, полистирол, полиуретан, поливинилхлорид, полиэтилены высокого и низкого давления, фторопласты, волокниты, пенопласты и др. Их применяют в качестве конструкционных материалов для изготовления деталей машин, насосов, аппаратов, резервуаров, трубопроводов, контейнеров, пакетов, мешков, различной тары, посуды, жестких емкостей для упаковки и хранения продуктов. Так, пластмассовые узлы и детали используют в транспортирующих машинах и элеваторно-складском хозяйстве: винтовые и лотковые спуски, кожухи вентиляторов, диски и цилиндры к триерам, ситовые рамы, бункеры для зерна и муки и т.д. Из пластмасс изготавливают втулки, диски, лопастные колеса бутылкомоечных машин, звездочки (рис. 155), ролики и цепи транспортеров, воронки, мерники дозирующих автоматов и др. Антикоррозионные свойства фторопласта—4 позволили использовать его для формования печенья, карамели и облицовки валов для раскатки теста, в матрицах для макаронных прессов.

Резины используют в криогенной, холодильной, пищевой и торговой технике для изготовления различных деталей и изделий, подвергаемых большим деформациям, способных без разрушения за счет обратимого изменения формы гасить удар и вибрацию. Кроме того, резины используют как мягкие материалы прокладок и покрытий, стойких к действию химикатов и истиранию (рис. 154, 157). Из резин изготавливают шланги, нагнетающие и всасывающие рукава, соединительные муфты для труб, транспортные ленты, приводные ремни, эластичные муфты, втулки (рис. 156), пластины, экраны, мембраны, диафрагмы, прокладки (рис. 155), манжеты, кольца, пробки, кабельную изоляцию, предметы защитной одежды и обуви. Из пористой резины изготавливают мягкие

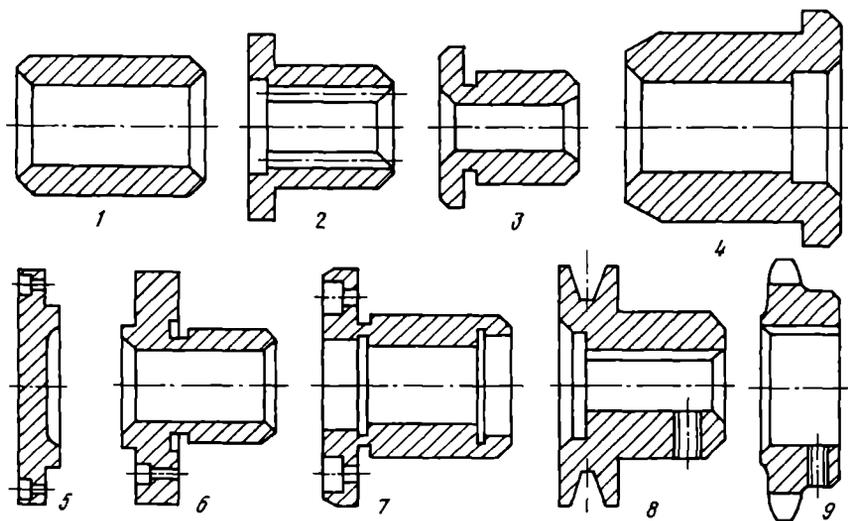


Рис. 156. Разновидности деталей, изготовленных из пластмасс:  
1—7 — втулки разного назначения; 8 — шкив; 9 — звездочка

теплоизоляционные прокладки, коврики, окантовку, в том числе для утепления дверей и окон холодильных шкафов.

Для изготовления эластичных охлаждаемых деталей холодильных и криогенных установок пригодны только достаточно морозостойкие резины на основе каучуков: СКС, СКД, НК, СКБ, СНК, СКТ (ГОСТ 14924—75Е, 14925—79, ТУ 103691—89, 15628—79Е). Для непосредственного контакта с пищевыми продуктами пригодны только «пищевые» резины, в частности СК—30, АРКМ—15, НРМ—36А, ИР—14А (ГОСТ 17133—83) и др. Применение клеевых материалов позволяет получать экономию традиционных материалов и создавать новые конструкции. Клеи применяют для крепления теплоизоляции резервуаров криогенных жидкостей. С помощью клеев созданы металлополимерные матричные теплообменники, клеи используют для приготовления резинотканевого материала на основе капроновой ткани для гибких вкладышей на железнодорожных цистернах-муковозах, предназначенных для хранения плодов и овощей, для герметизации люков и фланцевых соединений, для склеивания пакетов, картонной и бумажной тары, для приклеивания этикеток, склеивания фольги с пергаментом и т.д.

На предприятиях холодильной, криогенной и пищевой промышленности для защиты от внутренней и наружной поверхности металлических резервуаров и оборудования применяют различные грунтовки,

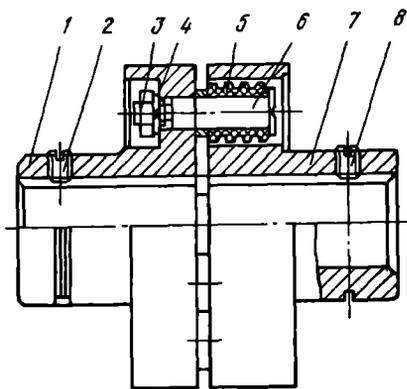


Рис. 157. Эскиз муфты привода вентиляторов кондиционеров:

1, 7 — левая и правая соответственно полумуфты; 2, 8 — стопорные винты; 3 — гайка; 4 — шайба; 5 — резиновая втулка; 6 — палец

эмали и лаки на эпоксидной основе, обладающие хорошей адгезией к черным и цветным металлам и разным неметаллическим подложкам, высокими физико-механическими свойствами, водостойкостью, стойкостью к действию различных щелочных, кислотных, солевых растворов и других агрессивных сред.

Например, шпаклевку ЭП—00—2 на основе смолы ЭД—20 (ГОСТ 10587—84) применяют совместно с грунтовкой ЭП—01 и эмалью ЭП—73 для защиты внутренней поверхности металлических резервуаров и оборудования в пищевой промышленности в комплексном трехслойном покрытии. Грунтовку ЭП—02 и эмаль

ЭП—74 применяют в комплексном четырехслойном покрытии, два слоя которого эмалевые.

Широкое применение получили эпоксидные лакокрасочные материалы (эмаль ЭП—5147, лаки ЭП—547, ФЛ—559, ЭП—5118 ГОСТ 14147—80 и др.) в консервной промышленности для лакирования листов из белой жести и алюминия, предназначенных для изготовления консервных банок под мясные, рыбные, овощные консервы.

Белую эмаль ЭП—148 (ГОСТ 10982—79) на основе эпоксидной смолы Э—40 применяют для окраски холодильников и других электробытовых приборов.

Стекло — единственный прозрачный твердый материал, пригодный для контакта со всеми пищевыми продуктами при любых температурах. Широко применяется листовое стекло различной толщины (2—20 мм) для окон холодильных установок, прозрачных полок, столов, витрин и т.д. Для автоклавов и другой аппаратуры, работающей под давлением при повышенной температуре, применяют термостойкое стекло. Из стекла изготавливают тару (бутылки, стаканы и др.), трубы для транспортировки хрупких продуктов, приемные патрубки. Стекло широко используют для производственного и лабораторного оборудования пищевых торговых и холодильных предприятий.

Пеностекло применяют как качественный теплоизоляционный материал. В этих целях используют и теплоизоляционную стекловату. Кроме того, стекло используют в качестве покрытий (стеклоэмали и глазури).

В криогенной и холодильной технике области применения керамики пока ограничены. В пищевой технике используют шамотный или тугоплавкий кирпич для футеровки топок нагревательных устройств, печей, варочных котлов и т.д. Фаянсовая и фарфоровая керамика применяется как основной материал для ванн, раковин в конструкциях моечных установок, а также для тарелок, кружек и другой посуды. Кислотоупорными или другими керамическими плитками выкладываются моечные и травильные ванны, стенки моечных камер, полы и стены помещений. Различные виды керамики используются в приборах и устройствах автоматического контроля и регулирования производственных процессов

### Раздел III

## ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

В соответствии с современной терминологией литье — есть способ изготовления заготовки или изделия заполнением полости заданной конфигурации жидким металлом с последующим его затвердеванием. Заготовку или изделие, получаемые методом литья, называют *отливкой*.

Литейное производство — основная заготовительная база всех направлений машиностроения, приборостроения и ряда других отраслей народного хозяйства. Во многих случаях литье — единственно возможный способ получения заготовок сложной формы. Литые заготовки являются наиболее дешевыми, а зачастую и имеют минимальный припуск на механическую обработку. Эффективность литейного производства характеризуется коэффициентом использования металла (КИМ) — отношением массы детали к массе заготовки (табл. 37).

Большинство отливок получают в соответствии со схемой, приведенной на рис. 158.

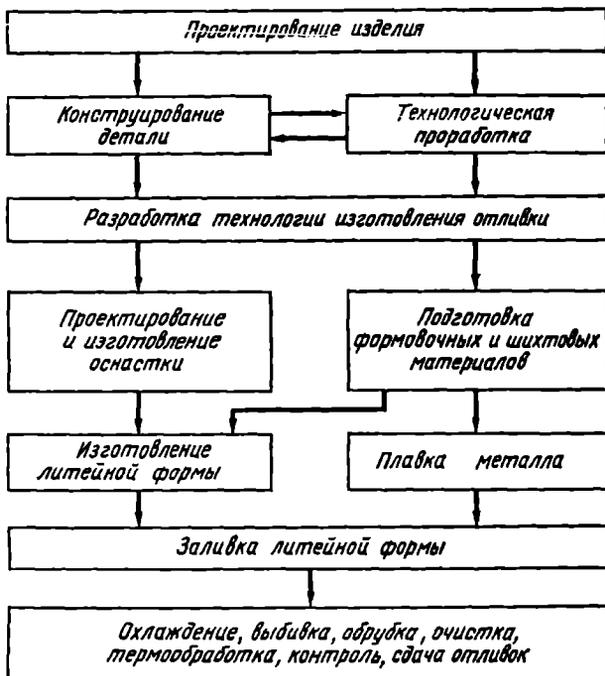


Рис. 158. Общая схема получения отливок

Способы изготовления отливок делятся на две группы: литье в обычные песчаные формы; специальные способы литья.

Способы литья в песчаные формы в свою очередь могут быть ручными и машинными (механизированными и автоматизированными).

Специальные методы литья подразделяют на: литье в кокиль (в металлические формы свободной заливкой); литье по выплавляемым, растворяемым, выжигаемым моделям; центробежное литье; литье под давлением; литье в оболочковые формы; другие способы литья.

Т а б л и ц а 37. Значения КИМ для отливок и различных видов заготовок

Вид заготовки	КИМ	Вид заготовки	КИМ
Литье:		Профильный прокат	0,70
под давлением	0,95	Штамповка (горячая)	0,45
по выплавляемым моделям	0,90	Прутки	0,35
в оболочковые формы	0,80	Ковка свободная	0,30
в кокиль	0,75		
в песчаные формы	0,70		

## Глава 1

# ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК В ПЕСЧАНЫХ ФОРМАХ

### 1. Общие понятия

Назначение литейной формы состоит в обеспечении:

1) необходимой конфигурации и размеров отливки; 2) заданной точности и качества поверхности отливки; 3) определенной скорости охлаждения залитого металла, способствующей формированию требуемой структуры сплава и качества отливок.

Эскиз отливки показан на рис. 159, а. Для изготовления песчаной формы этой отливки необходимо иметь модельный комплект и другую литейную оснастку. Модельный комплект включает в себя всю оснастку для получения полости формы. В рассматриваемом случае он состоит из модели (рис. 159, б), стержневого ящика (рис. 159, в), моделей элементов литниковой системы (на рисунке не показаны), прибыли / и выпора 2. При необходимости модельный комплект должен содержать также шаблоны для контроля размеров и конфигурации формы. Имея всю необходимую оснастку, можно изготовить литейную форму (рис. 160).

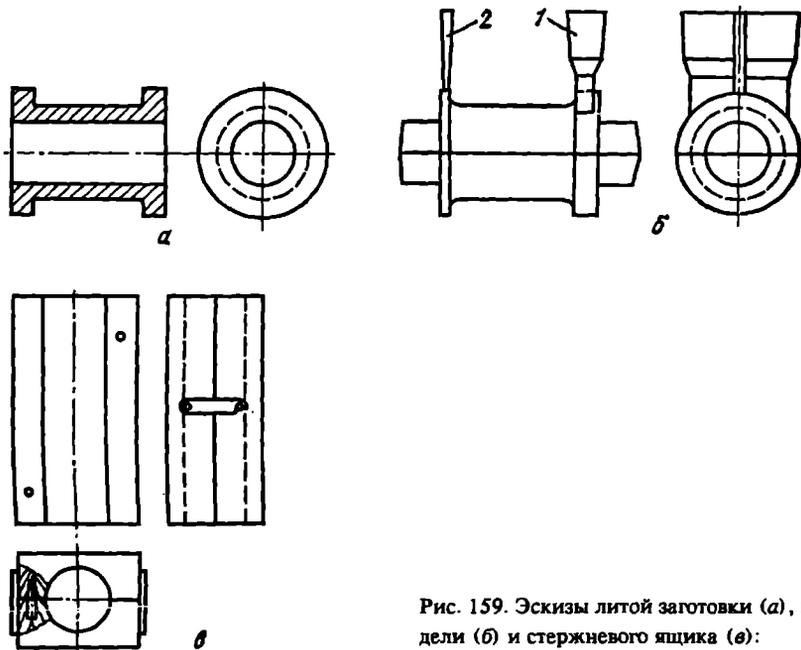


Рис. 159. Эскизы литой заготовки (а), модели (б) и стержневого ящика (в):

1 — прибыль; 2 — выпор

Модель служит для получения отпечатка в форме 1, стержневой ящик — для изготовления стержня 8, который устанавливается в форму с целью создания полости в отливке. Назначение других элементов литейной формы состоит в следующем. Совокупность каналов, создаваемых литниковой воронкой 10, стояком 11, зумпфом 13, шлакоуловителем 12 и питателями 14, 15, называют *литниковой системой*. Литниковая система нужна для подвода жидкого металла из литейного заливочного ковша, в который расплавленный металл поступает из плавильного агрегата или раздаточного ковша, к полости формы 1. Зумпф предохраняет нижнюю полуформу от размыва и попадания продуктов размыва (главным образом — частиц формовочной смеси) в полость формы, а следовательно, в отливку. Шлакоуловитель необходим для предотвращения попадания шлака и других частиц в полость формы.

Прибылью 7 называют технологический прилив, который, затвердевая в последнюю очередь, предотвращает образование усадочных раковин в теле отливки. Усадочная раковина при этом формируется в прибыли. Через выпор 5 выходит воздух и другие газы, которые образуются в полости формы во время ее заливки расплавленным металлом.

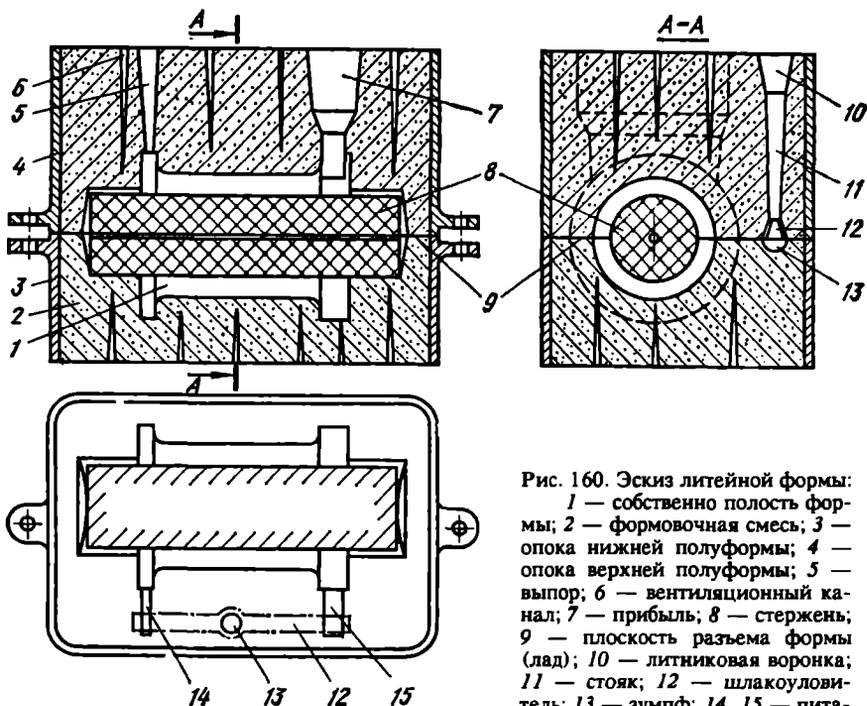


Рис. 160. Эскиз литейной формы:  
 1 — собственно полость формы; 2 — формовочная смесь; 3 — опока нижней полуформы; 4 — опока верхней полуформы; 5 — выпор; 6 — вентиляционный канал; 7 — прибыль; 8 — стержень; 9 — плоскость разъема формы (лад); 10 — литниковая воронка; 11 — стояк; 12 — шлакоуловитель; 13 — зумпф; 14, 15 — питатели

Газы возникают и в порах формовочной и стержневой смеси 2. Если их не удалять, то они могут пройти через границу форма—металл и попасть в отливку, образуя так называемые газовые раковины. Поэтому для лучшего удаления газов в полуформах верха и низа, а также в стержнях устраивают вентиляционные каналы 6, способствующие выходу газов из формы.

Уплотнение формовочной смеси в верхних и нижних полуформах, как правило, выполняют в опоках 3, 4, представляющих собой открытые с двух противоположных сторон металлические ящики. После изготовления полуформ низа, верха и стержней производят операции сборки форм и их заливки жидким металлом.

После заливки металла, его затвердевания и охлаждения до требуемой температуры производят выбивку форм (извлечение отливки из формы).

Выбитая из формы отливка подвергается обрубке (отделению литниковой системы, прибылей, заусенцев и т.д.) и очистке, затем, если необходимо, — термообработке. Перед сдачей в механический цех все отливки проходят необходимый контроль. При этом часть отливок мо-

жет быть отправлена на устранение дефектов — заварку, пропитку специальными составами и др. Основными причинами брака отливок являются трещины, усадочные и газовые раковины.

## 2. Формовочные материалы

Материалы, из которых изготовляют литейные формы, исключая металлургические, называют формовочными.

Все формовочные материалы разделяют на: исходные; формовочные смеси (для изготовления форм); стержневые смеси (для изготовления стержней); материалы окончательной отделки форм и стержней; отработанные — бывшие в употреблении смеси.

Исходными являются материалы, из которых приготавливают формовочные и стержневые смеси, а также материалы окончательной отделки форм и стержней.

Формовочные и стержневые смеси представляют собой предварительно подготовленные, взятые (в зависимости от назначения) в определенной пропорции, равномерно перемешанные между собой исходные материалы.

Материалами для окончательной отделки форм и стержней служат огнеупорные литейные краски, замазки, клеи и т.п. материалы, которые часто называют вспомогательными.

Формовочные и стержневые смеси, а также многие материалы окончательной отделки форм и стержней включают в себя три группы составляющих: огнеупорную основу, связующие материалы, специальные добавки.

Основной материал огнеупорной основы формовочных смесей — кварцевый песок. Кроме кварцевого песка используют магнезит, хромомагнезит, хромит, шамот, циркон и некоторые другие огнеупорные материалы.

Связующие материалы предназначены для связывания между собой частиц огнеупорной основы для придания им прочности. По объему потребления первое место среди этих материалов занимают формовочные глины, затем следуют жидкое стекло, различные синтетические смолы, прочие связующие.

Формовочные глины представляют собой водные алюмосиликаты или соли поликремниевых кислот общего вида



где  $n$ ,  $m$ ,  $l$ ,  $b$ ,  $q$  — коэффициенты, изменяющиеся в зависимости от минералогического состава глины в пределах от 0 до 6.

Жидкое стекло является коллоидным водным раствором силиката натрия общего состава  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot q\text{H}_2\text{O}$  (упрощенно  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Здесь  $n \sim 2 \dots 3$ . При использовании жидкого стекла в качестве связующего

материала наиболее широкое распространение получил  $\text{CO}_2$ -процесс, т.е. упрочнение смесей, содержащих жидкое стекло, продувкой газобразной углекислотой. При этом между жидким стеклом и углекислым газом идет реакция, в результате которой образуется гель кремнекислоты, связывающий между собой частицы огнеупорной основы смеси. Большое преимущество жидкостекольных смесей — их нетоксичность и низкая стоимость, недостаток — плохая выбиваемость.

В последние десятилетия в литейном производстве в качестве связующих материалов все большее применение находят синтетические смолы. В настоящее время используют фенолформальдегидные, карбамидные, фурановые, полиэфирные и некоторые другие смолы, а также многочисленные их сочетания. При отверждении таких смесей идут реакции поликонденсации или полимеризации смол, инициируемые катализаторами отверждения либо теплотой за счет нагрева смесей. В результате реакций в большинстве случаев получаются полимеры, которые, обволакивая зерна огнеупорной основы, прочно соединяют их между собой.

Кроме рассмотренных материалов в качестве связующих используют различные побочные продукты целлюлозного и сахарного производства, цементы, некоторые виды растительных масел и многие другие материалы.

Специальные добавки предназначены для улучшения технологических и рабочих свойств смесей и отделочных материалов. С этой целью в формовочные смеси вводят каменноугольную пыль, мазут, древесные опилки, торфяную или асбестовую крошку, различные поверхностно-активные вещества и другие материалы.

Приготовление формовочных и стержневых смесей состоит в подготовке исходных материалов (сушке, размоле, просеивании и т.д.) и смешивании составляющих на специальном оборудовании (бегунах, шнековых смесителях и т.п.).

Основными свойствами формовочных и стержневых смесей являются прочность на сжатие и разрыв, поверхностная прочность или осыпаемость, газопроницаемость (способность смеси пропускать газы), гигроскопичность, формуемость, текучесть, уплотняемость, выбиваемость и некоторые другие. Все они контролируются стандартными методиками на соответствующих приборах.

Составы и уровни свойств смесей назначают в зависимости от характера технологического процесса в свою очередь являющегося функцией большого числа факторов — масштаба производства, материала, массы, степени сложности, тонкостенности отливок и др.

### 3. Оснастка

Оснащение литейных цехов условно можно разделить на две группы — оборудование и оснастка. К оборудованию относят все машины и агрегаты, позволяющие облегчить труд, ускорять и удешевлять технологический процесс изготовления отливок. С этим видом оснащения будем знакомиться по мере изучения различных технологических процессов литья. Сейчас несколько более подробно ознакомимся с оснасткой, к которой обычно относят модели, стержневые ящики, опоки, модельные плиты и прочие приспособления, необходимые для изготовления литейных форм.

При машинной формовке, а часто и при ручном изготовлении форм, модели монтируются на модельные плиты, изготавливаемые из чугуна или алюминиевых сплавов. Модельные плиты содержат элементы их крепления к столу формовочной машины или автомата, центрирующие штыри для фиксации опоки на модельной плите во время формовки, элементы установки и крепления моделей отливки и литниковой системы. Чаще используют так называемые односторонние модельные плиты, т.е. такие, на которых модель находится только на одной стороне.

Другими элементами литейной оснастки служат опоки, стержневые ящики литниковых чаш и воронок, различные кондукторы для сборки стержней в блоки еще до установки их в нижнюю полуформу, всевозможные контрольные приспособления, плиты для сушки стержней и т.д.

### 4. Ручная формовка

Ручная формовка применяется при единичном производстве отливок — ремонтное литье, уникальные единичные отливки и т.п. Существует большое разнообразие методов ручной формовки, применение которых зависит от вида отливки (сложность, габариты и масса, марка сплава), условий производства, срочности изготовления и т.д. Здесь важно понять общий смысл процесса формовки, не вдаваясь в особые тонкости.

Положим, что нужно получить отливку, эскиз которой представлен на рис. 161, а. Материал модели — чаще всего дерево. Размеры модели должны быть больше размеров отливки, во-первых, на величину усадки металла в процессе его охлаждения в форме, во-вторых, на величину припуска на механическую обработку, если таковая предусмотрена.

В рассматриваемом случае наиболее простой является формовка по цельной модели с применением модельных плит. Модельные плиты могут быть деревянными или легкими металлическими. Модель 1 устанавливают на модельную плиту 2, на которую помещают опоку 3 (рис. 161, б). Поверхность модели и плиты посыпают разделительным составом для уменьшения прилипания смеси к оснастке (разделительный состав — чаще всего сухой кварцевый песок). Затем на модель насыпают

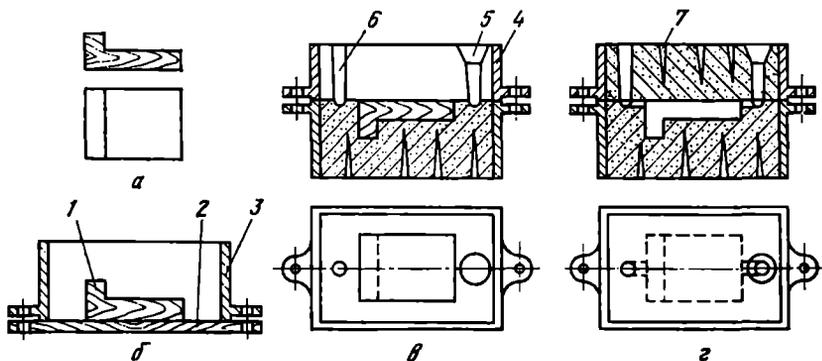


Рис. 161. Эскизы отливки (а), технологических этапов формовки (б, в) и собранной формы (з)

формовочную смесь, уплотняя ее для повышения прочности трамбовкой — ручной или пневматической. После уплотнения излишки смеси счищают рейкой, опоку вместе со смесью и модель снимают с модельной плиты, одновременно поворачивая полуформу на  $180^\circ$ , в нескольких местах ее прокалывают стальной проволокой с заостренным концом (душником) для создания вентиляционных каналов. На перевернутую опоку устанавливают вторую опоку 4 таких же размеров (по высоте опоки могут быть разными), модели стояка с воронкой 5 и выпора 6 (рис. 161, в), после чего в опоку насыпают формовочную смесь, уплотняя ее. По относительному расположению эта опока называется опокой верха. После полной набивки опоки верха излишки смеси срезают рейкой и производят вентиляционные наколы 7. Теперь нужно удалить модели отливки, стояка и выпора. Две последние извлекают из опоки верха сразу после накалывания вентиляционных каналов, после чего верхнюю опоку снимают с нижней, поворачивая ее на  $180^\circ$  и устанавливая на заранее подготовленную ровную поверхность. Модель, находящуюся в нижней опоке, осторожно расталкивая, извлекают с помощью специальных приспособлений. От отпечатка модели стояка в нижней полуформе вручную прорезают канал, через который во время заливки жидкий металл пойдет от стояка в полость формы (для упрощения шлакоуловитель и прибыль не ставим). Подобный канал прорезают и к выпору. Устраняют возможные дефекты формы, возникшие при извлечении моделей и других операциях, обдувают обе полуформы сухим сжатым воздухом для удаления возможного засора и производят сборку формы. Готовая форма показана на рис. 161, з.

Для получения более высокого качества поверхности отливок в необходимых случаях используют два вида формовочной смеси — облицовочную и наполнительную. Облицовочной смесью формируют лицевой слой формы, с которой непосредственно соприкасается жидкий металл во время его заливки и последующего охлаждения. Для уменьшения физико-химического взаимодействия между металлом и материалом формы в состав облицовочной смеси вводят более огнеупорные материалы. Из нее создают слой толщиной 10—50 мм, остальное пространство заполняют более дешевой наполнительной смесью. Такой метод несколько усложняет производство, но позволяет повышать его технико-экономическую эффективность.

Кроме того, применяют формовку в почве, в двух опоках с разъемной моделью, с остальными частями модели и т.д. Применяют также формовку с использованием жидких самотвердеющих смесей (ЖСС), когда опоку (или стержневой ящик) заполняют смесью, способной течь. При этом вместо обычного уплотнения трамбовкой применяют небольшое доуплотнение смеси вибрацией на специальной вибростенде. Смесью является самотвердеющей (отпадает операция сушки), поскольку в ее состав входят материалы, инициирующие процесс отверждения связующего. Такая смесь после заливки в опоку (или стержневой ящик) через некоторое время, которое можно регулировать, приобретает прочность, достаточную для выполнения дальнейших технологических операций.

## 5. Машинная формовка

Для повышения производительности труда и получения более точных отливок применяют машинную формовку. Машинные способы изготовления форм находят применение во всех видах производства, включая единичное. Существует большое разнообразие формовочных машин. По способу уплотнения формовочной смеси формовочные машины делятся на встряхивающие, прессовые, вибропрессовые, пескодувные, пескометные и комбинированные. Извлечение модели из уплотненной формы может производиться за счет поворота стола или специальными подъемниками. Конструктивно формовочные машины изготавливаются одно- и многопозиционными, работающими в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режимах.

На заводах массового производства (автомобильных, тракторных и др.) действуют автоматизированные формовочные линии. На рис. 162 приведены схемы уплотнения формовочных смесей различными методами.

При уплотнении на встряхивающих формовочных машинах (рис. 162, а) модельная плита 1 с моделью 2, опокой 3 и наполнительной рамкой 4 устанавливаются на стол формовочной машины 5. Из бункера

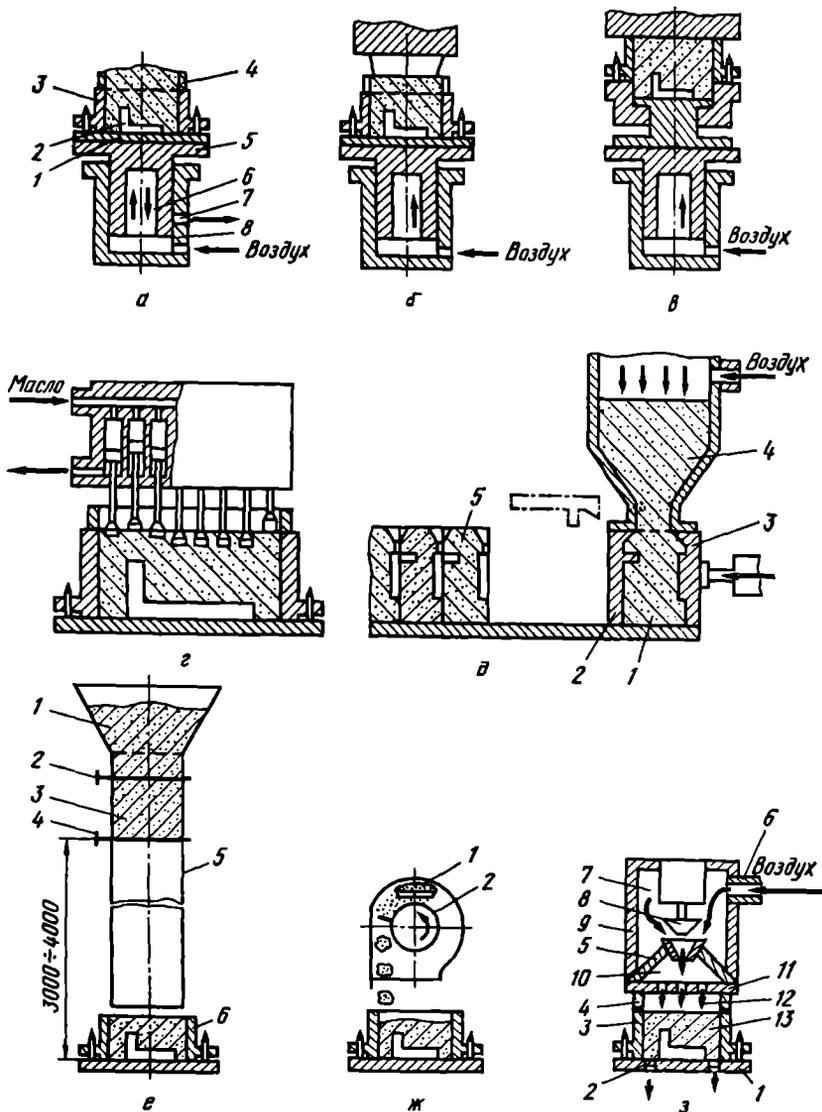


Рис. 162. Схемы уплотнения формовочных смесей различными методами:  
 а — встряхиванием; б — верхним прессованием; в — нижним прессованием;  
 г — прессованием многоплунжерной головкой; д — пескодувно-прессовым; е —  
 гравитационным; ж — пескочетным; з — импульсным

сверху в опоку насыпают смесь. Под поршень 6 подается воздух под давлением  $5-6 \cdot 10^5$  Па, поднимающий стол до тех пор, пока не откроется выпускное отверстие 7, через которое воздух из-под поршня уходит в атмосферу. Стол при этом резко опускается вниз, ударяясь о цилиндр 8. Смесь уплотняется за счет движения по инерции вниз. Так повторяется несколько десятков раз. Смесь хорошо уплотняется внизу у модели, верхние же ее слои остаются недоуплотненными. Доуплотнение осуществляют вручную или допрессовкой на той же машине. В России работают встряхивающие и встряхивающе-прессовые машины с наибольшими размерами опок «в свету»  $2500 \times 2000 \times 800$  мм грузоподъемностью до 10 т производительностью 8 полуформ в час.

Прессование полуформ может быть верхним и нижним. При верхнем прессовании в большей мере уплотняются слои формовочной смеси, расположенные в верхней наполнительной рамке (рис. 162, б), независимо от того, поднимается ли опока к прессовой колодке, опускается ли прессовая колодка на формовочную смесь, расположенную в наполнительной рамке. При нижнем прессовании (рис. 162, в) в большей мере уплотняются слои смеси, расположенные на модельной плите и самой модели. Для достижения большей равномерности уплотнения формовочной смеси по высоте опоки прессовую колодку иногда делают профильной, повторяя профиль модели. Прессовые формовочные отечественные машины производят до 120 полуформ в час с наибольшими размерами опок в свету  $760 \times 680 \times 110$  мм.

Разновидностью верхнего прессования является уплотнение формовочной смеси так называемой многоплунжерной прессовой головкой (рис. 162, з), состоящей из нескольких десятков независимых плунжеров, работающих под давлением масла или воздуха. Такое прессование обеспечивает наибольшую равномерность уплотнения по всему объему опоки.

При пескодувно-прессовом уплотнении (рис. 162, д) весь процесс осуществляется в два этапа. Сначала в полость 1, заключенную между вертикально расположенными модельными плитами 2 и 3, пескодувным методом с помощью давления воздуха подают предварительно уплотненную формовочную смесь 4. Затем модельную плиту 3 поршнем подают влево, прессуя смесь. По окончании прессования плита 2 сначала отходит влево, затем разворачивается вверх, занимая положение, показанное штрих-пунктиром на рис. 162, д. Ком смеси модельной плитой 3 подают влево до упора в предыдущий ком 5, плотно подгоняя его к ранее изготовленным формам, после чего все формы передвигаются влево к заливочной установке. Как видно, основная особенность состоит в том, что одновременно формируются обе полуформы в одном формовочном коме смеси, т.е. используются две стороны полуформы. Весь процесс от уплотнения смеси до заливки металлом автоматизирован. Производи-

тельность линии составляет 360 форм/ч и более (при наличии стержней — 300 и более форм/ч). Существует также процесс вакуумно-прессового уплотнения форм.

При гравитационном уплотнении (рис. 162, е) смесь поднимается на определенную высоту в бункер 1, из которого через шибер 2 дозатора 4 смесь в виде компактного кома по шахте 5 свободно падает в опоку или стержневой ящик 6. Уплотнения только гравитационным способом недостаточно. Поэтому для доуплотнения применяют подпрессовку давлением  $5-10 \cdot 10^5$  Па или вибрацию.

При единичном и мелкосерийном производстве крупных отливок для уплотнения форм используют пескометный способ (рис. 162, ж). Формовочная смесь ленточным транспортером 1 подается на быстро вращающийся ротор с ковшом 2. Последний, захватывая смесь, бросает ее в опоку, установленную на модельной плите, или в стержневой ящик, производя таким образом уплотнение. Пескометная головка может перемещаться в горизонтальной плоскости. Управляемое пескометом осуществляет оператор. Производительность пескометов колеблется от 6 до  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$  уплотненной формовочной смеси.

При изготовлении форм импульсным методом (рис. 162, з) на модельную плиту 1 с вентилями 2 (тонкие отверстия, через которые проходит воздух, но не проходит смесь) устанавливают опоку 3 и наполнительную рамку 4, после чего опоку с наполнительной рамкой засыпают формовочной смесью. Над наполнительной рамкой устанавливают импульсную головку 5 и вся оснастка прижимается друг к другу (герметизируется). Из специальной магистрали 6 в ресивер 7 головки поступает сжатый воздух. При уплотнении запорный клапан 8 поднимается вверх, пропуская сжатый воздух через отверстие 9 в полость 10. Из полости 10 через отверстия 11 воздух устремляется в полость прессования 12, уплотняя смесь 13. Пройдя через смесь, воздух уходит в атмосферу через вентили 2. При этом давление над смесью от максимального падает до атмосферного за долю секунды. Под действием сжатого воздуха смесь наполнительной рамки перемещается в опоку и уплотняется. Уплотнение производится однократным импульсом.

Разновидность импульсного воздушного уплотнения — уплотнение взрывом. С этой целью вместо воздуха в импульсную головку, содержащую взрывное устройство, подают взрывчатую смесь, которая в нужный момент взрывается. Продукты взрыва направляются к формовочной смеси, уплотняя ее аналогично воздушному импульсу.

Существуют и другие способы уплотнения смеси.

В литейных цехах массового производства России успешно работают механизированные, автоматизированные и автоматические формовочно-литейные линии. Установка стержней на автоматических формовочных линиях осуществляется роботами-манипуляторами.

## 6. Изготовление стержней

Стержни — есть элементы литейных форм, служащие для образования отверстий, полостей, а также сложных внешних очертаний отливок. Стержни получают ручными и машинными способами.

Технология ручного изготовления стержней во многом определяется сложностью стержней и соответственно конструкцией стержневого ящика и характером связующего материала стержневой смеси. В самом общем виде операции изготовления стержня могут быть следующими.

Сначала стержневой ящик частично наполняют стержневой смесью, которая легко уплотняется, затем в него устанавливают металлическую арматуру — каркасы (необходимые для придания стержню манипуляторной прочности), после чего ящик снова заполняют смесью, которая по мере заполнения уплотняется. Так поступают до полного заполнения всего объема стержневого ящика. После очистки излишков смеси для улучшения вентиляции стержень прокалывают душником. Дальнейшие операции зависят от вида связующего материала. Если стержень подвергают сушке (связующие — формовочная глина, растительные масла и т.п.), его извлекают из стержневого ящика, помещают на сушильную плиту, которую затем совместно со стержнем помещают в сушило, где производится сушка (а следовательно, и упрочнение). Иногда стержни устанавливают в форму без сушки, сырыми. Если связующее — жидкое стекло, то чаще стержень продувают углекислотой, в результате чего он упрочняется. Сушке такие стержни в большинстве случаев не подлежат. При использовании самотвердеющих смесей после уплотнения смесь в стержневом ящике некоторое время выдерживают, пока прочность не достигнет манипуляторной. Затем стержень извлекают из ящика. Такие стержни также не сушат. Могут быть другие разновидности ручного изготовления стержней. Так, уже ранее упоминались ЖСС, когда стержневую смесь наливают в стержневой ящик и доуплотняют вибрацией. Смесь самоотверждается в результате последующей выдержки в ящике. Многие стержни изготавливают из двух половинок, которые затем склеивают между собой. Для облегчения уплотнения используют различные инструменты — пневматические трамбовки, ручные встряхивающие столы, облегчающие также и извлечение стержня из ящика и др.

Большую часть литейных стержней изготавливают различными машинными способами. Основными типами стержневых машин являются встряхивающие с поворотным столом, встряхивающие с перекидным столом, вибропрессовые, мундштучные, пескодувные и пескострельные. Первые три типа машин ничем не отличаются от машин для изготовления форм. При изготовлении стержней на этих машинах вместо

модельных плит и опок устанавливаются стержневые ящики. В остальном процесс аналогичен формовке.

В мундштучных машинах стержневой ящик заменен сменной гильзой — мундштуком, сечение которого определяет сечение стержня (квадратное, круглое, комбинированное и др.). Стержень любой длины получают выдавливанием из мундштука машины уплотненной смеси. Уплотнение производится возвратно-поступательным движением поршня машины или шнеком.

Схемы пескодувных и пескострельных машин представлены на рис. 163.

В пескодувной машине к надувной плите снизу пневмопоршнем поднимается стержневой ящик. В рабочий резервуар подается стержневая смесь. Рабочее давление воздуха составляет  $5-6 \cdot 10^5$  Па. В случае пескодувной машины (рис. 163, а) сжатый воздух 1 подается на верхнюю поверхность стержневой смеси 2, находящейся в резервуаре 3. Смесь вместе с воздухом через вдвунные отверстия 4 надувной плиты 5 машины попадает в полость стержневого ящика 6. Воздух через венты 7 ящика уходит в атмосферу цеха. В пескострельных резервуарах (рис. 163, б) смонтирована специальная гильза 1 с щелевыми отверстиями 2, 3, вертикальными в нижней части и горизонтальными в верхней. Через эти отверстия воздух из ресивера в момент выстрела с большой скоростью устремляется в рабочий резервуар со смесью, выталкивая ее в полость стержневого ящика 4. Удаление воздуха в атмосферу такое же, как и в пескодувной машине. Уплотнение стержневой смеси в пескодувных и пескострельных машинах осуществляется благодаря кинетической энергии струи сжатого воздуха со смесью.

Отверждение уплотненных стержней может осуществляться различными способами в зависимости от вида связующего материала, определяемого

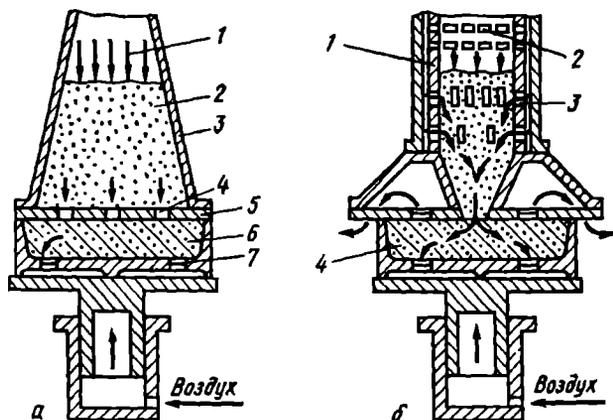


Рис. 163. Схемы пескодувной (а) и пескострельной (б) машин для изготовления стержней

технологическим процессом. Стержни могут отверждаться сушкой в сушилах или непосредственно в стержневых ящиках после уплотнения. В этом случае в качестве связующего используют синтетические смолы. Однако при горячем отверждении основным активатором отверждения является тепло, при холодном — только катализаторы отверждения. Последние могут быть выведены в смесь при ее приготовлении (так называемые ХТС — холоднотвердеющие смеси) или после уплотнения смеси в стержневом ящике путем продувки газообразными катализаторами (триэтиламином, диэтиламином, сернистым ангидридом и др.). Процессы холодного отверждения стержней (без нагрева) непосредственно в стержневых ящиках все шире используются в практике литейного производства, так как позволяют получать более точные стержни, а следовательно, и отливки, что влечет за собой уменьшение припусков на механическую обработку.

## 7. Окраска и сборка форм

Для уменьшения физико-химического взаимодействия между металлом отливки и материалом формы в процессе заливки и дальнейшего охлаждения с целью получения более чистой поверхности части формы и стержней, контактирующие с металлом, покрывают различными огнеупорными материалами. В качестве последних используют огнеупорные краски и другие материалы.

Огнеупорные краски наносят на рабочие поверхности форм и стержней кистью вручную, окунанием или с помощью пульверизатора. Краски повышают поверхностную прочность форм и стержней, уменьшая тем самым осыпаемость и предохраняя формы и стержни от размыва металлом во время заливки. Основная роль огнеупорных красок заключается в предотвращении пригара на поверхности отливок.

Краски содержат огнеупорный наполнитель, связующее, дисперсионную среду, специальные добавки. Огнеупорной основой, как правило, служат пылевидный кварц, циркон обезжелезненный, графит литейный, магнезит и т.д. Связующими могут быть глина, жидкое стекло, сульфитно-дрожжевая бражка, поливинилбутиральный лак и другие материалы. Жидкостями для разведения являются вода, бензин, ацетон, спирты и др. К специальным добавкам относят стабилизаторы, антисептики, поверхностно-активные вещества. Стержни и формы, окрашенные огнеупорным покрытием, содержащим воду, сушат, а окрашенные покрытием, содержащим легкоиспаряющиеся жидкости, — не сушат.

Перед сборкой полуформы и стержни тщательно проверяют по внешнему виду. В операцию сборки форм входят очистка полуформ от мусора, установка стержней или блоков стержней, контроль правильно-

сти их установки, накрытие верхней полуформы на нижнюю, скрепление двух полуформ между собой для предотвращения подъема верхней полуформы относительно нижней во время заливки. Смещение одной полуформы относительно другой предупреждается системой специальных штырей и втулок, имеющихся на модельных плитах и опоках, позволяющих устанавливать полуформы с точностью в пределах допускаемых отклонений размеров. Крепление опок между собой осуществляют установкой грузов, болтами или специальными скобами, надеваемыми на приливы, имеющиеся на опоках, и другими способами.

## 8. Заливка и другие окончательные операции

Заливку металла в литейные формы производят, используя специальные ковши разнообразных конструкций, в которые расплав поступает непосредственно из плавильных агрегатов (вагранок, электропечей и др.) или промежуточных раздаточных ковшей, где может быть предусмотрен подогрев жидкого металла. В зависимости от вида сплава и характера отливок температура заливаемого металла должна быть на 30—100 °С выше температуры ликвидус.

Залитые отливки некоторое время охлаждаются в форме, затвердевая и остывая до определенной температуры. Для различных по массе отливок продолжительность выдержки в форме после заливки колеблется от нескольких минут (иногда секунд) до нескольких суток. После выдержки отливки извлекаются из формы.

Извлечение отливок из форм (в случае разовых форм — выбивка) может быть ручное, механизированное или автоматизированное. Ручная выбивка имеет место при единичном мелком литье. Выбивка крупных отливок механизирована, на конвейерах — механизирована и автоматизирована.

Извлеченные из форм отливки подлежат обрубке и очистке. Обрубка состоит в отделении от отливки литниковой системы, прибылей, выпоров, различных заусенцев (в особенности — по плоскости разъема форм и у стержневых знаков). Очистка отливок — операция удаления стержней и каркасов из внутренних полостей, а также удаление пригара с поверхности отливок. Операции обрубки осуществляют вручную (мелкие единичные отливки), с помощью пневматических зубил, электро- и газорезкой, плазменной резкой, на специальных прессах, ленточными пилами. Очистка производится на выбивных решетках (совместно с выбивкой), в гидрокамерах, специальных очистных галтовочных барабанах, дробеметных и дробеструйных камерах. Далее отливки, если необходимо, проходят термическую обработку, а затем контроль и сдачу в механические цехи.

## Глава 2 СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ЛИТЬЯ

Особенностями отливок, получаемых специальными способами, по сравнению с отливками, получаемыми литьем в обычные песчаные формы, являются, как правило, их более высокая точность, лучшее качество поверхности, меньшие величины припусков на механическую обработку. Специальные способы получения отливок относятся к прогрессивным методам формообразования.

### 1. Литье в кокиль

Кокиль — это литейная форма, изготовленная из металла. Основные достоинства кокилей по сравнению с песчаными формами — многократное использование формы, более высокие производительность труда, точность отливок, качество их поверхности и стабильность размеров.

Кокколи делают неразъемными и разъемными (рис. 164). Все перечисленные типы кокилей могут быть одно- и многогнездными (т.е. для получения одной отливки или одновременно нескольких), немеханизированными (ручные), механизированными, автоматизированными и автоматическими.

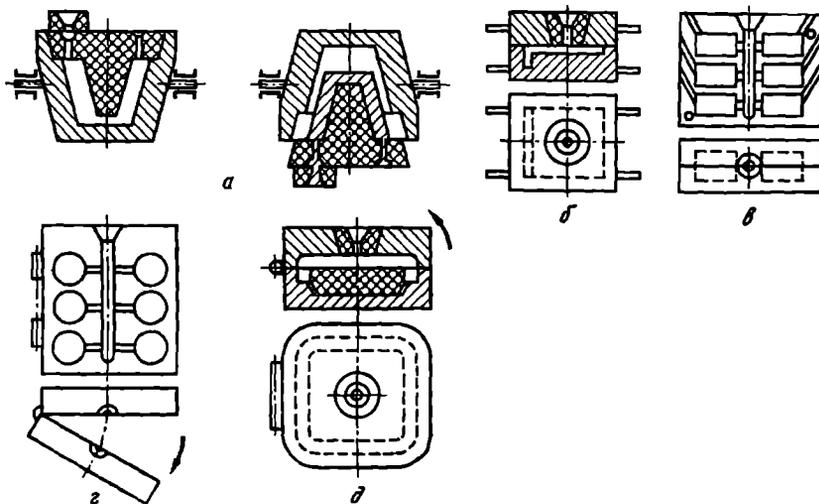


Рис. 164. Разновидности кокилей:

*а* — вытряхной; *б* — с горизонтальной плоскостью разъема; *в* — с вертикальной плоскостью разъема; *г* — створчатый; *д* — створчатый с горизонтальной плоскостью разъема

Материалы, используемые для изготовления кокилей, должны хорошо противостоять термическим ударам, возникающим при заливке металла, хорошо обрабатываться, быть недефицитными и недорогими. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет чугун, иногда используют сталь, алюминиевые и другие сплавы. Для мелких отливок из чугуна и стали в качестве материала кокилей используют легированный хромом и никелем. Кокили для средних и крупных отливок из сплавов железа и других черных металлов изготовляют из сталей, легированных хромом, молибденом и никелем. Формы для отливок из алюминиевых и магниевых сплавов изготовляют из серого чугуна, а также из алюминиевых сплавов.

Удаление газа из рабочей полости кокиля во время заливки металла осуществляется по разьему формы. Кроме этого, в плоскости разьема делают специальные каналы, а в стенках формы — вентиляционные пробки, через которые дополнительно удаляется газ.

При высоком непрерывном темпе литья стенки кокиля нагреваются. Их охлаждение может быть естественным (воздушным) и принудительным (воздушным, водяным, масляным).

Подвод металла в кокилях осуществляют сверху, снизу (сифоном) или сбоку через щелевые питатели. При подводе металла сверху возможно его разбрызгивание в полости формы. Поэтому такой подвод осуществляется для несложных неотчетливых отливок небольшой высоты. При подводе металла снизу (сифоном) в полость формы металл поступает плавно (рис. 165). Для ослабления удара падающей струи применяют зигзагообразные стояки 1. Для создания направленного (снизу вверх) затвердевания подвод металла осуществляют через щелевые питатели 2 сбоку.

Для предотвращения физико-химического взаимодействия металла с формой на рабочую поверхность кокиля ровным слоем наносят огнеупорное покрытие (кистью или пульверизатором). Полости, образующие литниковую систему, выпоры, прибыли и т.п., окрашивают более толстым слоем краски или покрывают специальными обмазками, чтобы увеличить термическое сопротивление стенок кокиля и предотвратить чрезмерное охлаждение металла при движении в каналах литниковой системы. В качестве огнеупор-

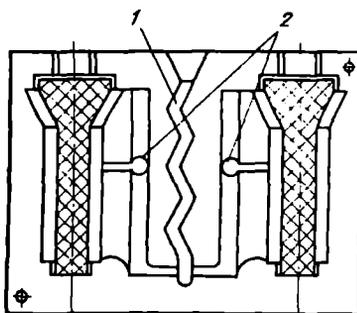


Рис. 165. Эскиз кокиля с зигзагообразным стояком, щелевыми питателями и песчаными стержнями

ной основы красок используют пылевидный кварц, шамот, графит, оксид цинка, тальк и другие материалы, связующим чаще всего служит жидкое стекло. При литье сплавов на основе титана на рабочие поверхности кокилей напыляют плазменным методом вольфрам и молибден. При литье чугунных отливок хорошие результаты получаются, если кокиль коптить ацетиленовым пламенем.

Перед заливкой кокиль должен быть подогрет до необходимой температуры. Чем ниже температура подогрева, тем выше теплоаккумулирующая способность формы. Поэтому при литье тонкостенных отливок при низкой температуре подогрева вследствие быстрого теплоотвода металл может потерять текучесть, в отливке будут недоливы. Для чугунных отливок ускоренный теплоотвод может вызвать отбел структуры.

## 2. Литье по выплавляемым моделям

Сущность способа состоит в получении специальных моделей из легкоплавких материалов, сборке их в блоки (соединение моделей отливок с моделью литниковой системы), покрытии модельных блоков огнеупорной оболочкой, удалении моделей (выплавлением, растворением, выжиганием), прокальвании оболочковых форм и заливке в них жидкого металла. К преимуществам литья по выплавляемым моделям относят возможность получения сложных отливок из разнообразных сплавов, в том числе труднообрабатываемых резанием и ковкой. Перевод поковок на литье по выплавляемым моделям снижает трудоемкость механической обработки на 30—80%, повышает коэффициент использования металла, снижает себестоимость изготовления деталей. Литьем по выплавляемым моделям получают отливки массой от нескольких граммов до 100 кг. Разберем более подробно некоторые этапы этого метода формообразования.

Все модельные материалы в зависимости от механизма удаления моделей из оболочек можно разделить на выплавляемые, растворяемые и выжигаемые. Наиболее широко используемые составы выплавляемых моделей содержат парафин, стеарин, буроугольный и торфяной воски (битумы), этилцеллюлозу, натуральный и синтетический церезин и др. Основные составляющие растворяемых моделей — карбамид, нитриды и нитраты щелочных металлов и некоторые другие вещества. К выжигаемым модельным материалам относят вспенивающиеся и компактные термопласты (полистирол блочный, вспенивающийся, суспензионный и др.). Модельные материалы этой группы иногда также удаляют растворением в специальных органических растворителях. Из приведенных исходных материалов готовят различные модельные составы для получения моделей отливок и литниковой системы (рис. 166).

Изготовление моделей осуществляют свободной заливкой расплавленного модельного состава обычно в металлические пресс-формы, запрессовкой под давлением пастообразного модельного состава специальными шприцами и на машинах-автоматах. Готовые модели собирают в блоки, припаявая их к модели литниковой системы, или другими методами.

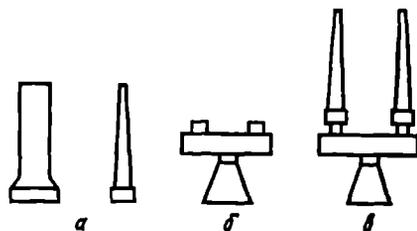


Рис. 166. Эскизы моделей (а), литниковой системы (б) и собранного блока (в)

Огнеупорная оболочка, наносимая на поверхность модельного блока, может быть получена поочередным нанесением нескольких перемежающихся слоев (суспензии и обсыпки) и электрофорезом. При многослойном нанесении оболочки суспензия состоит из гидролизованного раствора этилсиликата и огнеупорного наполнителя. Огнеупорным наполнителем суспензии служит пылевидный кварц, дистенсиллиманит, электрокорнуд и др. В процессе получения огнеупорной оболочки модельные блоки путем окунания смачивают суспензией, обсыпают зернистым огнеупорным материалом и сушат до отверждения. Так наносят четыре-шесть слоев (при производстве крупных отливок — более десяти). При получении оболочек электрофорезом начальный слой наносят так же, как и при первом способе, который затем смачивают суспензией с электролитом и связующим материалом. Благодаря такой обработке первый слой становится электропроводным. На этот слой из грубодисперсной суспензии электрофорезом осаждают второй слой, обсыпая затем его зернистым материалом, и сушат. В случае необходимости получения более толстой оболочки цикл повторяют. Сушку слоев производят на воздухе, в парах аммиака или в вакууме.

Модельный состав, его водный раствор или продукты термодеструкции удаляются через открытый торец литниковой воронки. Выплавление производят в воде, нагретой до температуры выше температуры плавления модельного материала, в расплавленном модельном материале (того же состава, что и модели), продувкой блоков горячим воздухом или перегретым водяным паром, нагревом блоков в термостатах или диэлектрическим нагревом, а также некоторыми другими способами. Удаление соляных моделей осуществляют растворением в воде, пенополистироловых — выжиганием в газовых печах (иногда их растворяют в смеси ацетона с толуолом). После удаления (растворения) моделей оболочки промывают в проточной воде.

Для окончательного удаления остатков модельного состава оболочки прокаливают при 800—1000 °С в окислительной атмосфере (для

лучшего выгорания). При литье по выплавляемым моделям большинство сплавов заливают в горячие формы, позволяющие получить тонкостенные отливки.

### 3. Центробежное литье

Центробежным литьем называют способ изготовления отливок, при котором металл заливается в форму и затвердевает в ней под действием центробежных сил. Расплавленный металл заливается во вращающуюся форму, приводимую в движение специальной машиной, называемой центробежной. Различают машины с вращением осей вокруг вертикальной и горизонтальной (или наклонной) осей (рис. 167).

Центробежным способом литья с вращением вокруг горизонтальной оси получают отливки типа тел вращения — трубы; кольца, втулки, гильзы и т.д. На машинах с вращением формы вокруг вертикальной оси кроме отливок типа тел вращения (кольца, короткие втулки и т.п.) получают также и фасонные отливки, имеющие сравнительно тонкие стенки. Центробежные силы в этом случае используют для улучшения заполняемости формы металлом и получения более плотной отливки. Центробежный способ литья позволяет изготавливать также двухслойные биметаллические отливки (отливки из двух различных сплавов), заливая сначала сплав одного состава, затем другого.

В России центробежным способом получают корпуса полых валов из коррозионностойких сталей диаметром до 1500 мм, длиной до 10 м, массой до 60 т для бумагоделательных машин; налажено производство биметаллических прокатных валков (с наружным слоем, имеющим повышенную износостойкость, и внутренним слоем с повышенной пластичностью); выпускают крупные биметаллические втулки диаметром

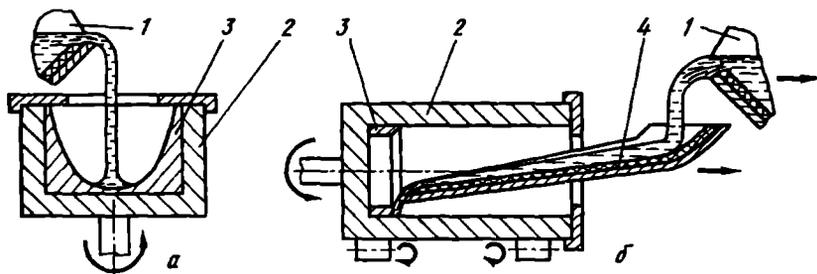


Рис. 167. Схемы изготовления отливок при вращении формы вокруг вертикальной (а) и горизонтальной (б) осей:

1 — ковш с расплавленным металлом; 2 — литейная форма (изложница), 3 — отливка; 4 — подвижный желоб

более 1000 мм для подшипников жидкостного трения и многие другие отливки.

При центробежном литье применяют в основном три типа литейных форм: металлические нефутерованные (кокили), металлические футерованные и разовые формы, изготавливаемые различными способами.

Увеличение стойкости металлических форм достигается нанесением на их рабочую поверхность защитных покрытий из мелкого кварцевого песка, измельченного ферросилиция, алюминиевой пудры, пылевидного графита и др. Три последних материала, помимо защитных свойств, выполняют также функции модификаторов, улучшающих качество поверхностного слоя металла. Защитные покрытия наносят на цилиндрические стенки формы во время ее вращения непосредственно перед заливкой металла. При непрерывном темпе литья металлические формы разогреваются. Поэтому их охлаждают водой (циркуляция, душ) или воздухом.

Металлические футерованные формы применяют при литье труб, втулок и т.д., имеющих сложный наружный профиль, затрудняющий свободную усадку. Футеровку производят различными смесями, применяемыми при обычном литье в песчаные формы.

По сравнению с литьем в неподвижные формы центробежный способ имеет следующие преимущества: при изготовлении полых цилиндрических отливок исключается необходимость изготовления стержней, увеличивается выход годного вследствие отсутствия литниковой системы и прибылей (исключая фасонное литье), повышается плотность металла отливок, а следовательно, и механические свойства, улучшается заполняемость формы металлом и др. К недостаткам можно отнести увеличение степени ликвации сплавов, ухудшение качества внутренней поверхности и уменьшение точности отливок.

#### 4. Литье под давлением

Сущность процесса состоит в том, что жидкий металл поступает в рабочую полость металлической формы (пресс-формы) под давлением, 30—300 МПа. Скорость впуска металла в полость формы составляет 0,5—140 м/с. Литьем под давлением получают отливки массой от нескольких граммов до нескольких десятков килограммов из сплавов на основе свинца, олова, цинка, алюминия, магния, меди, железа, по сложности — от элементов замка «молния» до блока цилиндров к автомобилю «Волга». При массовом производстве литье под давлением является весьма рентабельным. Отливки, получаемые этим процессом, имеют самый высокий коэффициент использования металла. Получение ряда деталей литьем под давлением оказывается в 50 раз и более дешевле, чем их изготовление из проката механической обработкой.

При литье под давлением используются автоматические или полуавтоматические поршневые и компрессорные машины с горячей или холодной камерой прессования. Расположение камер может быть горизонтальным или вертикальным.

Работа машины с холодной вертикальной поршневой камерой прессования (рис. 168, а) состоит в следующем. Ось камеры прессования 1 этой машины располагают параллельно плоскости разреза пресс-формы 3. Металл заливают на нижний поршень 4 камеры, который не позволяет проникать ему в форму самотеком. Жидкий металл будет заходить в литниковое отверстие 5 и полость формы после опускания вниз прессующего поршня 2, в результате чего нижний поршень, отжимаясь вниз, откроет литниковое отверстие. Металл, войдя в контакт со стенками формы, затвердевает. Прессующий поршень поднимается вверх, освобождая путь нижнему поршню, который при подъеме отрывает пресс-остаток от литника, выталкивая его из камеры прессования. Форму очищают, смазывают и закрывают. Цикл повторяют.

Ось горизонтальной холодной камеры прессования 1 (рис. 168, б) располагают перпендикулярно плоскости формы. Горизонтальная камера связана с неподвижной полуформой 2. Жидкий металл заливают в горизонтальную камеру через специальное окно 3. Поршень 4, двигаясь вправо, запрессовывает металл в полость формы. Пресс-остаток захватывается поршнем при холостом ходе и выбрасывается из камеры прессования.

Машины с холодной (вертикальной или горизонтальной) камерой прессования используют главным образом для изготовления отливок из сплавов на основе алюминия, магния и меди.

В поршневых машинах с горячей камерой прессования (которые являются только вертикальными) заливочное устройство отличается от

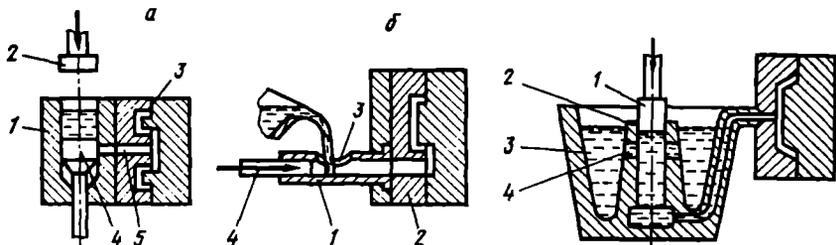


Рис. 168. Схемы холодной вертикальной (а) и горизонтальной (б) поршневых камер прессования машин литья под давлением

Рис. 169. Схема горячей поршневой камеры прессования

заливочного устройства машин с холодной камерой прессования (рис. 169). Цилиндр 1 прессующего поршня 2 таких машин находится в среде расплавленного металла 3, который заполняет камеру прессования через отверстие прессового цилиндра 4. При прессовании это отверстие перекрывается поршнем. По окончании прессования остаток жидкого металла сливается в камеру прессования, которая снова наполняется жидким металлом из тигля. Обогрев расплавленного металла в тигле — электрический. Остальные операции технологического процесса такие же, как и на машинах с холодной камерой прессования.

Если в рассмотренных машинах с горячей камерой прессования убрать поршень и герметично закрыть тигель с расплавленным металлом, то запрессовку можно производить сжатым воздухом, подаваемым на зеркало металла.

Машины с горячей камерой прессования применяют главным образом для изготовления отливок из легкоплавких сплавов на основе цинка, свинца и олова. Эти машины позволяют довольно легко автоматизировать процесс литья, здесь меньше потери металла, выше производительность труда (10—12 запрессовок в минуту) по сравнению с машинами, имеющими холодную камеру прессования. В последние десятилетия начали использовать так называемые комбинированные машины, позволяющие работать как с холодной, так и с горячей камерой прессования.

В настоящее время в условиях массового производства процесс литья под давлением стремятся автоматизировать. Для съема и удаления отливок из формы используют различные механизмы, в том числе роботы-манипуляторы. Последние разделяют на универсальные (которые наряду с литьем под давлением можно использовать также у кузнечных прессов, сварочных аппаратов и т.д.) и специальные, разрабатываемые для определенной номенклатуры отливок. Универсальные роботы-манипуляторы со встроенными ЭВМ могут последовательно выполнять до 200 различных команд. На некоторых машинах устанавливаются роботы для заливки жидкого металла в камеру прессования. Автоматизация литья под давлением невозможна без автоматической очистки формы от остатков сгоревшей смазки и облоя, распыления свежей смазки и контроля извлечения отливки из формы. Благодаря автоматизации оператор следит за несколькими одновременно работающими машинами.

Для повышения качества отливок машины литья под давлением постоянно совершенствуются. Сейчас работают машины с так называемым сдвоенным поршнем для подпрессовки толстостенных отливок. Эти машины имеют два поршня — основной прессующий и внутренний для подпрессовки. Запрессовка идет основным поршнем. После образования твердой корочки на всей поверхности отливки и литниковой системы включают внутренний поршень, который прорывает корочку

металла, образовавшуюся на торце основного поршня, и, внедряясь в пресс-остаток, доуплотняет отливку. Таким способом удается получить более плотные отливки.

Другим направлением улучшения качества отливок, получаемых литьем под давлением, является использование вакуума, который создается непосредственно в полости формы или в кожухе, окружающем форму, а иногда — и в камере прессования. При этом увеличивается плотность и улучшается качество поверхности отливок, повышаются прочностные свойства за счет уменьшения оксидных включений, появляется возможность снижения толщины стенок отливок (снижается противодавление газа со стороны полости формы) и т.д.

В настоящее время продолжается совершенствование литья под давлением стали в направлении повышения стойкости пресс-форм, улучшения качества отливок, механизации и автоматизации процесса.

Для повышения числа запрессовок формы изготавливают из высоколегированных теплоустойчивых сталей. В процессе работы формы нагреваются. Во избежание перегрева их необходимо охлаждать. С этой целью в них выполняют специальные каналы, по которым циркулирует охлаждающая вода. Температура формы с помощью автоматики поддерживается на необходимом уровне.

## 5. Литье в оболочковые формы

Название данного вида литья исходит из того, что литейная форма здесь представляет собой оболочку толщиной 6—10 мм, изготовленную из материала огнеупорной основы (наполнителя) и синтетической смолы в качестве связующего. Принцип получения оболочек заложен в свойствах связующего материала, способного необратимо отверждаться при нагревании. Литьем в оболочковые формы изготавливают отливки средней массы 5—15 кг (редко 100—150 кг) практически из любых сплавов.

В качестве огнеупорной основы широко используют кварцевый песок. Чем меньше в песке примесей, тем выше его качество. Повышенное содержание примесей приводит к увеличенному расходу связующего, повышенной газотворности смеси, пониженному качеству поверхности отливок. Ввиду малого расхода и возможности регенерации при литье в оболочковые формы рентабельно применять корунд, электрокорунд и особенно циркон (а также и некоторые другие материалы), обладающие более высокой по сравнению с кварцевым песком огнеупорностью. Качество отливок при этом значительно повышается.

Связующим материалом являются фенолформальдегидные синтетические терморезистивные смолы, которые при нагревании конденсируются, отверждая таким образом смесь.

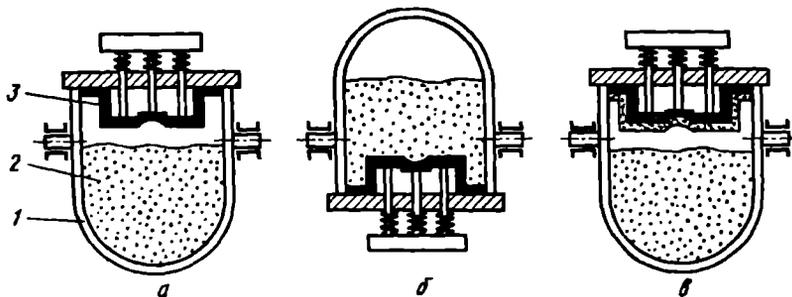


Рис. 170. Бункерный способ получения оболочковых полуформ

Кроме огнеупорной основы и связующего в смеси вводят специальные добавки: растворители (керосин, ацетон, спирты и другие вещества, уменьшающие количество пыли в смесях и их сегрегацию), смазывающие материалы (стеарат цинка, озокерит и др.), предотвращающие пригорание смесей к модельной оснастке, и некоторые другие добавки.

Существует несколько способов изготовления оболочек — бункерный, пескодувный и др. При бункерном способе (рис. 170) на поворотном бункере 1 со смесью 2 закрепляется предварительно нагретая до 200—270 °С модельная металлическая плита с моделью 3 (рис. 170, а), после чего бункер поворачивается на 180°. Смесь падает на модельную плиту, облекая всю ее рабочую поверхность (рис. 170, б). Синтетическая смола прилегающей к модельной плите смеси нагревается, расплавляется, затем отверждается. Толщина слоя зависит от времени выдержки смеси на модели, ее температуры и теплофизических свойств наполнителя. При достижении необходимой толщины бункер поворачивается в исходное положение. Непрореагировавшая смесь с модельной плиты сыпается вниз (рис. 170, в). Для лучшего и более быстрого отверждения смеси модельную плиту с оболочкой подают в печь, нагретую до 280—320 °С, где идет окончательный процесс конденсации смолы. После отверждения оболочку снимают с модельной плиты и направляют на сборку форм. Весь процесс получения оболочек длится несколько минут. Оболочки снимают специальными толкателями, монтируемыми на каждой модельной плите. Параллельно по такой же технологии изготавливают вторую полуформу (оболочку), а также стержни, которые могут быть сплошными или полыми. Полые или оболочковые стержни в последние годы начали использовать не только при литье в оболочковые формы, но и при обычном литье в песчаные формы. Масса таких стержней на 40—80 % меньше массы сплошных, они легко выбиваются из отливок, формируют поверхность высокого качества.

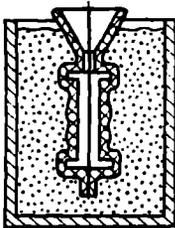


Рис. 171. Собранный оболочковая форма перед заливкой

При сборке формы производят установку стержней, затем соединяют две полуформы. Соединение осуществляют склеиванием или скобами. Совмещение двух оболочковых полуформ при спаривании осуществляют замком выступ—впадина. Литниковая система формируется при изготовлении оболочек.

Собранные формы перед заливкой устанавливают в металлические коробки (контейнеры), где для увеличения прочности формы свободное пространство между оболочками засыпают опорным материалом — песком или чугуной дробью (рис. 171). Заливка форм чаще всего происходит на конвейере. После заливки металла и затвердевания отливки оболочковые формы и стержни легко разрушаются.

Литьем в оболочковые формы получают отливки повышенной точности и более лучшего качества поверхности, чем при литье в песчаные формы. Процесс чрезвычайно производительен и легко поддается механизации. Расход смеси уменьшается в 10—12 раз по сравнению с литьем в песчаные формы. К недостаткам процесса следует отнести высокую стоимость связующих материалов и оборудования, токсичность фенолформальдегидных смол, коробление оболочковых форм.

Для устранения двух последних недостатков литья в оболочковые формы, а также для улучшения условий работы кокилей в 60-х годах в бывшем СССР разработан способ литья в облицованные металлические формы (облицованные кокили). Сущность этого процесса состоит в том, что в кокилях рабочей поверхностью является облицовочный слой толщиной 3—5 мм, образованный смесью для оболочкового литья. Облицовка придает форме податливость, предохраняет кокиль от удара, уменьшает скорость затвердевания, устраняя тем самым возможный отбел отливок из серого чугуна. В свою очередь, жесткая наружная металлическая стенка защищает оболочку (облицовочный слой) от коробления. Процесс легко механизуется и автоматизируется. Изготовление облицовочного слоя осуществляется наддувом пескодунным или пескострельным способом смеси в специально предусмотренный зазор между стенкой кокиля и моделью. Для лучшего сцепления смеси эту поверхность кокиля не обрабатывают, для уменьшения прилипания облицовки поверхность модели покрывают разделительным составом. Температура модели регулируется нагревателями, для нагрева стенок кокиля утилизируется тепло охлаждающейся отливки. Процесс находит все более широкое применение в России и за рубежом.

## 6. Другие специальные способы литья

Кроме рассмотренных специальных способов литья используются и некоторые другие, кратко описанные ниже.

*Литье в керамические формы.* Существует несколько способов изготовления керамических стержней, из которых собирают соответствующие формы. Разберем один из них.

В гидролизованый раствор этилсиликата при непрерывном перемешивании насыпают смесь кварцевого песка и пылевидного кварца. При достижении суспензией однородного состава сметанообразной консистенции к ней добавляют отвердитель, продолжая перемешивать. Далее суспензию выливают в заранее подготовленные стержневые ящики, в которых она и отверждается. Отвержденные стержни извлекают из стержневых ящиков, устанавливают на металлические плиты и поджигают. Горит выделяющийся в результате реакции гидролиза и отверждения этиловый спирт. После этого при температуре 900—1000 °С стержни прокаливают для более полного удаления из них летучих веществ. Из прокаленных и охлажденных стержней собирают формы, подготавливая их к заливке металлом. Так получают отливки повышенной точности с хорошим качеством поверхности массой от нескольких граммов до нескольких тонн (штампы, кокилы, пресс-формы и т.п.).

*Кристаллизация под давлением.* В металлическую неподвижную форму (матрицу или металлоприемник) наливают жидкий металл, на который затем дают пуансоном. Удельное давление при этом составляет 100—250 МПа. Здесь может быть два варианта: металл не перетекает по матрице, а кристаллизуется под давлением, уплотняясь при этом; металл перетекает по матрице под действием пуансона. Вторым вариантом кристаллизации под давлением чаще называют штамповкой жидкого металла (иногда — жидкой штамповкой).

Кристаллизацию под давлением производят преимущественно на гидравлических прессах. Совокупное воздействие давления и высокой скорости охлаждения приводит к получению плотных отливок с мелкокристаллической структурой, в результате чего металл приобретает повышенные физико-механические свойства.

В России кристаллизацией под давлением изготавливают отливки из сплавов на основе алюминия, меди, цинка, магния, а также ведется опытно-промышленная отработка процесса получения отливок на основе железа и других металлов.

*Литье по газифицируемым моделям.* При этом способе литья модель заформовывают в песчаную неразъемную форму и не извлекают из нее. В качестве материала моделей используют пенополистирол (углеводород, содержащий примерно 92 % С и 8 % Н). Во время заливки благодаря теплу металла материал модели испаряется (температура испарения

полистирола 316 °С). Место испаряющейся модели занимает заливаемый в форму металл. Основное преимущество процесса состоит в том, что отливка имеет малые припуски на механическую обработку. Этим способом получают единичные отливки массой от нескольких килограммов до 30 т.

Разновидностью процесса литья по газифицируемым моделям является так называемая магнитная формовка. Сущность ее состоит в том, что вместо кварцевого песка используют чугунную дробь. Форму во время заливки металла помещают в силовое магнитное поле, которое «связывает» частицы дроби между собой. После затвердевания отливки магнитное поле снимают, форма легко разрушается. Дробь используют повторно. Таким способом можно получать небольшие отливки как единичного, так и массового производства.

*Литье с контролируемой кристаллизацией.* Литейной формой для этого метода литья служит оболочка, получаемая по выплавляемым моделям. Из металловедения известно, что физико-механические свойства металла в большой степени зависят от характера его кристаллической структуры. Существует несколько способов получения металла с заранее заданной структурой. Разберем изготовление отливок методом направленной кристаллизации. При этом методе литейную форму нагревают до температуры заливаемого сплава. Залитый металл начинает кристаллизоваться в нижней части формы, так как ее температура искусственно занижается. Далее процесс может осуществляться двумя путями: либо форму с отливкой опускают с заданной скоростью, постепенно выводя ее из зоны высоких температур, либо поднимают зону высоких температур. Конструктивные решения здесь самые различные. В том и другом случаях происходит кристаллизация, направленная снизу вверх, при которой рост кристаллов ориентирован медленно изменяющимся температурным градиентом. Отливка получается с несколько вытянутыми в одном направлении кристаллами. Разновидность этого технологического процесса — получение монокристаллических отливок. Усложнение технологии изготовления отливок методом контролируемой кристаллизации окупается повышением пластичности металла и в особенности — жаропрочности, что чрезвычайно важно для отливок, работающих при повышенных температурах.

К специальным способам литья относят также литье с регулируемым давлением (под низким давлением, с противодавлением, вакуумным всасыванием), выжиманием, непрерывное литье, вакуумно-пленочную формовку, электрошлаковое литье, литье в замораживаемые формы и некоторые другие виды.

### 1. Классификация дефектов

В машиностроении дефектом называют каждое несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией. Отливки после изготовления могут иметь различные дефекты, классификация которых приведена ниже.

I. Несплошность в теле отливки: раковины, трещины, пористость, спай, плены и т.д.

II. Дефекты поверхности: пригар, заливы, ужимины, размывы и т.д.

III. Несоответствие по геометрии: перекосы, подутость, коробления, недоливы и т.д.

IV. Несоответствие требованиям чертежа и техническим условиям: неудовлетворительные механические и физические свойства, несоответствие химического состава и структуры металла.

*Раковины* в отливках в зависимости от природы образования имеют несколько разновидностей: усадочные, газовые, шлаковые, песчаные. Два последних дефекта часто называют засорами (шлаковыми, песчаными). Газовые раковины образуются за счет газа, растворяемого в металле в процессе его выплавки, и вследствие наличия в формовочной или стержневой смеси газообразующих веществ. К основным мерам по предупреждению образования газовых раковин в отливках относятся: дегазация жидкого металла, уменьшение количества газообразующих веществ в формовочной смеси, повышение газопроницаемости форм и стержней, понижение температуры заливаемого сплава. Попадание шлака и песка в тело отливки предупреждают использованием соответствующих разливочных ковшей, установкой необходимой литниковой системы, упрочняющей окраской рабочих поверхностей форм и стержней.

*Трещины* в отливках разделяют на горячие и холодные. Горячие трещины образуются при охлаждении залитого в форму металла в температурном интервале, близком к температуре солидус, когда начинает проявляться действие линейной усадки. В этот момент металл обладает очень низкой прочностью и во многих случаях плохой пластичностью. Усадочные напряжения, достигая значений временного сопротивления металла, приводят к его разрыву. Поверхность горячих трещин отливок из сплавов на основе железа окисленная. Основной путь предупреждения таких трещин — устранение препятствий, тормозящих линейную усадку. Холодные трещины образуются вследствие неравномерного охлаждения различных частей отливки и фазовых превращений, протека-

ющих с изменением объема. Предупреждают образование холодных трещин организацией равномерного охлаждения отливок.

*Пористость* бывает газовая и усадочная. Последняя возникает в результате недостаточного питания мест, где она образуется. Газовая (или ситовидная) пористость подразделяется на открытую и подкорковую. Подкорковая пористость располагается под поверхностным слоем металла и часто обнаруживается при механической обработке отливки. Основная причина образования — внедрение газа формы или стержня в металл. Газовую пористость можно предупредить применением сухих форм вместо сырых, улучшением вентиляции форм и стержней.

*Спаи* — места встречи потоков холодного окисленного металла. Спаи, как правило, образуются в тонких стенках отливок.

*Плены* — несплошности в теле отливки, образованные оксидами и другими неметаллическими включениями химических элементов сплава. Меры по предупреждению плен — защита металла от окисления во время его плавки и заливки (создание восстановительной атмосферы, плавка и заливка в вакууме) и повышение температуры заливаемого сплава.

*Пригар* — слой формовочной (стержневой) смеси (или продуктов взаимодействия металла, материала смеси и газовой фазы), удерживаемый на поверхности отливки после ее выбивки из формы. Пригар разделяют на механический, термический и химический. Механический пригар — слой смеси, удерживаемой на поверхности отливки за счет проникновения металла в ее поры. Термический — слой спекшейся смеси, находящейся на поверхности отливки. Химический — слой смеси, образованный вследствие химического взаимодействия материала отливки и смеси. Основная мера борьбы с пригарами — увеличение термостойкости рабочей поверхности форм и стержней (окраска огнеупорными красками, применение более термостойких облицовочных смесей и т.д.).

К *заливам* относят приливы отливок, возникающие вследствие затекания металла в полости, образовавшиеся из-за отслоения рабочей поверхности формы. Борьба с этими дефектами ведется путем укрепления поверхностных слоев формы, предрасположенных к отслоению.

*Размывы* — места в отливке, образованные в результате разрушающего действия струи жидкого металла на поверхностные участки формы или стержня. На месте размытого участка на отливке проявляется бесформенное утолщение. Организация правильного подвода металла и повышение поверхностной прочности формовочных и стержневых смесей позволяют предупредить размывы.

*Перекосом* называют дефект, образованный вследствие смещения одной половины формы относительно другой. Дефект можно предотвратить ужесточением требований к оснастке по ее точности.

*Подутость* (раздутие или распор) появляется в результате статического давления жидкого металла на стенки недоуплотненной формы.

Коробление отливки, т.е. искажение ее конфигурации в том числе и поверхности, — дефект, связанный с внутренними напряжениями, величина которых превысила предел упругости металла. Такое явление приводит к необратимым деформационным изменениям конфигурации отливки. Коробление может наблюдаться в процессе охлаждения отливки в форме, во время термической обработки, в межоперационные периоды, а также после начала механической обработки, если соответствующей термообработкой не сняты остаточные внутренние напряжения. Меры по предупреждению короблений — организация медленного равномерного охлаждения различных частей отливки.

К *недоливкам* относят дефекты, возникающие вследствие незаполнения части литейной формы жидким металлом. Причины образования недоливов — холодный металл, недостаточная скорость заливки, слишком тонкие стенки отливки и т.д.

Любая марка сплава прежде всего определяет химический состав этого сплава и уровень его механических, в некоторых случаях — и физических свойств (магнитная проницаемость, коэрцитивная сила и т.п.), структуру металла и т.д. Если фактические свойства сплава не соответствуют чертежу, техническим условиям или стандарту, то отливка является дефектной. К дефектам отливок относят также несоответствие химического состава и структуры, которой должны обладать отливка данного химического состава, прошедшая необходимую термическую обработку. Иногда в поверхностном слое отливки из серого чугуна появляется отбел (корочка из белого чугуна). Устранение такого дефекта — тщательное ведение технологического процесса.

Кроме указанных выше дефектов в отливках могут быть и другие.

## **2. Выбор вида технологического процесса**

При выборе способа изготовления отливок должен быть найден оптимальный вариант. Оптимальным может быть назван технологический процесс, при котором обеспечиваются наиболее высокие технико-экономические показатели изготовления отливок, удовлетворяющие по качеству предъявляемым техническим требованиям. Во вновь проектируемых и реконструируемых литейных цехах имеется возможность применения оптимальной технологии, отвечающей уровню современной техники. Такая возможность далеко не всегда существует во многих действующих цехах. Оптимальной технологией в этом случае будет такая, которая наиболее приемлема и экономически обоснована для данных конкретных условий.

При назначении технологического процесса принимают во внимание массу и габариты отливок, сложность и требования, предъявляемые к ним, масштаб производства, конкретно существующие условия и возможности литейного цеха — мощность и наличие оборудования, материалов, срочность заказа и т.п.

В настоящее время основную массу отливок изготавливают литьем в песчаные формы, характеризующиеся низкой стоимостью, недефицитностью материалов и простотой организации технологического процесса, наличием прогрессивных технологических решений. С развитием литейного производства все большее значение приобретают специальные способы литья, имеющие ряд преимуществ по сравнению с литьем в песчаные формы. В табл. 38 приведена характеристика различных способов изготовления отливок, по которой можно судить об отдельных преимуществах и недостатках наиболее широко используемых технологических процессов.

Выбор вида рациональной технологии изготовления заготовки — непростая задача и ее нужно решать конструктору изделия совместно с ведущими специалистами-технологами (литейщиками, кузнецами, механиками и т.д.).

Таблица 38. Ориентировочная характеристика различных способов литья

Показатель	В песчаные формы, формовка		По выплавляемым моделям	В оболочковые формы	В кокиль	Под давлением	Штамповка жидкого металла	В керамические формы	Центробежное литье
	ручная	машинная							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ограниченность размеров	5	4	2	3	4	1	1	2	4
Ограниченность массы	5	4	2	3	4	1	1	2	4
Сложность отливок	5	5	5	3	2	3	1	3	2
Применимость для различных сплавов	4	4	5	3	2	2	3	4	3
Продолжительность освоения	5	3	3	2	3	1	3	3	3
Тонкостенность	2	2	5	3	1	—	3	3	4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Шероховатость поверхности	1	2	4	3	3	5	4	3	3
Наименьшая экономическая рентабельная партия отливок	5	4	1	3	2	1	3	4	3
Возрастание экономичности с увеличением партии отливок	2	4	2	3	4	5	5	2	4
Коэффициент использования металла (КИМ)	1	2	4	3	3	5	4	3	3
Производительность	2	4	1	3	4	5	4	2	4

Примечание. 5 — наилучший показатель процесса, 1 — наихудший.

### 3. Анализ технологичности

Технологичность конструкции литой детали есть совокупность свойств, проявляемых при оптимальных затратах труда, средств, материалов и времени при ее изготовлении, а также при изготовлении из нее детали. Следовательно, при конструировании технологичной отливки необходимо учитывать большое число различных факторов. В настоящее время имеется методика оценки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий. Технологичность конструкции оценивают по так называемым показателям технологичности, основными из которых являются удельная металлоемкость, коэффициент использования металла, точность геометрической формы, удельная трудоемкость, обрабатываемость, коэффициент необработанной поверхности (отношение необработанной площади поверхности ко всей площади поверхности детали).

При конструировании технологичных литых деталей необходимо руководствоваться следующими соображениями.

Конструкция отливки должна удовлетворять либо одновременному, либо направленному принципу затвердевания. С позиций литейной

технологии отливка является нетехнологичной, если не соблюдается это правило.

При одновременном затвердевании стенки отливки, приливы, ребра и т.д. должны иметь по возможности одинаковую толщину.

Литые детали должны иметь наиболее простую внешнюю конфигурацию, минимальное количество резких поворотов и разветвлений стенок, ребер жесткости и других элементов. Причем, чем худшей жидкотекучестью обладает сплав отливок, чем меньше толщина их стенок, тем жестче необходимо выполнять данное требование. Нечеткое его выполнение может приводить к недоливам или спаям стенок отливок. Кроме того, такая конструкция в меньшей степени будет вызывать возникновение напряжений, а следовательно, короблений и трещин. Немаловажным также является сокращение времени, средств и энергии для изготовления оснастки таких отливок, увеличение производительности при обработке и очистке отливок.

Конструктор обязан знать положение отливки при заливке и плоскость разреза формы отливки конструируемой детали. В конструкции детали предусматривают необходимые при формовке уклоны, что приводит к уменьшению массы отливки.

Таким образом, при анализе технологичности конструкцию литой детали рассматривают с различных позиций. Особое внимание обращают на возможное образование дефектов усадочного происхождения (усадочных раковин, усадочной пористости), на условия возникновения внутренних напряжений и связанных с ними дефектов (остаточных напряжений, коробления, трещин), на заполняемость стенок формы (что обуславливает образование недоливов, спаев, плен и т.д.), на формирование пригара, на удобство формовки и сборки форм (положение формы при заливке, плоскости разреза, количество и сложность стержней, их установка и контроль при сборке) и т.д. Анализ технологичности всегда производят применительно к определенному способу изготовления отливок, так как технологичность отливки, получаемой различными способами, различна.

Отсюда понятно, что при конструировании детали конструктор обязан определить способ изготовления отливки. Окончательная стадия конструирования должна осуществляться в тесном контакте с технологом литейного производства. Технолог-литейщик после критического анализа конструкции литой детали вносит изменения в чертеж с целью повышения технологичности отливки.

В условиях серийного, крупносерийного и массового производства заключительным этапом конструирования детали является запуск опытной партии отливок в производство, анализ их технологичности и технологического процесса, внесение окончательных корректив в чертеж детали. Подобного рода работа конструктора в той или иной степени

должна осуществляться со всеми технологическими службами предприятия. Постоянное сотрудничество конструктора с технологами всегда приводит к наибольшей эффективности производства и высокому качеству продукции.

Приведем несколько примеров повышения технологичности отливок при внесении некоторых конструктивных изменений (рис. 172), где слева показана менее технологичная конструкция детали, справа — более технологичная.

Как уже отмечалось, отливки должны иметь конструктивные уклоны (рис. 172, а), облегчающие извлечение модели из формы и стержня — из стержневого ящика.

Соединения V-образного типа всегда склонны к образованию трещин, усадочной пористости и пригара между стенками (рис. 172, б). Такие сопряжения необходимо заменять на Т-образные или близкие к ним. Недопустимы резкие переходы вследствие образования напряжений и трещин в них (рис. 172, в)

Весьма нетехнологично X-образное сопряжение стенок вследствие образования усадочной пористости в термическом узле. Термический

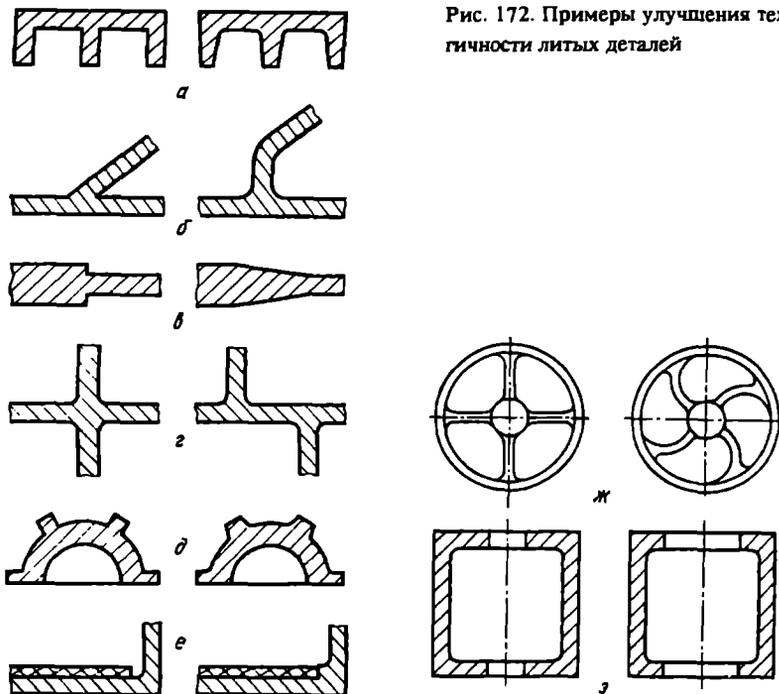


Рис. 172. Примеры улучшения технологичности литых деталей

узел удастся несколько рассредоточить заменой Х-образного сочленения на два Т-образных (рис. 172, з). В случае необходимости к Т-образному сопряжению легче поставить наружные холодильники.

Всевозможные бобышки, оси которых не перпендикулярны к плоскости разъема, мешают свободному извлечению модели из формы (рис. 172, д). Поэтому их надо устанавливать так, чтобы извлечение модели было свободным. При конструировании всегда необходимо учитывать расположение припуска на механическую обработку. В конструкции детали слева в пазу всегда будет пригар, возможны трещины (рис. 172, е). В колесных деталях (маховиках, шестернях и т.п.) спицы должны иметь «пружинную» конструкцию, уменьшающую возможность образования трещин в местах перехода к ступице и ободу (рис. 172, ж). Установка стержней в форме, удаление стержневой смеси и каркасов из отливки требует более полных отверстий корпусных деталей (рис. 172, з). Рассмотренные примеры далеко не исчерпывают разнообразия изменений в чертежах литых деталей. Поэтому для оптимального конструирования технологичных деталей конструкторы должны обращаться к специальной литературе.

## Глава 1.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Применение в машиностроении рациональных заготовок позволяет сократить потери металла на 20—50 %, снизить объем механической обработки и существенно повысить коэффициент использования металла. В настоящее время около четверти металла, потребляемого в машиностроении, уходит в отходы в виде стружки, что составляет в целом по стране миллионы тонн.

Внедрение и широкое использование таких методов как получение точных профилей фасонной конфигурации методом прокатки, прессования, гибки; штамповка в разъемных матрицах; горячее и холодное выдавливание; волочение; высокоскоростная штамповка; беспрессовые методы штамповки (взрывная, магнитоимпульсная, электрогидравлическая); обработка давлением с использованием эффекта сверхпластичности и других позволяет повысить точность заготовок и резко снизить трудоемкость механической обработки при значительном снижении расхода металла. Так, применение точных фасонных профилей в зависимости от номенклатуры деталей обеспечивает снижение расхода металла в среднем на 50—70 %.

Процесс обработки металлов давлением — это придание материалу требуемой формы, размеров и физико-механических свойств без нарушения его сплошности путем пластической деформации. В зависимости от полноты восстановления исходной формы и размеров тела после прекращения воздействия внешних сил различают упругую (полное восстановление) и пластическую деформацию. В процессе пластической деформации происходит изменение исходной структуры, при этом механические свойства материала резко повышаются. Процессы обработки давлением разделяют на две группы — горячую и холодную деформацию.

К процессам горячей деформации относят процессы, протекающие при температуре выше температуры рекристаллизации. При нагреве металла его способность к пластической деформации увеличивается, а сопротивление деформации падает, поэтому процессы горячей обработки являются менее трудоемкими и энергоемкими. Однако изделия, полученные горячей обработкой, обладают худшим качеством поверхности (слой окисленного металла на поверхности, называемой окалиной) и

меньшей точностью геометрических размеров по сравнению с изделиями, полученными методом холодной деформации.

На современных металлургических заводах применяют ковку, штамповку, прокатку, волочение и прессование.

Обработка металлов кузнечным способом включает процессы свободнойковки, горячей и холодной штамповки. Для штамповки характерно применение специального инструмента — штампов. Свободнойковкой производят единичные или мелкосерийные поковки. Мелкие и средние поковки массой до 1 т изготавливают на молотах, более крупные — на прессах.

Нагрев металла — одна из существенных операций технологического процесса обработки металлов давлением. Строгое соблюдение режима нагрева оказывает значительное влияние на качество и точность геометрических размеров готового профиля, состояние обрабатывающего оборудования и технико-экономические показатели производства.

Для проведения процессов горячей пластической деформации металл необходимо нагреть до температуры выше 0,65—0,75 абсолютной температуры плавления для обеспечения полного протекания разупрочняющих процессов (для углеродистой стали эта температура составляет 900—1150 °С). В интервале температур горячей деформации пластичность повышается в несколько раз, а прочностные характеристики снижаются примерно в 10 раз по сравнению с этими характеристиками при комнатной температуре. Нагревать сталь до температур, близких к температуре плавления, нельзя, так как развиваются перегрев, состоящий в интенсивном росте зерна нагреваемого металла, и пережог, сопровождающийся окислением и оплавлением границ зерен, нарушением связей между ними и, как следствие, полной потерей пластичности. Пережог является неисправимым браком, такой металл совершенно непригоден к дальнейшей переработке или использованию. Таким образом, нагревать слитки или заготовки необходимо до значений температур, лежащих ниже тех, которые приводят к перегреву или пережогу. Температура пережога для углеродистых сталей в зависимости от содержания углерода находится в пределах 1180—1490 °С соответственно для сталей с 1,1 и 0,1 % С. С учетом требований технологии и окончательных свойств обрабатываемого металла устанавливается оптимальный интервал температур нагрева (начала деформации) и окончания процесса ОМД.

Нагрев желательнее осуществлять с наибольшей скоростью, т.е. за возможно короткое время. При этом в меньшей степени происходит рост зерна, снижаются отходы металла на угар (образование окалины за счет взаимодействия с кислородом атмосферы печи), меньше углерода выгорает с поверхности стальных заготовок. Температура посадки металла в нагревательное устройство и скорость нагрева определяются его пла-

стичностью и теплопроводностью в соответствующем температурном интервале.

В процессе нагрева возникает перепад температур между внутренними и наружными зонами заготовки, сопровождаемый возникновением термических напряжений. Эти напряжения при недостаточной пластичности металла могут привести к образованию и развитию трещин в нагреваемом изделии. Выдача заготовки из печи должна производиться после определенной выдержки в течение времени, необходимого для выравнивания температуры по всему сечению. В период выравнивания температуры по сечению, когда температура на поверхности постоянна, время, необходимое для полного прогрева всего сечения слитка или заготовки, прямо пропорционально квадрату толщины или диаметра сечения. В современных процессах обработки металлов давлением нагрев заготовок осуществляют в пламенных и электрических печах, в установках контактного и индукционного электрического нагрева.

Нагрев в пламенных печах происходит за счет лучеиспускания, конвекции и теплопроводности металла. Нагрев металла с применением электрической энергии осуществляется за счет тепла, выделяющегося при прохождении тока через нагреваемую заготовку (контактный метод), или за счет токов от гистерезиса (индукционный метод). В электрических печах сопротивления металл нагревается за счет лучеиспускания тепла от нагревательных элементов сопротивления. Основными видами топлива, используемыми в пламенных печах, являются мазут и газ, причем последний вид топлива — наиболее прогрессивный.

Нагревательные печи бывают двух основных типов — камерные и методические. В камерных печах заготовку сажают в нагретую до температуры посадки печь и дальнейший нагрев осуществляют вместе с печью по заданному режиму. В таких печах нагреваются обычно заготовки и изделия, допускающие в начальный момент нагрева воздействие высоких температур. Методические печи имеют несколько зон (камер), при перемещении через которые металл постепенно нагревается до заданной температуры.

Существенным недостатком нагрева в пламенных печах с обычной атмосферой является обезуглероживание поверхности стальных заготовок и высокий угар металла. Кроме того, образующаяся окалина во избежание брака изделий и повреждений деформирующего инструмента должна перед обработкой удаляться. Обезуглероженный слой подлежит удалению зачисткой или механической обработкой готовых изделий. Обе эти операции не только трудоемки, но и связаны с большими потерями металла. Так, угар при нагреве слитков составляет 1,5—2 %, а сортового металла — 3—4 % от общей массы нагреваемого металла. Угар при каждом последующем нагреве составляет 50—75 % от получаемого при первом нагреве. Для уменьшения и предохранения металла

от окисления и обезуглероживания в пламенных печах применяют защитные атмосферы. Чаще всего используют оксид углерода, получаемый путем неполного сжигания топлива. Проще осуществляется безокислительный нагрев в электропечах сопротивления, так как отсутствие в рабочей зоне пламени позволяет заполнять ее нейтральным газом.

При контактном и индукционном нагревах по сравнению с нагревом в пламенных печах слой окалины уменьшается в 4—5 раз (угар 0,8—1 %), а обезуглероживание практически отсутствует. Электронагрев обеспечивает более высокую точность регулирования температур, что важно для предупреждения перегрева. К недостаткам электронагрева относятся ограничения по сортаменту нагреваемых изделий и маркам сталей, высокая стоимость установок и электроэнергии. В последние годы для нагрева высокорективных металлов и сплавов находят применение нагревательные установки с вакуумированием печного пространства или заполнением его нейтральными газами (гелием, аргоном и др.) высокой степени очистки. Для указанных дорогостоящих сталей и сплавов затраты на осуществление безокислительного нагрева, как правило, окупаются.

## Глава 2 ПРОКАТКА

### 1. Способы прокатки

Прокатка — один из наиболее распространенных видов ОМД. Основные способы прокатки представлены на рис. 173.

При продольной прокатке (рис. 173, а) металл деформируется между двумя валками, вращающимися навстречу друг другу. В настоящее время этим способом производится почти 90 % прокатной продукции, в том числе весь листовой и профильный прокат. Крупный сорт, профиль и толстый лист производят методом горячей продольной прокатки, тонкий лист, ленту, мелкий профиль точных размеров — методом холодной прокатки. Горячая прокатка более производительна и экономически выгодна, чем холодная, однако холодная прокатка обеспечивает значительно более высокую точность и часто является чистовым этапом производства листов, труб и профилей. Кроме того, тонкий лист (толщина 1,5 мм) производить горячей прокаткой затруднительно вследствие быстрого охлаждения металла.

При поперечной и поперечно-винтовой (косой) прокатке (рис. 173, з) валки вращаются в одну сторону. При косой прокатке металл получа-

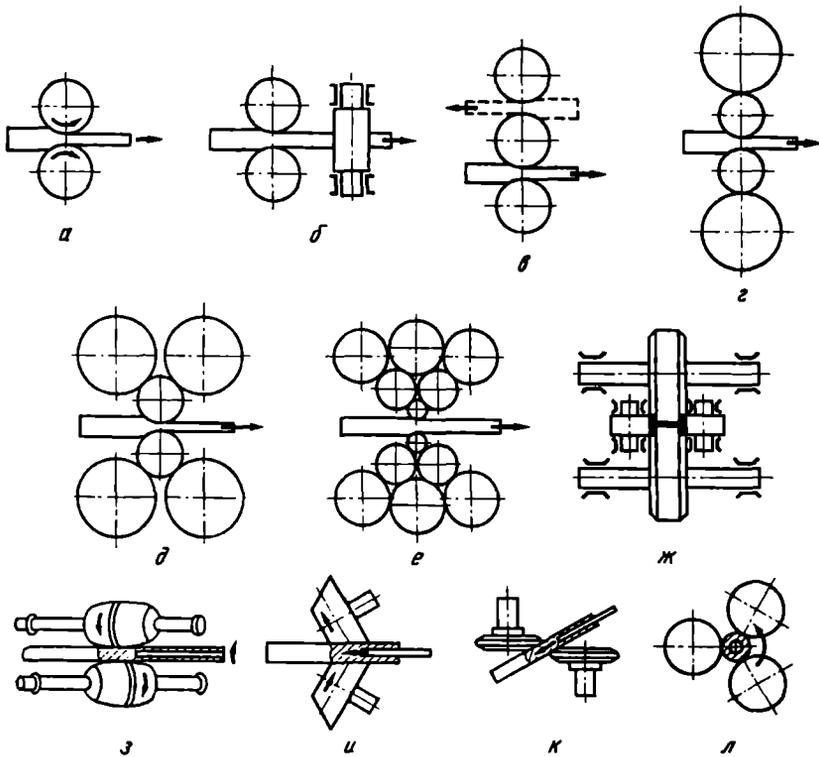


Рис. 173. Основные способы прокатки и типы прокатных станов

ет не только поперечную, но и продольную деформацию за счет перекоса валков. В обоих случаях заготовка вращается вследствие вращения валков. Косая прокатка — процесс производства бесшовных горячекатаных труб, а поперечная — спецпрофилей периодического сечения. Эти виды прокатки, как правило, относятся к методам горячей обработки.

## 2. Классификация прокатных станов

Наиболее простая классификация прокатных станов может быть произведена по назначению продукции: обжимные (блюминги — производство сортовой заготовки; слябинги — производство листовой заготовки), заготовочные, крупносортовые, среднесортные, мелкосортные, проволочные, рельсобалочные, универсальные балочные, толстолистовые, широкополосные, листовые, тонколистовые, ленточные, трубопрокатные, бандаже- и колесопрокатные, а также специального назначения.

Сортовые станы характеризуются диаметром валка: так, блюминг 1150 имеет  $D_B = 1150$  мм, сортовой стан 450 имеет  $D_B = 450$  мм.

Листовые станы определяются максимальной длиной цилиндрической части (бочки) валка: так, листовой стан 2000 имеет длину бочки валка 2000 мм.

Прокатные станы бывают реверсивными (возможность изменения направления прокатки) и нереверсивными.

По количеству валков (см. рис. 173) различают станы «дуо» — двух-валковые, «трио» (применяются редко), «кварто» — четырехвалковые (находят самое широкое применение для горячей и холодной прокатки, так как из-за жесткости валков резко повышается точность проката), шестивалковые (служат для холодной прокатки тонких и узких лент с жесткими допусками), двенадцати (и более)-валковые (предназначены для производства фольги высокой точности в холодную), универсально-балочные станы с неприводными вертикальными валками для горячей прокатки широкополосных балок, трубные станы горячей прошивки и раскатки гильз.

### 3. Основы технологии продольной прокатки

Сортаментом стана называется совокупность получаемых изделий по форме, сечению и размерам.

Прокатные изделия России гостированы, имеются справочники, указатели технических условий и каталоги различного назначения. Все прокатные изделия подразделяют на сорт, лист (до 4 мм тонкий, свыше 4 мм толстый); трубы (горячекатаные и холоднокатаные); профили (простые и фланцевые); специальные виды проката. Основной сортамент прокатной продукции, изготавливаемой на станах продольной прокатки, представлен на рис. 174. Прокатку сорта и профиля осуществляют в калиброванных (ручьевых) валках, листы и полосы прокатывают в валках с гладкой бочкой.

Врез на валке называется ручьем, два ручья образуют калибр (рис. 175). Калибровкой называется последовательное расположение на валках ручьев, обеспечивающее получение готового профиля заданных размеров.

В практике прокатного производства используют различные виды калибров: обжимные (вытяжные), черновые (подготовительные), предотделочные (предчистовые), отделочные (чистовые).

Общей тенденцией для технологии горячей прокатки листового и профильного проката является широкое внедрение методов контролируемой прокатки: регламентирование условий деформации и температурных режимов, объединяющих в себе процесс прокатки и термической

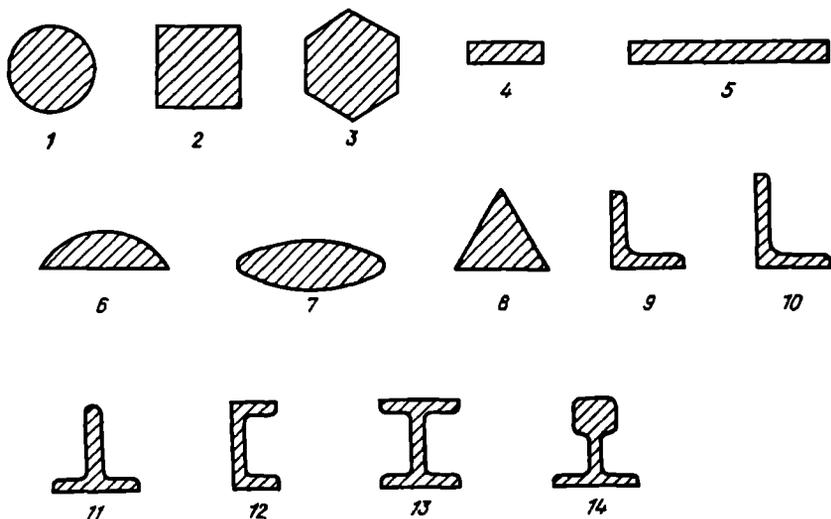


Рис. 174. Сортамент прокатной продукции:

1 — круг; 2 — квадрат; 3 — шестигранник; 4 — полоса; 5 — лист; 6 — сегмент; 7 — овал; 8 — трехгранник; 9 — равнобокий уголок; 10 — неравнобокий уголок; 11 — тавровая балка; 12 — швеллер; 13 — двутавровая балка; 14 — рельс

обработки, что резко повышает свойства готового проката при снижении затрат на его производство.

Метод холодной прокатки занимает особое место при производстве листов и лент толщиной 0,2—5 мм при ширине 200—2300 мм и, что особенно важно, обеспечивает точные размеры изделий и высокое качество поверхности. С уменьшением толщины листов до определенной величины горячая прокатка сопровождается быстрым остыванием металла в окалину вследствие неизбежных частых подогревов. В нагретом состоянии из стали можно прокатать листы толщиной не менее 1,5 мм, узкие полосы — не менее 1,0 мм и в пакетах (по 6—8 полос) обеспечить толщину до 0,25 мм.

Для горячекатаного листа допуск по толщине составляет  $\pm 0,1$ —4,0 мм в зависимости от сортамента, более тонкие листы и полосы с допусками по толщине от  $\pm 0,001$  до 0,02 мм с гладкой и чистой поверхностью получают

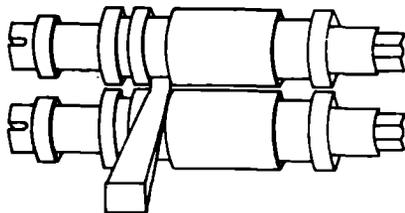


Рис. 175. Расположение ручьев на валках

только холодной прокаткой на шлифованных или полированных валках с применением смазок.

В последние годы холодную прокатку начали широко применять для производства точных фасонных профилей наряду с волочением. Потребности в холоднокатаном металле растут из года в год: электромашиностроение, авиация, автомобильная и тракторная промышленность, криогенная техника и др. Холоднокатаный лист — самая высококачественная продукция, хотя себестоимость его выше, чем горячекатаного. Холодной прокаткой изготавливают лист и ленту из стали всех классов, цветных металлов (алюминия, титана, медных сплавов) и тугоплавких сплавов.

В современных цехах листовую сталь производят рулонным методом. Смотанный в рулоны лист поставляется потребителям, производящим размотку и разрезку листов на требуемые по длине размеры.

Полистный способ устарел и остался лишь для толстых листов ответственного назначения. Рулонный способ позволяет создавать непрерывные процессы с полной механизацией и автоматизацией всех операций в потоке. Исходной заготовкой служит горячекатаный лист или лента (подкат). Перед холодной прокаткой подкат очищают от окалины и зачищают от дефектов, для чего используют дробеструйный метод, травление, механические методы.

Холодную прокатку проводят на реверсивных или непрерывных станах, как правило, многовалковых. Многовалковые станы имеют более жесткую конструкцию, вследствие чего обеспечивают высокую точность изделий. При холодной прокатке удельное давление на валки очень велико (до 2000 МПа) и жесткость клетей обеспечивает незначительные величины прогиба валков. В процессе обработки металл упрочняется (наклепывается) и при дальнейшей деформации может разрушиться. Поэтому рулоны подвергают промежуточным разупрочняющим отжигам. Толщины готовых изделий колеблются в пределах от нескольких миллиметров до нескольких микрометров. Для повышения механических свойств холоднокатаного металла после окончательной термообработки в ряде случаев металл подвергают дрессировке — прокатке с небольшим обжатием (0,5—5 %). При этом повышается прочность, улучшаются штампуемость, качество поверхности. Дрессировку производят за один проход без смазки на специальных дрессировочных станах.

К основным тенденциям развития конструкции листовых станов и технологии производства холоднокатаного листа относятся:

- 1) строительство непрерывных 5—6-клетевых четырехвалковых станов для производства листов и жести с высокими скоростями прокатки;

2) реконструкция непрерывных станов в станы бесконечной прокатки путем совмещения прокатки с операциями подготовки полосы, а дрессировки — с термообработкой и отделкой;

3) комплексная автоматизация станов с применением ЭВМ.

#### 4. Производство бесшовных труб

Трубопрокатные заводы, как правило, имеют полный цикл производства и поставляют как горячекатаные, так и холоднокатаные, тянутые и сварные трубы. Центробежно-литые трубы используют в качестве заготовки и значительно реже поставляют в качестве готовой продукции. Горячекатаные трубы производят двумя методами — прокаткой и прессованием.

Горячекатаные трубы служат также заготовкой для изготовления всех видов холоднокатаных и холодноотянутых труб.

Большинство труб имеет круглое сечение, но выпускаются также трубы профильного и ребренного сечения (рис. 176).

Сортамент бесшовных труб характеризуется диаметром (чаще наружным) и толщиной стенки. По диаметру бесшовные трубы поставляются от 650 мм до нескольких миллиметров (капиллярные трубы для медицинских игл) с толщиной стенки от 75 мм до десятых долей миллиметра. Бесшовные трубы по механическим, физическим и эксплуатационным свойствам превосходят литые и сварные, но значительно дороже.

Горячекатаные трубы изготавливают диаметром не менее 70 и стенкой не менее 2,5 мм. Уменьшение диаметра горячекатаных труб без утонения стенки до 50—25 мм производят методом горячего редуцирования на редуцированных безоправочных станах. Экономически нецелесообразно изготовление горячей прокаткой более тонкостенных труб и труб

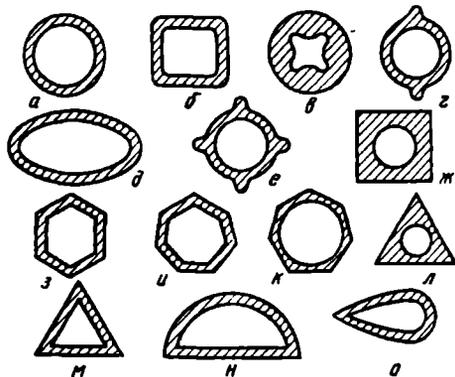


Рис. 176. Основные профили бесшовных труб:

а — круглые; б — квадратные или прямоугольные; в — круглые с профильным каналом; г, е — ребристые; д — овальные; ж — квадратные с круглым каналом; з, и, к, л, м — многогранные с различным профилем канала; н — сегментные; о — каплевидные

меньшего диаметра вследствие того, что металл быстро охлаждается, а также по соображениям стойкости и работоспособности инструмента.

Общая схема процесса производства горячекатаных труб состоит из двух операций: получение из цельной заготовки толстостенной трубы-гильзы (прошивка); раскатка гильз в горячекатаную трубу в основном на станах продольной прокатки в круглых калибрах на оправке.

Процесс прошивки осуществляют на прошивных станах валкового, грибовидного или дискового типа на конической оправке (см. рис. 176, з, и, к). Создаваемая в очаге деформации схема объемного напряженного состояния с преобладанием растягивающих напряжений вызывает такое ослабление сердцевины прошиваемой заготовки, что возможно самопроизвольное вскрытие полости (разрушение) в центральной части ее поперечного сечения. Для его предотвращения и получения гильзы с гладкой внутренней поверхностью устанавливается коническая оправка, размеры которой выбирают, исходя из требуемых размеров гильзы по внутреннему диаметру и толщине стенки.

Однако геометрическая точность и чистота поверхности горячекатаных труб не всегда удовлетворяют потребителей и всегда уступают холоднокатаным. Так, допуски по диаметру горячекатаных труб в два раза превышают допуски для труб холоднокатаного производства, а допуски по толщине стенки для холоднокатаных труб практически на порядок меньше. Получение труб повышенной геометрической точности и качества поверхности, в том числе малого диаметра и с тонкой стенкой, осуществляют холодной прокаткой или холодным волочением. В большинстве случаев комбинируют оба способа: холодной прокаткой осуществляют утонение стенки до требуемой величины и далее волочением уменьшают диаметр до заданного размера.

Холодным волочением на оправке также можно утонять стенку, но экономически целесообразна комбинация холодной прокатки труб с безоправочным волочением. Заготовкой для холодной прокатки служат горячекатаные и горячепрессованные трубы. Для производства холоднодеформированных труб ответственного назначения исходную трубную заготовку подвергают обточке и расточке по наружному и внутреннему диаметрам.

## 5. Специальные виды прокатки

К специальным видам прокатки относят прокатку колес и профилей периодического сечения, прокатку шаров, процесс прессопрокатки и др.

Последовательность изготовления цельнокатаных колес состоит из комбинацииковки (а, б), штамповки (в) и прокатки (г) на специальном стане сложной конструкции (рис. 177, I, II).

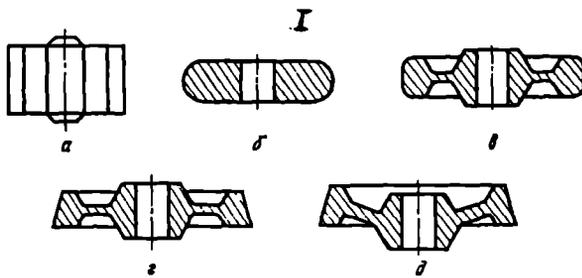
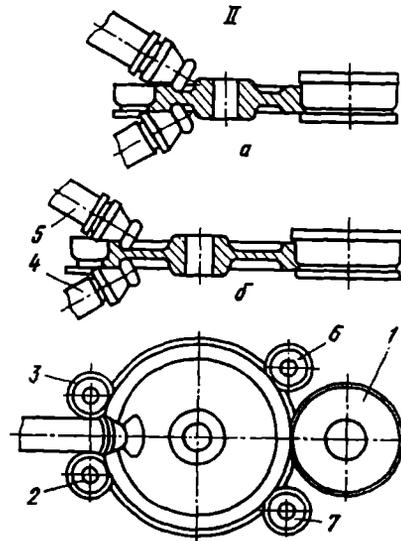


Рис. 177. Схемы производства горячекатаных колес и бандажей:

*I* — схема последовательности операций при изготовлении колес; *a* — заготовка; *б* — осадка и прошивка; *в* — штамповка; *г* — прокатка; *д* — выгибание диска; *II* — положение валков колесопрокатного стана в начале (*a*) и конце прокатки (*б*): *1* — коренной валок; *2, 3* — нажимные валки; *4, 5* — наклонно расположенные валки для обработки торцевой и внутренней поверхностей обода; *6, 7* — направляющие ролики



Многие машиностроительные отрасли потребляют детали круглого сечения, диаметр которых периодически изменяется по длине (полуоси автомобилей, ступенчатые валы и др.) (рис. 178, б). Ранее применяемые методыковки и штамповки по производительности, точности и качеству изделий значительно уступают методам горячей прокатки, из которых наиболее совершенным является способ поперечно-винтовой прокатки на трехвалковых станах (рис. 178, а). Прокатные валки *2*, сближаемые или раздвигаемые электроприводом *1* по заданной периодической схеме копиром *5*, осуществляют прокатку заготовки *б*, закрепленной в патроне *3*. Каждый валок может перемещаться вдоль своей оси с помощью индивидуального гидроцилиндра, причем это перемещение автоматически происходит одновременно на одинаковую величину для всех вал-

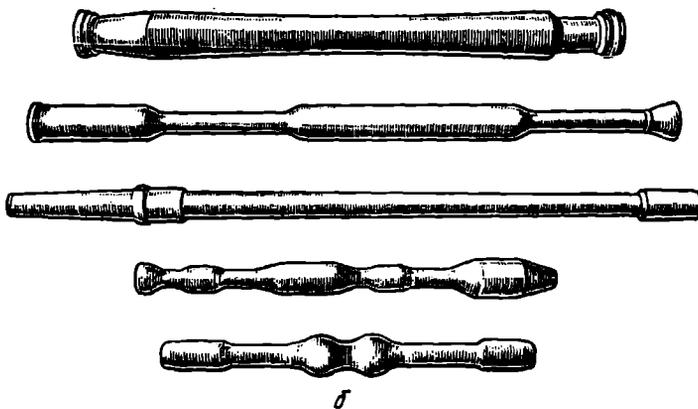
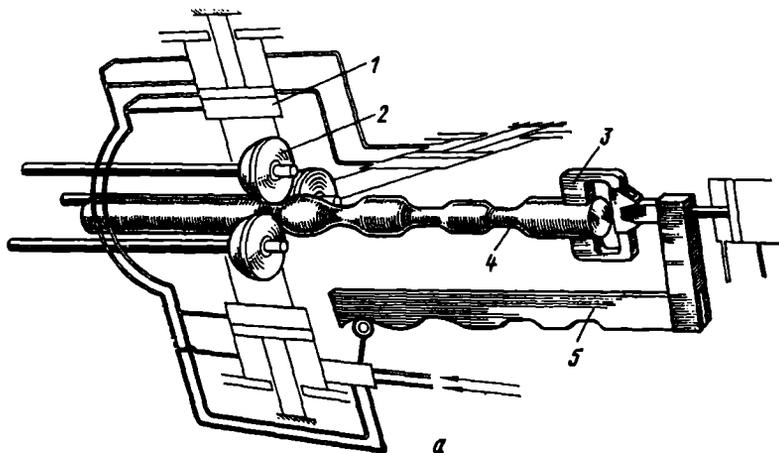


Рис. 178. Схема стана для производства периодического проката (а) и образцы профилей (б)

ков. Валки имеют дисковую или коническую форму и расположены под углом  $120^\circ$  один к другому.

### *Прокатка стальных шаров*

Стальные шары требуются в больших количествах для производства подшипников и установок для размельчения различных материалов. Ранее применявшиеся методы штамповки малопродуктивны и свя-

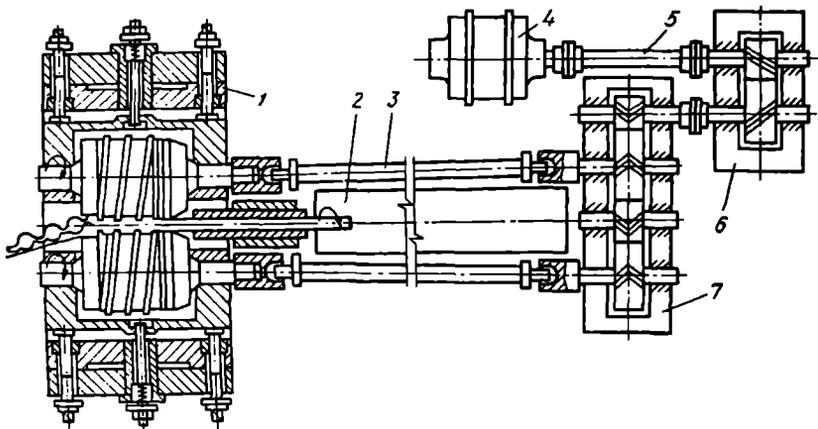


Рис. 179. Схема стана для прокатки шаров

заны с большими отходами металла. В нашей стране созданы станы поперечно-винтовой прокатки шаров диаметром 25—120 мм из круглой штанги соответствующего диаметра, равного диаметру прокатываемого шара. За каждый оборот валков прокатывается один шар. Производительность стана находится в пределах 60—150 штук в минуту. Конструкция стана представлена на рис. 179.

### *Пресспрокатка*

Основными методами производства профилей являются прессование и прокатка. Причем каждому из этих методов свойственны свои преимущества и недостатки. Пресспрокатка, объединяя основные преимущества прессования и продольной прокатки, практически сводит к нулю недостатки каждого из отдельных составляющих. В результате такого совмещения появляется возможность получения как изделий традиционного сортамента (полосы, сорта, сплошные и полые профили, трубы и т.д.), так и изделий, ранее либо вообще не изготовлявшихся методами обработки давлением, либо изготовлявшихся с ограничениями по геометрическим размерам и маркам материалов (крупногабаритные панели; вафельные, оребренные, полые и сплошные, высокие таворы, широкополочные балки и др.).

Пресспрокатный процесс (рис. 180) вследствие резкого снижения величины пассивных сил трения и сохранения благоприятной схемы объемного напряженного состояния, позволяет значительно (на 40—50 %) снизить усилие, необходимое на выдавливание металла из контейнеров по сравнению с обычным прессованием. При этом вследствие

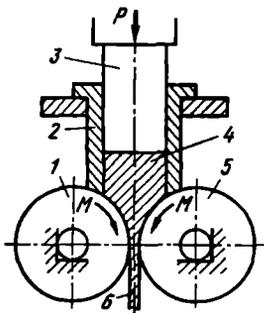


Рис. 180. Схема пресспрокатного процесса:

1, 5 — валки; 2 — контейнер;  
3 — пуансон; 4 — заготовка, 6 — изделие

принудительной задачи металла в валковую матричную клеть обеспечивается заполнение калибра практически любой конфигурации, что при продольной прокатке в ряде случаев либо невозможно вообще, либо сопряжено с очень большими трудностями. Процесс осуществляется путем прессования нагретой заготовки из контейнера в валковую матрицу. В настоящее время пресспрокатка пока не нашла широкого применения в промышленности.

## 6. Производство гнутых профилей

Особой разновидностью специальных станов являются гибочные роликовые станы. На этих станах изготавливают профили методом холодной гибки полосы (рис. 181). Получить такие профили горячей прокаткой зачастую просто невозможно из-за быстрого охлаждения тонкостенных изделий и сложности их формы. Гнутые профили можно изготавливать и штамповкой, но этот способ менее производителен и ограничивает длину профиля. Многоклетевые гибочные станы имеют 6—20 последовательно расположенных клетей непрерывного типа. В каждой паре гибочных роликов сечение полосы изменяется, постепенно приобретая к последней клетке заданную форму. В гибочных станах практически нет изменения площади сечения, изменяется только его форма. Применение гнутых профилей в строительстве и машиностроении взамен катаных позволяет экономить до 40 % металла. Производство гнутых профилей характеризуется следующими преимуществами перед другими способами получения профилей сложной формы.

1. Обеспечивается возможность получения из полосовой стали профилей практически любой конфигурации с различными размерами.

2. Создается возможность осуществления поточного производства с совмещением операций перфорации, окраски, нанесения покрытий и т.д.

3. Обеспечивается высокое качество поверхности и точность размеров всех элементов.

4. Сравнительно низкий расход энергии, высокая стойкость валков.

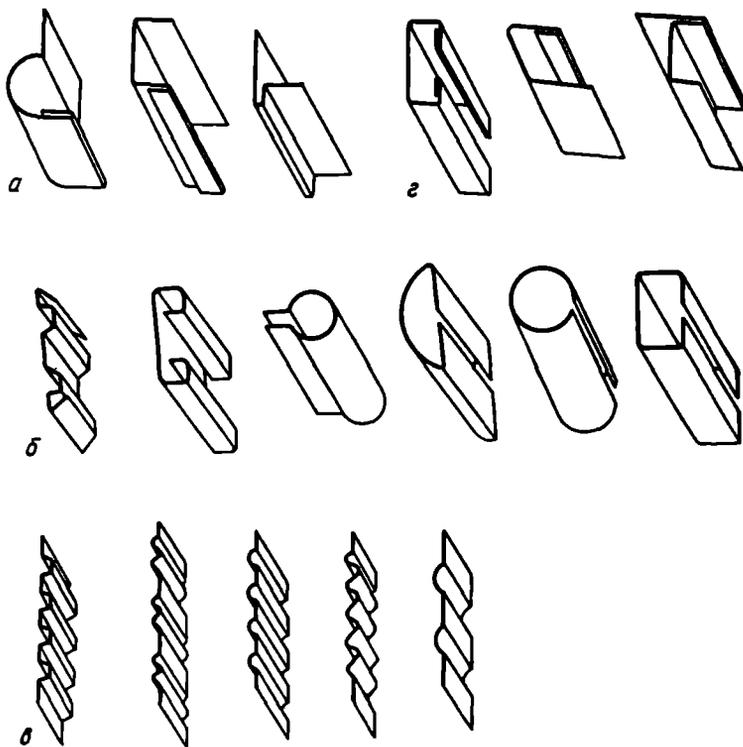


Рис. 181. Основные виды гнутых профилей:

*а, г* — профили с элементом двойной толщины; *б* — профили замкнутого типа; *в* — гофрированные профили

5. Минимальный расход металла (коэффициент использования металла 99,5—99,8 %). Максимальные размеры по ширине исходной заготовки 600—1500 мм при толщинах соответственно 2—8 и 1—4 мм. Предельные размеры исходной полосы в настоящее время составляют по ширине 2500 мм, по толщине 20 мм.

Процесс профилирования весьма перспективен и будет широко развиваться в последующие годы.

## 7. Производство сварных труб

Сварные трубы изготавливаются на трубосварочных агрегатах различными способами, из которых наиболее старым является печная сварка. Особенностью современных способов является использование различных методов электросварки — контактной сварки сопротивлением или

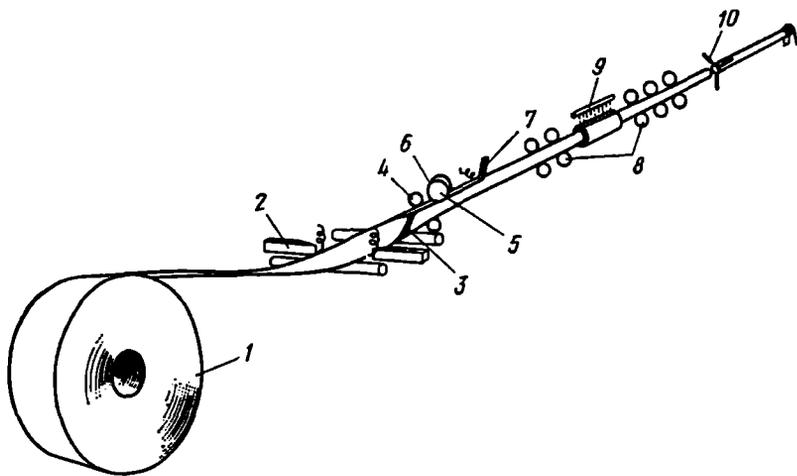


Рис. 182. Схема технологического процесса производства электросварных труб:  
 1 — рулон полосы; 2 — зачистка кромки полосы; 3 — формовка (свертывание); 4 — сдавливание кромок; 5 — медные диски-электроды; 6 — сварка кромок; 7 — зачистка грата; 8 — калибровка трубы по диаметру; 9 — охлаждение; 10 — резка на ходу

оплавлением, электросварки под слоем флюса или в среде защитных газов, газозлектрической сварки и др. Используют также кислородно-ацетиленовую сварку и пайку. Процесс производства состоит из операции валковой или прессовой формовки — гибки исходной ленты (штрипса) в трубу с последующей сваркой по стыку. Трубосварочный агрегат представляет собой комплекс механизмов и машин в виде поточной линии производства труб, их резки, транспортировки, контроля, отделки и отгрузки. В линию входят несколько многоклетевых станов: формовочный и сварочный, калибровочный, редуционный. Самый простой способ сварки — печной, основанный на способности нагретого металла при сдавливании образовывать сварное соединение (кузнечная сварка).

Процесс электросварки холоднотекучих труб является более современным и широко распространенным (рис. 182). Исходным материалом служит холоднокатаная лента или полоса, формируемая в трубу в шести и более клетевых станах со сваркой шва в конце процесса.

Для получения труб диаметром больше ширины исходного штрипса используют метод спиральной навивки. Следует отметить, что такие трубы по сравнению с прямошовными обладают большей равнопрочностью сечения. Для производства труб большого диаметра и толщины

стенки для магистральных трубопроводов используют методы прессовой формовки двух корыт со сваркой двумя продольными швами и другие методы. Сварные трубы производят в широком сорimente по диаметру (5—1620 мм и более) и толщине стенки (0,5—40 мм и более). Электросварные трубы имеют повышенную точность благодаря применению холоднокатаной ленты высокого качества.

## Глава 3 ВОЛОЧЕНИЕ

### 1. Основные понятия и закономерности процесса волочения

Сущность процесса волочения состоит в деформации металла путем протягивания его через сужающийся по длине канал круглого, квадратного или более сложного профиля (рис. 183). Волочильный инструмент, волока (матрица, фильера) изготавливаются из закаленной стали, твердых сплавов, а для прецизионных изделий — из алмаза (вставки в металлическое кольцо). Усилия волочения в значительной мере определяются силами трения на поверхности металл—волока, которые стремятся максимально снизить подбором рациональных смазок. Смазки бывают жидкие (касторовое масло, олифа, минеральные масла), жидкие с добав-

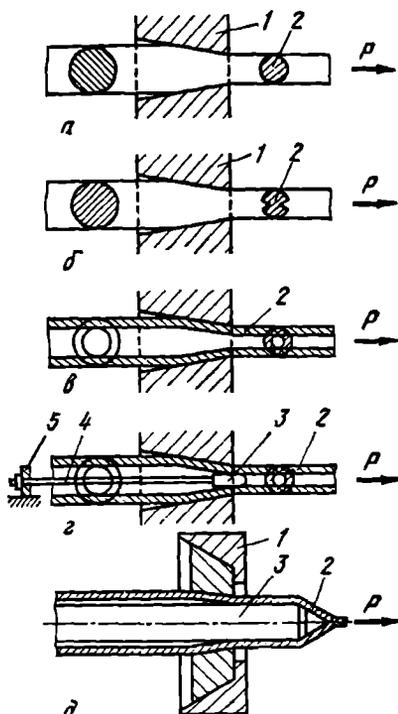


Рис. 183. Основные схемы процесса волочения:

*а* — круглого сплошного профиля; *б* — фасонного сплошного профиля; *в* — круглой трубы без оправки (редуцирование); *г*, *д* — круглой трубы на короткой и на длинной оправках с уменьшением по диаметру и утонением стенки; 1 — волока; 2 — протягиваемое изделие; 3 — оправка; 4 — стержень короткой оправки; 5 — упор стержня

ками (талька, порошка графита и др.), сухие (порошки, мыла), покрытия (фосфатные, металлические и др.). Для уменьшения внешнего трения и повышения стойкости волоочильного инструмента часто применяют волочение с противонапряжением, т.е. приложением к протягиваемому металлу на входе силы, направленной в сторону, противоположную его движению. При волочении изменяется профиль поперечного сечения с одновременной вытяжкой по длине. Процесс волочения многократен и чередуется с большим количеством промежуточных отжигов, травлений, смазок и т.д. Волочением изготавливают проволоку и трубы, реже используют процесс для калибровки сорта и производства профилей. Этот процесс позволяет изготавливать изделия различного сечения (проволока от 10 мм до нескольких микрометров) с очень высокой точностью и чистой поверхностью. В большинстве случаев металл, обрабатываемый волочением, не нагревают: он входит в волоочильный канал при комнатной температуре, а образующееся тепло деформации отводят с помощью эмульсии или обдува воздухом. При таком способе холодного волочения протянутый металл имеет блестящую гладкую поверхность и точные размеры поперечного сечения. В некоторых случаях, когда обрабатываемый металл обладает недостаточной пластичностью при комнатной температуре или высоким сопротивлением деформации, волочение осуществляют с предварительным подогревом.

При изготовлении труб широко используют три схемы: без оправки; на короткой оправке; на длинной подвижной оправке (рис. 183, в, г, д).

Для введения заготовки в волоочильный инструмент и обеспечения первоначального захвата передний конец изделия утоняют (острят) заковкой или забивкой на ротационно-ковочных машинах или молотах.

Отличительная черта процесса волочения — его универсальность (простота и быстрота замены инструмента), что делает его очень распространенным.

## 2. Производство проволоки

Производство проволоки осуществляется из широкой гаммы сталей и сплавов: углеродистых и высоколегированных сталей, сплавов на основе меди, никеля, титана и чистых металлов. Проволоку широко применяют для изготовления различных изделий техники практически во всех отраслях промышленности (троссы, торсионы вертолетов, пружины, струны, стропы парашютов и т.п.), а также в качестве сварочных материалов для автоматической и полуавтоматической сварки, материалов для армирования при производстве композиционных материалов и др. По объему производства из всех видов металлургических изделий проволока уступает лишь листовому прокату и трубам.

Исходным материалом для производства проволоки служит катанка диаметром 5—12 мм, изготавливаемая методом горячей прокатки.

В практике производства проволоки цветных металлов применяется также метод горячего прессования. Несмотря на то что отходы при прессовании достигают 10 %, этим способом можно производить заготовку из малопластичных сплавов. Кроме того, процесс прессования позволяет производить быструю переналадку оборудования и вести обработку металлов и сплавов, резко различающихся по физико-химическим свойствам.

Катанку из высоколегированных сталей и сложнoleгированных сплавов на основе цветных металлов для повышения пластических свойств и обеспечения стабильности физико-механических свойств по длине подвергают термической обработке. Это способствует резкому снижению обрывности проволоки в процессе ее волочения. Окалина на поверхности катанки оказывает большое влияние на процесс волочения. Содержание слоя окислы на стальной катанке, превышающее  $18 \text{ г/м}^2$ , практически исключает процесс волочения. Окислы с катанки необходимо удалить, что осуществляют травлением, изгибом катанки в роликах, дробеструйной очисткой. Наиболее распространено кислотное и щелочно-кислотное травление. В последнее время чаще стали применять механические методы очистки — дробеструйную, зачистку резцами, иглофрезерование и др.

На очищенную от окислы катанку наносят смазку. Материал смазки должен плотно сцепляться с поверхностью катанки, не разрушаться при давлениях и температурах, развивающихся в волочильном канале, и обеспечивать относительно материала волоки наименьший коэффициент трения.

Если по условиям изготовления проволоки недостаточно одного передела, то операции подготовки поверхности после разупрочняющей термической обработки повторяют.

### 3. Производство прутков и профилей

Методом холодного волочения, кроме проволоки, можно производить прутки и профили фасонного сечения из широкой гаммы марок сталей и сплавов, а также цветных металлов. Применительно к пруткам простого сечения (круг, квадрат) метод холодного волочения используют для калибровки, т.е. для получения более точных размеров с высоким качеством поверхности за 1—3 прохода. Как правило, калиброванные прутки последующей термической обработке не подвергаются. Точные или фасонные профили раньше изготавливали методами механической обработки сортовой заготовки. Однако такой метод при достижении

требуемых характеристик по точности имеет ряд недостатков, к которым относятся ограничение длины изделия, большие отходы металла в стружку (20—25 %), высокая трудоемкость операций.

Метод холодного волочения обеспечивает получение фасонных профилей длиной до 10 м и более любой конфигурации поперечного сечения требуемой точности и чистоты поверхности. Метод дает возможность широко варьировать (за счет наклепа, а также термической обработки) диапазон прочностных и пластических свойств металла готового изделия, резко сокращает отходы и увеличивает производительность.

Один из основных факторов, определяющих получение точного профиля, — качество и профиль волочильного инструмента. Получение точного профиля сложной конфигурации обеспечивается за 5—12 пропусков в последовательно сменяемых волоках, профиль которых последовательно приближается к профилю готового изделия. Волоки должны обладать высокой износостойкостью и минимальной деформацией при закалке. Поэтому для их изготовления применяют специальные легированные инструментальные стали и твердые сплавы на основе карбидов тугоплавких металлов (ВК8, ВК10 и др.).

#### 4. Производство труб

В общем случае волочением можно изготавливать трубы диаметром от 0,3 до 220 мм и более с толщиной стенки от 0,05 до 5—6 мм. Развитие методов холодной прокатки привело к использованию волочения в качестве последней операции ОМД в технологическом цикле — деформация без оправки с уменьшением диаметра до заданных размеров. Сочетание процессов холодной прокатки и волочения как последней операции является наиболее экономически выгодным, так как сокращает число циклов волочения в два раза. Используют все методы волочения, как с утонением по стенке и диаметру, так и с изменением только диаметра. Промышленное значение имеют следующие способы волочения труб: 1) волочение без оправки; 2) волочение на длинной подвижной оправке; 3) волочение на короткой неподвижной оправке.

Безоправочное волочение (редуцирование) не сопровождается значительными изменениями толщины стенки.

Волочение на оправке позволяет не только уменьшать диаметр, но и утонять стенку трубы. Технологический процесс производства труб волочением имеет ряд эффективных направлений совершенствования, реализация которых позволит значительно сократить потери металла и увеличить производительность работы трубоволочильных цехов.

## 1. Прессовое оборудование

По виду энергии привода прессы разделяются на гидравлические и механические.

В гидравлических прессах передача энергии деформирующим органам производится с помощью давления жидкости.

Механические прессы имеют кривошипные или кулачковые механизмы, преобразующие вращательное движение электропривода в возвратно-поступательное перемещение деформирующего инструмента.

Максимальные усилия гидравлических прессов 750 МН, механических — до 100 МН. Наиболее распространены прессы усилием 8—50 МН (гидравлические) и 6—1,5 МН (механические). Нижние пределы усилий не ограничены, мелкие прессы выпускаются на широкую гамму рабочих усилий. Крупные прессы (более 100 МН) представляют собой уникальные сооружения, воплощающие в себе новейшие достижения инженерной и научной мысли.

По расположению инструмента прессы делятся на вертикальные и горизонтальные. Горизонтальные прессы наиболее удобны при изготовлении профилей и труб, так как в этом случае не требуется подвальных приямков для выхода прессуемого изделия и соответственно снижаются ограничения по их длине.

## 2. Технология прессования

Прессованием называют процесс выдавливания (экструзии) находящегося в полости контейнера металла через выходное отверстие — очко матрицы. Методом горячего прессования в настоящее время изготавливают широкий сортамент изделий: прутки диаметром от 3 до 250 мм, трубы диаметром от 20 до 560 мм (с толщиной стенки 1,5—15 мм) и самые разнообразные профили сложного сечения.

Прессование чаще применяют для обработки цветных металлов и реже стали. Прессуют как слитки, так и деформированный металл. Большое распространение прессование цветных металлов получило благодаря более низким температурам обработки и требуемым усилиям. Однако в настоящее время все более широкое применение находит прессование стальных изделий. Используется прессование и для изготовления изделий из тугоплавких металлов (вольфрама, ниобия и др.) и сплавов на их основе. Это связано с успехами в деле конструирования мощных прессов и создания жаропрочных и износостойких материалов для прессового инструмента. По схеме деформации процесс прессования

идентичен волочению, а по схеме объемного напряженного состояния резко от него отличается.

При прессовании имеет место самая благоприятная схема напряженного состояния обрабатываемого металла по сравнению с другими процессами ОМД. Эта схема позволяет обрабатывать малопластичные и даже хрупкие металлы без опасности разрушения. Так сегодня обрабатывают недеформируемые другими способами обработки давлением чугуны (производство труб).

Методом прессования изготавливается очень широкий сортамент сплошных и полых профилей, труб и панелей, в том числе оребренных. Практически любой вид профильного проката может быть изготовлен прессованием. Процесс универсален относительно перехода с размера на размер и одного типа профиля на другой. Смена инструмента не требует больших затрат времени. Кроме того, возможность достижения очень высоких степеней деформации делает этот процесс высокопроизводительным. Скорости прессования достигают 5 м/с и более. Из недостатков следует указать повышенный отход материала в пресс-остаток (10—20 %), неравномерность деформации в контейнере, высокую стоимость и расход инструмента, повышенные энергозатраты.

Существует два метода прессования — прямой и обратный (рис. 184).

При прямом прессовании металл выдавливается в направлении движения пуансона (пресс-остаток 18—20 %), при обратном — металл движется из контейнера навстречу движению пуансона (пресс-остаток 5—6 %). При прямом прессовании качество поверхности выше, чем при обратном, но обратное прессование требует меньшее усилие.

Инструмент для прессования состоит из контейнера, матрицы, пуансона (штемеля), иглы и иглодержателя (при прессовании полых профилей и труб).

В некоторых случаях применяются такие методы прессования как прессование с подогревом инструмента, вакуумное, с противодавлением, прилагаемым к изделию на выходе из матрицы (для металлов и сплавов с низкими пластическими свойствами) и т.д.

В последние годы наряду с традиционным методом горячего прессования широкое применение нашел способ холодного прессования точных профилей, без последующей механической обработки. Этот метод требует очень больших усилий и применяется для профилей малого сечения из высокопластичных в холодном состоянии металлов и сплавов. Холодное прессование исключает один существенный недостаток горячего процесса: нестабильность размеров и свойств по длине прессуемого изделия вследствие изменения температуры и размеров инструмента в ходе прессования. Однако несмотря на это основным и наиболее распространенным остается метод горячего прессования.

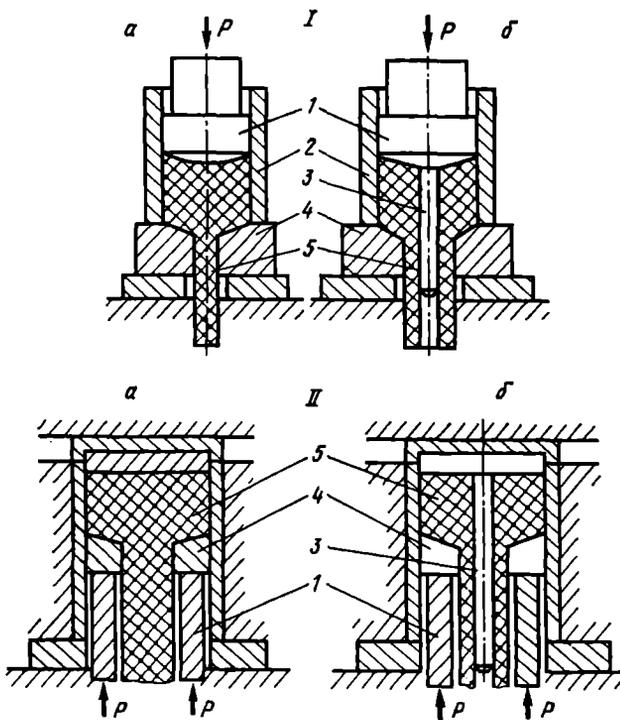


Рис. 184. Методы прямого (I) и обратного (II) прессования прутков (а) и труб (б):  
 1 — штемпель; 2 — контейнер; 3 — трубная оправка (игла); 4 — матрица;  
 5 — прессуемый металл

### 3. Гидроэкструзия

Одним из сравнительно новых и весьма перспективных способов прессования, при котором повышается пластичность металла и в значительной степени уменьшается влияние вредных сил трения, является прессование жидкостью высокого давления. Этот способ называется гидроэкструзией. Сущность способа заключается в том, что заготовка деформируется не жестким пуансоном, как при обычном прямом или обратном прессовании, а жидкостью высокого давления, подаваемой в полость контейнера (рис. 185). Кажущиеся на первый взгляд небольшие различия в схемах гидроэкструзии и обычного прессования обеспечивают в действительности как положительные, так и отрицательные моменты, свойственные этому процессу. К преимуществам процесса относятся:

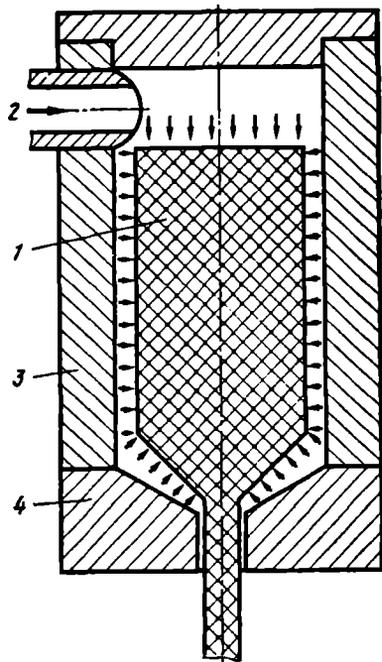


Рис. 185. Схема пресования жидкостью высокого давления:

1 — заготовка; 2 — жидкость высокого давления; 3 — контейнер; 4 — матрица

стойки матриц за счет тонкого слоя жидкости между металлом и поверхностью инструмента;

б) значительное улучшение структуры и свойств обработанного металла.

В общем случае гидроэкструзия является внеконкурентным способом обработки тугоплавких металлов и других хрупких материалов. Способ универсален, обладает широкими энергетическими возможностями, позволяет изготовить широкую номенклатуру изделий (профили, трубы, проволоки, биметаллы и др.). Метод гидроэкструзии не лишен ряда недостатков, к которым относятся:

1) сложность конструкции и эксплуатации оборудования, так как создать и удержать давление жидкости (до 3000 МПа и выше) практически очень трудно; требуются сложные установки из особопрочных сталей и высококвалифицированный обслуживающий персонал;

1) значительное повышение пластичности обрабатываемого металла под воздействием жидкости высокого давления и возможность его деформации с высокими скоростями и степенями обжатия;

2) отсутствие неравномерности деформации ввиду исключения вредного воздействия сил трения и более благоприятный характер истечения металла из матрицы;

3) значительное снижение удельного давления пресования (на 30—40 %) вследствие исключения трения по стенкам контейнера и возможность использования заготовки любой формы;

4) возможность деформации в холодном (теплом) состоянии, что повышает точность, чистоту и качество поверхности изделия, исключает отходы металла при нагреве, травлении и механической обработке; шероховатость поверхности гидроэкструдированных профилей  $R_a 0,1$  мкм;

5) резкое повышение стойко-

2) резкое возрастание скорости движения экструдированного изделия с ростом давления жидкости, которая при его выходе из матрицы достигает скорости полета пули; указанное явление требует создания специальных тормозных устройств или осуществление процесса с оставлением пресс-остатка, что увеличивает расход металла;

3) необходимость проведения предварительной заточки переднего конца заготовки (по профилю матрицы), чистовой обработки поверхности заготовки на станках, приготовления и нанесения на нее специальных смазок и защитных покрытий. Это, в свою очередь, повышает трудоемкость процесса.

Несмотря на отмеченные недостатки, применение различных способов гидроэкструзии практически оправдано и незаменимо в следующих случаях:

- 1) при получении изделий из труднодеформируемых материалов;
- 2) при изготовлении изделий из металлов нормальной деформируемости с большими степенями деформации (коэффициент вытяжки 200 и более);
- 3) при необходимости получения комплексного улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств обработанного металла;
- 4) для получения тонкостенных труб и профилей высокой точности;
- 5) при получении изделий из многослойных, композиционных, гранулированных, порошковых и других материалов.

В зависимости от заданных давлений и температур обрабатываемого металла (холодная обработка или тепловая деформация с подогревом до 200—700 °С, горячее выдавливание при 700—1200 °С) при гидроэкструзии применяют различные типы жидкостей: жидкое стекло, глицерин, воду, масла, силикон, керосин, бензин, расплавы солей, битумы или смеси ряда указанных компонентов.

В качестве смазок применяют дисульфид молибдена, графит, касторовое масло, оксид цинка, стеклосмазки и др.

Процесс гидроэкструзии быстро развивается и совершенствуется.

## Глава 5 СВОБОДНАЯ КОВКА

### 1. Общие сведения

Процесс свободного течения металла под воздействием периодических ударов или статических воздействий инструмента называется свободной ковкой (рис. 186, а—е).

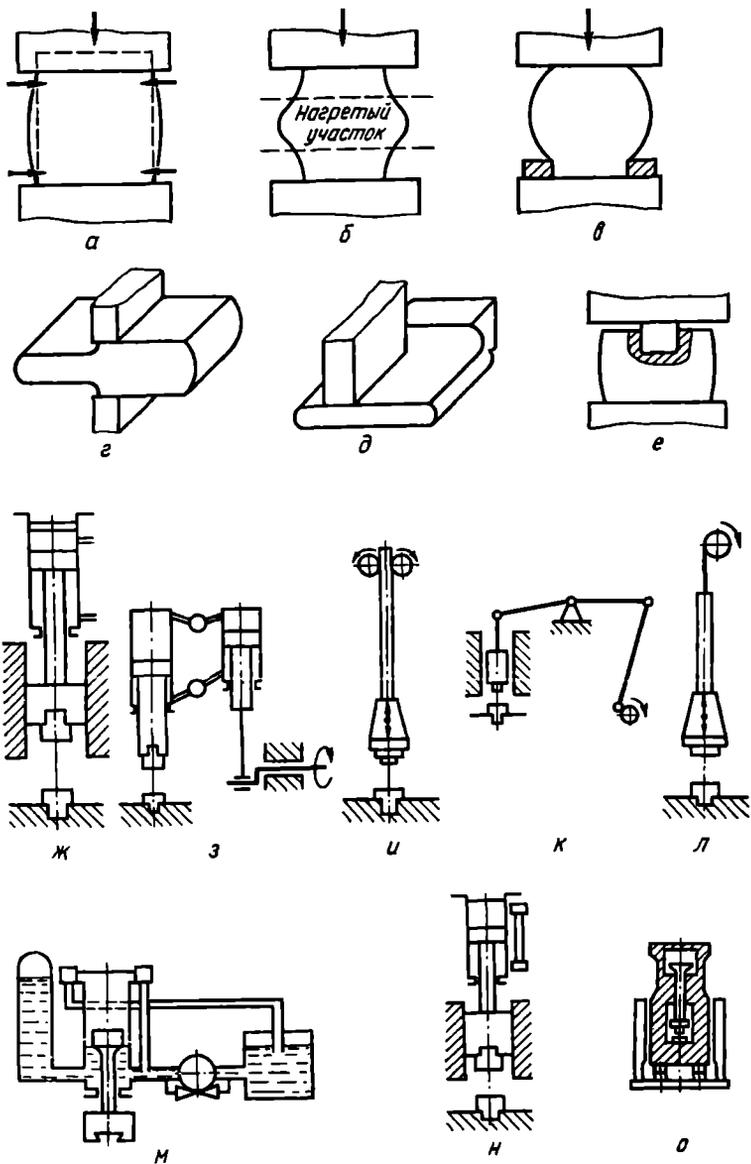


Рис. 186. Схемы свободнойковки и основных типов молотов:

*a* — осадка; *б, в* — высадка; *г* — протяжка; *д* — разгонка; *е* — прошивка; *ж* — паровоздушный молот; *з* — пневматический молот; *и, к, л* — механические молоты; *м* — гидравлический; *н* — газовый; *о* — высокоскоростной молоты

Свободной ковкой изготавливают детали массой от нескольких граммов до 250 т и более и размерами от сантиметров до десятков метров. Свободнаяковка разделяется на ручную и машинную. Ручнаяковка как древнейший способ обработки металла под давлением сохранилась в настоящее время в мелких ремонтных мастерских.

Свободная машиннаяковка осуществляется на молотах и прессах.

Молотами называются машины ударного действия, в которых энергия привода перед ударом преобразуется в кинетическую энергию линейного движения рабочих масс с закрепленным на них инструментом, а во время удара — в полезную работу деформирования поковки. Для привода молотов используют пар, сжатый воздух или газ, жидкость под давлением, горючую смесь, взрывчатые вещества, магнитные и гравитационные поля. Существуют молоты с массой падающих частей от 160 кг до 16 т. Обычно операции осуществляются последовательными ударами, высокоскоростные штамповочные агрегаты рассчитывают на один удар, за который полностью осуществляется деформационная операция. Принципиальные схемы молотов представлены на рис. 186, ж—о. По конструкции и типам привода молоты можно разделить следующим образом: паровоздушные, пневматические, электромеханические, газовые и высокоскоростные.

Паровоздушные молоты приводятся в действие соответственно паром или сжатым воздухом, подающимся от котлов или компрессоров. Поступая в рабочий цилиндр, энергоноситель разгоняет поршень и связанные с ним подвижные части молота до скоростей 6—7 м/с.

Пневматические молоты также используют сжатый воздух, но воздух является пружиной, связывающей два поршня — рабочий и компрессорный. Компрессорный приводится от коленчатого вала двигателя. Компрессор фактически встроен в молот.

В электромеханических молотах на поршень действует давление газов, возникающее в результате вспышки горючего.

В высокоскоростных молотах высокое давление создается с помощью специальных гидравлических устройств. Энергоноситель — сжиженный газ, порох и др. В этих молотах чаще используют метод встречного движения бойков. Такие молоты называются бесшаботными. Преимущество данной конструкции состоит в отсутствии громоздких фундаментов или амортизационных систем.

При ударе молота (бойка) по заготовке часть энергии расходуется на ее деформацию, остальная поглощается нижним бойком и его основанием (шаботом). Коэффициент полезного действия молота определяется как отношение полезной работы деформации  $A_d$  ко всей энергии удара  $A$ , т.е.  $\eta = A_d / A$ . Чем больше масса шабота, тем выше  $\eta$ .

## 2. Технологияковки

Ковке подвергают чаще литой металл. Деформированная заготовка применяется при перековке на мелкие размеры. При ковке литого металла процессы раздробления литой (дендритной) структуры и образования волокнистости в целом аналогичны соответствующим процессам при прокатке. Ковка и штамповка характеризуются большей неравномерностью деформации, чем прессование, что обусловлено контактным трением и рядом других факторов. Величину деформации оценивают коэффициентом укова:  $\lambda = F_0 / F_k = H / h > 1$ . При нескольких операцияхковки общий коэффициент укова  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n$ . Для устранения литой структуры коэффициент укова должен быть больше 2—5. На практике эта величина достигает 20.  $F_0$  и  $F_k$  — площади поперечного сечения до и после деформации,  $H$  и  $h$  — высоты начальной и конечной поковок соответственно.

Ковкой получают изделия достаточно сложной формы для последующей механической обработки.

К основным преимуществам свободнойковки относятся:

1) получение металла высокого качества и свойств по сравнению с отливками;

2) возможность получать крупные поковки по массе и габаритам, что другими способами либо недостижимо, либо экономически нецелесообразно;

3) сравнительно небольшие усилия, требуемые для изготовления крупных поковок, так как обработка осуществляется обжатием отдельных небольших участков.

4) применение универсального оборудования и инструмента, что резко снижает затраты производства, особенно при мелкосерийном его характере.

Однако свободнаяковка имеет также ряд существенных недостатков:

1) низкая производительность по сравнению с горячей штамповкой; этот недостаток в последние годы стремятся максимально устранить путем механизации процесса;

2) большие напуски на поковках, что требует большого объема последующей обработки.

Поэтому в настоящее время области применения свободнойковки все более сокращаются по сравнению с объемной штамповкой. Тем не менее в ряде случаев, особенно при единичном и мелкосерийном производстве, а также при изготовлении уникальных по габаритам заготовок (например, в тяжелом машиностроении) свободнаяковка оказывается экономически целесообразным способом получения деформированных заготовок. Свободнойковкой можно изготавливать заготовки практически

ски из всех марок и видов деформируемых конструкционных металлов и сплавов.

Методом свободнойковки получают крупные поковки (250 т) в основном простого сечения: круг, квадрат, многогранник, прямоугольник. Из крупных поволоков можно назвать заготовки валов и толстостенные оболочки (корпуса сосудов давления).

Особенностью осадки, разновидностью которой можно считать протяжку (увеличение длины изделия за счет уменьшения площади поперечного сечения с изменением его формы или без изменения), является бочкообразование, вызываемое действием контактного трения. Бочкообразование наглядно характеризует неравномерность деформации при ковке.

Обычная технологическая схемаковки: нагрев заготовки (слитка), беллетировка (превращение конического слитка в цилиндрическую заготовку), протяжка, подогрев и последующая ковка в размер (число подогревов может быть большим), разрубка на мерные длины, охлаждение и термообработка, осмотр, обмер, зачистка дефектов, отрезка образцов на механические испытания, сдача. При ковке слитков после беллетировки производят обрубку донной и прибыльной частей. При этом отход составляет в среднем 25—30 % (прибыль) и 5—10 % (донная часть). Иногда прибыль отрубают в концековки, так как за нее держат слиток. Учитывая, что процессковки многооперационный, отход металла на угар составляет 2—3 % от массы слитка при нагреве и 1,5—2 % на каждый подогрев. Эти потери значительно выше, чем при прокатке и несколько превосходят аналогичные при объемной и листовой штамповке.

## Глава 6.

### ОБЪЕМНАЯ И ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА

Штамповка — это способ изготовления изделий давлением с помощью специального инструмента (штампов), рабочая полость которых определяет конфигурацию конечной штамповки (изделия). Штамповки по своим размерам, точности, допускам и припускам значительно лучше аналогичных деталей, изготавливаемых свободной ковкой. Штампованные заготовки значительно приближены по форме и размерам к готовой детали. Специальные методы точной штамповки (высокоскоростная, штамповка в изотермических условиях и др.) позволяют изготавливать заготовки, подлежащие механической обработке только по сопрягаемым поверхностям. Процессы штамповки подразделяются на два вида

— объемная и листовая штамповка. При объемной штамповке используют сортовую или профильную заготовку, при листовой штамповке заготовкой служит металл в виде листа. Методами объемной штамповки изготавливают заготовки сложной конфигурации (шестерни, коленчатые валы, кронштейны, рычаги и другие детали для машиностроения). Для листовой штамповки характерно получение различных корпусных изделий (детали обшивки и корпуса легковых и грузовых автомобилей, гнутые корпусные судостроительные детали, коробчатые изделия сложной конфигурации и др.).

Детали можно штамповать в горячем и холодном состояниях на различных типах кузнечно-прессового оборудования. Холодная штамповка обеспечивает более высокое качество поверхности и точность, но требует более мощного оборудования и высоких энергозатрат. Одновременно следует учитывать более низкую пластичность обрабатываемого в холодную металл, что зачастую вызывает необходимость многооперационной обработки. Несмотря на это, штамповка — высоко экономически эффективный метод. Механические свойства штамповок превосходят аналогичные показатели кованных деталей, так как в штамповке легче создать усилия, обеспечивающие равномерность структуры и направленность волокон. Вырез на одном штамповом кубике называют ручьем, два кубика в совмещении образуют плоскость штампа. Штампы бывают одно- и многоручьевыми для изготовления штамповки в несколько переходов.

## 1. Горячая объемная штамповка

Сущность процесса горячей объемной штамповки заключается в том, что нагретую до оптимальной температуры заготовку помещают в полость одной из половин штампа, где она при воздействии второй половины приобретает заданную форму. Штамповка в открытых штампах сопровождается образованием облоя (заусеницы), поэтому при расчете объем заготовки нужно увеличить относительно объема готовой штамповки на величину облоя. Облой облегчает заполнение штампа металлом и позволяет использовать при штамповке одинаковых деталей заготовки несколько различающиеся по объему. Для получения облоя в верхнем ручье вытачивается специальная канавка. В открытых штампах делают специальные штамповочные уклоны в ручьях для облегчения извлечения готовой штамповки.

Штамповка в закрытых штампах осуществляется без облоя. В этом случае штамп и при наличии уклонов не обеспечивает свободного извлечения штамповки. Поэтому применяется специальное выталкивающее устройство. К безоблойным штампам относятся также прошивные штампы и штампы для выдавливания по типу прессования. Основные

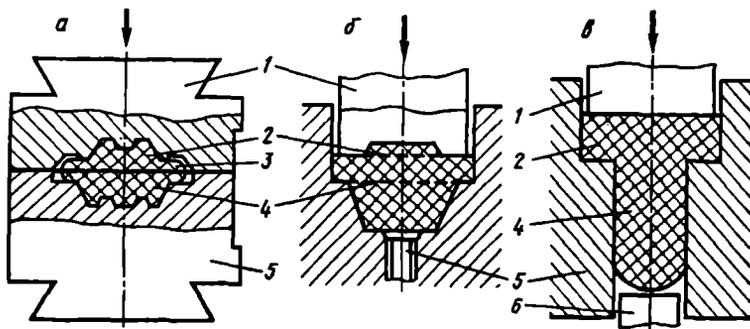


Рис. 187. Типы штампов при объемной штамповке:

*a* — открытый; *б* — закрытый; *в* — штамп для выдавливания; 1 — верхний (подвижный) штамп, по схеме *в* и *б* — пуансон, 2 — стенка ручья, 3 — облой (заусенец), 4 — штамповка, 5 — нижний (неподвижный) штамп, 6 — выталкиватель

типы штампов для горячей объемной штамповки представлены на рис. 187.

Технологическая схема процесса состоит из следующих операций: разрезки прутков, нагрева заготовки, переноса в полость штампа, штамповки, обрезки заусенца (облоя), термической обработки, осмотра, ремонта дефектов, приемки. Для горячей штамповки штампы изготавливаются из инструментальных углеродистых и легированных сталей: У8, У10, 3ХВ8, 7Х3, 5ХГС и др.

Горячая штамповка характеризуется высокой производительностью и низкой себестоимостью в массовом производстве. К недостаткам относятся наличие окалины, а также высокая стоимость штампов.

К преимуществам объемной штамповки по сравнению со свободной ковкой относятся:

- 1) значительно более высокая производительность;
- 2) исключение напусков для сложных по форме штамповок;
- 3) получение штамповок со значительно меньшими припусками;
- 4) несмотря на потери в облой 10—30 % металла, при объемной штамповке достигается его значительная экономия против операцийковки. Это достигается за счет снижения припусков и допусков.

Однако процесс имеет следующие недостатки:

- 1) ограниченную массу штамповок и их размеры; штамповки массой более 100 кг считаются крупными, основная номенклатура штамповок по массе оставляет 0,5—30 кг;

- 2) большие усилия, требуемые на проведение деформации по сравнению со свободной ковкой;

3) высокие затраты на инструмент, что делает штамповку в единичном и мелкосерийном производстве нерентабельной.

## 2. Холодная объемная штамповка

В холодном состоянии штамповку осуществляют в тех же штампах, которые применяются для горячей обработки. Основное преимущество холодной штамповки наряду с ранее указанными состоит в возможности деформирования заготовок малой толщины (полоса) и поперечного сечения (пруток, проволока). Этот метод позволяет получать поковки с тонкими сечениями, что в нагретом состоянии недостижимо вследствие их быстрого охлаждения. Холодная штамповка практически не применима для изготовления крупных изделий. В холодном состоянии чаще штампуют цветные металлы, низкоуглеродистые стали, легированные и коррозионностойкие стали типа X18H9T.

Примером холодной объемной штамповки являются процессы холодной высадки для изготовления из прутка изделий типа болтов, гвоздей, шурупов и шариков.

Разновидность холодной штамповки — холодное выдавливание, которое применяют для обработки цветных сплавов, например свинцовых, цинковых или алюминиевых, используемых для выдавливания тьюбиков для зубной пасты, красок и др.

## 3. Листовая штамповка

Листовая штамповка — один из прогрессивных методов формообразования на прессах при помощи штампов и широко применяется во всех отраслях машиностроения, приборостроительной, электротехнической и металлообрабатывающей промышленности.

Листовой штамповкой изготавливают изделия для автомобилей, тракторов, самолетов, сельскохозяйственных машин, холодильников. Особенно велик объем применения листовой штамповки в судостроении (корпусное производство, двери, настилы, переборки). Удельный вес листовой штамповки по расходу материалов в основных отраслях машиностроения и производства товаров народного потребления составляет 60—98 %. Широкое развитие листовой штамповки объясняется целым рядом ее достоинств, а именно:

- 1) высокой производительностью процесса и вследствие этого низкой себестоимостью штампуемых деталей;
- 2) незначительными отходами металла по сравнению с отходами других способов обработки резанием;
- 3) взаимозаменяемостью деталей, обусловленной их точностью;
- 4) возможностью получения достаточно простых и жестких, но легких деталей;

5) широкими возможностями механизации и автоматизации процесса.

В зависимости от толщины листа-заготовки штамповку можно условно разделить на тонколистовую (толщиной листа до 4 мм) и толстолистовую (толщина более 4 мм). Листовой металл толщиной свыше 15 мм, как правило, штампуют в горячем виде. Диапазон размеров штампуемых листовых деталей очень широк: от нескольких миллиметров до 6—7 м при толщинах от десятых долей миллиметров до 100 мм и выше. Точность деталей достигает при листовой штамповке 11—12 качества, а в случае проведения операций дополнительной зачистки и калибровки — 7—8 качества. В листоштамповочном производстве широко применяются как черные металлы (стали, сплавы на основе железа), так и цветные металлы и сплавы на их основе.

К первой группе относятся углеродистые стали (обыкновенного качества, качественные и конструкционные), легированные конструкционные стали (10ГСА, 25ХГСА и др.), стали и сплавы высоколегированные, коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные (0Х13, 4Х13, 1Х18Н10Т и т.п.). Ко второй группе относятся наиболее наиболее применяемые в промышленности медь и ее сплавы (М1, М3, Л62, ЛС59—1 и др.), никель, алюминий, магний, титан и сплавы на их основе (Н1, НМц65—20, А1, Д16, В95, АМг6, МА1, МА8, ВТ1, ВТ5 и т.п.). В листовой штамповке используют также биметаллический и многослойный лист.

Операции листовой штамповки могут быть разбиты на следующие основные группы: разъединительные, формоизменяющие, прессовочные, комбинированные и штампосборочные. К разъединительным (разделительным) операциям, связанным с отделением одной части материала от другой по замкнутому или незамкнутому контуру, следует отнести отрезку, вырубку (вырезку), пробивку отверстий, надрезку, обрезку и зачистку.

К формоизменяющим операциям превращения плоской заготовки в пространственную деталь требуемой формы без необходимого изменения толщины материала относят гибку, вытяжку, правку, рельефную штамповку, отбортовку, формовку, раздачу и обжим. К формоизменяющим операциям также относят вытяжку с утонением материала — протяжку.

К прессовочным операциям, связанным с изменением толщины заготовки, относятся чеканка, разметка (кернение), клеймение (маркировка) и холодное выдавливание.

Комбинированная штамповка — это совмещение нескольких технологических операций, например отрезки и гибки, вырубки и вытяжки.

Штампосборочные операции предназначаются для соединения нескольких деталей в один узел. Такими операциями являются запрессов-

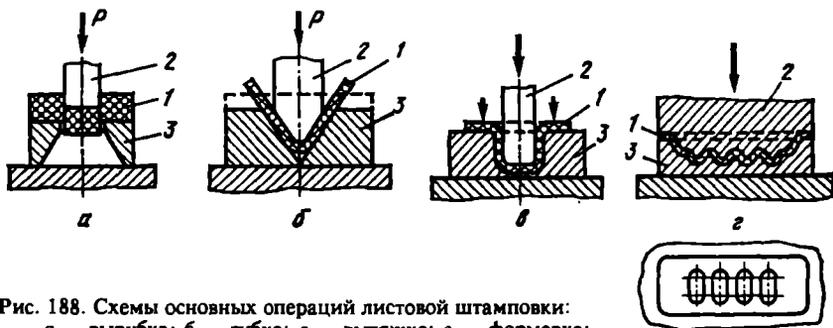


Рис. 188. Схемы основных операций листовой штамповки:  
*a* — вырубка; *б* — гибка; *в* — вытяжка; *г* — формовка;  
 1 — заготовка и изделие; 2 — пуансон; 3 — штамп (матрица)

ка, закатка, холодная или горячая пластическая (диффузионная) сварка и др. (рис. 188).

Своеобразной разновидностью процесса холодной листовой штамповки является метод безотходной просечки ленты (листа), применяемый для изготовления сетки из стали, титана, алюминия и других цветных металлов и сплавов. Технологический принцип основан на надавливании и растяжении с формированием ячейки различной конфигурации в зависимости от геометрии инструмента (рис. 189). Этим способом изготавливают сетки толщиной от 0,05 до 8 мм с размером ячеек по

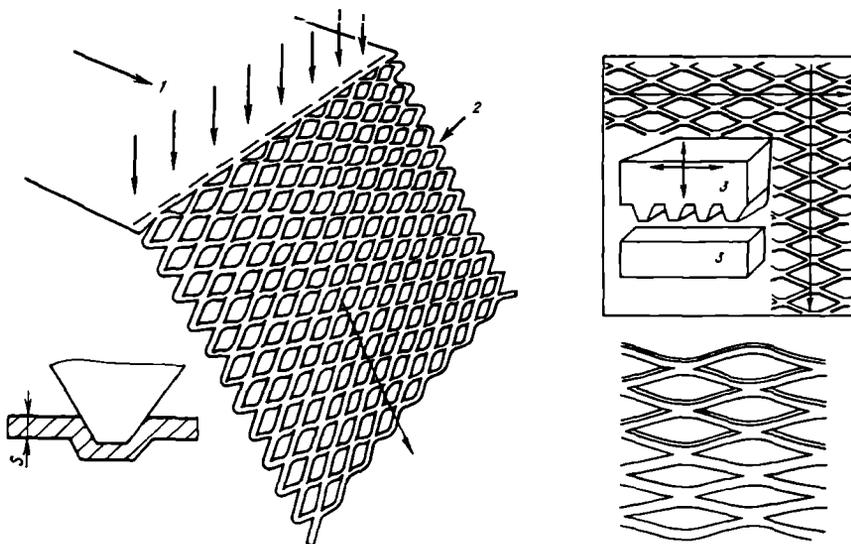


Рис. 189. Принципиальная схема установки безотходной просечки ленты:  
 1 — лента, 2 — сетка, 3 — рабочий инструмент (штамп)

вертикали 0,1—90 и 1,5—200 мм по горизонтали при перемычке, равной или большей, чем толщина сетки, которая равна толщине исходной листовой заготовки. Основное назначение сеток: элементы фильтров, сит, ограждений экранов, электротехнических изделий, строительных конструкций и др. Метод безотходной просечки имеет неоспоримые преимущества перед всеми традиционными способами изготовления сеток (сварка, плетение из проволоки, перфорация листа пробивкой, сверлением и т.д.) и имеет самые широкие перспективы.

Процессы листовой штамповки постоянно совершенствуются и развиваются. Наряду с традиционными методами получают широкое развитие такие, как обтяжка и обтяжка с растяжением по пуансону, сложная вытяжка, штамповка эластичным инструментом, групповые методы штамповки по элементам и ряд других. Разработаны новые конструкции переналаживаемых штампов и другие устройства, позволяющие применять листовую штамповку не только в массовом и крупносерийном производстве, но и в производстве деталей средними и мелкими сериями. Все это способствует успешному применению листовой штамповки во всех областях металлообработки.

## Глава 7

### ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

#### 1. Эффект сверхпластичности и его использование в процессах ОМД

Металлы и сплавы с ультрамелкой структурой (диаметр зерна до 10 мкм и меньше, что в 100 раз мельче зерна обычной структуры промышленных металлов и сплавов) обладают резко повышенной прочностью при обычных и низких (криогенных) температурах. Как правило, это повышение прочности не сопровождается сколько-нибудь существенным снижением пластичности. Такое измельчение зерна — один из перспективных путей эффективного повышения эксплуатационных свойств металлических материалов в области нормальных и криогенных температур как на воздухе, так и в агрессивных коррозионных средах. Другой и не менее существенной особенностью металлов и сплавов с высокодисперсной структурой является их поведение в области температур горячей пластической деформации (как правило, выше температуры начала рекристаллизации). Прочность этих материалов становится как минимум в 10 раз ниже прочности материала с обычным размером зерна, а пластичность становится аномально высокой. Так, величина относи-

тельного удлинения при растяжении достигает в ряде случаев 1000 и более процентов, относительное сужение  $\psi \approx 100\%$ , шейка на разорванном образце часто отсутствует. Это явление носит название эффекта сверхпластичности.

Кроме сверхпластичности, обусловленной наличием высокодисперсной структуры (изотермическая сверхпластичность), аналогичный эффект достигается для металлов и сплавов с обычной структурой в случае их пластической деформации в области температур фазовых, аллотропических или других видов структурных превращений (динамическая сверхпластичность). Для обоих типов имеет место наличие высокой чувствительности напряжения  $\sigma$  к скорости деформации  $\dot{\epsilon}$ , определяемой зависимостью  $\sigma = K \dot{\epsilon}^m$ , где  $m$  — показатель чувствительности к скорости деформации,  $K$  — константа, зависящая от марки материала. Так, при значениях  $m \geq 0,33$  материал сверхпластичен. Обычный интервал значений величины  $m$  для сверхпластичных материалов и сплавов 0,4—0,7 ( $m = 1$  имеет идеально-пластичная ньютоновская жидкость). Скоростной интервал проявления эффекта сверхпластичности для большинства металлов при растяжении составляет  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} - 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , что на несколько порядков ниже применяемых в процессах ОМД. При деформации с применением объемных схем напряженного состояния развитие эффекта сверхпластичности происходит при значительно больших скоростях и достигает значений  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ с}^{-1}$  (скорость деформации при прессовании или ковке на гидравлических прессах).

Ограничение по скорости деформации при сверхпластичности является одним из самых серьезных недостатков при использовании этого эффекта в процессах обработки металлов давлением.

После сверхпластической деформации металл имеет высокодисперсную структуру и в нем практически отсутствует анизотропия свойств. Следует также отметить, что металл, прошедший сверхпластическую деформацию, практически лишен наружных и внутренних дефектов (трещины, надрывы) и имеет высокое качество и чистоту поверхности.

В настоящее время все существующие и перспективные металлические материалы следует рассматривать как потенциально сверхпластичные. Температурно-скоростные параметры сверхпластической деформации целого ряда металлов и сплавов установлены, а технологические процессы промышленного использования сверхпластичности при ОМД проходят стадию изучения и внедрения.

Использование эффекта сверхпластичности возможно как в традиционных процессах обработки давлением (прессование, объемная штамповка, прокатка), так и в специально созданных способах, максимально реализующих все положительные аспекты этого явления (бесфиллерное волочение, пневматическая формовка) (рис. 190).

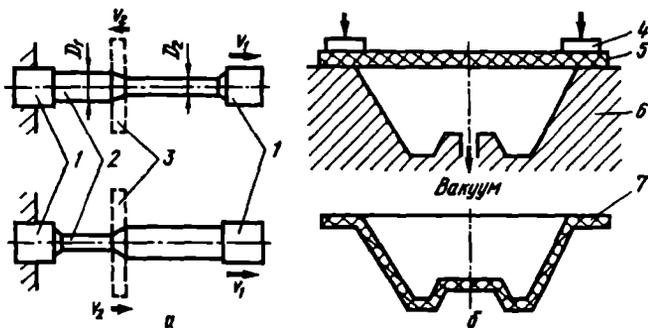


Рис. 190. Принципиальные схемы бесфильтерного волочения (а) и пневмостатической формовки (б):

1 — захват; 2 — обрабатываемое изделие; 3 — индуктор для нагрева; 4 — прижим контактного нагрева; 5 — листовая заготовка; 6 — штамп; 7 — изделие коробчатого типа

Исследования показывают, что при оптимальных температурно-скоростных условиях и режиме сверхпластичности можно деформировать металл со степенями деформации по сечению 400—800 % при высокой точности конечных размеров изделия.

В процессах прокатки сверхпластичных материалов наибольший практический интерес представляет возможность резкого снижения сопротивления деформации, что дает очень большую экономию энергозатрат и инструмента. Положительный эффект от снижения усилий в значительной степени компенсирует отрицательный фактор необходимости снижения скорости прокатки; однако суммарный экономический эффект оказывается положительным.

В состоянии сверхпластичности можно прессовать обычно недеформируемые металлы и сплавы, а для прессуемых — значительно повысить степень деформации при резком снижении энергосиловых параметров процесса. Некоторые сверхпластичные металлы прессуют с коэффициентом вытяжки до 250.

При штамповке объемных деталей в состоянии сверхпластичности вследствие низкого сопротивления и достижения больших степеней деформации получают высокоточное заполнение штампов сложной конфигурации и достигают значительного увеличения стойкости инструмента. Общее снижение стоимости изготовления объемных штамповок по сравнению с обработкой в несверхпластичном состоянии составляет более 25 %.

В целом преимущества использования эффекта сверхпластичности в процессах обработки давлением сводятся к следующему: 1) простота и низкая стоимость инструмента; 2) исключение промежуточных термообработок; 3) достижение полного повторения профиля и контуров штампа; 4) практически неограниченная степень деформации; 5) высокое качество поверхности; 6) получение оптимальной структуры и свойств обработанного металла.

Из недостатков необходимо отметить следующие: 1) низкую скорость деформации; 2) необходимость поддержания с высокой точностью температурного интервала деформирования, что в ряде процессов требует подогрева инструмента (прокатка, прессование, объемная штамповка); 3) необходимость применения нового технологического оборудования или дополнительной оснастки; 4) необходимость подготовки структуры обрабатываемого металла при реализации эффекта изотермической сверхпластичности.

## 2. Высокоскоростные и импульсные методы обработки металлов давлением

В области скоростей деформации, соответствующих обычным процессам обработки давлением (ковка, прокатка и др.), повышение скорости деформации отрицательно влияет на поведение обрабатываемого металла: растет сопротивление деформации и снижается пластичность металла. Однако это отрицательное влияние наблюдается только до определенных значений скорости. В области высокоскоростных и импульсных процессов деформирования ( $\epsilon = 10^3 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$ ) обнаружено снижение сопротивления деформации и рост пластичности обрабатываемого металла. При высокоскоростной обработке металлов давлением достигается повышение прочностных свойств металла готового изделия при сохранении достаточно высокого уровня пластичности.

Использование положительных аспектов влияния высоких скоростей деформации реализуется в следующих процессах обработки давлением: высокоскоростной объемной штамповке, штамповке взрывом и электрогидроимпульсной (электрогидравлической) штамповке.

Высокоскоростная объемная штамповка осуществляется на высокоскоростных молотах при скоростях до  $10^3 \text{ с}^{-1}$  преимущественно в закрытых штампах. При горячей высокоскоростной штамповке улучшаются заполняемость штампов и соответственно точность изделий. Применение высокоскоростной штамповки обеспечивает значительную экономию металла за счет снижения припусков и сокращения трудоемкости механической обработки.

Высокоскоростная деформация с использованием энергии взрыва наибольшее распространение получила в процессах изготовления изде-

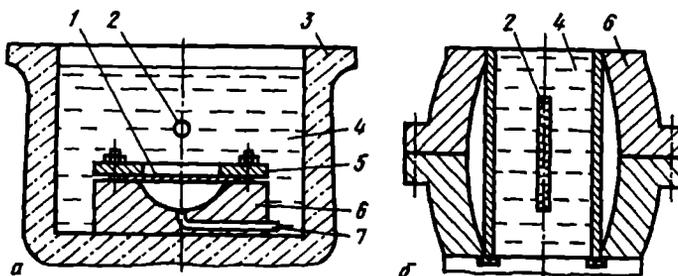


Рис. 191. Схема штамповки взрывом деталей из плоской (а) и трубной (б) заготовки в стационарном бассейне:

1 — заготовка; 2 — заряд взрывчатого вещества; 3 — бассейн; 4 — передающая среда; 5 — прижимное кольцо; 6 — матрица; 7 — вакуумная система

лий из листовой заготовки. Энергия ударной волны взрывчатых веществ передается заготовке через промежуточную среду — воздух, сыпучие или эластичные материалы. Форма деталей определяется матрицей. Детали различной конфигурации изготавливают из плоских или фасонных листовых заготовок.

Толщина штампуемой детали может превышать 25 мм (легированные стали) и достигать 100 мм (алюминиевые сплавы), длина и ширина 3,5 м и более.

Взрывная штамповка осуществляется путем холодной (рис. 191) или горячей деформации. В последнем случае в качестве передающей среды применяют песок. В процессе взрывной штамповки металл упрочняется без резкого снижения пластических свойств. Матрицы в зависимости от серийности производства изготавливают из чугуна, стали, железобетона с пластмассовой облицовкой. Точность изготовления деталей значительно выше, чем при листовой штамповке на прессах, и допуски составляют  $+0,05...0,1$  мм. Штамповку осуществляют в специальных закрытых камерах или на полигонах. Оборудование конструктивно несложно и имеет низкую стоимость. Штамповку можно совмещать с другими операциями — отбортовкой, пробивкой отверстий и т.д.

В процессе гидроимпульсной штамповки деформирование заготовки происходит под действием импульсного давления и гидротока, возникающих в жидкости в результате высоковольтного разряда между электродами рабочей камеры. По скоростям и схеме деформации этот вид штамповки близок и подобен штамповке взрывом. Способ позволяет деформировать малопластичные материалы и изготавливать с высокой точностью детали сложной формы.

**Глава 1.**

**СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА И ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ  
ПЛАВЛЕНИЕМ И ДАВЛЕНИЕМ**

**1. Роль и место технологического процесса сварки  
в современном производстве**

Сваркой называют технологический процесс получения механически неразъемных соединений, характеризующихся непрерывностью структур — непрерывной структурной связью.

Это технологический процесс, с помощью которого изготавливаются все основные конструкции гидротехнических сооружений, паровых и атомных электростанций, автодорожные, городские и железнодорожные мосты, вагоны, надводные и подводные корабли, крупные узлы машиностроительных конструкций, автомобили, ракеты, искусственные спутники Земли, электрическая и радиотехническая аппаратура и многие другие изделия.

Если некоторое время тому назад конструкции изготавливались в основном из относительно просто сваривающихся материалов, то в настоящее время наряду с традиционными для сварных конструкций применяются материалы с весьма различными физическими и сварочными характеристиками: коррозионностойкие и жаропрочные стали и сплавы, никелевые и медные сплавы с особыми свойствами, легкие сплавы на алюминиевой и магниевой основах, титановые сплавы, ниобий, тантал и другие металлы и сплавы.

Многообразии свариваемых конструкций и свойств материалов, используемых для их изготовления, заставляют применять различные способы сварки, разнообразные сварочные источники теплоты. Для сварочного нагрева и формирования сварного соединения используют энергию, преобразованную в тепловую посредством дугового разряда, электронного луча, квантовых генераторов; джоулево тепло, выделяемое протекающим током по твердому или жидкому проводнику; химическую энергию горения; механическую энергию; энергию ультразвука и других источников.

Все эти способы требуют разработки, производства и правильной эксплуатации разнообразного оборудования, в ряде случаев с примене-

нием аппаратуры, точно дозирующей энергию, со сложными схемами, иногда с использованием технической электроники и кибернетики.

Производство сварных конструкций в России в настоящее время достигло многих десятков миллионов тонн в год.

Разнообразие способов сварки, отраслей промышленности, в которых ее используют, свариваемых материалов, видов конструкций и огромные объемы применения позволяют охарактеризовать технологический процесс сварки как один из важнейших в металлообработке.

## 2. Физическая сущность и основные способы процесса сварки

Задача сварочной операции состоит в получении механически неразъемных соединений, подобных по свойствам свариваемому материалу. Это может быть достигнуто, когда по своей природе сварное соединение будет максимально приближаться к свариваемому металлу.

Свойства твердых тел, в том числе и механические (прочность, упругость, пластичность и др.), определяются их внутренними энергетическими связями, т.е. связями межмолекулярного, межатомного и ионного взаимодействия.

В металлах, которые относятся к кристаллическим твердым телам, внутренние связи определяются единым энергетическим полем ионизированных атомов (находящихся в узлах кристаллической решетки) и подвижных электронов.

Для получения в сварном соединении таких же энергетических связей, как и в свариваемом материале, необходимо пограничные слои одной свариваемой детали приблизить к пограничным слоям другой на такие расстояния, при которых между ними возникает единое энергетическое поле. В ряде случаев такое состояние может быть получено с помощью промежуточного добавочного материала, который должен установить подобные связи с пограничными слоями обеих свариваемых частей.

Расстояния между узлами кристаллической решетки, при которых в металлах образуется достаточно сильное энергетическое поле, составляет около  $4 \cdot 10^{-8}$  см.

Подобной точности подгонки поверхностей твердых материалов современные методы обработки обеспечить не могут. Так, полировка и хонингование металла обеспечивают точность обработки поверхностей не выше  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  см, т.е. примерно в 400 раз менее точную, чем та, которая необходима при сближении поверхностей для установления общего энергетического поля, подобного полю в любом другом сечении твердого металла.

Облегчить возможность сближения поверхностей на расстояния около  $4 \cdot 10^{-8}$  см и установления энергетических связей между отдельными

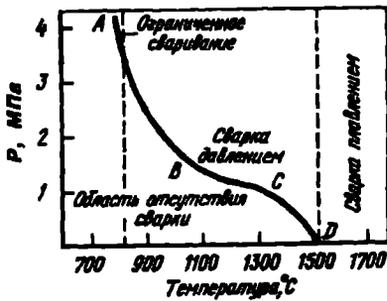


Рис. 192. Диаграмма условий выполнения сварки технического железа

частыми, подлежащими сварке, можно: 1) применением внешней силы достаточной величины и 2) повышением температуры.

Некоторые материалы, в частности весьма пластичные металлы (алюминий, медь, свинец и др.) и сплавы, способны образовывать сварные соединения без применения каких-либо внешних источников тепла в результате только совместного пластического деформирования частей, которые должны быть сварены.

Другие материалы, в том числе многие металлы, способны образовывать сварные соединения при пластическом деформировании, выполняемом только при определенных повышенных температурах.

Многие материалы могут быть сварены с доведением некоторого объема их до расплавленного состояния.

Некоторые материалы способны в определенном диапазоне температур свариваться как при пластическом деформировании внешней силой (давлением), так и при доведении материала до расплавленного состояния (плавлением).

Так, для технически чистого железа на рис. 192 показаны области режимов сварки по давлению и температуре. Выше кривой ABCD нахо-

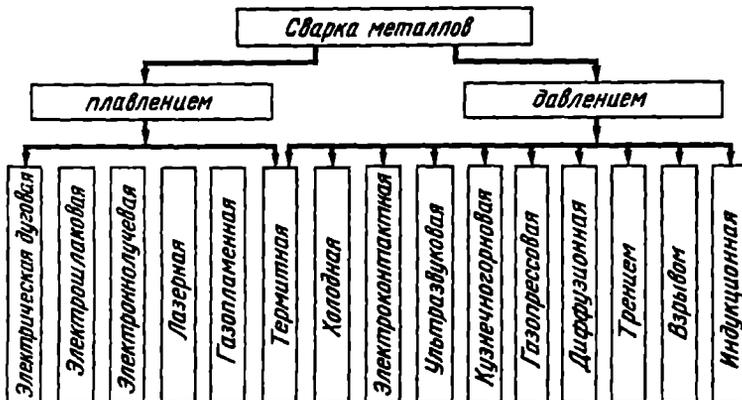


Рис. 193. Схема основных способов сварки металлов плавлением и давлением

дится область, в которой при соответствующих соотношениях давления и температуры качество сварки получается хорошим, а ниже кривой — область, где сварка совсем не получается, либо получается, но низкого качества. Как видно из рис. 192, при температурах ниже температуры плавления железа для сварки требуется и давление, и нагрев (область левее точки *D*, сварка плавлением).

Для других материалов также существуют определенные области таких режимов. Исходя из этого, все способы сварки можно классифицировать как способы сварки давлением и плавлением (рис. 193).

Некоторые материалы, которые даже при высоких температурах почти не имеют пластичного состояния (например, чугуны), практически могут свариваться только плавлением.

### **3. Сущность основных способов сварки плавлением и область их рационального применения**

#### *Электрическая дуговая сварка*

Наиболее широко используется при изготовлении всевозможных конструкций. В зависимости от материала сварной конструкции, ее габаритов, толщины свариваемого металла и других особенностей свариваемого изделия предпочтительное применение находят определенные разновидности электрической дуговой сварки. Так, при изготовлении конструкций из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей наибольшее применение находят как ручная дуговая сварка качественными электродами с толстым покрытием, так и автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом, а также сварка в углекислом газе; при сварке конструкций из высоколегированных сталей, цветных металлов и сплавов на их основе предпочтительное использование находит аргоно-дуговая сварка, хотя при определенных условиях применяются и некоторые другие разновидности электрической дуговой сварки.

*Ручная дуговая сварка плавящимися толстопокрытыми электродами* имеет наибольший объем применения из всех дуговых способов сварки. Схема процесса сварки приведена на рис. 194, а. Питание дуги осуществляется от сварочного генератора или выпрямителя постоянным током или от сварочного трансформатора — переменным током. Наиболее широкое применение находит постоянный ток. В настоящее время применяются только толстопокрытые электроды, т.е. такие, у которых на металлический пруток определенных размеров (стержень) наносится обмазка (электродное покрытие). Состав покрытия при расплавлении вместе со стержнем обеспечивает защиту от окисления и азотирования металла шва и определенное легирование наплавленного металла для

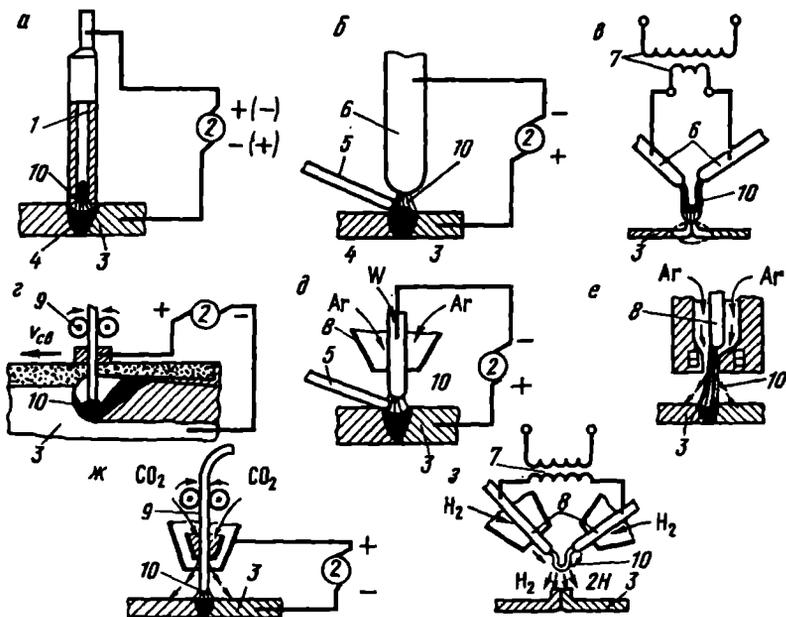


Рис. 194. Схема процесса при использовании различных видов электрической дуговой сварки:

*а, в* — ручная дуговая сварка; *а* — толстопокрытыми плавящимися электродами; *б* — угольными электродами дугой прямого действия; *в* — угольными электродами дугой косвенного действия; *г* — автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом; *д* — аргоно-дуговая сварка вольфрамовым электродом; *е* — плазменная сварка; *ж* — сварка в углекислом газе; *з* — атомно-водородная сварка; *1* — электрод с покрытием; *2* — сварочный генератор; *3* — свариваемые детали; *4* — электрическая дуга; *5* — присадочный пруток; *6* — угольный электрод; *7* — сварочный трансформатор; *8* — вольфрамовый электрод; *9* — электрическая проволока; *10* — электрическая дуга

придания ему необходимых механических свойств, а также придает устойчивость горению дуги.

При питании дуги постоянным током в зависимости от марки электрода (в соответствии с рекомендациями паспорта электродов) может применяться прямая или обратная полярность подключения.

Прямой полярностью называют такую, когда отрицательный полюс источника питания подключают к электроду, положительный — к изделию, при обратной полярности плюс подключают к электроду, минус

— к изделию. Для большинства марок качественных электродов рекомендуется обратная полярность.

*Ручная дуговая сварка угольными электродами дугой прямого действия* используется при сварке тонколистовой углеродистой конструкционной стали, а также при сварке некоторых цветных металлов и сплавов на их основе. Схема процесса сварки приведена на рис. 194, б. Сварка производится при питании дуги постоянным током прямой полярности, что обеспечивает наилучшую стабильность процесса. В настоящее время объем применения этого способа невелик.

*Ручная дуговая сварка угольными электродами дугой косвенного действия* применяется только при сварке тонких деталей из стали, некоторых цветных металлов и сплавов на их основе. Схема процесса сварки приведена на рис. 194, в. Сварной шов в этом случае, как правило, образуется за счет расплавления отбортованных кромок без участия присадочного (добавочного) металла. Так как расход электродов при питании дуги постоянным током оказывается неодинаковым (электрод, являющийся анодом, вследствие большого тепловыделения на нем, расходуется значительно быстрее), то питание дуги в этом случае осуществляется переменным током, что позволяет обеспечить равномерный расход электродов.

*Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом* (рис. 194, з). Область рационального применения этого способа сварки — сварка углеродистых низколегированных и некоторых марок высоколегированных сталей. В небольшом объеме этот способ используется при сварке некоторых цветных металлов и сплавов на их основе.

При сварке дуга горит в пузыре из расплавленного флюса, который толстым слоем (40—60 мм) насыпается на стык свариваемых металлов.

Так как при сварке дуга закрыта расплавленным и нерасплавленным порошкообразным флюсом, то плотность тока по сравнению со сваркой открытой дугой без опасения разбрызгивания металла может быть увеличена в несколько раз, что определяет существенное (в несколько раз) увеличение производительности процесса. По сравнению с ручной дуговой сваркой существенно расширяется диапазон толщин, свариваемых встык без скоса кромок, что сокращает время на подготовку деталей к сварке.

Питание дуги может осуществляться как переменным, так и постоянным током.

Так как объем сварочной ванны (расплавленного металла и флюса) достаточно велик, что во избежание стекания их сварка этим способом осуществляется только в нижнем положении, т.е. когда шов располагается в горизонтальной плоскости или при очень небольших наклонах свариваемых листов, как правило, не более  $7^\circ$  к горизонту. Это несколько ограничивает объем применения данного способа.

*Аргоно-дуговая сварка вольфрамовым электродом (рис. 194, д).* Вольфрамовый электрод закрепляют в токоподводящем устройстве специальной горелки, к которой по шлангам подводят токоведущий привод и инертный газ — аргон. Истекающая из сопла горелки струя аргона оттесняет воздух и надежно защищает электрод, дугу и сварочную ванну от окисления и азотирования. Таким образом, процесс осуществляется при струйной защите зоны сварки от контакта с воздухом. Если возникает необходимость в добавочном (присадочном) металле для усиления шва (валика), то в дугу подают присадочную проволоку, как правило, того же или близкого состава, что и свариваемый металл.

Так как при такой схеме процесса имеет место весьма надежная изоляция сварочной ванны (а если надо, то и остывающего шва) от кислорода и азота воздуха, то этот способ применяется главным образом при сварке изделий из металлов и сплавов, обладающих большим сродством к газам воздуха (например, из титана, циркония, алюминия, магния и других химически активных металлов), либо при изготовлении конструкций ответственного назначения из коррозионностойкой стали и некоторых других материалов.

В особых случаях, когда при сложной конфигурации изделий струйная защита не может обеспечить надежной изоляции зоны шва и прилегающих участков от контакта с воздухом, применяют аргоно-дуговую сварку в камерах с контролируемой атмосферой (как правило, аргоном).

Такие камеры могут быть необитаемыми, в них располагается автомат с дистанционным управлением. При небольших габаритах изделия сварщик держит электрододержатель и манипулирует дугой руками, вводя их в камеру через специальные герметические «рукава», заканчивающиеся перчатками; при этом наблюдение за процессом осуществляется через смотровое стекло.

Если свариваемое изделие имеет большие размеры, то сварка может осуществляться в так называемых обитаемых камерах, заполненных аргоном. Детали, подлежащие сварке, подаются в камеру через грузовой люк, имеющий специальный шлюз, исключающий попадание наружного воздуха внутрь камеры. Через эти же люки сваренные изделия выгружаются.

Сварщики в специальных скафандрах входят в камеры через пассажирские шлюзы и промежуточные камеры небольшого размера, в которых производится «промывка» аргоном наружной поверхности костюма от адсорбированного воздуха. Свежий воздух для дыхания сварщика подводится и выдыхаемый воздух отводится по специальным шлангам, сообщаемым с внешней атмосферой.

*Плазменная сварка (рис. 194, е)* является разновидностью аргоно-дуговой сварки. В отличие от аргоно-дуговой, где дуга между электродом и изделием горит в свободно истекающем из сопла горелки потоке аргона

(рис. 194, д), при плазменной сварке дуга обжимается потоком газа, проходящем через узкое отверстие в горелке, называемой плазмотроном.

Обжатие дуги приводит к повышению температуры ее столба: при свободно горящей дуге эта температура составляет около 5730 °С, при горении сжатой дуги температура повышается до 14730—24730 °С. Вследствие этого возрастает и степень ионизации газа, что в свою очередь создает более высокую эффективность локального нагрева свариваемого металла.

Кроме плазмообразующего через горелку подается также защитный газ, обеспечивающий надежную изоляцию зоны сварки от контакта с воздухом. Плазменная горелка применяется для соединения тех же материалов, что и аргоно-дуговая.

*Сварка в углекислом газе* (рис. 194, ж) применяется преимущественно при изготовлении конструкций из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, как общего назначения, так и машиностроительных. Как правило, сварка производится электродной проволокой, в составе которой имеется достаточное количество раскислителей — кремния и марганца.

Это необходимо в связи с тем, что углекислый газ при высоких температурах диссоциирует на оксид углерода и кислород, причем содержание последнего в зоне сварки может достигать 20 % и более. Таким образом, углекислый газ в зоне сварки представляет собой сильный окислитель и фактически защищает сварочную ванну только от азотирования. При наличии в сварочной ванне достаточного количества кремния и марганца эти элементы выступают как раскислители и тем самым позволяют получить наплавленный металл требуемого состава, а надежная защита потоком газа от контакта сварочной ванны с воздухом исключает возможность образования нитридов.

Поэтому для сварки в углекислом газе необходимо использовать только кремнемарганцевую проволоку, обычно марки Св—08Г2С, содержащую до 2 % Mn (обычно 1,8—2,1 %) и около 1 % Si (0,70—0,95 %). Значительная часть кремния и марганца в процессе сварки окисляется и переходит в шлак, покрывающий шов тонким слоем, легко удаляемым стальной щеткой, а оставшееся неокисленным количество этих элементов обеспечивает оптимальные механические свойства шва.

В настоящее время этот способ получил широкое распространение при изготовлении сварных конструкций как общего назначения, так и специальных.

*Атомно-водородная сварка* (рис. 194, з). При этом способе сварки дуга горит между двумя вольфрамовыми электродами в потоке водорода, подаваемого через горелку от баллона. Проходя через дугу, водород

нагревается до высоких температур (более 5730 °С) и диссоциирует на атомы, поглощая большое количество тепловой энергии.

Поток диссоциированного водорода, попадая на свариваемые детали, охлаждается (до температуры плавления металла) и вновь образует молекулы, выделяя то количество тепловой энергии, которое было затрачено на диссоциацию (около 540 кДж/моль).

Этой тепловой энергии оказывается достаточно для локального расплавления кромок свариваемого металла и образования сварочной ванны. Примерно около 15 % тепловой энергии от общего тепловыделения образуется за счет горения водорода, окружающего дугу.

Одновременно с энергетическим воздействием водород, поступающий в зону сварки, изолирует сварочную ванну от контакта с воздухом, т.е. исключает возможность окисления и азотирования металла шва. Однако в настоящее время этот способ сварки используется крайне редко из-за ряда недостатков, присущих ему.

Основной недостаток этого способа состоит в том, что дуга в водороде горит при высоком напряжении (до 150—200 В), что требует использования источника питания (трансформатора) с напряжением холостого хода на вторичной обмотке 250—260 В.

В этом случае сварщик должен работать в специальных резиновых перчатках и специальной обуви, что создает определенные неудобства и не гарантирует полной безопасности.

### *Электрошлаковая сварка*

Имеет три основные разновидности: сварка проволочными электродами (рис. 195, а), пластинчатыми электродами (рис. 195, б) и плавящимся мундштуком — пластино-проволочными электродами (рис. 195, в). Электрошлаковая сварка во всех случаях выполняется при вертикальном расположении шва.

Электрошлаковая сварка проволочными электродами применяется для соединений встык толстого металла (толщиной около 40 мм и более) при относительно большой протяженности швов, например при сварке продольных швов барабанов котлов высокого давления и других изделий.

Сварка пластинчатыми электродами используется для соединения массивных деталей, имеющих прямоугольное сечение, если длина шва и толщина металла не намного различаются.

Сварка плавящимся мундштуком применяется для соединения массивных деталей, если сечение их отличается от прямоугольного, например имеет трапецидальную или другую форму.

Сущность способа электрошлаковой сварки состоит в том, что расплавленный флюс образует так называемую шлаковую ванну, которая

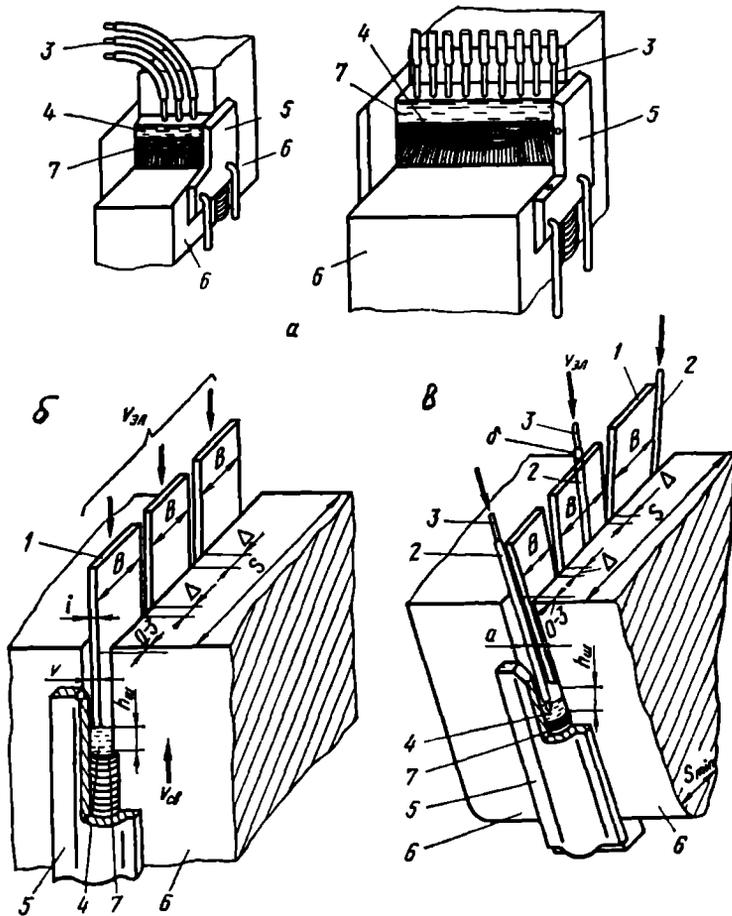


Рис. 195. Схема процесса электрошлаковой сварки:

а — проволочными электродами; б — пластинчатыми электродами; в — плавящимся мундштуком; 1 — пластины; 2 — стальные трубки; 3 — электродные проволоки; 4 — шлаковая ванна; 5 — медные водоохлаждаемые пластины; 6 — свариваемые детали; 7 — металлическая ванна;  $\Delta$  — зазор между пластинами;  $B$  и  $\delta$  — ширина и толщина пластинчатого электрода;  $S$  — толщина свариваемых деталей ( $S_{max}$  — максимальная;  $S_{min}$  — минимальная);  $V_{эл}$  — скорость подачи электродов в шлаковую ванну;  $V_{св}$  — скорость сварки (скорость подъема металлической ванны);  $h_{ш}$  — глубина шлаковой ванны

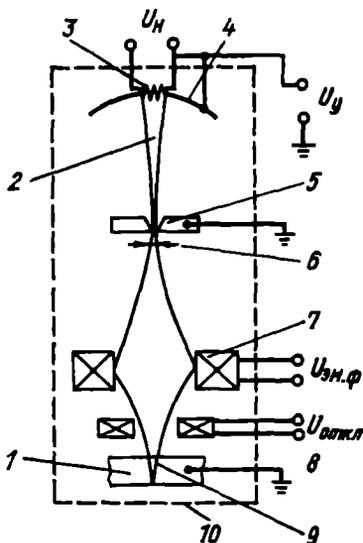
является проводником электрического тока. При прохождении тока через расплавленный флюс — шлак — выделяется тепловая энергия, которая поддерживает температуру шлака около  $1730\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. выше температуры плавления основного (свариваемого) и электродного металла. В результате электродная проволока, подаваемая с определенной скоростью в зону сварки, и кромки основного (свариваемого) металла расплавляются, вследствие чего создается металлическая ванна, после затвердевания которой образуется шов.

Расплавленный основной металл, шлаковая и металлическая ванна удерживаются от вытекания специальными формирующими устройствами — подвижными (медными водоохлаждаемыми ползунами) или неподвижными (медными водоохлаждаемыми шинами).

Как видно из схемы рис. 195, при любой толщине металла сварка выполняется за один проход, что при изготовлении конструкций из толстого металла во много раз превышает производительность по сравнению с любым другим способом сварки. Поэтому область рационального применения — получение сварных соединений на металле большой толщины.

### Электронно-лучевая сварка

Схема процесса электронно-лучевой сварки показана на рис. 196. Катод 3 электронной пушки, нагретый до высокой температуры (вольфрамовый катод, температура накала  $2130\text{—}2430\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), emits электроны, которые, попадая в электрическое поле, создаваемое при-



катодным электродом электростатической фокусировки 4, направ-

Рис. 196. Схема процесса электронно-лучевой сварки:

1 — изделие; 2 — электронный луч; 3 — катод; 4 — прикатодный управляющий электрод; 5 — анод; 6 — кроссовер; 7 — магнитная линза; 8 — система отклонения луча; 9 — сварочная ванна; 10 — вакуумная камера;  $U_n$  — напряжение накала катода;  $U_y$  — ускоряющее напряжение;  $U_{эм.ф}$  — напряжение электромагнитной фокусировки;  $U_{откл}$  — напряжение отклоняющей системы

ляются в виде пучка к аноду 5. Электрическое поле высокой напряженности разгоняет электроны до больших скоростей. Пройдя через центральное отверстие в аноде, пучок имеет наименьшее сечение (кроссовер 6), но начинает расходиться и для его фокусировки на изделии 1 используют электромагнитные линзы 7, представляющие собой плоские катушки, создающие магнитное поле высокой напряженности. В результате взаимодействия электронов с магнитным полем осуществляется электромагнитная фокусировка пучка электронов, причем фокусное расстояние рассчитывают так, чтобы сфокусировать пучок на поверхности изделия, либо на некотором заглублении.

Корректировка положения луча относительно кромок свариваемого металла выполняется с помощью магнитной отклоняющей системы 8.

При электронно-лучевой сварке используют электронные пучки мощностью от 2 кВт (например, А852.18) до 60 кВт (ПЛ—105, ЭЛА—60/60), позволяющие выполнять сварку различных металлов и сплавов толщиной до 80—100 мм и более.

Для достижения и поддержания необходимого рабочего вакуума в камерах используют соответствующие вакуумные системы. Эти системы комплектуются механическими насосами, создающими предварительное разрежение  $1,33—1,33 \cdot 10^{-1}$  Па и высоковакуумными пароструйными насосами, обеспечивающими разрежение в камерах в пределах  $1,33 \cdot 10^{-1}—1,33 \cdot 10^{-4}$  Па.

### *Лазерная сварка.*

При лазерной сварке в основном применяют газовые  $\text{CO}_2$ -лазеры непрерывного действия, в которых рабочим телом служат смеси газов в соотношении  $1 \text{ CO}_2 : 20 \text{ N}_2 : 20 \text{ He}$ .

На рис. 197 приведена принципиальная схема технологического  $\text{CO}_2$ -лазера с замкнутым циклом, в котором векторы скорости потока прокачиваемого газа, электрического поля и направления лазерного луча взаимно перпендикулярны. Такие лазеры возбуждаются электрическим разрядом.

Типичная конструкция лазера, (рис.197) представляет собой камеру, ограниченную с двух сторон строго параллельными зеркалами 6 — непрозрачным (слева) и полупрозрачным (справа), формирующими лазерный луч 7.

Поперек разряда с помощью компрессора или вентилятора 2 прокачивается и охлаждается в холодильнике 3 газовая смесь; газовый тракт условно изображен стрелками 1.

В результате электрического разряда между электродами 4 и 5, расположенными в камере, возникают быстрые электроны, переводящие газовые молекулы в возбужденное состояние. Возвращаясь в исход-

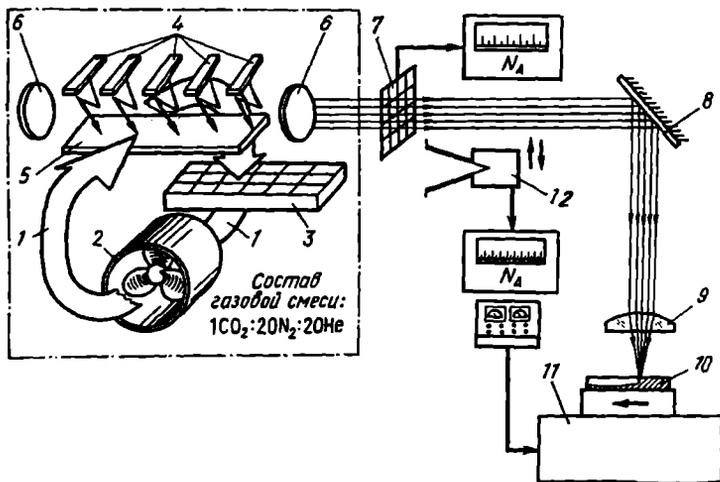


Рис. 197. Принципиальная схема технологического CO<sub>2</sub>-лазера с поперечной прокачкой газовой смеси:

1 — газовый тракт; 2 — вентилятор; 3 — холодильник; 4, 5 — электроды; 6 — непрозрачное (слева) и полупрозрачное зеркала; 7 — лазерный луч; 8, 9 — линзы оптической системы; 10 — свариваемое изделие; 11 — пульт управления; 12 — измерители мощности

ное состояние, эти молекулы образуют кванты света, который, проходя через оптическую систему 6, 8 и 9, фокусируется на свариваемом изделии 10, расположенном на сварочном манипуляторе с пультом управления 11 и при высокой концентрации энергии осуществляется локальное расплавление кромок свариваемого изделия. Измеритель мощности проходного 12 и калориметрического 13 типов позволяет контролировать параметры процесса.

Большим достоинством способа лазерной сварки является возможность ведения процесса как в вакууме, так и в защитных газах, что позволяет получить высококачественные сварные соединения не только на обычных углеродистых и низколегированных сталях, но и на легированных сталях, а также цветных металлах и специальных сплавах.

### Газовая (газо-кислородная) сварка.

При газовой сварке кромки металла, подлежащие сварке, нагреваются до расплавления теплом экзотермической реакции, протекающей в пламени газовой горелки между горючим газом (как правило, ацетиленом

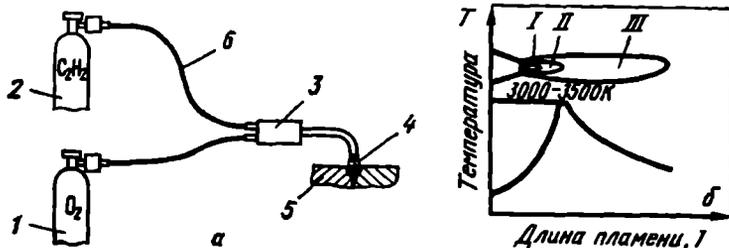
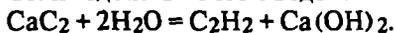


Рис. 198. Схема процесса газовой сварки (а) и распределение температуры в пламени (б):

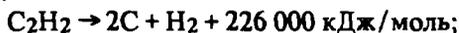
1 — баллон с кислородом; 2 — баллон с ацетиленом; 3 — сварочная горелка; 4 — присадочная проволока; 5 — свариваемое изделие; 6 — шланги для подвода газа к горелке

$C_2H_2$ ) и кислородом (рис. 198). Ацетилен получают из карбида кальция при взаимодействии его с водой:



Ацетилен сжигается в смеси с кислородом посредством специальной горелки. Процесс подготовки ацетилено-кислородной смеси к горению и самого горения можно разделить на три стадии:

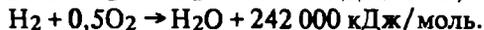
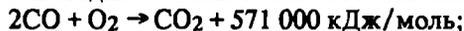
1-я стадия — подготовка горючего к сгоранию (распад углеводорода):



2-я стадия — образование  $CO$  и  $H_2$  (окисление углерода)



3-я стадия — окончательное окисление оксида углерода и водорода:



Строение пламени при горении ацетилена в смеси с кислородом характеризуется наличием трех зон: ядра (I), средней зоны (II) и факела (III) (рис. 198, б). Наивысшая температура ( $2730\text{—}3230\text{ }^\circ\text{C}$ ) имеет место в районе II зоны. Поэтому при сварке горелку располагают так, чтобы ядро пламени касалось поверхности сварочной ванны.

Газовая сварка применяется как при изготовлении изделий из тонколистовой стали, так и при сварке чугуна (при ремонтных работах) и некоторых цветных металлов и сплавов на их основе.

### Термитная сварка.

Осуществляется за счет тепловой энергии, выделяемой при обменной реакции компонентов термита — смеси оксидов железа (~ 80 %) и измельченного алюминия (~ 20 %):

$3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{Al} = 4\text{Al}_2\text{O}_3 + 9\text{Fe} + Q_1$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe} + Q_2$ ,  
где  $Q_1 = 3344$  кДж/кг;  $Q_2 = 3553$  кДж/кг.

Термит загружают в специальный тигель (рис. 199), сообщающийся с формой, облегающей свариваемый стык (рельсов, стальных приводов,

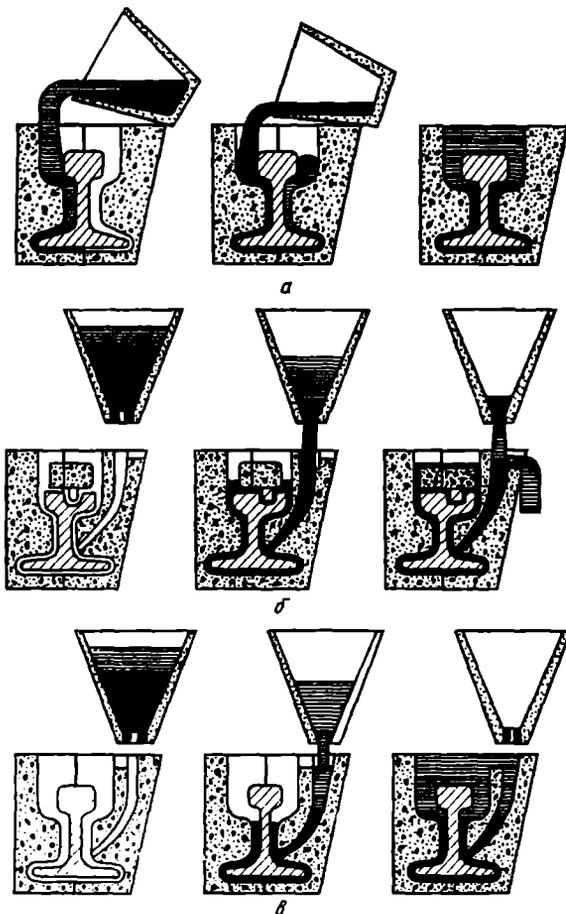


Рис. 199. Схема процесса термитной сварки

гребных валов судов и других изделий), и поджигают магниевым или электрическим запалом. В результате горения перегретый металл затекает в стык (рис. 199, *а* и *б*), а образовавшийся шлак выпускают в специальный сосуд — приставку (рис. 199, *в*).

Кроме варианта термитной сварки плавлением в некоторых случаях используют вариант сварки давлением, характеризующийся тем, что разогретые и оплавленные шлаком кромки соединяемых деталей сдавливают специальным приспособлением.

#### 4. Сущность основных способов сварки давлением

##### *Холодная сварка пластичных металлов*

Как указывалось выше, для получения в сварном соединении таких же энергетических связей, как и в свариваемом материале необходимо пограничные слои узлов кристаллической решетки одной свариваемой детали приблизить к пограничным слоям решетки другой свариваемой детали на такие расстояния, при которых между ними возникает единое энергетическое поле. Даже на очищенных поверхностях металла всегда имеются оксиды, толщина слоя которых больше необходимого для сварки расстояния, и для сближения ювенильных поверхностей надо разрушить эти пленки. Это можно сделать, локализуя пластическую деформацию таким образом, чтобы выдавить из зоны контакта эти пленки. Практически такое локальное пластическое деформирование может быть осуществлено при соединении этим способом пластичных металлов — свинца, алюминия, меди.

В практике используют две разновидности холодной сварки: точечную и стыковую.

При точечной холодной сварке (рис. 200) листы металла с тщательно зачищенными поверхностями мест сварки помещают между пуансонами 2 (рис. 200, *а*) с рабочей частью — выступами 3. Действием прессы, сжимающего пуансоны усилием  $P$ , выступы 3 вдавливаются в металл на всю их высоту, пока опорные поверхности 4 не сдавят металл. Этим обеспечивается необходимая пластическая деформация и образуется сварная точка.

В местах вдавливания остаточная толщина должна составлять лишь часть суммарной толщины листов (рис. 200, *б*). Для получения качественного сварного соединения необходимо, чтобы остаточная толщина имела определенную величину: для алюминия, например, она должна составлять 30—40, для меди — около 14 %. На рис. 200, *б* стрелками показано направление течения металла при вдавливании выступов пуансонов.

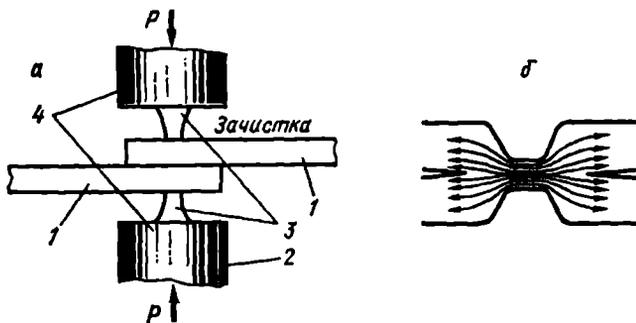


Рис. 200. Схема процесса точечной холодной сварки (а) и разрез сварной точки (б):

1 — свариваемые детали; 2 — пуансоны; 3 — выступы на пуансонах; 4 — опорные поверхности пуансонов;  $P$  — усилие сжатия

В процессе стыковой холодной сварки (рис. 201) подлежащие сварке стержни 1 зажимают в «губках» машины 2. При осадке в результате сдавливания правый и левый зажимы сближают до соприкосновения и острый край зажима, как нож, срезает излишний выдавленный металл — грат. В процессе осадки сближающиеся зажимы затрудняют течение

металла и позволяют увеличить давление осадки. Деформируемый и текущий металл стержней заполняет насечку 3, играющую роль уплотнителя и мешающую проскальзыванию металла в губках. Величина удельного давления для осуществления пластической деформации должна быть достаточно большой: для алюминия, например, 500—700 МПа, для меди еще больше.

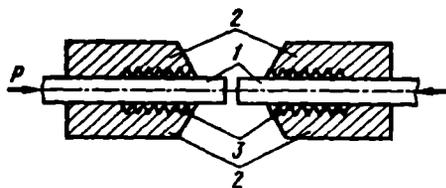


Рис. 201. Схема стыковой холодной сварки:

1 — соединяемые детали; 2 — зажимы («губки» машины); 3 — насечка на губках

Холодной сваркой можно получать соединения на разнородных металлах.

Широко практикуется, например, облицовка алюминиевых шин в местах контакта в распределительных устройствах электростанций листовой медью для улучшения качества соединений.

## Электрическая контактная сварка.

По форме выполняемых соединений различают три основных вида контактной сварки — стыковую, точечную и шовную, или роликовую (рис. 202).

При стыковой сварке (рис. 202, а) через стык соединяемых деталей пропускают электрический ток. После разогрева зоны сварки производится осадка.

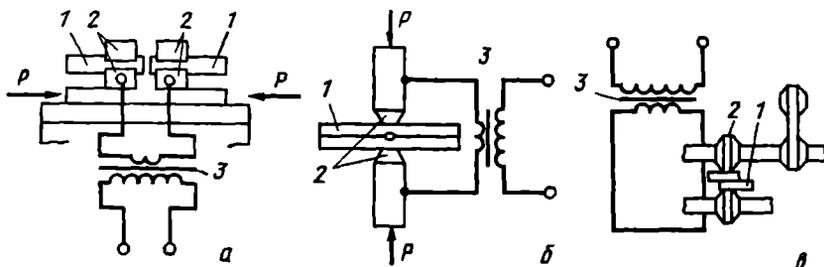


Рис. 202. Виды контактной сварки:

а — стыковая; б — точечная; в — шовная; 1 — соединяемые детали; 2 — электроды; 3 — сварочный трансформатор; P — усилие сжатия

При точечной сварке (рис. 202, б) соединяемые детали, чаще всего листы, собирают внахлестку и зажимают между двумя медными, охлаждаемыми изнутри проточной водой электродами, подводящими ток к месту сварки и имеющими вид усеченного конуса. Ток проходит от одного электрода к другому через толщу соединяемых металлов и контакт между ними и производит местный нагрев их (вплоть до температуры расплавления). Давлением P, приложенным к электродам, производят осадку. Полученное сварное соединение в плане имеет форму пятна диаметром в несколько миллиметров. Это пятно называют точкой.

При шовной сварке электроды, подводящие ток к изделию и осуществляющие осадку, имеют форму роликов, катящихся по изделию, в связи с чем эту разновидность контактной сварки называют также роликовой (рис. 202, в). При шовной сварке листы соединяются непрерывным плотным швом.

Тепловая энергия, выделяемая проходящим электрическим током через контакт соединенных деталей, может быть выражена формулой

$$Q = \int_0^t (2R_M + R_K + 2R_Э) I^2 dt ,$$

где  $R_M$  — сопротивление металла свариваемой детали;  $R_K$  — сопротивление контакта между соединениями деталей;  $R_Э$  — сопротивление контакта между электродами и изделием.

Полезной для процесса сварки являются энергия, выделяемая в контакте ( $I^2 R_K dt$ ), и энергия, выделяемая в толще свариваемого металла ( $2R_M I^2 dt$ ). Энергия, выделяемая на контактах между электродами и основным металлом, расходуется на подогрев поверхности свариваемых деталей и ускоряет износ электродов, в связи с чем является вредной. Для уменьшения износа электродов обычно предусматривается их водяное охлаждение.

Все разновидности электрической контактной сварки широко используются в промышленности, а в ряде отраслей (например, в автомобилестроении и др.) находят наибольшее по сравнению с другими способами сварки применение.

### Ультразвуковая сварка.

Способ основан на использовании механических ультразвуковых колебаний, вводимых в металл, и имеет две разновидности — точечную и шовную (рис. 203) сварку. Свариваются этими способами металлы малых толщин (обычно от нескольких микрометров до 1,5 мм), а также некоторые пластмассы.

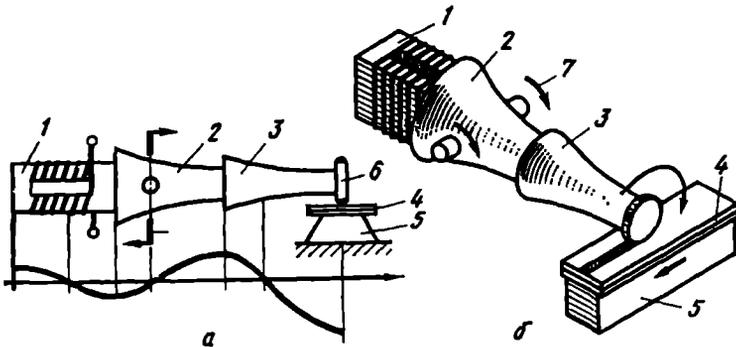


Рис. 203. Схема ультразвуковой сварки:

*a* — точечная; *б* — шовная; 1 — магнитострикционный преобразователь, сердечник и обмотка; 2, 3 — волновод; 4 — свариваемые детали; 5 — опора; 6 — наконечник из твердого металла, передающий колебания свариваемому изделию; 7 — направление сдвигающего усилия

Ультразвуковые колебания, т.е. механические зазвуковых частот (около 20 кГц), создаются преобразователем 1, сердечник которого изменяет свои размеры при намагничивании и размагничивании (т.е. обладает так называемым магнитострикционным эффектом). Обмотка сердечника питается от высокочастотного генератора. Эти колебания через волноводы 2 и 3 передаются на электрод 6. Свариваемые детали 4 зажаты между опорой 5 и электродом 6. Поэтому все колебания передаются в свариваемые детали.

Продольные механические колебания очищают поверхность металла, вследствие трения разогревают поверхностные слои под наконечником (электродом) и в зоне соприкосновения деталей. В результате происходит очистка поверхности металлов, их сближение на расстояния, при которых начинает действовать единое энергетическое поле и, как следствие, происходит сварка (сращивание границ).

Усилие, сдавливающее детали, в разных случаях составляет 100—2000 Н, амплитуда колебаний детали составляет 10—20 мкм; время сварки одной точки 0,5—3 с. Потребляемая мощность из сети 4—6 кВт·А. Свариваемая толщина верхнего листа не превышает 2 мм (как правило, до 1,5 мм); нижний лист может иметь большую толщину. Хорошо свариваются медь, титан, многие сплавы, пластмассы. Плохо свариваются стали.

#### *Кузнечно-горновая сварка.*

Это один из наиболее старых способов сварки. При его использовании нагретые до 1100—1300 °С детали из стали складывают внахлестку, вразруб или врасщеп (рис. 204) и подвергают сдавливанию путем проковки, прокатки, прессования, волочения и т.д.

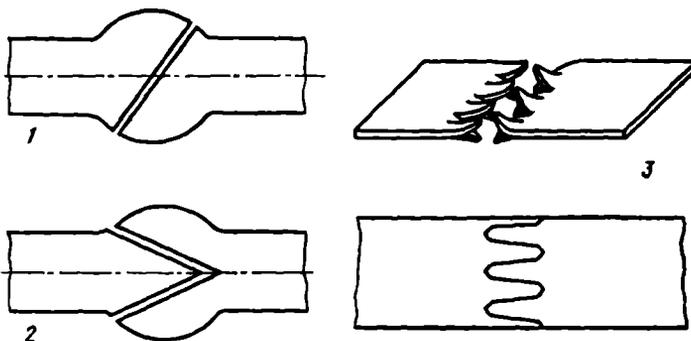


Рис. 204. Подготовка изделий под кузнечно-горновую сварку:

1 — внахлестку; 2 — вразруб; 3 — врасщеп

Так как поверхности свариваемых деталей, даже тщательно зачищенные, в процессе нагрева обычно значительно окисляются, слой оксидов делает сварку невозможной. Для очистки сопрягаемых поверхностей от оксидов применяют флюсы, которые разжижают окалину и тем самым создают возможность прямого контакта металлических поверхностей при сжатии. В качестве флюсов чаще всего применяют буру, борную кислоту или их смеси с поваренной солью.

В настоящее время объем применения кузнечно-горновой сварки весьма мал.

Разновидностью кузнечно-горновой сварки является *газопрессовая сварка*. Сущность ее заключается в том, что изделие для нагрева не помещается в печь, а место сварки нагревается специальными газосварочными горелками (рис. 205) ацетилено-кислородным пламенем. Используются многопламенные горелки с десятками и сотнями пламен, охватывающие всю периферию стыка.

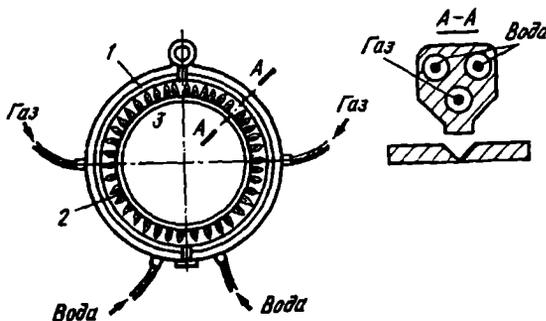


Рис. 205. Горелка для газопрессовой сварки труб:

1 — горелка; 2 — труба; 3 — пламя горелки

Устройство для газопрессовой сварки стыков трубопроводов представляет собой сложный механизированный агрегат, самостоятельно перемещающийся вдоль трубопровода. Все необходимое оборудование размещается на мощном гусеничном тракторе повышенной проходимости. Для выполнения грузоподъемных операций трактор снабжен боковой стрелой. В периоды остановок двигатель трактора приводит в действие все необходимые механизмы: подъемный кран, масляный насос, питающий механизм зажатия и осадки (сжатия труб после нагрева стыка до необходимой температуры кромок). На прицепе к трактору помещены мощный ацетиленовый генератор и батарея кислородных баллонов.

## Диффузионная сварка в вакууме

Способ основан на использовании процесса диффузии. Соединяемые детали помещают в сварочную камеру, заполненную инертным газом или вакуумированную с поддержанием постоянного вакуума  $133,3 (10^{-2} \dots 10^{-5})$  Па и сдвливают удельным давлением  $(0,5 \dots 2,0) \cdot 10^5$  Па. Вакуум поддерживается непрерывной работой вакуумных насосов, откачивающих газы, поступающие в камеру через неплотности, а также адсорбированные поверхностями аппаратуры и непрерывно выделяемые нагреваемым металлом. Температура нагрева соединяемых деталей (чаще всего с помощью индуктора) должна составлять  $(0,55 - 0,60) T_{пл}$  (для стали, например, около  $800^\circ\text{C}$ ).

Процесс сваривания (очистка поверхностей и диффузия) идет довольно медленно: для завершения процесса сварки требуется 5—20 мин, а иногда и более, однако способ отличается большой универсальностью: возможна сварка многих сочетаний разнородных металлов, а также металлов с металлокерамическими сплавами, металлов с керамикой, с графитом и т.д.

## Сварка трением

Основана на использовании для нагрева соединяемых деталей превращения механической энергии трения в тепловую.

Способ применяется для соединения стержневых деталей, труб небольшого диаметра и других подобных изделий. Сварка выполняется на специальных машинах, в зажимах которых закрепляют свариваемые детали (рис. 206). Одна из деталей остается неподвижной, а другая

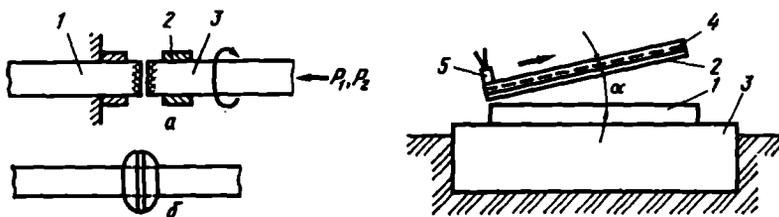


Рис. 206. Схема процесса сварки трением:

а — схема процесса; б — сваренные стержни; 1 — неподвижная деталь; 2 — губки машины; 3 — вращаемая деталь;  $P_1$  — давление в процессе вращения;  $P_2$  — давление осадки

Рис. 207. Схема процесса сварки взрывом:

1 — неподвижная деталь; 2 — μεταемая деталь; 3 — опорный фундамент; 4 — слой взрывчатого вещества; 5 — детонатор

приводится во вращение и торцом с определенным усилием прижимается к торцу неподвижной детали. Частота вращения детали составляет  $500—1500 \text{ мин}^{-1}$ . Вследствие трения торцы деталей быстро разогреваются и через относительно короткое время происходит их оплавление, автоматически выключается фрикционная муфта, прекращая вращение шпинделя; затем производится осевая осадка деталей.

Способ весьма экономичен и обладает высоким к. п. д. Потребляемая мощность составляет  $15—20 \text{ Вт/мм}^2$ , а затраты электроэнергии в 7—10 раз меньше, чем при контактной стыковой сварке.

Способ позволяет сваривать не только однородные, но и разнородные металлы (например, алюминий с медью, алюминий со сталью, медь со сталью и пр.). Особенно эффективна сварка заготовок металлорежущего инструмента — сверл, метчиков, резцов и другого инструмента из углеродистой и быстрорежущей стали.

### *Сварка взрывом (рис. 207)*

На поверхность привариваемой (метаемой) детали 2 равномерным слоем распределяется взрывчатое вещество 4 (тол, гексаген и т. п.); масса взрывчатого вещества составляет 10—20 % от массы метаемой детали; на нижнем крае метаемой детали располагают детонатор 5. Неподвижная деталь 1 для увеличения массы укладывается на опорный фундамент 3. Метаемая (ударяющая) деталь располагается под углом  $3—10^\circ$  к поверхности плиты 1. Скорость движения ударяющей детали к моменту соударения достигает нескольких сотен метров в секунду. При таких скоростях в зоне соударения металл соединяемых деталей течет подобно жидкости и сливается в одно целое, образуя монолитное соединение. Таким образом, взрыв распространяется в направлении стрелки (рис. 207) и происходит как бы выстрел листом 2 в плиту 1. Сначала ударяется и приваривается к плите 1 нижний край листа 2, затем зона соударения и сварки перемещается вправо, и лист в конечном счете приваривается к плите 1. Процесс длится тысячные доли секунды.

Граница между соединяемыми деталями на макрошлифах имеет характерный вид волокнистой линии. Таким способом могут быть соединены разнородные металлы, например к плите из углеродистой стали может быть присоединен лист коррозионностойкой стали, никеля, титана, меди, алюминия и др.

Полученную взрывом заготовку затем прокатывают в листовой биметалл. Сварка взрывом может применяться и при изготовлении других изделий. Например, могут свариваться стыки труб или ввариваться медные стержни в пазы роторов специальных быстроходных электродвигателей, работающих с частотой вращения десятки тысяч оборотов в

минуту. При такой скорости вращения любой другой способ закрепления обмотки может обеспечить необходимую прочность.

### *Индукционная высокочастотная сварка*

При этом способе кромки изделия, подлежащие сварке, нагреваются до необходимой температуры пропусканием токов высокой частоты и сдавливаются. Токи высокой частоты наиболее удобны для введения в металл индукционным (бесконтактным способом). Наряду с этим использование токов высокой частоты обеспечивает концентрацию нагрева у поверхности свариваемых кромок вследствие резко выраженного поверхностного эффекта, эффекта близости и большого индуктивного сопротивления шунтирующих путей.

При сварке труб с индукционным подводом тока (рис. 208), ток высокочастотного генератора подводится к индуктору 2, который индуцирует ток в заготовке трубы 1. Для уменьшения шунтирования сварочного тока внутрь заготовки вводят ферритный сердечник 3, вследствие чего сопротивление шунтирующих путей для токов высокой частоты становится очень большим, и практически весь ток проходит через свариваемый стык. Нагретые до сварочных температур кромки обжимаются роликами 4, которые одновременно являются и ведущими.

Такие трубосварочные станы весьма производительны: трубы диаметром 12—60 мм свариваются со скоростью до 50 м/мин. Питание током осуществляется от высокочастотных ламповых генераторов мощностью 160 кВт при частоте 440 и 880 кГц.

Изготавливаются трубы и больших диаметров, например 325 и 426 мм, с толщиной стыка 7—8 мм со скоростью 30—40 м/мин.

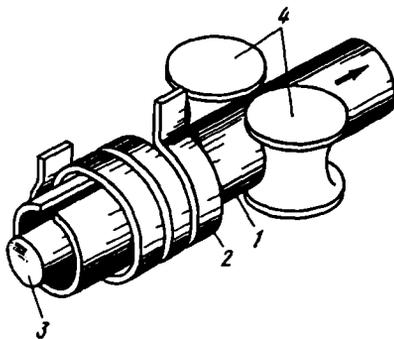


Рис. 208. Схема процесса индукционной сварки труб:

1 — труба; 2 — индуктор; 3 — сердечник;  
4 — обжимные ролики

## 1. Сварочные материалы

*Электроды для ручной дуговой сварки.* Металлические электроды для сварки представляют собой пруток из специальной проволоки, называемый стержнем электрода (в подавляющем большинстве случаев — из низкоуглеродистой стали), на который нанесен слой покрытий (рис. 209). Электроды диаметром 4, 5 и 6 мм имеют стандартную длину 450 мм.

Электродное покрытие служит: *a* — для защиты металла сварочной ванны от воздуха; *b* — для раскисления и легирования наплавленного металла; *в* — для стабилизации горения дуги.

В соответствии с этим в состав любого электродного покрытия входят материалы, выполняющие соответствующие функции: шлакообразующие (например, марганцевая руда, гематит, гранит, мрамор, рутил и др.); флюсоующие, т.е. придающие шлаку жидкотекучесть (плавиковый шпат); газообразующие (мрамор, магнезит, органические вещества); раскисляющие (ферросплавы элементов, обладающих большим сродством к кислороду); легирующие (ферросплавы различных элементов); стабилизирующие (материалы, содержащие элементы, обладающие низким потенциалом ионизации, например, мрамор, поташ, углекислый барий и др.).

Некоторые материалы одновременно выполняют несколько функций. Например, мрамор является шлакообразующим, газообразующим и стабилизирующим материалом; ферромарганец и ферросилиций в ряде случаев служат раскислителями и легирующими.

В зависимости от материалов, определяющих шлаковую основу или газовую защиту расплавленного металла от контакта с воздухом, используются электроды с покрытиями различных видов: кислые (А), основные (Б), рутиловые (Р) и целлюлозные (Ц).

К электродам с кислым покрытием относятся электроды марки ЦМ—7: гематит 33 %, гранит 32 %, ферромарганец 30 %, крахмал 5 %.

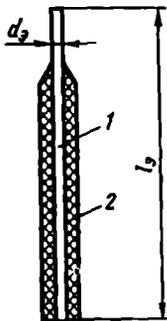
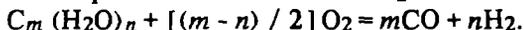


Рис. 209. Металлический толстопокрывный электрод:

1 — стержень; 2 — покрытие

При нагревании и плавлении электродов протекают следующие металлургические процессы: крахмал уже на подходе к дуге начинает окисляться с образованием газов CO и H<sub>2</sub>:



При нагревании и плавлении происходит переход высших оксидов в низшие:  $2MnO_2 \rightarrow 2MnO + O_2$ ; возможно и прямое окисление железа:  $MnO_2 + Fe = MnO + FeO$ .

Если нет раскислителей, то железо восстанавливается углеродом с образованием газообразного оксида:  $FeO + C = CO + Fe$ . Оксид углерода, нерастворимый в жидкой стали, не успевая удалиться из жидкого металла до его затвердевания, образует поры. Поэтому необходимо раскисление, в данном случае ферромарганцем, входящим в состав покрытия:  $MnO_2 + Mn = 2MnO$  и  $Fe_2O_3 + Mn = MnO + 2FeO$  (при недостатке марганца). При избыточном содержании марганца  $Mn + FeO = MnO + Fe$  (+ Mn легирующий).



Однако, несмотря на эти процессы, остаточное содержание кислорода в наплавленном металле находится на довольно высоком уровне и составляет 0,013—0,015 %. Понизить содержание кислорода, например введением более сильных раскислителей, нельзя, так как при этом может повыситься содержание водорода в металле шва, который может вызвать возникновение «водородных» пор из-за наличия органики в покрытии.

Наиболее широко применяемые электроды основного типа (Б) марки УОНИ—13/45 имеют покрытие следующего состава, %: мрамор 53, кремнезем 9, плавиковый шпат 18, ферромарганец 2, ферросилиций 3, ферротитан 15.

Уже на подходе к дуге происходит диссоциация мрамора:  $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ ; при дальнейшем нагревании углекислого газа  $2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$ . Поэтому углекислый газ при нагревании является окислителем:  $CO_2 + Fe = FeO + CO$ . Окисление сварочной ванны может вызвать снижение свойств металла и парообразование из-за восстановления оксида железа углеродом:  $FeO + C = CO + Fe$ . Чтобы подавить парообразование, необходимы раскислители, которые, обладая высоким сродством к кислороду, образуют жидкие оксиды: MnO, SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub>. Вступая во взаимодействие с CaO, эти оксиды образуют силикаты и титанаты:  $CaO + SiO_2 = CaSiO_3$  и  $CaO + TiO_2 = CaTiO_3$ .

При этом содержание кислорода в наплавленном металле не превышает 0,006 %, т.е. в 2,5 раза меньше, чем при сварке электродами с покрытиями кислого типа.

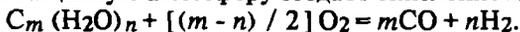
При сварке электродами с рутиловыми покрытиями (Р), примером которого может быть покрытие АНО—3, состава, %: рутил 43, мусковит

7, магнетит 15, ферромарганец 13,5, гематит 4, целлюлоза 2, железный порошок 15,56 протекают следующие металлургические процессы.

На подходе к дуге окисляется целлюлоза с образованием CO и H<sub>2</sub> по реакции  $C_m (H_2O)_n + [(m - n) / 2] O_2 = mCO + nH_2$ . При дальнейшем нагревании диссоциируют карбонаты:  $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$ . В контакте с жидким металлом  $Fe_{ж} + CO_2 = FeO + CO$ . Для предупреждения окисления металла шва в покрытия электродов вводят раскислители ферромарганец и иногда ферросилиций:  $CO_2 + Mn = MnO + CO$  и  $2CO_2 + Si = SiO_2 + 2CO$ .

Содержание кислорода в наплавленном металле при сварке такими электродами составляет 0,010—0,013 %, т.е. выше, чем при электродах с покрытиями вида Б, но ниже, чем при сварке электродами с покрытиями вида А.

Для сварки швов, расположенных на вертикальной плоскости или выполняемых в потолочном положении, наиболее удобны электроды, которые в основном используют газовую защиту сварочной ванны от контакта с воздухом (при небольшом количестве шлака), например с целлюлозными покрытиями (Ц). Примером таких электродов могут служить электроды марки ЦЦ—1, покрытие которых имеет следующий состав, %: целлюлоза 45, рутил 25, тальк 10, ферромарганец 20. Газовую защитную атмосферу создает окисление целлюлозы:



Рутил и тальк, расплавляясь, обеспечивают дополнительную шлаковую защиту сварочной ванны. При этом в головной части сварочной ванны может иметь место реакция восстановления кремнезема железом:  $SiO_2 + 2Fe = 2FeO + Si$ . При недостатке раскислителей могут образоваться поры вследствие восстановления FeO углеродом. При наличии же марганца (ферромарганца) раскисление происходит по реакции  $FeO + Mn = MnO + Fe$ .

В зависимости от степени легирования наплавленного металла можно получить различную механическую прочность его. По этим признакам все электроды, согласно ГОСТ 9464—75, подразделяются на 14 типов: Э—38, Э—42, Э—46, Э—50, Э—42А, Э—46А, Э—50А, Э—55, Э—70, Э—85, Э—100, Э—125, Э—150. Цифра в маркировке означает гарантированное временное сопротивление наплавленного металла в кгс/мм<sup>2</sup> (1 кгс/мм<sup>2</sup> = 10 МПа). Буква А в конце маркировки указывает, что при данной прочности наплавленный металл имеет повышенную пластичность и ударную вязкость. Например, электроды типа Э—42 обеспечивают временное сопротивление наплавленного металла не ниже 42 кгс/мм<sup>2</sup> (420 МПа) при относительном удлинении не ниже 18 % и ударную вязкость не ниже 8 кгс · м/см<sup>2</sup> (80 Дж/см<sup>2</sup>), а электроды типа Э—42А — при том же временном сопротивлении гарантируют относи-

тельное удлинение не ниже 22 %, ударную вязкость не ниже 15 кгс · м/см<sup>2</sup> (150 Дж/см<sup>2</sup>).

Флюсы для автоматической и полуавтоматической сварки должны обеспечивать защиту сварочной ванны от контакта с воздухом, раскисление и легирование металла сварочной ванны, необходимое формирование швов и стабилизацию горения дуги. Почти исключительное применение имеют так называемые плавные флюсы, представляющие собой крупинки, состоящие из сплава различных оксидов и фторидов. Чаще всего при сварке углеродистых и низколегированных конструкционных сталей используют флюсы марок ОСЦ—45 и АН—348А. В качестве примера приведен состав флюса ОСЦ—45, %: SiO<sub>2</sub> 38—44, MnO 38—47, CaF<sub>2</sub> 6—8; примеси (CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) остальное.

В плавных флюсах раскислителей и легирующих в чистом виде, как это имеет место в электродных покрытиях — нет. Поэтому они могут быть введены в сварочную ванну за счет кремне- и марганцевосстановительных процессов, причем восстанавливаться и переходить в металл шва эти металлы будут в тем большем количестве, чем больше содержание их оксидов во флюсе (рис. 210).

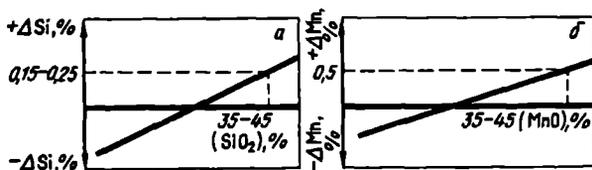


Рис. 210. Схема перехода кремния (а) и марганца (б) из плавного флюса в металл сварочной ванны

Для предотвращения пористости необходимо подавить реакции окисления углерода в остывающей части сварочной ванны. Для этого необходимо в ней иметь 0,15—0,25 % Si. Так как при сварке используют низкоуглеродистую проволоку св—08А, в которой практически полностью отсутствует кремний, то все это количество должно быть восстановлено из флюса. Как следует из рис. 210, а, для перехода такого количества кремния содержание кремнезема во флюсе должно составлять 35—45 %.

Для предупреждения горячих трещин, образующихся вследствие залегания по центру шва легкоплавкой эвтектики Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>—Fe с температурой плавления 985 °С необходимо связать серу в более тугоплавкое

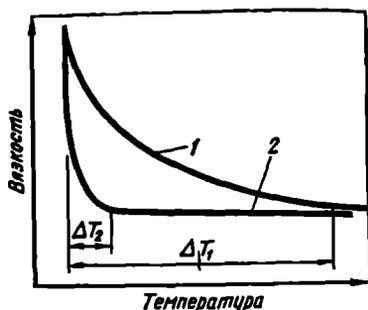


Рис. 211. Схема температурной зависимости вязкости «длинного» (1) и «короткого» (2) флюсов

можно быть восстановлено около 0,5 % марганца. Как следует из рис. 210, б, для этого необходимо иметь во флюсе 35—45 % оксида марганца.

Таким образом, при использовании низкоуглеродистой проволоки для получения качественных швов (без пор и горячих трещин) необходимо применять только кислые (с высоким содержанием кремнезема) высокомарганцовистые плавяные флюсы.

Надо иметь в виду, что кремнемарганцевовосстановительные процессы протекают активно, если расплавленный флюс будет жидкотекучим (т.е. будет иметь малую вязкость). Для обеспечения этого во флюс вводят такие компоненты, которые при расплавлении флюса снижали бы вязкость расплава в узком («коротком») интервале температур (рис. 211). Таким флюсующим материалом является плавленый шпат, который вводится во флюсы в количестве 5—8 % и более.

Кроме того, короткие флюсы лучше формируют шов, т.е. делают его поверхность более гладкой, с плавным сопряжением со свариваемым металлом.

**Защитные газы.** Аргон газообразный чистый используется трех сортов: высшего, первого и второго. Содержание аргона составляет соответственно 99,99, 99,98 и 99,95 %. Примеси — кислород, азот, влага. Аргон хранится и поставляется в баллонах под давлением 150 · 98,06 кПа. Цвет окраски баллону присвоен серый, надпись «Аргон чистый» зеленого цвета.

Углекислый газ поставляется в баллонах черного цвета вместимостью 40 л. В такой баллон заливается сжиженная углекислота массой 25 кг, дающая при испарении около 12,5 м<sup>3</sup> газа.

соединение, например  $Mn_2S_3$ , с температурой плавления 1650 °С (т.е. более высокой, чем температура начала кристаллизации стали, 1500 °С). Для этого в металле шва необходимо иметь требуемое количество марганца, определяемое соотношением:  $Mn S = 20 \dots 22$ .

Так как предельное содержание серы в металле шва может составлять 0,03—0,04 %, то содержание марганца в металле шва должно быть не менее 0,6—0,8 %. Из сварочной проволоки в шов переходит обычно около 0,3—0,35 % Mn, поэтому из флюса должно быть восстановлено около 0,5 % марганца.

## 2. Тепловое воздействие сварочного источника на свариваемый металл. Методы расчетного определения параметров режима сварки

Под действием тепловой энергии, вводимой в изделие при сварке, металл в зоне сварного шва расплавляется, а непосредственно прилегающие к шву участки нагреваются до высоких температур и вследствие этого в зоне термического влияния происходят структурные превращения.

Как видно из рис. 212 размеры всей зоны термического влияния и отдельных ее участков зависят от характера распределения максимальных температур, до которых нагревались эти участки.

Расчет распределения максимальных температур может быть выполнен следующим образом.

Согласно теории распространения тепла, при сварке температуры точек, находящихся на расстоянии  $r$  от места ввода тепла для времени  $t$  при нагревании массивного изделия мощным быстро движущимся сосре-

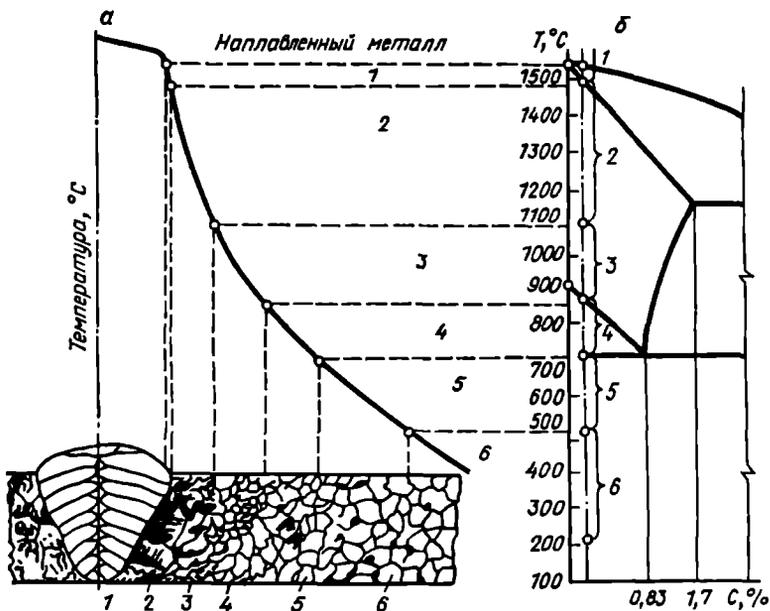


Рис. 212. Схемы распределения максимальных температур при сварке (а) и участки диаграммы состояния системы Fe—C (б):

1 — неполного расплавления; 2 — перегрева; 3 — нормализации; 4 — неполной перекристаллизации; 5 — рекристаллизации; 6 — синеломкости

доточенным (точечным) источником энергии, определяется уравнением

$$T = q \exp [(-r^2 / 4at) / (2\pi\lambda vt)], \quad (1)$$

где  $q$  — тепловая мощность дуги;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности металла;  $v$  — скорость сварки;  $t$  — время, прошедшее с момента прохождения дугой рассматриваемого сечения;  $a$  — коэффициент температуропроводности свариваемого металла.

Для удобства вычисления скорости изменения температуры (производной  $dT / dt$ ) логарифмируем выражение (1):

$$\ln T = \ln (q / 2\pi\lambda v) - \ln t - r^2 / 4at. \quad (2)$$

Далее дифференцируем почленно, учитывая, что первый член правой части для данного режима сварки — величина постоянная:

$$(1 / T) \cdot (dT / dt) = (-1 / t) + (r^2 / 4at), \text{ откуда}$$

$$dT / dt = (-T / t) (r^2 / 4at - 1).$$

Максимум температуры будет достигнут при  $r^2 / 4at - 1 = 0$ , т.е. в момент времени, определяемый этим уравнением, откуда  $t_{\max} = r^2 / 4a$ . Тогда максимальная температура может быть определена, если в выражение для  $T$  подставить  $t_{\max} = r^2 / 4a$ :

$$T_{\max} = [4aq / (2\pi\lambda v r^2)] e^{-1}. \quad (3)$$

Учитывая, что коэффициент температуропроводности  $a = \lambda / c\rho$ , откуда  $\lambda = ac\rho$ , уравнение (3) может быть представлено в окончательном виде:

$$T_{\max} = 2q / (\pi e c\rho v r^2). \quad (4)$$

Отсюда квадрат расстояния до изотермы плавления  $r^2 = 2q / (\pi e c\rho v T_{\text{пл}})$ . Для точечного источника площадь, ограниченная той или иной изотермой, в поперечном сечении представляет собой полуокружность радиуса  $r$  (рис. 213). Поэтому площадь провара (площадь, ограниченная изотермой  $T_{\text{пл}}$ )

$$F_{\text{пр}} = \pi r^2 / 2 = (\pi / 2) [2q / (\pi e c\rho v T_{\text{пл}})] = [(1 / (e c\rho v T_{\text{пл}}))] q_{\text{п}}, \quad (5)$$

где  $q_{\text{п}} = q / v$  — погонная энергия сварки.

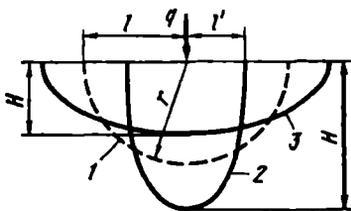


Рис. 213. Очертания площади провара:

1 — полуокружность; 2, 3 — полуэллипс

Однако фактическая форма провара в большинстве случаев отличается от полуокружности. Если принять допущение, что фактическая форма провара представляет собой полуэллипс (2 или 3 на рис. 213), площадь которого равна площади полуокружности, вычисленной по уравнению (5), то площадь провара

$$F_{\text{пр}} = (\pi e / 2) (H / 2) = (\pi / 2) (e / 2) (H^2 / 2) = \pi \varphi_{\text{пр}} H^2 / 4. \quad (6)$$

Приравнявая (5) и (6) и решая относительно  $H$ , получим

$$H = 2 \sqrt{q_{\text{н}} / (\pi e c \rho T_{\text{пл}} \varphi_{\text{пр}})} = A \sqrt{q_{\text{н}} / \varphi_{\text{пр}}}. \quad (7)$$

Обработка экспериментальных данных, накопленных в течение многих лет, позволила установить следующую зависимость коэффициента формы провара от основных параметров режима сварки:

$$\varphi_{\text{пр}} = K' (19 - 0,01 I_{\text{св}}) (d_3 U_{\text{д}} / I_{\text{св}}), \quad (8)$$

где  $K'$  — коэффициент, величина которого зависит от рода тока и полярности;  $d_3$  — диаметр электродной проволоки, мм.

Величина коэффициента  $K'$  при плотности тока  $j < 120 \text{ А/мм}^2$  при сварке постоянным током обратной полярности равна  $0,367 j^{0,1925}$ , при сварке постоянным током прямой полярности  $k' = 2,82 / j^{0,1925}$ .

При  $j > 120 \text{ А/мм}^2$  величина  $K'$  остается неизменной и составляет 0,92 при сварке постоянным током обратной полярности и 1,12 — прямой полярности. При сварке переменным током во всех диапазонах плотностей тока  $K' = 1$ .

Зная глубину провара и величину коэффициента формы провара, можно найти ширину шва.

Площадь поперечного сечения наплавленного металла (площадь наплавки) может быть рассчитана по уравнению:

$$F_{\text{н}} = \alpha_{\text{н}} I_{\text{св}} / (3600 \rho v_{\text{св}}), \text{ см}^2,$$

где  $I_{\text{св}}$  — сварочный ток, А;  $\rho$  — плотность наплавленного металла, г/см<sup>3</sup>;  $v_{\text{св}}$  — скорость сварки, см/с;  $\alpha_{\text{н}}$  — коэффициент наплавки, г/(А · ч), т.е. условное удельное количество наплавленного металла, г, получаемое при сварке в течение 1 ч, отнесенное к силе тока 1 А.

Величина коэффициента наплавки зависит от способа сварки, рода тока, полярности подключения и сварочных материалов. Так, при ручной дуговой сварке электродами УОНИ—13 на постоянном токе обратной полярности эта величина составляет 7—8 г/(А · ч), в случае использования электродов ЦМ—7 при питании дуги переменным током — около 10 г/(А · ч), при сварке под флюсом на переменном токе на оптимальных режимах — около 15, на постоянном токе обратной полярности — около 13 г/(А · ч), при сварке в углекислом газе проволокой Св—0872С 14 — 15 г/(А · ч) и т.д.

### 3. Деформация и напряжения, возникающие при сварке, и способы борьбы с ними

Процесс сварки всегда сопровождается неравномерным нагревом изделия. Зоны металла, прилегающие к сварному шву, в процессе сварки нагреваются до высоких температур, а затем по мере распространения тепла в массе изделия охлаждаются. В результате местного нагрева и

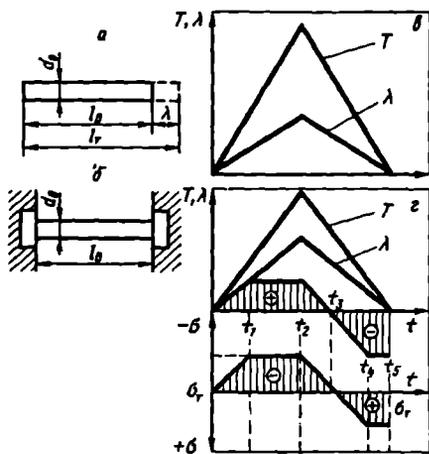


Рис. 214. Деформация и напряжения при нагревании и охлаждении стержня:

*a* — свободного от внешних связей; *б* — жестко закрепленного; *в* — изменения температуры и длины стержня, свободного от внешних связей при нагреве и охлаждении; *г* — изменение напряжений в жестко закрепленном стержне при нагреве и охлаждении

и размеров и не сопровождается возникновением в нем внутренних напряжений.

*Нагрев стержня, встречающего препятствие в осевом направлении расширению и укорочению* (рис. 214, б), приведет к появлению в нем напряжений сжатия и упругих деформаций сжатия, пропорциональных  $\alpha T$ . В этих пределах температур процесс формоизменения в стержне будет обратимым. При дальнейшем повышении температуры (с момента времени  $t_1$ , рис. 214, б) кроме упругих деформаций появятся пластические деформации, по величине равные общим тепловым ( $\alpha T$ ) за вычетом упругих деформаций:  $\epsilon_{пл.сж} = \alpha T - \epsilon_T$ .

С понижением температуры (с момента времени  $t_2$ ) в стержне будут уменьшаться напряжения сжатия вплоть до момента времени  $t_3$ , когда они станут равными нулю. Дальнейшее охлаждение должно бы привести к соответствующему укорочению, так как стержень закреплен, то в нем появятся напряжения растяжения, которые в момент времени  $t_4$

последующего охлаждения происходят объемные изменения в металле, приводящие к возникновению временных и остаточных деформаций и напряжений.

Для понимания процесса их образования рассмотрим некоторые случаи формоизменения при нагревании и охлаждении.

*Нагрев стержня, свободного от внешних связей* (рис. 214, а). При равномерном нагреве незакрепленного стержня до температуры  $T$  его длина  $l_0$  и диаметр  $d_0$  увеличатся на  $l_0 \alpha T$  и  $d_0 \alpha T$ , однако после охлаждения до исходной температуры размеры стержня вновь станут такими же, какими они были до нагрева, т.е. равномерный нагрев стержня, свободного от внешних связей, не вызывает изменений его формы и

достигнут величины предела текучести  $\sigma_T$  и при дальнейшем охлаждении возникнут пластические деформации растяжения вплоть до момента времени  $t_5$ , т.е. до охлаждения изделия до исходной температуры.

В результате в стержне возникнут остаточные напряжения, по величине равные пределу текучести материала.

Температура, при которой в стержне возникнут напряжения, равные пределу текучести, может быть оценена следующим образом: предел текучести, т.е. те напряжения, при которых начинается пластическая деформация металла,  $\sigma_T = \varepsilon_T E$  ( $E$  — модуль упругости, т.е. коэффициент пропорциональности в соотношении между напряжением и линейной деформацией упругого тела). Так как  $\varepsilon_T = \alpha T$ , то  $\sigma_T = \alpha T E$ , откуда

$$T = \sigma_T / (\alpha E) = 2400 / (12 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^6) = 100 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Если же освободить стержень от закрепления, то он укоротится, но останется увеличенным по диаметру в сравнении с исходным, так как объем металла при этом не изменится. Однако в этом случае запас пластичности (для низкоуглеродистой конструкционной стали относительное удлинение составляет около 22 %) окажется далеко не исчерпанным, так как  $\varepsilon = \alpha T = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 600 = 0,0072 = 0,72 \%$ , что составляет около 3 % от всего запаса пластичности.

Предел текучести стали, как правило, соответствует деформации около 0,20 % (деформация, соответствующая возникновению напряжений, равных  $\sigma_{0,5}$ ). Поэтому 0,72 % (общая тепловая деформация) = 0,20 % (упругая деформация) + 0,52 % (пластическая деформация).

Таким образом, при сварке используется лишь незначительная часть деформационного запаса материала.

Наибольшее практическое значение имеет определение остаточных деформаций. В большинстве случаев достаточную для практики точность обеспечивает использование инженерного метода расчета, предложенного Н.О.Окербломом. Так как величину деформации определяет ширина зоны разогрева до определенной температуры пластической деформации, то наибольшее влияние оказывает погонная энергия сварки, т.е. отношение мощности источника к скорости сварки, и сопротивляемость изгибу рассматриваемого сечения.

Согласно этой методике, определение сварочных деформаций производится следующим образом. Рассчитывают погонную энергию сварки, отнесенную к толщине металла, и для данной ширины свариваемых листов по графику рис. 215 находят ожидаемую кривизну  $C$ , 1/см.

Из графика (рис. 216) следует, что при достаточно больших размерах площади поперечного сечения свариваемых элементов, когда отношение  $\sigma_T / F \leq 150$ , связь между деформациями и значением погонной энергии характеризуется прямолинейной зависимостью.

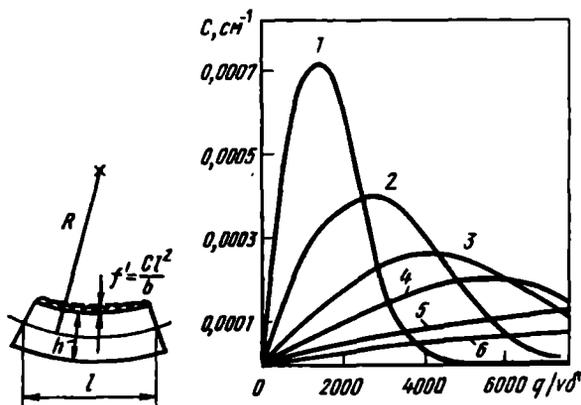


Рис. 215. Зависимость остаточной кривизны прямоугольных полос разной ширины ( $h$ ) от режима сварки:

слева — вид полосы с наплавкой после охлаждения, справа — характер изменения кривизны в зависимости от «погонной» энергии сварки для  $h$ , см: 1 — 5; 2 — 10; 3 — 15; 4 — 20; 5 — 30; 6 — 40

При этом для стальных конструкций, как это следует из рис. 216,  $\Delta_{ц.т} = 3,5 \cdot 10^{-6} q_{п} / F$ .

Учитывая, что относительная деформация продольной оси полосы, проходящей через центр тяжести сечения  $\Delta_{ц.т} = \sum \lambda_F / F$ , а кривизна полосы  $C = z \sum \lambda_F / J$ , где  $\sum \lambda_F$  — сумма произведения местных относительных деформаций на площадь участка, занимаемого ими,  $см^2$ ;  $F$  — площадь поперечного сечения полосы,  $см^2$ ;  $J$  — момент инерции поперечного сечения полосы,  $см^4$ ;  $z$  — расстояние от оси полосы до центра тяжести площади, характеризующей местные деформации  $\lambda$ , см, можно написать:  $\sum \lambda_F = 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot q_{п}$ . Тогда кривизна  $C = 3,5 \cdot 10^{-6} q_{п} z / J$ .

Рис. 216. Зависимость относительного укорочения от погонной энергии сварки и размеров поперечного сечения ( $\Delta_{ц.т}$  — расстояние от центра тяжести сечения)

Как следует из изложенного выше, при сварке всегда имеют место определенные изменения размеров и формы изделия, что следует учиты-

вать как при проектировании, так и при изготовлении сварных конструкций. Для предупреждения и компенсации деформаций при сварке используют различного рода закрепления, нагружения внешними силами, «обратный» выгиб свариваемых элементов и др.

В то же время различные меры борьбы с деформациями оказываются эффективными лишь при определенных условиях. Чаще всего для предотвращения сварочных деформаций или уменьшения их применяют закрепления свариваемых деталей, которые вызывают появление в процессе сварки остаточных деформаций растяжения и поэтому могут понизить общие напряжения свариваемого изделия. Однако, как показала практика, использование этого способа не может заметно снизить сварочные деформации, если специальными средствами не обеспечить усиленный теплоотвод из свариваемого изделия в оснастку.

Недостаточная эффективность закреплений как средства борьбы с деформациями привела к применению обратных выгибов изделия перед сваркой: для получения изделия, недеформированного после сварки, оно должно перед сваркой иметь некоторую начальную кривизну противоположного знака по сравнению со знаком кривизны, вызываемой сваркой.

В некоторых случаях существенную эффективность обеспечивает ограничение зоны нагрева до температур, при которых имеет место пластическая деформация металла околошовной зоны, искусственным охлаждением металла шва и зоны термического влияния путем применения прижимов или ползунов из высокотеплопроводного материала (например, меди) либо, если это допустимо для свариваемого металла, душирования шва и околошовной зоны непосредственно за сварочной ванной. Интенсивный теплоотвод может существенно снизить размеры зоны, претерпевающей пластическую деформацию и тем самым уменьшить величину остаточных деформаций.

Существует также способ уменьшения деформации так называемой раскаткой шва. В этом случае по горячему металлу шва прокатывается стальной ролик с таким усилием, чтобы он как бы «раздавал» металл шва и тем самым создавал в нем не напряжения растяжения, а напряжения сжатия.

Положительные результаты по получению сварных конструкций заданных размеров и формы может обеспечить выбор правильной последовательной сборки и сварки изделия таким образом, чтобы деформации, возникшие при сварке последующих швов, имели обратный знак по сравнению с теми, которые образовались от предыдущих швов (метод «уравновешивания деформаций»).

Расчетная оценка ожидаемых деформаций при различных вариантах последовательности сборки и сварки позволяет выбрать такую очередность технологических операций, при которой итоговые деформации

сварных изделий будут находиться в пределах допусков на точность изготовления данной сварной конструкции.

#### 4. Источники питания для сварки

Устойчивость горения дуги зависит от характеристик электрической цепи, в которую включена сварочная дуга. Напряжение на дуге зависит от состава атмосферы, в которой горит дуга, характеристик электродов и длины дуги. На рис. 217 приведена зависимость напряжения на дуге от ее длины, которая описывается уравнением  $U_d = a + bl$ , где  $a$  — сумма

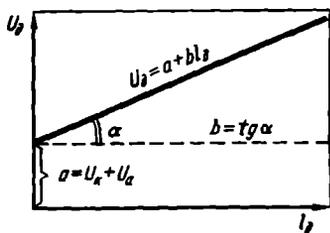


Рис. 217. Зависимость напряжения на дуге от ее длины

анодного и катодного падения напряжений в приэлектродных областях, В;  $b$  — градиент напряжения в столбе дуги, В/мм;  $l$  — длина дуги, мм. Величина  $a$  зависит главным образом от материала электродов,  $b$  — от состава атмосферы столба дуги.

Для поддержания постоянства напряжения на дуге, а значит и ее длины, необходимо, чтобы скорость подачи электрода в зону сварки была бы равна скорости его плавления. Однако некоторые колебания длины дуги без ухудшения формирования шва возможны.

Источники питания дуги могут быть подразделены на 2 группы: источники питания переменным током (сварочные трансформаторы) и источники питания постоянным током (выпрямители и сварочные генераторы).

**Сварочные трансформаторы.** Для сварки на переменном токе применяются специальные сварочные трансформаторы. Такие трансформаторы могут изготавливаться как с отдельным дросселем, обеспечивающим создание падающей внешней характеристики, так и объединенными с дросселем (рис. 218).

Изменение сопротивления дросселя, а значит и силы сварочного тока, осуществляется изменением величины воздушного зазора в цепи магнитопровода регулятора (дросселя).

Кроме сварочных трансформаторов с дросселями в настоящее время для сварки на переменном токе применяются трансформаторы с подвижной обмоткой и трансформаторы с магнитным шунтом; эти трансформаторы, как и описанные выше, обеспечивают получение падающей внешней характеристики. Падающая внешняя характеристика источника питания необходима как для ограничения токов короткого замыкания, которыми всегда сопровождается процесс сварки, до величины,

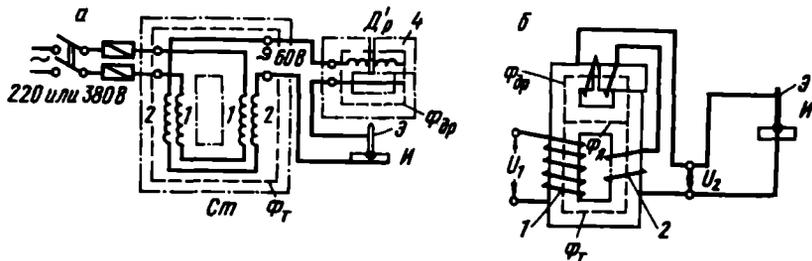


Рис. 218. Схемы сварочных трансформаторов:

*а* — с отдельным дросселем; *б* — объединенный с дросселем; 1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка; 3 — обмотка дросселя; 4 — подвижный пакет;  $\Phi_T$  — магнитный поток в трансформаторе;  $\Phi_{Др}$  — магнитный поток в дросселе; Э — электрод, И — изделие

обеспечивающей безопасность сварочного оборудования, так и для устойчивого горения дуги.

Устойчивый электрошлаковый процесс может быть получен при питании автомата от трансформатора с относительно небольшим сопротивлением короткого замыкания.

Для электрошлаковой сварки наибольшее применение нашли трехфазные трансформаторы, приспособленные для работы в однофазном режиме при удвоенном номинальном сварочном токе.

Основная особенность трансформаторов для электрошлаковой сварки — широкий диапазон ступенчатого регулирования вторичного напряжения, как правило, с использованием секционных обмоток.

Трансформаторы для электрошлаковой сварки производятся на сварочные токи до 3000 А включительно.

**Выпрямители.** Выпрямительные сварочные установки собираются из полупроводниковых элементов — вентиляй. Полупроводниковый вентиль обладает свойством проводить ток только в одном направлении (прямом). В прямом направлении электропроводность вентиля очень высока, в обратном же направлении полупроводниковый вентиль практически не пропускает электрический ток, так как его проводимость крайне мала.

Сварочный выпрямитель состоит из двух основных узлов: трансформатора с соответствующим регулирующим устройством и блоком вентиляй. В комплект могут также входить секционный дроссель, обеспечивающий улучшение динамических характеристик за счет замедления скорости нарастания тока короткого замыкания и тем самым улучшающий динамические характеристики для нормального переноса капель электродного металла в шов.

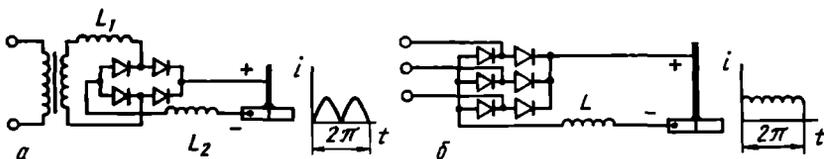


Рис. 219. Схемы выпрямителей:

а — однофазного двухполупериодного; б — трехфазного;  $i = f(t)$  — вид кривой выпрямленного тока

В сварочных выпрямителях используются преимущественно кремниевые и селеновые вентили, причем кремниевые нашли применение главным образом для выпрямителей с падающими внешними характеристиками.

Выпрямители могут быть однофазными (рис. 219, а) и трехфазными (рис. 219, б).

В однофазной схеме вентили включены в четыре плеча, образующие мост, сходный по схеме с измерительным мостом. В одну из диагоналей моста включается нагрузка — сварочная дуга. Для улучшения формы кривой выпрямленного тока в схему включают, как минимум, две реактивные катушки  $L_1$  и  $L_2$ .

В трехфазной мостовой схеме (рис. 219, б) вентили включены в шесть плечей моста; в трех плечах между собой соединены все катоды, образующие катодную группу, в остальных трех — все аноды (анодная группа). От общих точек этих соединений делаются выводы для подключения нагрузки.

В трехфазной мостовой схеме выпрямления в каждый момент времени проводят ток только два плеча, соединенные последовательно через нагрузку.

В мостовой трехфазной схеме выпрямляются обе полуволны во всех трех фазах, благодаря чему пульсация выпрямленного напряжения значительно уменьшается, а число их за период равно удвоенному числу фаз системы, т.е. шести пульсациям за период.

Как кремниевые, так и селеновые полупроводниковые вентили требуют интенсивного принудительного охлаждения, для чего их располагают на радиаторах, охлаждаемых потоком воздуха от вентилятора.

Наряду с однопостовыми сварочными выпрямителями изготавливают многопостовые (рис. 220).

Сварочные генераторы могут быть однопостовые (предназначенные для питания только одного сварочного поста) и многопостовые (для одновременного питания нескольких сварочных постов). Наибольшее распространение получили однопостовые сварочные генераторы.

Так как процесс сварки всегда сопровождается большим числом коротких замыканий (как при возбуждении дуги, так и в процессе переноса электродного металла в сварочную ванну), то сварочные генераторы должны иметь устройство, ограничивающее ток короткого замыкания безопасной для машины величиной. Наряду с этим сварочный генератор должен обладать такой динамической характеристикой, которая обеспечивала бы высокую стабильность горения дуги в этих условиях.

Для этого магнитный поток, создаваемый магнитной системой генератора, должен обеспечивать снижение напряжения при увеличении нагрузки, т.е. генератор должен иметь падающую внешнюю характеристику (рис. 221).

Для создания падающей внешней характеристики в однопостовых сварочных генераторах используют различные способы. Так, в генера-

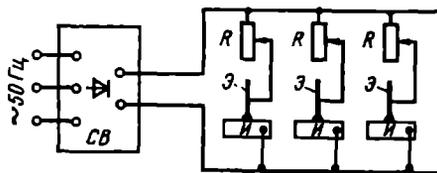


Рис. 220. Схема питания сварочных постов ручной дуговой сварки от многопостового выпрямителя:

СВ — сварочный выпрямитель; R — балластные реостаты; Э — электрод; И — изделие

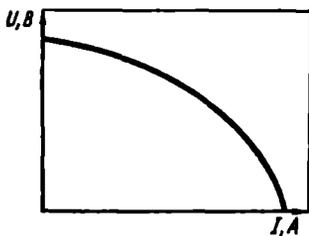


Рис. 221. Падающая внешняя характеристика сварочного генератора

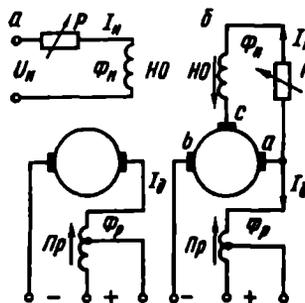


Рис. 222. Принципиальная схема сварочного генератора:

*a* — с независимым возбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой; *b* — с намагничивающей параллельной и размагничивающей последовательной обмотками возбуждения; НО — намагничивающая обмотка;  $\Phi_H$  — основной магнитный поток;  $\Phi_P$  — размагничивающий магнитный поток; *a*, *b* — основные щетки; *c* — дополнительная щетка; Пр — размагничивающая последовательная обмотка;  $I_H$  — намагничивающий ток; *P* — реостат для плавного регулирования режима;  $I_D$  — сварочный ток

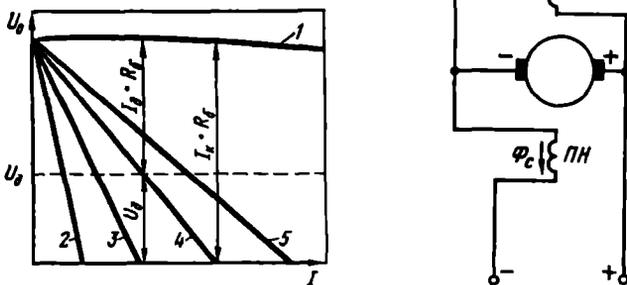


Рис. 223. Внешняя характеристика многопостового генератора (1) и характеристики схемы питания поста для различных значений сопротивления балластного реостата (прямые 2 — 5):

$R_{62} > R_{63} > R_{64} > R_{65}$ ;  $U_{д}$  — напряжение на дуге для одного из возможных режимов сварки;  $R_6$  — сопротивление балластного реостата;  $I_{д} \cdot R_6$  — падение напряжения в балластном реостате при сварке в этом режиме;  $I_{к} \cdot R_6$  — падение напряжения в балластном реостате при коротком замыкании;

Рис. 224. Принципиальная электрическая схема многопостового сварочного генератора:

$\Phi_{ш}$  — магнитный поток, создаваемый параллельной обмоткой возбуждения ШО;  $P$  — реостат; ПН — последовательная (подмагничивающая) обмотка;  $\Phi_{с}$  — магнитный поток подмагничивающей обмотки

торах с независимым возбуждением (рис. 222, а) сварочный ток пропускается через размагничивающую обмотку, так как магнитный поток, создаваемый этой обмоткой, направлен навстречу основному потоку. Поэтому, чем больше ток, тем меньше результирующий поток, а значит и напряжение на клеммах генератора.

В сварочных генераторах с намагничивающей параллельной и размагничивающей последовательной обмотками возбуждения магнитные потоки направлены навстречу друг другу (рис. 222, б). Поэтому и при работе этих генераторов с увеличением силы тока будет уменьшаться результирующий поток, а следовательно, будет снижаться напряжение на клеммах, т.е. внешняя характеристика их также будет падающей.

Существуют и другие способы создания падающей внешней характеристики сварочных генераторов. Например, в генераторах с расщепленными полюсами падающая характеристика создается за счет взаимодействия магнитных потоков, возбуждаемых полюсами с различной степенью магнитного насыщения, а в генераторах «поперечного поля» — за счет использования короткозамкнутой обмотки якоря.

Многопостовые сварочные генераторы обычно используют в крупных сварочных цехах со стационарными рабочими местами. Ток от многопостового генератора подводится к рабочим местам по шинам большого сечения, проложенным по цеху. На стационарных рабочих местах (сварочных постах) предусматриваются устройства, к которым подключаются балластные реостаты, обеспечивающие на рабочем месте падающие внешние характеристики при включении различных сопротивлений балластного реостата (рис. 223).

Для поддержания постоянства напряжения на клеммах генератора при увеличении нагрузки (жесткой внешней характеристики  $I$ , рис. 223) кроме основной шунтовой обмотки ШО предусмотрена действующая согласно с основной последовательная обмотка ПН, усиливающая магнитный поток при возрастании нагрузки (рис. 224).

## 5. Автоматическое регулирование процессов дуговой сварки

Для получения сварных соединений высокого качества, которые при применении соответствующих сварочных материалов определяются постоянством геометрических размеров шва по всей его длине, необходимо, чтобы сварочный автомат обеспечивал как точное направление электрода при перемещении его вдоль выполняемого шва, так и постоянство режима сварки.

Эти функции должны выполнять сварочные автоматы. Основное назначение регулятора сварочного режима — стабилизация им тока и напряжения дуги — основных параметров, определяющих тепловложение в шов.

Все регуляторы по сложности систем регулирования подразделяются на три группы: саморегулирующиеся, регулируемые по одному параметру и по двум параметрам.

В основу принципа саморегулирования, по которому работают многие автоматы, положено постоянство скорости подачи электродной проволоки в зону горения дуги, равной скорости плавления проволоки, т.е.  $v_{\text{под}} = v_{\text{пл}}$ . Однако в силу ряда причин скорость плавления проволоки может изменяться, например из-за колебания сетевого напряжения, незначительных местных отклонений диаметра проволоки от номинального и др. Если скорость плавления проволоки станет меньше скорости ее подачи, то длина дуги начнет уменьшаться. При этом сопротивление дуги уменьшится, что вызовет увеличение силы тока. Это приведет к увеличению скорости плавления проволоки и, как следствие, через небольшое время восстановится прежняя длина дуги.

Если скорость плавления проволоки по какой-либо причине возрастает, то длина дуги и ее сопротивление начнет увеличиваться, сила тока уменьшится. Это вызовет замедление плавления при постоянстве ско-

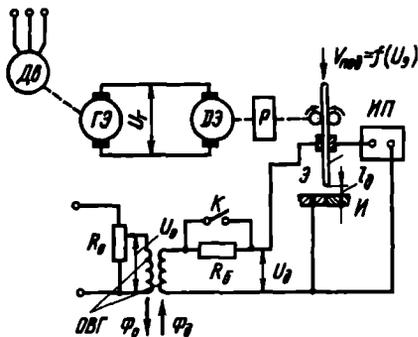


Рис. 225. Принципиальная схема регулирования скорости подачи электродной проволоки в автомате АДС—1000:

ГЭ — генератор, питающий двигатель подачи электродной проволоки; ДЭ — двигатель подачи электродной проволоки; Р — редуктор; Э — электродная проволока; ИП — источник питания;  $Л_d$  — длина дуги; И — свариваемое изделие;  $U_d$  — напряжение на дуге; ОВГ — обмотки возбуждения генератора;  $\Phi_0$  и  $\Phi_d$  — магнитные потоки, создаваемые обмотками возбуждения генератора;  $R_Б$  — реостат регулирования напряжения на дуге;  $R_0$  — реостат, регулирующий величину опорного магнитного потока  $\Phi_0$ ; К — переключатель диапазона регулирования напряжения

рости подачи и через некоторое время восстановится требуемая длина дуги.

Процессы саморегулирования протекают тем интенсивнее, чем больше величина плотности тока в электроде.

Если же плотность тока в электроде мала, то для быстрого восстановления заданного режима используют автоматы с принудительным регулированием скорости подачи электродной проволоки в зависимости от напряжения на дуге.

В качестве примера может быть рассмотрена принципиальная схема регулирования скорости подачи электродной проволоки в автомате АДС—1000 (рис. 225).

Скорость вращения электродвигателя ДЭ, а значит и скорость подачи электродной проволоки определяются напряжением генератора ГЭ, питающего якорь ДЭ. При неизменной скорости вращения ротора генератора (от асинхронного двигателя Дв) напряжение, вырабатываемое генератором ГЭ, определяется величиной результирующего магнитного потока в обмотках его возбуждения ОВГ, одна из которых включена на независимое постоянное напряжение  $U_0$  (которое может регулироваться реостатом  $R_0$ ), другая — на напряжение между электродом и изделием — напряжение дуги  $U_d$  (через балластный реостат  $R_Б$  или непосредственно через контактор К). Результирующий магнитный поток  $\Phi_p$  будет определяться геометрической суммой потоков  $\Phi_0$  и  $\Phi_d$ ; т.е.  $\Phi_p = \Phi_0 + \Phi_d$ . Так как магнитные потоки направлены в разные стороны, причем поток при горении дуги несколько больше потока  $\Phi_0$ , то в установившемся режиме электрод подается в зону сварки по мере его плавления. При отклонении напряжения  $U_d$  в ту или иную сторону соответственно изменяется поток  $\Phi_d$ , вызывая торможение или ускоре-

ние вращения для восстановления режима. Сопротивление  $R_6$  служит для расширения диапазона регулирования.

## Глава 3

# ПАЙКА И ГАЗОКИСЛОРОДНАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

## 1. Пайка металлов

Пайкой металлов называют процесс соединения материалов в твердом состоянии припоями, которые при температуре пайки находятся в расплавленном состоянии, смачивают паяемые поверхности, заполняют зазор между ними и в результате кристаллизации образуют паяный шов.

Образование паяного соединения происходит в результате возникновения химических связей в контакте основной металл—припой.

При этом могут иметь место четыре разновидности спаев: 1) бездиффузионный, т.е. такой, при котором температура пайки определяется температурой смачивания паяемых поверхностей припоем; 2) растворно-диффузионный спай, который образуется, когда паяемый металл и припой обладают взаимной растворимостью; 3) контактно-радиационный спай, образующийся в результате контактного плавления соединяемых металлов при температуре ниже температур плавления паяемых металлов и припоя за счет образования жидкой фазы в виде раствора или эвтектики; 4) диспергированный спай, т.е. такой, который образуется, если паяемый металл и припой не образуют химических соединений и не дают растворов. В этом случае дисперсные частицы равномерно распределены в расплаве припоя по границам зерен паяемого металла.

Пайке поддаются все углеродистые и легированные стали, твердые сплавы, чугун, медь, никель, алюминий и другие металлы и сплавы.

Способы пайки в зависимости от используемых источников нагрева приведены на схеме рис. 226.

К наиболее широко используемым способам нагрева для пайки относятся: в печах электросопротивления, газопламенных печах, нагретым блоком (паяльником периодического нагрева, электрическим паяльником), в соляных ваннах (с расплавленными солями определенного состава), в расплаве припоя (погружением). Достаточно часто применяются также нагрев в индукционных печах, токами высокой и промышленной частоты, в контактных (сварочных) машинах, в электролитических ваннах, газовыми горелками, паяльными лампами.

Пайка в печах производится нагревом подготовленных деталей, т.е. собранных с наложенным на место спая припоем. В печах для предохра-

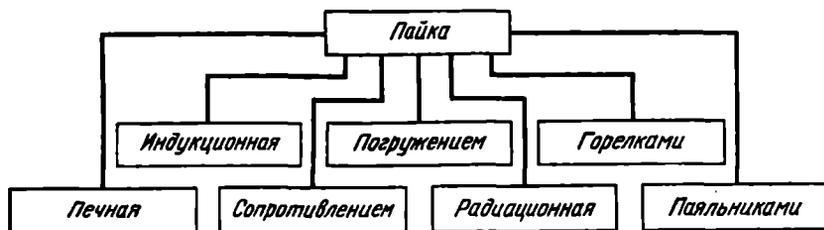


Рис. 226. Способы пайки в зависимости от источников нагрева

нения деталей от окисления и оказания флюсующего действия создают специальную газовую атмосферу.

Индукционная пайка состоит в том, что подготовленные детали, подлежащие пайке, вводят в магнитное поле индуктора, питаемого током высокой, повышенной или промышленной частоты. Энергия, необходимая для нагрева деталей и припоя до температуры пайки, выделяется за счет индуктируемого тока.

Пайка сопротивлением осуществляется за счет тепловой энергии, выделяемой при прохождении тока через паяемые детали (в машинах контактной сварки и других устройствах).

Пайка погружением производится нагревом паяемых деталей и припоя в ваннах с расплавом солей. Нагрев в соляных ваннах может быть непосредственным или косвенным: в последнем случае паяемые детали помещаются в герметичный контейнер со специальной газовой средой или вакуумированный. При пайке нагревом в расплавленных припоях осуществляется полное или частичное погружение подготовленных к пайке деталей.

Радиационный нагрев паяемых деталей осуществляется мощными кварцевыми лампами, расфокусированным электронным лучом или мощным лазером.

При пайке горелками используют газосварочные горелки, плазменные горелки косвенного действия, электрическую дугу косвенного действия, горящую между угольными электродами, а также паяльные лампы. Применяется также пайка паяльником (нагретым блоком).

Все припои, используемые для пайки, могут быть подразделены на две группы: твердые (с температурой плавления 500—1300 °С) и мягкие (с температурой плавления до 450 °С, большей частью до 280—300 °С). Наибольшее распространение получили мягкие припои оловянно-свинцовые, маркируемые буквами ПОС и цифрой, характеризующей массовую долю, %, олова в нем. Например ПОС—40 содержит олова в ко-

личестве 40 %, остальное свинец. Интервал температур плавления этого припоя 235—183 °С.

Существуют припои и более легкоплавкие, например сплав с температурой плавления 74 °С, а также припои на основе галлия с еще более низкой температурой плавления. Такие припои называют чаще еще металлическими клеями, так как пайка производится наложением свежеприготовленной пасты, состоящей из медного или никелевого порошка, замешанного на жидком галлии. Через определенное время паста твердеет (в связи с образованием интерметаллидов) и прочно соединяет паяемые детали; температура распая таких соединений достаточно высока.

Однако прочность мягких припоев низка и, как правило, не превышает 40—60 МПа, тогда как твердые припои обеспечивают прочность 250—500 МПа.

Наиболее легкоплавкие твердые припои для пайки алюминия имеют температуру плавления 525 °С (так называемый припой Лоцманова, в состав которого входят алюминий, медь, кремний); твердые припои для пайки черных металлов, меди и др. имеют температуру плавления в пределах 765—1300 °С и представляют собой сплавы медноцинковые, меднооловяннокремниевые, серебряные (серебро—медь—цинк) и др. (рис. 227).

Поступление припоя в зазоры, смачиваемость кромок паяемых деталей и диффузия зависят как от физических свойств припоя, так и от чистоты кромок. В связи с этим следует производить тщательную очистку кромок как предварительную (механическим способом или травлением), так и в процессе пайки восстановлением или ошлаковыванием оксидов.

С этой целью при пайке применяются флюсы, в качестве которых используются смеси легкоплавких солей или оксидов, имеющих температуру плавления ниже температуры плавления припоя, а иногда и газы, восстанавливающие оксиды, например водород, боросодержащие пары и др.

В зависимости от физико-химических свойств паяемых металлов и припоев компонентами флюсов служат различные соли, кислоты, оксиды, а также вещества органического происхождения.

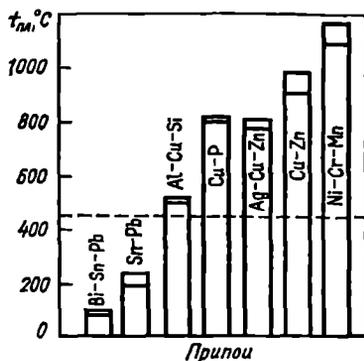


Рис. 227. Диаграмма, характеризующая температуру плавления некоторых припоев

Применяемые в настоящее время флюсы можно подразделить на четыре группы: 1) на основе соединений бора; 2) на основе фторидов; 3) на основе хлоридов; 4) на основе органических соединений (канифоли, стеарина и др.).

Флюсы 1-й группы используют при пайке черных и многих цветных металлов, 2-й группы — при пайке таких металлов и сплавов, для которых боридные флюсы недостаточно активны; флюсы 3-й группы находят применение главным образом при пайке алюминия и его сплавов, а также сплавов на основе магния; водные растворы хлористого цинка («отравленная» соляная кислота) обладают высокой химической активностью и используют при низкотемпературной пайке сталей, никеля, меди и ее сплавов. Флюсы 4-й группы применяют для низкотемпературной пайки меди и сплавов на ее основе и, как исключение, для низкоуглеродистых сталей.

Иногда применяют так называемые самофлюсующие припои, т.е. такие, которые содержат компоненты, активно реагирующие с оксидной пленкой паяемого металла и припоя.

Такие припои подразделяются на четыре группы:

- 1) содержащие щелочные металлы, чаще литий, иногда другие, вводимые в состав серебряных припоев;
- 2) содержащие бор, вводимый обычно в жаропрочные припои, а также бор вместе с литием — в припои для пайки в газовой атмосфере;
- 3) содержащие фосфор, которые обычно вводят в медные и медно-серебряные припои, применяемые для пайки меди и ее сплавов;
- 4) содержащие несколько флюсующих элементов: обычно бор, кремний и фосфор, которые вводят в припои на основе никеля, меди и серебра.

Очистка паяемых поверхностей от оксидов кроме флюсования может также осуществляться за счет самопроизвольной диссоциации оксидов и удаления выделяющегося кислорода. Для этого необходимо, чтобы парциальное давление кислорода, образующегося в результате диссоциации оксида («упругость диссоциации оксида»), было больше, чем внешнее давление. Наибольшей упругостью диссоциации обладают серебро и медь.

Если изделие поместить в вакуумную камеру, где давление будет составлять  $\sim 133,3 \cdot (10^{-4} - 10^{-5})$  Па, то при температуре пайки восстановление оксидов, следовательно, и очистка поверхности, будет происходить только у меди и серебра. Поверхность железа, никеля, титана и других металлов не должна бы очищаться, так как упругость диссоциации оксидов этих металлов очень мала (например, для  $\text{FeO}$   $133,3 \cdot 10^{-10}$ , а для  $\text{TiO}_2$   $133,3 \cdot 10^{-21}$  Па при температуре плавления оксида).

Однако практика вакуумной пайки показывает, что при температурах 1100—1200 °С пайка сталей и титановых сплавов протекает успешно при давлениях в вакуумной камере  $133,3 \cdot (10^{-2}—10^{-4})$  Па.

По-видимому, очистка поверхности в вакууме происходит не только за счет диссоциации оксидов. Анализ процесса очистки поверхности при пайке в вакууме показывает, что в ряде случаев высшие оксиды при диссоциации переходят в низшие, которые диффундируют в глубину металла (растворяются), подготавливая таким образом паяемый металл для смачивания припоем (например, при пайке железа, титана). Возможна также очистка за счет испарения некоторых оксидов или растворение их в расплавленном припое.

## 2. Газокислородная резка металлов

### *Сущность процесса и основные условия кислородной резки*

В технически чистом кислороде при температуре, необходимой для начала резки, интенсивность окисления металла становится настолько большой, что начинается горение металла. Для непрерывности процесса горения необходимо соблюдение определенных условий: 1) контакт окислителя с неокисленным металлом поверхности; 2) непрерывный подогрев неокисленного металла до температуры воспламенения; 3) достаточно высокая концентрация кислорода в газовой среде, вступающей в контакт с металлом.

Таким образом, процесс газокислородной резки является процессом сквозного прожигания твердого металла струей чистого кислорода.

Для получения качественной (гладкой) поверхности реза необходимо, чтобы разрезаемый металл удовлетворял определенным требованиям.

1. Температура горения металла должна быть ниже температуры его плавления с тем, чтобы при горении сам металл не плавился.

2. Продукты горения металла должны быть жидкими с тем, чтобы они легко удалялись из реза, оголяя поверхность металла для непрерывного контакта со струей кислорода при перемещении резака вдоль линии реза.

Кроме этих двух основных требований следует учитывать и дополнительные требования, имеющие определенное значение. Так, для интенсивного горения металла необходим контакт с чистым кислородом, а образующиеся газообразные оксиды снижают концентрацию свободного кислорода, отсюда вытекает требование недопустимости образования большого количества газообразных продуктов горения.

Вторым дополнительным требованием, которому должен удовлетворять разрезаемый металл, — достаточно высокая жидкотекучесть обра-

зующихся оксидов. Третье дополнительное условие — достаточно высокий тепловой эффект реакции окисления металла, а теплопроводность металла не должна быть очень большой с тем, чтобы не происходило интенсивного охлаждения зоны реза.

Всем этим требованиям удовлетворяют железо, углеродистые и низколегированные конструкционные стали при невысоком содержании углерода: температура плавления железа 1536 °С, горения 1200 °С, температура плавления оксида железа 1370 °С. Тепловой эффект реакции окисления достаточно высок:  $\text{Fe} + 0,5\text{O}_2 = \text{FeO} + 64,3$  ккал/г-моль;  $3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 266,9$  ккал/г-моль,  $2\text{Fe} + 1,5\text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 198,5$  ккал/г-моль, а теплопроводность железа ограничена.

Худшими характеристиками обладают никель и медь; так, для меди температура плавления 1083 °С, оксида меди 1230 °С, тепловой эффект окисления 37,5 ккал/г-моль, а теплопроводность очень велика.

Совершенно не удовлетворяют изложенным выше требованиям алюминий, магний, хром и цинк;  $t_{\text{пл}}$ , °С: Al 658; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2050; Mg 651; MgO 2500.

Примеси в сталях оказывают влияние на способность подвергаться кислородной резке, причем разные элементы в разной степени. Влияние углерода сказывается при содержании его свыше 0,25 %; марганец, никель и медь в тех количествах, в которых они содержатся в сталях, не мешают выполнению резки, кремний, алюминий и хром по мере их увеличения в стали ухудшают процесс резки.

### *Подогревательное пламя и кислород режущей струи*

Для возможности начала процесса резки и устойчивого его протекания необходимо подогреть металл в нужном месте до температуры его воспламенения. С этой целью резак должен иметь канал для подачи горючего газа в смеси с кислородом для создания подогревательного пламени и канал, по которому подается струя режущего кислорода.

Несмотря на то что реакция горения железа протекает с выделением тепла, для создания необходимой температуры в зоне реза нужно и после начала процесса не выключать подогревательное пламя, так как тепловой энергии, образующейся только за счет горения железа, оказывается недостаточно.

Схема устройства ацетилено-кислородного резака приведена на рис. 228. Для подогрева места начала реза до температуры воспламенения металла при закрытом вентиле 3 другими вентилями 4 и 9 открывают подачу ацетилена и кислорода для создания нагревательного пламени, горящего на выходе смеси из кольцевого канала, образуемого зазором между наружным и внутренним мундштуками 14 и 15. После разогрева

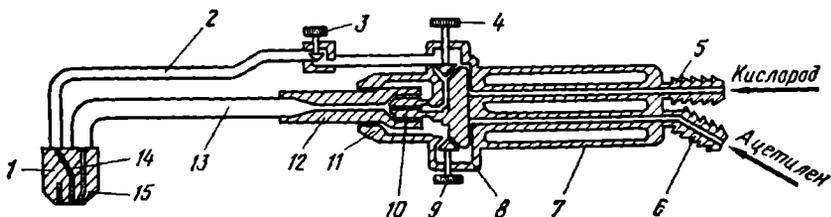


Рис. 228. Схема устройства ацетилено-кислородного резака:

1 — головка резака; 2 — трубка режущего кислорода; 3, 4, 9 — вентили; 5, 6 — ниппели для шлангов; 7 — рукоятка; 8 — корпус резака; 10 — инжектор; 11 — накидная гайка; 12 — смесительная камера; 13 — наконечник; 14 — внутренний мундштук; 15 — наружный мундштук

места начала реза до необходимой температуры открытием вентиля 3 подают струю режущего кислорода.

Мощность подогревательного пламени, а следовательно, и расход горючего газа зависят от толщины разрезаемого металла:

Толщина разрезаемого металла, мм	3—25	25—50	50—100	100—200
Мощность пламени, м <sup>3</sup> /ч	0,3—0,55	0,55—0,75	0,75—1,0	1,0—1,2

Расход кислорода режущей струи ( $V_{кр}$ ) на окисление (сжигание)  $V_{ко}$  и на выдувание  $V_{кв}$  образующихся жидких оксидов составит:  $V_{кр} = V_{ко} + V_{кв}$ . Сделав допущение, что весь окисленный металл представляет собой оксид FeO, масса кислорода, расходуемого на окисление  $M_{ко} = 16blS\rho / 56$ , г, где 16 и 56 — атомные массы кислорода и железа;  $b$  — ширина реза, см;  $l$  — длина реза, см;  $S$  — толщина металла, см;  $\rho$  — плотность железа (7,8 г/см<sup>3</sup>).

Так как площадь реза равна  $lS$ , то удельный расход кислорода на окисление  $M'_{ко} = 0,285b\rho$ , г/см<sup>2</sup>, или  $V'_{ко} = 0,285 \cdot 7,8 \cdot (1/1,43) = 1,55b$ , л/см<sup>2</sup>, так как масса 1 л кислорода равна 1,43 при 0 °С. Так как ширина реза  $b$  колеблется (0,25—0,40 см), то расход кислорода на сжигание металла, удаляемого из реза,  $V'_{ко} = 0,39—0,62$  л/см<sup>2</sup> (0,4—0,6).

Для оценки количества кислорода, расходуемого на выдувание шлака из реза, введем понятие коэффициента использования струи режущего кислорода на окисление:  $\eta_{кр} = V_{ко} / (V_{ко} + V_{кв}) = V_{ко} / V_{кр}$ . Практически  $\eta_{кр} = 0,40...0,55$ .

Тогда полный расход кислорода режущей струи:

$$V_{кр} = 0,4 / 0,55...0,6 / 0,4 = 0,73...1,5 \text{ л/см}^2.$$

Практически для машинной резки  $V_{кр} = 0,75...0,85$  л/см<sup>2</sup>, для ручной резки  $V_{кр} = 1,1 \pm 1,5$  л/см<sup>2</sup>.

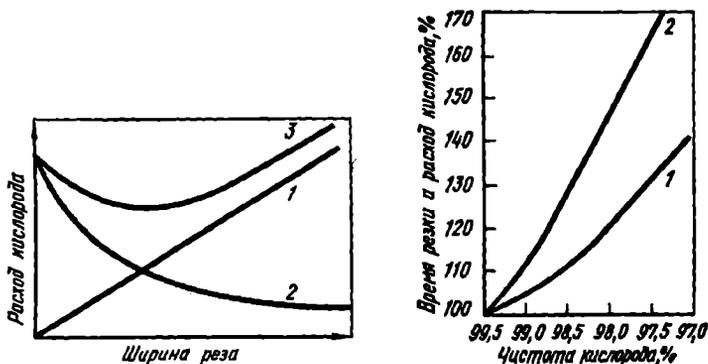


Рис. 229. Характер зависимости расхода кислорода от ширины реза:

1 — расход кислорода на сжигание металла; 2 — расход кислорода на выдувание металла; 3 — общий расход кислорода режущей струи

Рис. 230. Влияние чистоты кислорода на время резки (1) и расход кислорода (2) (расход кислорода и время резки приняты за 100 % при чистоте кислорода 99,5 %)

Очень большое влияние на расход кислорода оказывает ширина реза (рис. 229) и чистота кислорода (рис. 230). При снижении чистоты кислорода до 95 % процесс резки становится практически невозможным.

### Классификация машин для кислородной резки

Кроме ручной разделительной резки, при которой резак вдоль линии реза перемещается вручную, в настоящее время широко используется машинная кислородная резка, при которой точность и равномерность перемещения резака вдоль линии реза гораздо выше.

Для этих целей используют специальные машины двух видов: стационарные (16 типоразмеров) и переносные (3 типоразмера).

Стационарные газорезательные машины могут быть различных типов, как по конструктивной схеме, так и по системе управления перемещением — линейные — для прямолинейной резки; магнитные, перемещающиеся по стальному копиру, — для фигурной резки; фотокопировальные по чертежу — для фигурной резки; цифровые программные — для фигурной резки.

Переносные газорезательные машины общего назначения по системе контурного управления или способу движения предназначаются для резки по разметке, по циркулю, по исправляющим и гибкому копиру.

Наиболее совершенным является программное управление газорезательной машиной, так как оно устраняет необходимость изготовления так называемых копир-чертежей, повышает точность и снижает стоимость резки. Контур детали в этом случае задается в виде математической функции или через координаты отдельных точек и в виде электрических импульсов условным кодом записывается на магнитную ленту. Магнитная лента проходит через считывающее устройство (магнитофонную головку), передающую сигналы на усилитель и оттуда в исполнительную часть, управляющую параметрами резки и движением каретки.

Вместо магнитной ленты используют также бумажную ленту с записанными на ней условным кодом координатами.

### Особые виды кислородной резки

*Поверхностной кислородной резкой* называют процесс снятия слоя металла с поверхности, выполняемый кислородной струей (рис. 231).

Как и при обычной разделительной резке процесс требует начальной тепловой подготовки металла до температуры воспламенения в кислороде. Смесь горючего газа и кислорода подается из отверстий, расположенных по периферии торца резака, а в центре имеется отверстие, откуда истекает струя режущего кислорода. При начале подогрева резак располагают почти вертикально, а в момент включения режущего кислорода — поворачивают в положение, показанное на рис. 231 (с углом атаки  $10—30^\circ$ ). В этом случае струя кислорода выжигает канавку овальной формы. Последовательной выборкой расположенных рядом канавок

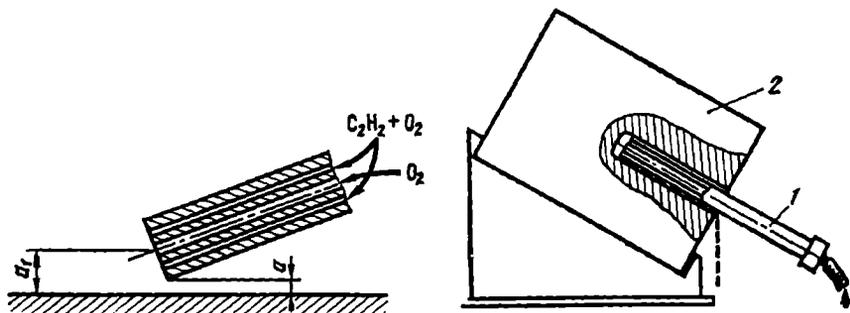


Рис. 231. Относительное положение мундштука и обрабатываемой поверхности при поверхностной кислородной резке

Рис. 232. Схема процесса резки кислородным копьем

можно снять слой металла. В металлургической и других отраслях промышленности этот процесс используется для механизированной зачистки горячего и холодного металла перед прокаткой, для удаления поверхностных пороков литья перед их заваркой, а также для строгания корня шва перед наложением подварочных валиков.

*Резка кислородным копьем* (рис. 232) заключается в прожигании в металле отверстий струей кислорода, подаваемого по стальной трубке, один конец которой упирается в прорезаемый металл, а другой присоединяется к рукоятке с вентилем для подачи кислорода.

Для начала процесса конец трубки 1 разогревают до температуры воспламенения железа сварочной горелкой, дугой (угольным электродом) или другим способом. Затем конец трубки прижимают в нужном месте в прожигаемому изделию 2 и при подаче кислорода происходит горение металла без какого-либо дополнительного источника теплоты. Для обеспечения возможности вытекания шлака из отверстия и удобства выполнения работы изделие располагают так, как это показано на рис. 232.

Для уменьшения расхода трубок и увеличения теплового эффекта горения железа внутрь толстостенных трубок закладывают одну или несколько сплошных сварочных проволок.

*Подводная кислородная резка* используется при судоремонтных, судоподъемных, аварийно-спасательных и других работах.

Нагрев металла под водой обеспечивается созданием газового пузыря, оттесняющего воду как от пламени, так и от нагреваемого участка металла. Для создания такого пузыря могут использоваться неконденсирующиеся в воде газы: кислород, азот, углекислый газ и другие (в большинстве случаев применяют кислород). Необходимость подачи газа под высоким давлением, например на глубину 20 м более 0,20 МПа, а на большие глубины под еще большим давлением, исключает применение ацетилена (из-за склонности его к распаду со взрывом при таких давлениях). Поэтому в качестве горючего используют бензин, распыляемый на выходе из горелки специальной форсункой с помощью струи кислорода (рис. 233), подаваемого по отдельным каналам. Струя режущего кислорода истекает под необходимым давлением из центрального канала резака. Газовый пузырь образуется под специальным колпаком-насадкой.

Для зажигания подогревательного пламени применяется электрический запал. Ввиду интенсивного теплоотвода водой мощность подогревательного пламени должна быть в 5—10 раз больше, чем при резке на воздухе.

В качестве примера приведем основные параметры режима резки стали толщиной 10 мм на глубине 10 м.

Рабочее давление, МПа: бензина 0,7, распылительного кислорода 0,7, режущего кислорода 0,7. Расход: бензина 3400 г/ч, распылительного кислорода 12,6 м<sup>3</sup>/ч, режущего кислорода 9,5 м<sup>3</sup>/ч. Скорость резки — до 22 м/ч.

При увеличении глубины на каждые следующие 10 м давление увеличивается на 0,1 МПа.

При увеличении толщины разрезаемого металла на той же глубине давление газов возрастает незначительно, а расход материалов увеличивается существенно. Например, при резке металла толщиной 50 мм рабочее давление бензина 0,7 МПа, распылительного кислорода 0,8 МПа, режущего кислорода 0,8 МПа, а расход материалов составляет: бензина 6800 г/ч, распылительного кислорода 17,7 м<sup>3</sup>/ч, режущего кислорода 12,1 м<sup>3</sup>/ч. При этом скорость резки составляет 12,0 м/ч.

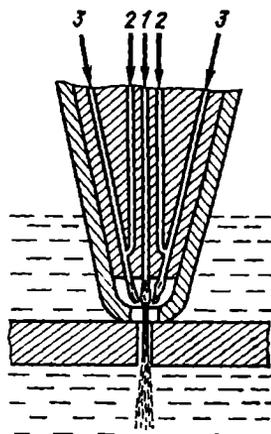


Рис. 233. Схема устройства резака для подводной резки:

1 — кислород режущей струи;  
2 — бензин; 3 — кислород подогревательного пламени (распыляющий кислород)

### Кислородно-флюсовая резка

Как указывалось выше, ряд металлов не поддается кислородной резке в связи с образованием тугоплавких оксидов, а также недостаточного теплового эффекта реакции окисления.

Удаление тугоплавких оксидов возможно либо путем их перевода в более легкоплавкие соединения, либо путем создания вблизи поверхности большого градиента температур. Тогда в очень тонком слое у поверхности создавались бы температуры, при которых могли бы расплавиться оксиды с более высокой температурой плавления, не вызывая заметного расплавления самого металла. Такого эффекта можно достичь концентрированным вводом дополнительного тепла непосредственно в реакционное пространство, т.е. вместе со струей режущего кислорода.

На этом принципе основан способ кислородно-флюсовой резки. Основой таких порошкообразных флюсов, вводимых в реакционную зону вместе с кислородной струей, является железный порошок. При этом в процессе горения флюса образуются высоконагретые частицы FeO, способствующие образованию более легкоплавких комплексных соединений (FeO · SiO<sub>2</sub>, FeO · Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.). При этом облегчается доступ кислорода к неокисленным частям металла вследствие удаления тугоплавких

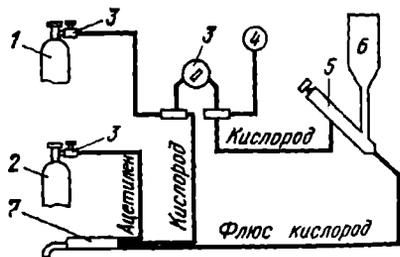


Рис. 234. Схема установки для кислородно-флюсовой резки:

1 — баллон с кислородом; 2 — баллон с ацетиленом; 3 — редукторы; 4 — манометр; 5 — инжекторная установка; 6 — бункер с флюсом; 7 — резак

состоящие из железного порошка, кварцевого песка, железной окалины, феррофосфора и алюминия с размерами зерен 0,1—0,25 мм.

Схема установки для кислородно-флюсовой резки приведена на рис. 234. Инжекторное устройство 5 дозирует количество флюса, подаваемого из бункера 6 вместе с кислородом режущей струи в резак 7. Кислород и ацетилен для создания подогревательного пламени из баллонов 1 и 2 через редукторы 3 по отдельным шлангам также поступают в резак 7.

оксидов. Для меди и сплавов на медной основе такие действия могут оказывать фосфорные и в некоторой степени алюминиевые оксиды. Введение алюминия способствует и повышению теплового эффекта за счет термитной реакции. Имеет значение также действие абразивных частиц, увлекаемых потоком кислорода режущей струи.

Опыт применения кислородно-флюсовой резки показал, что в качестве флюсов для различных металлов и сплавов могут использоваться смеси,

Глава 1  
ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ  
МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

1. Схемы обработки и классификация движений в процессе резания

Практически все детали машин и приборов приобретают окончательные формы и размеры, заданные чертежом, только после механической обработки, т.е. после обработки резанием. До обработки будущая деталь называется заготовкой; в процессе обработки с заготовки необходимо удалить лишний металл, который называется припуском на обработку.

Наряду с механической обработкой резанием в настоящее время применяют также методы обработки заготовок пластическим деформированием без снятия стружки, с использованием химической, электрической, световой, лучевой и других видов энергии.

Для осуществления процесса обработки режущему инструменту и заготовке необходимо сообщить движения относительно друг друга, которые подразделяются на основные и вспомогательные.

Движения, при которых с заготовки срезается припуск или изменяется состояние обработанной поверхности, называются основными или движениями резания. Основных движений два: главное движение и движение подачи. Главное движение определяет скорость отделения стружки. Его скорость значительно больше скорости движения подачи. Движение подачи обеспечивает возможность непрерывного врезания режущего инструмента в новые слои металла и снятия стружки со всей обрабатываемой поверхности.

Прежде чем приступить к срезанию припуска с заготовки, необходимо установить режущий инструмент и заготовку в определенном взаимном положении. Те движения, которые необходимо для этого сделать, называются установочными.

Для обеспечения процесса обработки необходимо также закреплять и раскреплять заготовки и инструменты, включать и выключать станок, производить измерение деталей и т.д. Такие движения называются вспомогательными.

В зависимости от характера выполняемых работ и вида применяемого режущего инструмента главное движение и движение подачи могут быть вращательными, поступательными, прерывистыми или комбина-

цией этих движений и могут сообщаться как заготовкам, так и инструментам. Каждая из таких комбинаций определяет схему обработки, а аналогичные схемы образуют метод обработки и определяют группу станков.

## 2. Элементы токарного проходного резца

Работа резания любого режущего инструмента основана на действии клина, который внедряется в тело заготовки и последовательно скалывает заданные участки припуска. В зависимости от метода обработки (точение, сверление, фрезерование и т.д.) режущие инструменты значительно различаются по конструкции, однако правила формирования их режущих элементов практически одинаковы. Поэтому изучение геометрических параметров режущих инструментов удобно рассматривать на примере наиболее простого токарного проходного резца. При необходимости рассмотрения геометрических характеристик любого другого режущего инструмента нужно несколько трансформировать полученные знания в соответствии с конструктивным выполнением инструмента.

Схема обработки детали точением и взаимное расположение обрабатываемой заготовки и инструмента приведены на рис. 235, а. На детали в процессе резания различают обрабатываемую, обработанную поверхности и поверхность резания.

Обрабатываемая поверхность 1 — это поверхность заготовки, которую предстоит обработать на данной операции. Обработанная поверхность 3 — поверхность, полученная в результате обработки. Поверхность резания 2 — поверхность, по которой происходит срезание стружки, она соединяет обрабатываемую и обработанную поверхности.

Токарный резец состоит из двух частей: рабочей, осуществляющей работу по срезанию стружки, и стержня, служащего для закрепления инструмента на станке. Рабочая часть резца состоит из нескольких элементов: передней поверхности 7, по которой сходит образующаяся в процессе резания стружка, главной задней поверхности 6, обращенной в сторону поверхности резания, вспомогательной задней поверхности 5, обращенной в сторону обработанной поверхности. Эти поверхности, пересекаясь под заданными углами, образуют режущие кромки.

Главная режущая кромка 8 образуется пересечением передней и главной задней поверхностей. Вспомогательная режущая кромка 4 образуется пересечением передней и вспомогательной задней поверхностей. Точка пересечения главной и вспомогательной режущих кромок образует вершину резца. Так как острая вершина резца непрочная, то на практике ее притупляют. Если радиус притупления достаточно велик, то между главной и вспомогательной режущими кромками образу-

ется переходная режущая кромка 9, наличие которой (рис. 235, б) увеличивает прочность вершины реза и уменьшает шероховатость обработанной поверхности.

При обработке материалов разной прочности острота режущего клина должна быть разная. Для формирования оптимального режущего клина вводят координатные плоскости, относительно которых и рассматривают положение передней и задних поверхностей (рис. 235, в).

Основная плоскость 10 — плоскость, параллельная продольной и поперечной подачам.

Плоскость резания 11 проходит через главную режущую кромку касательно поверхности резания.

Главная секущая плоскость 12 — плоскость, перпендикулярная проекции главной режущей кромки на основную плоскость.

Для вспомогательной режущей кромки аналогично вводят вспомогательную плоскость резания и вспомогательную секущую плоскость.

На резе различают четыре группы углов:

- 1) углы в плане (в проекции на основную плоскость);
- 2) главные углы или углы главной режущей кромки (рассматриваются в сечении главной секущей плоскостью);
- 3) вспомогательные углы или углы вспомогательной режущей кромки (рассматриваются в сечении вспомогательной секущей плоскостью);
- 4) угол наклона главной режущей кромки (рассматривается в проекции на плоскость резания).

К углам в плане относятся главный угол в плане  $\varphi$ , вспомогательный угол в плане  $\varphi_1$  и угол при вершине  $\epsilon$  (рис. 236, а).

Главный угол в плане  $\varphi$  образован проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. Угол  $\varphi$  оказывает значительное влияние на качество обработки. Уменьшение угла  $\varphi$  снижает шероховатость обработанной поверхности. При этом увеличивается активная длина режущей кромки, что улучшает условия теплоотвода и уменьшает износ инструмента.

Однако при уменьшении угла  $\varphi$  значительно увеличивается радиальная составляющая силы резания, вызывающая изгиб заготовки. Ве-

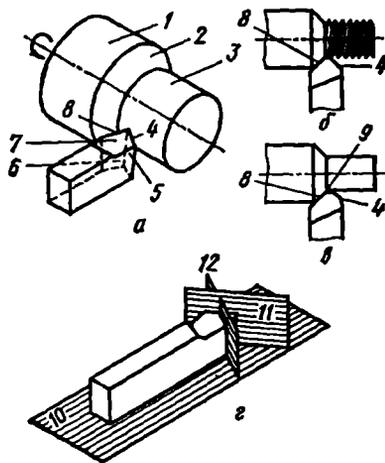


Рис. 235. Схемы обработки точением и координатные плоскости

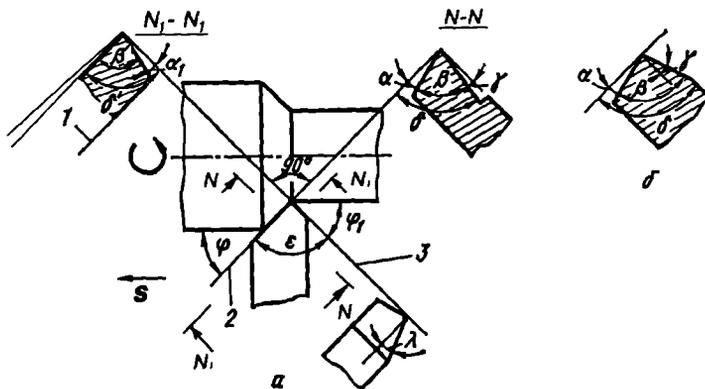


Рис. 236. Углы реза:

1 — основная плоскость; 2 — плоскость резания; 3 — главная секущая плоскость

Величина угла  $\varphi$  в зависимости от условий обработки выбирается в диапазоне  $10\text{—}90^\circ$ . Наиболее часто употребляются резцы с  $\varphi = 45^\circ$ .

Вспомогательный угол в плане  $\varphi_1$  образован проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением, обратным подаче. Чем меньше этот угол, тем меньше высота шероховатости на обработанной поверхности, но больше силы трения. Угол  $\varphi_1$  изменяется в диапазоне  $0\text{—}30^\circ$ .

Угол при вершине  $\varepsilon$  образован проекцией режущих кромок:  $\varepsilon = 180 - (\varphi + \varphi_1)$ . Чем больше этот угол, тем прочнее резец и лучше условия теплоотвода.

Углы главной режущей кромки изменяются в главной секущей плоскости (рис. 236, а). Главный задний угол  $\alpha$  образован главной задней поверхностью и плоскостью резания. Величина угла  $\alpha$  определяет величину силы трения между главной задней поверхностью резца и поверхностью резания заготовки. Его величина влияет на прочность режущей части инструмента и на условия теплоотвода. В обычных условиях обработки угол  $\alpha$  выбирается в диапазоне  $5\text{—}15^\circ$ .

Главный передний угол  $\gamma$  образован передней поверхностью и перпендикуляром к плоскости резания. Угол  $\gamma$  определяет условия схода стружки и вместе с главным задним углом обуславливает прочность режущей части инструмента. При увеличении угла  $\gamma$  уменьшается сопротивление сходу стружки и силы резания. Однако при этом уменьшается прочность режущего клина и ухудшается теплоотвод.

Угол затачивается в диапазоне от  $+30^\circ$  до  $-10^\circ$ .

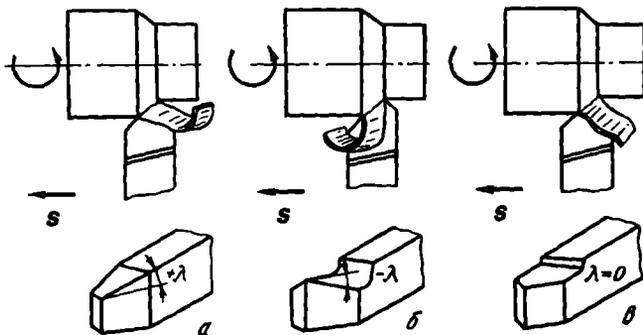


Рис. 237. Углы наклона главной режущей кромки резца

Угол заострения  $\beta$  образован передней и главной задней поверхностями:  $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma)$ . Он фактически и определяет остроту и прочность угла резца.

Угол резания  $\delta$  образован плоскостью резания и передней поверхностью:  $\delta = 90^\circ - \gamma$  (см. рис. 236, б). Если угол  $\delta < 90^\circ$ , то угол  $\gamma$  имеет положительное значение. Такая заточка применяется для чистовых резцов, работающих с малой толщиной срезаемой стружки. Если угол  $\delta > 90^\circ$ , то угол  $\gamma$  отрицательный, режущий клин очень прочный и хорошо отводит тепло. Такие углы заточки применяются для резцов чернового точения (рис. 236, б).

Углы вспомогательной режущей кромки  $\alpha'$ ,  $\varphi'$ ,  $\beta'$  и  $\delta'$  аналогичны главным и рассматриваются между передней и вспомогательной задней поверхностями.

Угол наклона главной режущей кромки  $\lambda$  образован главной режущей кромкой и плоскостью, проведенной параллельно основной плоскости через вершину резца (рис. 237). Он считается положительным, если вершина резца является самой низкой точкой режущей кромки (рис. 237, а), отрицательным (рис. 237, б), когда вершина — наивысшая точка режущей кромки, и равным нулю, если режущая кромка параллельна основной плоскости (рис. 237, в).

При нулевом или положительном значении угла  $\lambda$  стружка сходит в направлении, обратном подаче. При положительном значении угла головка резца прочная, что обуславливает применение такой заточки для черновых резцов, когда не предъявляется высоких требований к качеству обработанной поверхности.

У резцов с отрицательным значением угла  $\lambda$  стружка сходит в направлении подачи, т.е. опережает резец. При этом вершина резца острая и менее прочная. Поэтому резцы с отрицательными углами  $\lambda$  применя-

ются для чистовой обработки, когда срезается стружка малого сечения, и предъявляются высокие требования к качеству обработанной поверхности.

Величина угла  $\lambda$  выбирается в диапазоне  $+ 5^\circ$ .

### 3. Элементы резания и параметры срезаемого слоя

Для осуществления процесса обработки заготовки необходимо произвести настройку станка, т.е. определить и задать на станке следующие три параметра: скорость главного движения, величину подачи и глубину внедрения режущего инструмента в обрабатываемую заготовку. Эти параметры называются элементами резания, а их совокупность называется режимом резания.

Скорость главного движения называется скоростью резания ( $v$ ). Эта величина перемещения поверхности резания относительно режущей кромки в единицу времени в процессе главного движения. Скорость резания измеряют в метрах в минуту, при шлифовании — в метрах в секунду.

Если главное движение вращательное, например при точении, то скорость резания определяется по формуле  $v = \pi D n / 1000$ , м/мин, где  $n$  — частота вращения заготовки,  $\text{мин}^{-1}$ ,  $D$  — диаметр заготовки, мм.

Для удобства использования этой формулы  $D$  измеряют в миллиметрах, а наличие в знаменателе 1000 позволяет получить  $v$  в метрах в минуту.

Скорость подачи или подача  $S$  — это скорость перемещения инструмента относительно заготовки в направлении подачи.

При точении (рис. 238) подача  $S$ , мм/об, определяется величиной перемещения инструмента за один оборот заготовки. В ряде случаев бывает необходимо знать величину минутной подачи:  $S_m = S \cdot n$ .

Глубина резания  $t$  определяет толщину срезаемого слоя за один проход. Она определяется расстоянием между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренным по нормали к последней.

При точении цилиндрической поверхности глубину резания определяют полуразностью диаметров до и после обработки:  $t = (D - d) / 2$ .

В ряде случаев оказывается необходимым использовать понятия ширины и толщины срезаемого слоя материала.

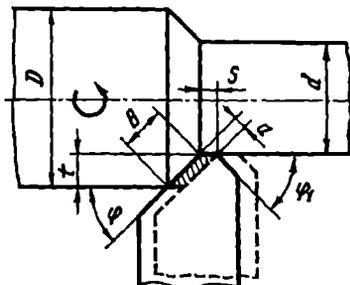


Рис. 238. Элементы режима резания при точении

Шириной среза  $b$  называют расстояние между обработанной и обрабатываемой поверхностями, измеренное по поверхности резания, а толщиной среза  $a$  — расстояние между двумя последовательными положениями поверхностей резания за время одного оборота заготовки (рис. 238). Очевидно, что  $a = f(S)$ , а величина  $b = f(t)$ .

#### 4. Процесс резания и образования стружки

Резец при своем движении деформирует находящийся перед ним металл, при этом в срезаемом слое создается сложное напряженное состояние. Когда напряжения превышают силу внутреннего сцепления, происходит сдвиг отдельного элемента стружки. При дальнейшем движении резца таким же образом отделяются последующие элементы стружки. Плоскость, по которой происходит скалывание отдельных элементов стружки, называют плоскостью скалывания, а угол между плоскостью скалывания и направлением движения резца — углом скалывания.

Степень деформации материала определяется его физико-механическими свойствами, геометрией инструмента, режимом резания и условиями обработки. Знание закономерностей и явлений, сопровождающих процесс резания, позволяет найти пути повышения качества обработки, надежности деталей, их износостойкости, снижения мощности резания и повышения эффективности обработки.

В процессе резания могут образоваться три вида стружки: сливная, скалывания и надлома (рис. 239).

Сливная стружка образуется при обработке пластичных материалов (мягкой стали, меди, алюминия и т.п.) и имеет вид сплошной гладкой ленты. Отдельные элементы стружки довольно прочно связаны друг с другом (рис. 239, *a*).

Стружка скалывания образуется при обработке менее вязких материалов (сталей повышенной твердости, некоторых видов латуней). У нее отчетливо видны плоскости скалывания между отдельными элементами, а верхняя сторона имеет пилообразную форму.

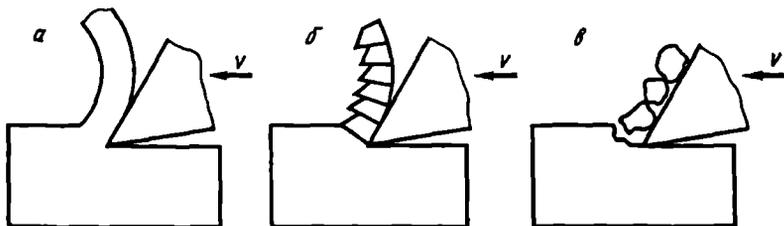


Рис. 239. Виды стружки

Стружка надлома (рис. 239, в) получается при обработке хрупких материалов (чугуна, бронзы и т.п.) и некоторых неметаллических материалов и состоит из элементов, практически не связанных между собой.

Характер стружки зависит не только от физико-механических свойств обрабатываемого материала, но и от режима резания, геометрии режущего инструмента и ряда других причин.

Стружка, образуемая в процессе резания, подвергается значительной деформации, одним из проявлений которой является ее усадка. Усадка состоит в том, что длина стружки становится меньше длины обработанной поверхности, а толщина — больше толщины срезанного с заготовки слоя. Ширина стружки при этом практически не изменяется. Величина усадки характеризуется коэффициентом усадки,

$$K = L_0 / L = a / a_0,$$

где  $L_0$  — длина обработанной поверхности;  $a_0$  — толщина срезаемого с заготовки слоя;  $L$  — длина стружки;  $a$  — толщина стружки.

Чем пластичнее металл, тем больше коэффициент усадки. Для хрупких материалов  $K \approx 1$ , для пластичных металлов  $K = 5 \dots 7$ . Усадка стружки зависит от свойств обрабатываемого металла, режима резания, геометрии режущего инструмента, условий резания и т.д.

## 5. Наростообразование при резании металлов

Стружка оказывает на переднюю поверхность резца высокое давление, а вследствие выделения в зоне резания большого количества тепла в ряде случаев возникают условия, при которых происходит как бы приваривание элементов стружки к передней поверхности режущего инструмента. Постепенно на эти частицы наслаиваются другие и между стружкой и передней поверхностью образуется неподвижный, сильно спрессованный слой, который и называют наростом. Нарост имеет клиновидную форму. Его твердость в 2—3 раза больше твердости обрабатываемого металла, и он сам может резать металл, являясь как бы продолжением резца. В процессе резания нарост непрерывно обновляется, большая его часть уносится стружкой, а остальная соскальзывает по главной задней поверхности и вдавливаются в обработанную поверхность. Нарост защищает режущую кромку от истирающего действия со стороны сходящей стружки и до некоторой степени предохраняет ее от воздействия теплоты.

При черновой обработке нарост не оказывает вредного влияния на процесс резания, но при чистовом точении является безусловно вредным, так как он приводит к значительному увеличению шероховатости обработанной поверхности.

Интенсивность наростообразования зависит от свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента и в значительной мере — от скорости резания. Для уменьшения возможности образования нароста рекомендуется применять смазочно-охлаждающие жидкости, а также тщательно полировать переднюю поверхность инструмента.

## 6. Силы резания и мощность при точении

При срезании стружки обрабатываемый материал оказывает сопротивление резанию, которое преодолевается механизмами станка и характеризуется силой резания  $R$  (рис. 240). Возникновение этой силы вызвано суммой сил различного характера, определяющихся при срезании стружки. Величина этих сил обусловлена разными факторами, поэтому абсолютная величина силы и точка ее приложения в процессе обработки являются переменными. Для выполнения необходимых расчетов используют не равнодействующую силу резания  $R$ , а ее составляющие по трем взаимно перпендикулярным координатным осям.

Вертикальная составляющая силы резания  $P_z$  действует в плоскости резания. По ее величине определяют необходимый крутящий момент на шпинделе, эффективная мощность резания, деформации изгиба заготовки и резца в плоскости  $X—Z$ . По силе  $P_z$  производится расчет на прочность механизмов коробки скоростей станка.

Радиальная составляющая силы резания  $P_y$  действует в плоскости  $X—Y$  перпендикулярно оси заготовки. По этой силе рассчитываются деформации изгиба заготовки в плоскости  $X—Y$ .

Осевая составляющая силы резания  $P_x$  действует вдоль заготовки противоположно подаче. По ней рассчитываются на прочность механизмы подачи станка и изгибающий момент, действующий на стержень резца.

Величину составляющих сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  можно измерить в процессе резания с помощью специальных динамометров. Для оценки величин  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  можно использовать экспериментальную зависимость, полученную для наружного точения проходным резцом с  $\varphi = 45^\circ$  и  $\gamma = 15^\circ$ , по которой  $P_x : P_y : P_z = 0,35 : 0,45 : 1,0$ .

Для определения по этому соотношению величин составляющих силы резания используют эмпирическую

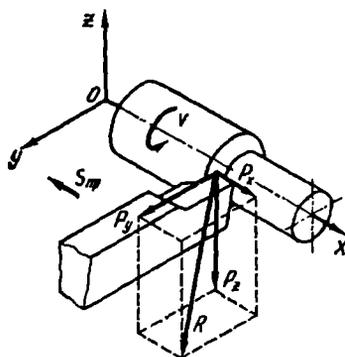


Рис. 240. Силы резания при точении

зависимость, по которой рассчитывают максимальную из них  $P_z$ :

$$P_z = C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} v^{n_{P_z}} K^{M_{P_z}}$$

где  $C_{P_z}$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала;  $t$  — глубина резания, мм;  $S$  — подача, мм/об;  $v$  — скорость резания, м/мин;  $K^{M_{P_z}}$  — коэффициент, учитывающий реальные условия обработки, геометрию заточки, материал режущей части, смазочно-охлаждающие средства и т.д.

Величины коэффициентов и показателей степеней выбираются из справочников.

Крутящий момент на шпинделе, необходимый для преодоления сопротивления заготовки резанию, определяют по формуле

$$M_{кр} = P_z D / (2 \cdot 1000),$$

где  $D$  — диаметр заготовки, мм.

Эффективной мощностью  $N_e$  называют мощность, расходуемую на процесс деформирования и срезания с заготовки слоя металла. При точении цилиндрической поверхности на токарно-винторезном станке

$$N_e = P_z v / (60 \cdot 10^3) + P_x n S / (60 \cdot 10^6) \text{ кВт},$$

где  $n$  — частота вращения заготовки,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $S$  — продольная подача, мм/об.

Для определения мощности электродвигателя необходимо учесть  $\eta$  — коэффициент полезного действия станка:

$$N_{э.д.} = N_e / \eta$$

Так, для токарно-винторезных станков  $\eta = 0,8$ , для шлифовальных 0,9, а для станков строгальной группы 0,5—0,6.

## 7. Тепловые явления при резании

Основными источниками образования тепла при обработке резанием являются работа деформации срезаемого слоя, сил трения стружки о переднюю поверхность и инструмента о поверхность резания заготовки. Экспериментальными исследованиями установлено, что выделившееся тепло распределяется неравномерно. В зависимости от условий обработки стружкой отводится 25—85 % всей выделившейся теплоты, заготовкой 10—50 %, инструментом 2—8 % и около 1 % рассеивается в окружающую среду.

Теплообразование в целом отрицательно влияет на процесс резания. Хотя при повышении температуры возрастает пластичность обрабатываемого материала, однако негативные процессы значительно сильнее. Повышение температуры режущего инструмента снижает его твердость и износостойкость.

С повышением температуры заготовки и инструмента увеличиваются их размеры, что приводит к увеличению толщины снимаемого слоя и получения бракованных деталей.

Температурные погрешности, влияющие на точность формы и размеров обрабатываемых заготовок, необходимо учитывать при наладке станков, особенно автоматов и полуавтоматов.

Наибольшее влияние на повышение температуры в зоне резания оказывает увеличение скорости резания, а наименьшее — увеличение глубины резания.

Это объясняется тем, что с увеличением глубины резания возрастает длина активной части режущего инструмента, что улучшает условия теплоотвода.

## 8. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей

Для уменьшения трения и охлаждения режущего инструмента и обрабатываемой детали широкое применение при обработке резанием находят смазочно-охлаждающие жидкости. Для этого используются водные растворы минеральных солей, эмульсии, растворы мыла, минеральные, животные и растительные масла, скипидар, керосин и т. д.

Смазочно-охлаждающие жидкости, обладая смазывающими свойствами, снижают трение, при этом одновременно охлаждаются режущий инструмент, заготовка и деформируемый слой. Смазывающая способность жидкостей препятствует образованию нароста, что способствует уменьшению степени шероховатости обработанной поверхности. За счет применения смазочно-охлаждающих жидкостей мощность, необходимая для снятия стружки, уменьшается на 10—15 %, резко возрастает стойкость режущего инструмента, повышается точность обработанной поверхности и уменьшается степень шероховатости.

В зависимости от метода обработки и режима резания расход смазочно-охлаждающих жидкостей составляет 5—150 л/мин.

Эффективность охлаждения зависит не только от состава смазочно-охлаждающих жидкостей, но и от способа ее подвода к охлаждаемым поверхностям.

Наиболее распространенным является подача смазочно-охлаждающих жидкостей свободно падающей струей.

Более эффективно высоконапорное охлаждение. В этом случае смазочно-охлаждающая жидкость под большим давлением (1,5—2,0 МПа) подается снизу, со стороны задних поверхностей инструмента. При этом частицы жидкости интенсивно проникают в микротрещины, чем способствуют уменьшению сил резания и значительному увеличению степени охлаждения.

Весьма эффективно также охлаждение распыленными жидкостями. Метод характеризуется малым расходом и чистотой рабочего места.

## 9. Износ и стойкость режущих инструментов

В процессе резания выделяется большое количество тепла, действуют большие контактные давления и происходит интенсивное трение между инструментом, заготовкой и стружкой, что обуславливает износ режущего инструмента.

При действии контактных давлений и температур в зоне резания начинают действовать силы молекулярного сцепления — адгезия, выражающаяся в слипании материала инструмента со стружкой. Это сопровождается вырыванием отдельных частей материала инструмента сходящей стружкой, что ускоряет процесс его изнашивания.

При обработке без смазочно-охлаждающих жидкостей преобладающим становится абразивное изнашивание. Вследствие действия указанных факторов происходит износ режущих инструментов по передней и задней поверхностям.

Степень и характер износа режущего инструмента оказывают существенное влияние на расход режущего инструмента, качество обработки и размеры деталей.

С понятием об износе инструмента тесно связано понятие о его стойкости, под которой понимается промежуток времени непрерывной работы инструмента, в течение которого его износ достигает установленной величины. Стойкость измеряется в минутах и обозначается буквой  $T$ . Наибольшее влияние на износ, а соответственно и на стойкость оказывает скорость резания.

Обычно задаются такими режимами резания, чтобы стойкость инструмента была в пределах 30—90 мин.

## 10. Упрочнение при обработке резанием

Все режущие инструменты работают по принципу действия клина, причем чем острее клин, тем легче отделяется стружка. Однако на практике режущий клин даже заточенного инструмента имеет некоторый радиус закругления (около 0,02 мм).

При срезании с заготовки припуска с глубиной резания  $t$  (рис. 241, а) при наличии радиуса закругления режущего клина  $B$  в стружку будет переходить лишь часть металла, лежащая выше линии  $AB$ . Слой металла, лежащий ниже, будет повергаться упругой и пластической деформации, образуя обработанную поверхность. В результате такого воздействия обработанная поверхность приобретает повышенную по сравнению с исходным металлом твердость. Это явление упрочнения обработанной поверхности называется наклепом. В результате проявления

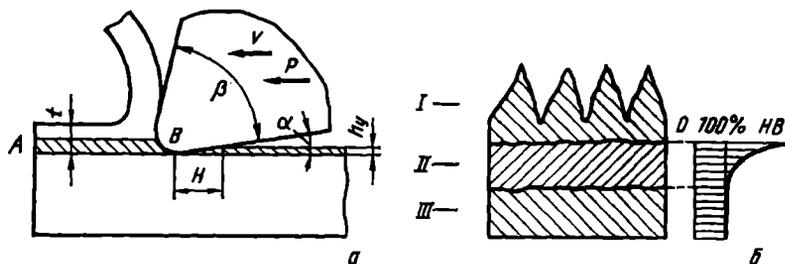


Рис. 241. Схема образования наклепа при точении:

*a* — схема срезания стружки; *б* — структура приповерхностного объема металла после обработки; *в* — изменение твердости по зонам *II* и *III*

наклепа твердость обработанной поверхности может повышаться в 2 раза и более. Величина упрочнения и глубина наклепанного слоя будет зависеть от физико-механических свойств обрабатываемого металла, геометрии режущего инструмента и режима резания.

После прохождения резца относительно обработанной поверхности происходит частичное упругое восстановление размера деформированного слоя  $h_y$ . В результате этого образуется контактная площадка шириной  $H$ , по которой обработанная поверхность контактирует со вспомогательной режущей кромкой и вспомогательной поверхностью резца.

В результате воздействия режущего инструмента на заготовку в поверхностном слое обработанной поверхности выявляются внутренние остаточные напряжения. Эти напряжения в зависимости от условий обработки могут быть растягивающими или сжимающими. Напряжения сжатия повышают работоспособность деталей, а растягивающие остаточные напряжения — понижают.

Формирующийся в процессе обработки поверхностный слой можно разделить на три зоны (рис. 241, б): *I* — зона разрушенной структуры, *III* — основной недеформированный металл, *II* — зона наклепанного металла.

Зона разрушенной структуры является дефектной. Она содержит острые, глубокие канавки и трещины, являющиеся микроконцентраторами напряжений.

В зоне наклепа твердость металла резко изменяется (рис. 241, в) от 2—3-кратной на верхней границе до равной твердости основного металла на нижней. Глубина этого слоя составляет от нескольких миллиметров при черновой обработке до сотых долей миллиметра при чистовой обработке.

Наличие наклепа на обработанной поверхности благоприятно при условии, что образуются остаточные сжимающие напряжения.

Упрочнение, полученное при черновой обработке, является безусловно вредным, так как при дальнейшей обработке инструментом приходится срезать металл повышенной твердости.

## 11. Производительность и выбор режима резания

Производительность обработки определяется количеством заготовок, изготавливаемых в единицу времени, шт/мин:  $Q = 1 / T_{шт}$ , где  $T_{шт}$  — штучное время, т.е. среднее время, затрачиваемое на изготовление одной детали. Оно складывается из суммы отдельных составляющих:

$$T_{шт} = T_0 + T_в + T_{обсл} + T_{отд},$$

где  $T_0$  — основное технологическое время, затрачиваемое на снятие припуска с заготовки;  $T_в$  — вспомогательное время, затрачиваемое на выполнение вспомогательных действий, обеспечивающих выполнение основной работы — установку и съем детали, управление станком и т.д.;  $T_{обсл}$  — время обслуживания рабочего места и станка;  $T_{отд}$  — время перерывов на отдых.

Величина основного технологического времени  $T_0$  определяется расчетным путем в зависимости от способа обработки и режимов резания. Так, при точении

$$T_0 = L / (Sn) = Lh / (Snt),$$

где  $L = l + l_1 + l_2$  (мм) — расчетная длина пути режущего инструмента относительно заготовки в направлении подачи (рис. 242);  $l$  — длина обрабатываемой поверхности;  $l_1$  — путь врезания инструмента;  $l_2$  — путь выхода (перебег) резца;  $n$  — частота вращения заготовки,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $S$  — продольная подача, мм/об;  $i$  — число рабочих ходов инструмента, необходимое для снятия всего припуска при работе с глубиной резания  $t$ , мм.

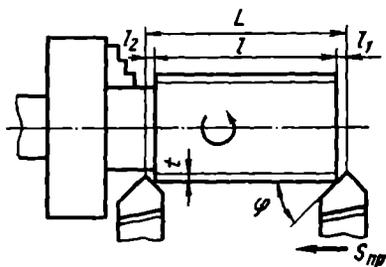


Рис. 242. Схема к расчету основного технологического времени при точении цилиндров

При обработке резанием главной составляющей  $T_{шт}$  является основное технологическое время  $T_0$  (до 75 %), поэтому для повышения производительности труда необходимо принимать все меры для его сокращения. На практике для повышения производительности труда используют методы высокопроизводительного врезания, основанные на максимальном возможном увеличении скорости ре-

зания (скоростное резание) и увеличении подачи (силовое резание). Скоростное резание требует применения инструментов, оснащенных наиболее теплостойким и износостойким инструментальным материалом.

Для широкого внедрения силового резания необходимо иметь режущие инструменты, обеспечивающие при работе с большими величинами подач высокое качество обработанной поверхности. Основной особенностью таких режущих инструментов является наличие вспомогательной режущей кромки с углом  $\varphi = 0^\circ$ .

Элементы режима резания выбирают в следующей последовательности. Вначале задаются значением глубины резания. При этом стремятся снять за один проход весь припуск. Если, исходя из технологических требований, необходима последующая чистовая обработка, то за первый черновой проход снимается 80 % припуска, а за второй — остальные 20 %. Затем выбирают величину подачи. При этом необходимо назначать наибольшую допустимую подачу, исходя из требований точности и шероховатости обработанной поверхности. На практике для выбора величин  $S$  и  $t$  существуют соответствующие таблицы.

В зависимости от выбранной глубины резания и подачи определяется оптимальная скорость резания:

$$v = C_v K_v / (T^m S^{x_v} t^{y_v}),$$

где  $C_v$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала, материал режущей части инструмента и т.д.,  $T$  — период стойкости инструмента, выбирается в зависимости от технологической схемы обработки: для наружного точения  $T = 60 \dots 90$  мин;  $t$  — глубина резания, мм;  $S$  — подача, мм/об;  $K_v$  — поправочный коэффициент, учитывающий особенности геометрии заточки инструмента, применение смазочно-охлаждающих средств и т.п.;  $m$ ,  $x_v$ ,  $y_v$  — показатели степеней, величины которых определяются свойствами обрабатываемого и инструментального материалов и условиями обработки.

По оптимальной скорости резания находят частоту вращения шпинделя станка:  $n = 1000 v / (\pi D)$ .

## 12. Материалы для изготовления режущих инструментов

Режущая часть инструментов работает в условиях очень высоких температур, на нее действуют высокие статические и динамические нагрузки. Поэтому инструментальные материалы должны обладать следующим комплексом свойств: твердостью, прочностью, износостойкостью, теплостойкостью и теплопроводностью.

**Твердость** — способность материала сопротивляться внедрению в него другого недеформируемого тела — позволяет режущему инструменту производить работу по отделению стружки.

**Вязкость** — способность материала сопротивляться динамическим ударным нагрузкам.

**Прочность** — способность сопротивляться действующим растягивающим, скручивающим, изгибающим, сжимающим и т.д. нагрузкам.

**Износостойкость** — способность материала сопротивляться изнашиванию. Чем выше износостойкость, тем дольше режущий инструмент будет сохранять свою остроту и размеры.

**Теплостойкость** — свойство материала сохранять свою твердость при высоких температурах.

**Теплопроводность** — способность отводить тепло — способствует понижению температуры в зоне резания, улучшению условий работы режущего инструмента.

Наряду с указанными требованиями инструментальные материалы должны, по возможности, содержать малое количество дефицитных элементов.

В качестве инструментальных материалов применяются следующие: углеродистые инструментальные стали, легированные инструментальные стали, быстрорежущие стали, металлокерамические твердые сплавы, абразивные материалы и сверхтвердые инструментальные материалы. Состав, свойства и применение инструментальных материалов рассматривается в разделе II, гл. 11.

### 13. Обрабатываемость материалов

Основными параметрами, характеризующими обрабатываемость материала, являются сопротивление материала резанию, стойкость инструмента и качество обработанной поверхности. Обрабатываемость материала резанием зависит от его химического состава и физико-механических свойств.

Повышение рабочих параметров машин (давлений, скоростей, температур) обуславливает создание новых конструкционных материалов, обработка резанием которых весьма затруднительна.

Для облегчения процесса резания можно применять предварительную термическую обработку заготовок — отжиг или отпуск, в результате чего уменьшается твердость и повышается пластичность материала. Однако этот метод повышения обрабатываемости не всегда удобен.

Более радикальным является правильный подбор оптимальной марки инструментального материала для обработки заданной заготовки.

Значительное влияние на улучшение обрабатываемости оказывает также выбор оптимального сочетания элементов геометрии режущего

инструмента, параметров режима резания, применение наиболее эффективных смазочно-охлаждающих жидкостей и способа их подвода в зону резания.

Часто для увеличения обрабатываемости используется легирование материалов специальными элементами. Так, для изготовления неотчетственных деталей, выпускаемых в массовом количестве на станках-автоматах, применяются специальные автоматные стали, легированные серой и свинцом. Их повышенное содержание приводит к некоторому понижению механических свойств, но резко повышает обрабатываемость.

В последние годы для улучшения обрабатываемости используется также микролегирование.

Обрабатываемость сталей можно повысить дополнительным подогревом зоны резания. При этом облегчается процесс пластической деформации срезаемой стружки, улучшаются условия трения на режущих поверхностях инструмента. Чаще всего используются методы электрического подогрева.

При предварительной обработке находит применение подогрев зоны резания газовой горелкой и плазменной струей.

В настоящее время не существует единого общепринятого критерия для количественного определения обрабатываемости материала резанием. В общем случае лучшей оценкой обрабатываемости является та скорость резания, при которой резец, работающий с заданными глубиной и подачей, имеет наибольшую стойкость.

## **Глава 2**

### **МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ И ИХ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ**

#### **1. Классификация и обозначение металлорежущих станков**

В основу отечественной классификации станков положен технологический принцип, по которому все многообразие станков делится на классы, исходя из общности технологической схемы обработки, типа применяемых режущих инструментов и геометрических особенностей обрабатываемых поверхностей.

Все серийно выпускаемые станки в соответствии с классификацией, разработанной Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков (ЭНИМС), в зависимости от технологического принципа обработки разделены на десять групп (табл. 38).

Таблица 38. Классификация металлорежущих станков

Группа станков	Шифр группы	Ш и ф р			
		0	1	2	3
Резервные Токарные	0	—	—	—	—
	1	<i>Автоматы и полуавтоматы</i>			Револьверные
Сверильные и расточные	2	—	Специализированные — Вертикально-сверильные	Одношпиндельные	Многошпиндельные <i>Полуавтоматы</i>
				Одношпиндельные	
Шлифовальные и доводочные	3	—	Круглошлифовальные	Внутришлифовальные	Обдирочные шлифовальные
Комбинированные	4	—	—	—	—
Зубо- и резьбообрабатывающие	5	Резьбонарезные	Зубострогальные для цилиндрических колес	Зуборезные для конических колес	Зубофрезерные
Фрезерные	6	—	Вертикальные консольные	Непрерывного действия	—
Строгальные, долбежные и протяжные Разрезные	7	—	<i>Продольные</i>		Поперечно-строгальные
			Одностоечные	Двухстоечные	
	8	—	<i>Разрезные</i>		
Разные	9	—	резцом	абразивным кругом	гладким диском
			Опиловочные	Пилонасекательные	Правильно- и бесцентровобдирочные

Каждая группа разделена на 10 подгрупп, исходя из общности конструктивного выполнения станков. В каждой подгруппе имеется по несколько типовразмеров станков.

В соответствии с этой классификацией каждому станку присвоен индекс, состоящий из цифр и букв. Первая цифра означает его принадлежность к группе, вторая указывает на тип станка, следующие одна или две цифры условно указывают на основную техническую характеристику станка, позволяющую оценить максимальный размер заготовки, которую можно обрабатывать на данном станке (высоту центров для токарно-винторезного станка, наибольший размер просверливаемого отверстия для сверильных станков, условный размер стола для фрезерных и строгальных станков и т.д.).

В обозначениях могут встречаться буквы (А, К, М, Н и др.).

Буква после цифры указывает на то, что данный станок является модернизированным по сравнению с моделью, не содержащей в индексе

типа					
4	5	6	7	8	9
— Сверлильно-отрезные	— Карусельные	— Токарные и лобовые	— Много-резцовые	— Специализированные	— Разные
Координатно-расточные	Радиально-сверлильные	Горизонтально-расточные	Алмазно-расточные	Горизонтально-сверлильные	Разные
Специализированные шлифовальные	—	Заточные	Плоскошлифовальные	Притирочные и полировочные	Разные, работающие абразивом
—	—	—	—	—	—
Для нарезания червячных пар	Для обработки торцов зубьев	Резьбофрезерные	Зубоотделочные и проверочные	Зубо- и резьбошлифовальные	Разные
Копировальные и гравировальные	Вертикальные бесконсолные	Продольные	Консольные широкоуниверсальные	Горизонтальные консольные	Разные
Долбежные	Протяжные горизонтальные	—	Протяжные вертикальные	—	Разные строгальные
Правильно-отрезные	<i>Пилы</i>			—	—
Балансировочные	Ленточные	Дисковые	Ножовочные	—	—
	Для испытания сверл и шлифовальных кругов	Делительные	—	—	—

буквы. Буква после последней цифры означает, что станок видоизменен (модифицирован) по сравнению с базовой моделью.

Например, обозначение станка с индексом 162 свидетельствует, что станок относится к группе токарных станков (1), к шестой подгруппе (6), имеющей горизонтальное расположение шпинделя — токарно-винторезный, высота центров станка (расстояние от станины до оси шпинделя) составляет 200 мм (2), что позволяет обрабатывать детали максимальным диаметром 400 мм.

Индекс модели станка 1К62 показывает, что это модернизированный (улучшенный) станок, выполненный на базе модели станка 162. Индекс 1К62ПУ говорит о том, что это модернизированный станок, выполненный на базе станка 1К62, в отличие от которого он оснащен системой программного управления.

Кроме этой, основной, имеются и другие системы классификации.

По степени универсальности станки делятся на:

1) универсальные, предназначенные для выполнения самых различных работ при обработке разнообразных деталей (токарно-винторезные, сверлильные, фрезерные, шлифовальные и т.д.);

2) специализированные, предназначенные для обработки деталей, сходных по конфигурации, но имеющих различные размеры (ступенчатых валиков, колец подшипников качения и т.п.);

3) специальные для обработки деталей только одного типоразмера.

По степени точности станки разделены на 5 классов: нормальной точности (Н), повышенной точности (П), высокой точности (В), особо-высокой точности (А) и особоточные станки (С).

Для обеспечения надежной работы станков классов А, В, С их необходимо устанавливать в помещении с постоянной температурой окружающего воздуха.

По массе станки разделяют на легкие (до 1 т), средние (до 10 т), тяжелые (до 100 т) и уникальные (свыше 100 т).

По степени автоматизации подразделяют на станки: с ручным управлением, полуавтоматы, автоматы и станки с программным управлением.

## 2. Приводы и передачи металлорежущих станков

Для работы металлорежущих станков необходимо наличие следующих основных групп механизмов: двигательных, передаточных и исполнительных. Исполнительные механизмы обеспечивают необходимые перемещения заготовки и инструмента, которые сообщаются им от двигательных механизмов через передаточные. В качестве двигательных механизмов используются индивидуальные электродвигатели, число которых определяется сложностью и мощностью станка.

Передаточные механизмы не только передают движение от двигательного механизма к исполнительному, но и преобразуют его — изменяют его скорость, направление, преобразуют вращательное движение в поступательное, прерывистое и т.п.

Совокупность двигательного, передаточного и исполнительного механизмов называется *приводом*. В современных металлорежущих станках различают приводы главного движения, движения подачи и вспомогательных движений.

Приводы бывают ступенчатого и бесступенчатого регулирования скоростей.

Ступенчатое регулирование осуществляется коробками скоростей и подач, собранными из соответствующих передач. При использовании такого способа регулирования обеспечиваются строго постоянные значения скоростей исполнительных элементов и заданное число скоростей. Достоинством таких приводов является простота, надежность и

компактность конструкции, возможность быстрой и точной установки тех ступеней скоростей, которые обеспечивает механизм. Недостатком таких приводов является невозможность регулировки скоростей между двумя соседними значениями.

Приводы бесступенчатого регулирования позволяют получить любую скорость из имеющегося диапазона. Достоинством станков, оборудованных такими видами приводов, является то, что они всегда работают на оптимальных режимах резания. Существенный недостаток приводов бесступенчатого регулирования — сложность конструкции и, как правило, малый диапазон регулирования.

Для передачи и преобразования движений служат кинематические цепи, которые начинаются от электродвигателя и заканчиваются у соответствующего исполнительного органа (шпинделя, суппорта, стола и т.п.).

Для изображения кинематических цепей на чертежах применяются условные обозначения, называемые кинематическими схемами.

Кинематические цепи состоят из отдельных элементов, называемых звеньями. Два взаимодействующих между собой звена составляют кинематическую пару или передачу. Передачи передают движение от одного звена к другому, а при необходимости и преобразуют движение при передаче.

В передаче элемент, отдающий движение, называется ведущим, а получающий движение — ведомым. Для расчетов, связанных с настройкой станков, необходимо знать, как изменяется скорость при ее передаче от звена к звену. Каждая кинематическая пара характеризуется передаточным отношением  $i$ , которое показывает, во сколько раз частота вращения ведомого элемента  $n_2$  будет меньше или больше частоты вращения ведущего элемента  $n_1$ , т.е.

$$i = n_2 / n_1.$$

Наиболее часто применяются шесть типов передач, комбинации которых позволяют создать самые разнообразные механизмы.

Ременная передача (рис. 243, а) осуществляется плоскими, клиновыми или круглыми ремнями через шкивы, закрепленные на ведущем и ведомом валах. При передаче движения линейные скорости на поверхностях ведущего и ведомого шкивов, соприкасающихся с ремнем, равны и вследствие этого

$$v_1 = v_2, \text{ но } v = \pi dn, \text{ тогда } \pi d_1 n_1 = \pi d_2 n_2,$$

где  $d_1$  и  $d_2$  — диаметры ведущего и ведомого шкивов.

Отсюда следует, что величина передаточного отношения будет определяться соотношением диаметров ведущего и ведомого шкивов:

$$i_p = n_2 / n_1 = d_1 / d_2.$$

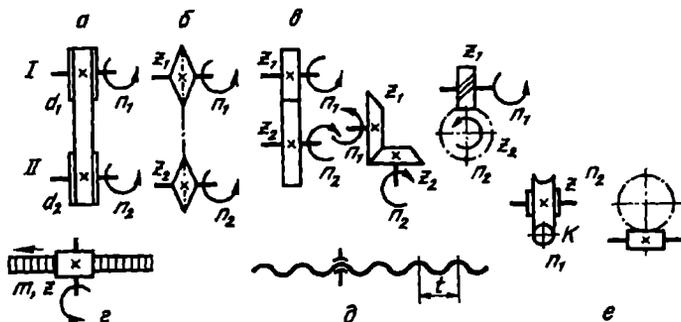


Рис. 243. Основные типы передач металлорежущих станков

В силу того, что валы могут проскальзывать относительно ремня, скорость ведомого вала будет несколько меньше. Это учитывается коэффициентом проскальзывания  $\gamma_p = 0,96...0,98$ .

Тогда

$$i_p = n_2 / n_1 = (d_1 / d_2) \gamma_p.$$

Ременная передача находит очень широкое применение, в частности, для передачи движения с электродвигателя в кинематические цепи станков.

Достоинством ременной передачи является простота изготовления и монтажа, возможность передачи движения между далеко расположенными валами, оси которых могут быть непараллельными, плавность работы.

Основные недостатки связаны с проскальзыванием ремня. Это вызывает сложность при передаче больших моментов при больших скоростях вращения.

Цепная передача (рис. 243, б) является развитием ременной передачи. Наличие ведущих и ведомых звездочек и цепи устраняет главный недостаток ременной передачи — проскальзывание ремня, но сохраняет большинство ее достоинств.

Передаточное отношение цепной передачи

$$i_{ц} = z_1 / z_2,$$

где  $z_1$  и  $z_2$  — числа зубьев ведущей и ведомой звездочек.

Наибольшее применение в кинематических цепях находят зубчатые (рис. 243, в) передачи, образованные парой цилиндрических или конических зубчатых колес.

Передаточное отношение зубчатой передачи

$$i_з = z_1 / z_2,$$

где  $z_1$  и  $z_2$  — числа зубцов ведущего и ведомого зубчатых колес.

Во многих случаях необходимо преобразовать вращательное движение в поступательное. Для этого применяются два типа передач: реечные и винтовые.

Реечная передача (рис. 243, з), по сути дела, представляет собой видоизмененную пару двух цилиндрических зубчатых колес, диаметр одного из которых равен бесконечности и образующая превратилась в зубчатую рейку. При вращении зубчатого колеса, находящегося в зацеплении с рейкой, рейка получает поступательное перемещение.

Если реечное колесо сделает  $n$  оборотов, то рейка пройдет путь  $S$ , мм:

$$S = tzn = \pi mzn, \quad t = \pi m, \quad m = D / z,$$

где  $D$  — диаметр делительной окружности зубчатого колеса;  $t$  — шаг зубчатого колеса;  $z$  — число зубьев реечного зубчатого колеса;  $m$  — модуль зубчатого зацепления.

Винтовая передача (рис. 243, д) состоит из винта и гайки и также служит для преобразования вращательного движения в поступательное.

Если шаг резьбы равен  $t$ , а число заходов  $K$ , то за  $n$  оборотов винта гайка переместится на величину  $S$ , мм:

$$S = Ktn.$$

Особенность винтовой передачи — преобразование вращательного движения в поступательное, но не наоборот.

Червячная передача (рис. 243, е) применяется для резкого уменьшения скорости вращения ведомого вала. В этой передаче ведущим всегда является многозаходный специальный винт, который здесь называется червяком. Передаточное отношение червячной передачи

$$i_{ч.п.} = K / z,$$

где  $K$  — число заходов червяка;  $z$  — число зубьев червячного колеса.

Важным достоинством червячной пары является то, что при небольших габаритах она позволяет резко уменьшать скорость ведомого элемента. Аналогично винтовой передаче червячная пара является самотормозящейся, т.е. движение может передаваться только от червяка к червячному колесу.

### 3. Элементарные механизмы станков

Для обеспечения исполнительным органам станков разных скоростей движения необходимо иметь механизмы, позволяющие изменять величины скоростей при передаче движения между валами, а, исходя из зависимости  $n_2 = n_1 i$ , для этого надо изменять величину передаточного отношения между валами, что и обеспечивается соответствующими механизмами регулирования.

При использовании в кинематических цепях станков механизмов ступенчатого регулирования возникает вопрос о перепаде скоростей

между двумя соседними ступенями. Исследования академика А.В. Гадюлина показали, что наиболее выгодно для построения коробок скоростей и подач применять изменение регулируемых параметров по закону геометрической прогрессии. Тогда по известной минимальной скорости  $n_1 = n_{\min}$  каждая последующая определяется как

$$n_2 = n_1 \varphi; n_3 = n_2 = n_1 \varphi^2 \text{ и } n_z = n_{z-1} \varphi = n_1 \varphi^{z-1},$$

где  $\varphi$  — знаменатель геометрического ряда скоростей.

Изменение скорости при переходе от одного числа оборотов шпинделя к другому называется перепадом скорости. Геометрический ряд характеризуется постоянством перепада скоростей  $A, \%$ :

$$A = [ (\varphi - 1) / \varphi ] 100.$$

В нашей стране числа оборотов шпинделей и знаменателей рядов стандартизованы и приняты следующие знаменатели рядов и соответствующие им перепады скоростей:

$\varphi$	1,06	1,12	1,26	1,41	1,58	1,78	2,00
$A, \%$	5	10	20	30	40	45	50

*Ступенчато-шкивный механизм* (рис. 244, а) состоит из нескольких пар шкивов разных диаметров. Изменяя положение ремня, передающего движение с ведущего вала  $I$  на ведомый  $II$ , получают разные величины передаточных отношений, а соответственно и скорости ведомого вала:

$$i_1 = (d_1 / d_2) \gamma; i_2 = (d_3 / d_4) \gamma; i_3 = (d_5 / d_6) \gamma$$

*Подвижный блок зубчатых колес* (рис. 244, б). Движение с ведущего вала  $I$ , с глухо закрепленными зубчатыми колесами  $z_1, z_3, z_5$  передается на ведомый вал  $II$  с помощью подвижного тройного блока  $z_2, z_4, z_6$ , перемещающегося на шпонке вдоль его оси. Ведомому валу может быть обеспечено три скорости вращения вследствие изменения передаточных отношений:

$$i_1 = z_1 / z_2; i_2 = z_3 / z_4; i_3 = z_5 / z_6.$$

*Механизм с накидным зубчатым колесом* (конус Нортонa) (рис. 244, в). Движение с любого колеса ( $z_1—z_6$ ) ведущего вала  $I$  передается с помощью накидного колеса  $z_H$  колесу  $z_C$ , находящемуся с ним в постоянном зацеплении, которое вместе с  $z_H$  может перемещаться вдоль оси ведомого вала  $II$ . Механизм обеспечивает пять вариантов передаточных отношений:

$$i_1 = (z_1 / z_H) (z_H / z_C) = z_1 / z_C; i_2 = z_2 / z_C;$$

$$i_3 = z_3 / z_C; i_4 = z_4 / z_C; i_5 = z_5 / z_C.$$

*Механизм с вытяжной шпонкой* (рис. 244, г). Состоит из двух валов, на одном из которых колеса скреплены с валом глухо ( $II$ ), а колеса другого вала могут поочередно подключаться к ведущему валу ( $I$ ) с помощью «флажка» вытяжной шпонки, устанавливаемого в соответ-

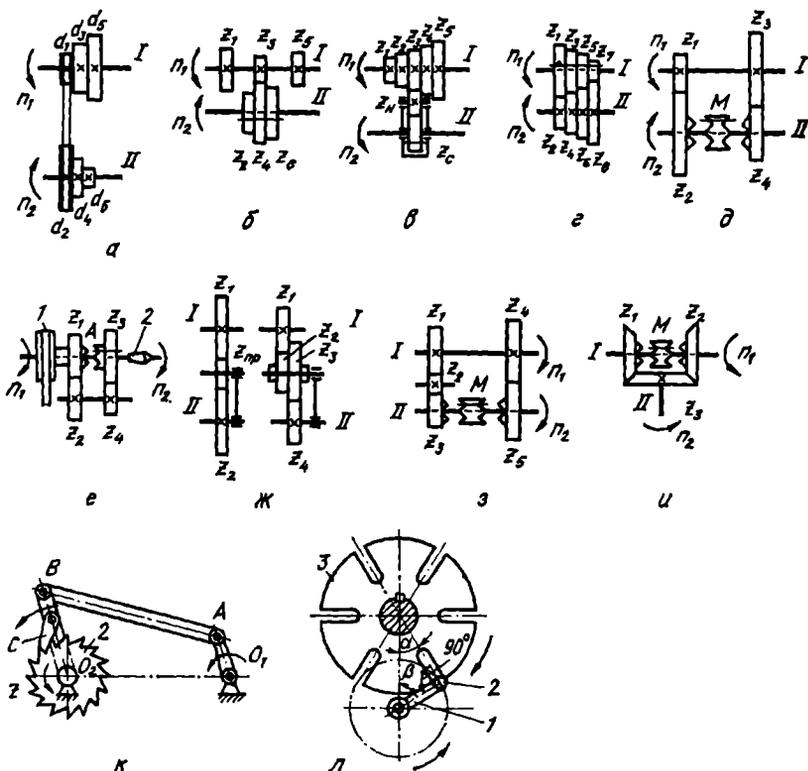


Рис. 244. Механизмы ступенчатого регулирования металлорежущих станков

вующем колесе, оставляя другие колеса свободными. Этот механизм обеспечивает следующие величины передаточных отношений:

$$i_1 = z_1 / z_2; i_2 = z_3 / z_4; i_3 = z_5 / z_6; i_4 = z_7 / z_8.$$

Механизм с кулачковыми муфтами (рис. 244, д) служат для попеременного введения в работу пар колес ( $z_1$  и  $z_2$ ;  $z_3$  и  $z_4$ ). Колеса ведущего вала (I) глухо закреплены на валу, а ведомого (II) ( $z_2, z_4$ ) посажены и снабжены зубчатыми полумуфтами.

При среднем положении муфты M движение на ведомый вал не передается и колеса  $z_2$  и  $z_4$  проскальзывают относительно вала II, к которому они при таком положении не подключены. При правом или левом положении муфты M ведомый вал получает движение с передаточными отношениями соответственно

$$i_{\text{прав}} = z_3 / z_4; i_{\text{лев}} = z_1 / z_2.$$

Кулачковые муфты обеспечивают большую жесткость и надежность передачи. Использование фрикционных муфт, работающих на основе сил трения, позволяет осуществлять включения и переключения на ходу.

*Механизмы перебора* (рис. 244, е) имеют два варианта включения. При включении влево кулачковой муфты  $M$ , скрепленной с зубчатым колесом  $z_3$ , движение с ведущего шкива  $I$  передается непосредственно на шпиндель 2 без изменения частоты вращения ( $i_1 = 1$ ). При правом положении муфты  $M$ , когда колесо  $z_3$  находится в зацеплении с  $z_4$ , движение с ведущего шкива к шпинделю передается через промежуточный вал с глухозакрепленными на нем колесами  $z_2, z_4$ . При этом передаточное отношение

$$i_{II} = (z_1/z_2) (z_4/z_3) .$$

Механизм перебора применяется при необходимости резкого уменьшения скорости. Для этого колеса  $z_1$  и  $z_4$  выбираются много меньше, чем  $z_2$  и  $z_3$ .

*Механизм гитары сменных колес* (рис. 244, ж) позволяет производить настройку кинематической цепи на любое передаточное отношение. Гитара может быть настроена в одну или две пары сменных колес. При настройке в одну пару колеса  $z_1$  и  $z_2$  соединяются промежуточным колесом  $z_{пр}$  и передаточное отношение

$$i_{I} = (z_1/z_{пр}) (z_{пр}/z_2) = z_1/z_2 .$$

В некоторых случаях приходится настраивать гитару колес в две пары. Для этого на промежуточном валу закрепляют колеса  $z_2$  и  $z_3$  и вводят их в зацепление с колесами ведущего  $z_1$  и ведомого  $z_4$  валов. Тогда

$$i_{II} = (z_1/z_2) (z_3/z_4) .$$

Для обеспечения работы механизма гитары, настроенного в две пары, необходимо выполнение условия их сцепляемости, при котором должны удовлетворяться следующие соотношения:

$$z_1 + z_2 \geq z_3 + 15 \text{ и } z_3 + z_4 \geq z_2 + 15 .$$

Механизм гитар сменных колес используют в цепях настройки станков различных групп — токарных, зубо- и резьбообрабатывающих, расточных и т.д.

Во многих случаях исполнительные органы металлообрабатывающих станков должны иметь движение как в прямом, так и в обратном направлении. Для обеспечения этого служат *реверсирующие механизмы* (рис. 244, з, и).

На рис. 244, з показан механизм реверса, выполненный из цилиндрических зубчатых колес. Муфта  $M$  закреплена подвижно без вращения, т.е. вращается совместно с ведомым валом  $II$  и может перемещаться вправо и влево вдоль оси. Для изменения направления вращения ведомого

мого вала муфты может сдвигаться к колесу  $z_3$  или  $z_5$ , свободно сидящим на валу.

При левом положении муфты ведомый вал  $II$  вращается в том же направлении, что и ведущий  $I$ , при правом положении — в противоположном. При среднем положении муфты  $M$  вращение ведомому валу не сообщается.

При анализе работы механизмов реверсирования необходимо помнить, что при передаче движения от ведущего вала к ведомому через нечетное число колес направление вращения ведомого такое же, что и у ведущего, а при наличии четного числа колес — противоположное.

*Реверсирующие механизмы с коническими колесами* (рис. 244, и) применяются при передаче движения между перпендикулярно расположенными валами. При этом за счет переключения муфты  $M$  в правое или левое положение ведомое колесо  $z_3$ , а следовательно и вал  $II$ , будут изменять направление своего вращения.

Во многих станках необходимо иметь прерывистые движения исполнительных органов, например, для обеспечения прерывистой подачи строгальных и долбежных станков, поворота револьверной головки токарно-револьверного станка, поворота шпиндельных блоков станков-автоматов и т.д.

Наибольшее распространение получили храповые и мальтийские механизмы.

*В храповом механизме* (рис. 249, к) непрерывное вращательное движение кривошипа  $O_1A$  с помощью шатуна  $AB$  преобразуется в колебательное движение рычага  $O_2B$  с собачкой  $C$ . При движении рычага вправо собачка свободно перескакивает через зубья храпового колеса. Величина угла поворота храпового колеса будет определяться передаточным отношением  $i_{xp} = a / z$ , где  $a$  — число зубьев, захватываемых собачкой,  $z$  — число зубьев храпового колеса.

*Мальтийский механизм* (рис. 244, л) применяется для поворота вала на заданный постоянный угол. При вращении валика  $I$  его палец  $2$  входит в паз мальтийского креста  $3$  и поворачивает его на  $1/z$  часть оборота, где  $z$  — число пазов мальтийского креста.

#### 4. Настройка кинематических цепей станков

При обработке деталей различных размеров, выполненных из разных материалов, необходимо регулировать скорость движения как инструмента, так и заготовки. Для каждого станка устанавливается максимальная  $v_{\max}$  и минимальная  $v_{\min}$  скорости резания, которые он должен обеспечивать. Тогда предельные частоты вращения шпинделя составят:

$$n = 1000 v_{\max} / (\pi d_{\min}) , \quad n = 1000 v_{\max} / (\pi d_{\max}) ,$$

где  $d_{\max}$  и  $d_{\min}$  — максимальный и минимальный диаметры заготовок, обрабатываемых, на данном станке.

Отношение  $n_{\max} / n_{\min} = D$  называют диапазоном регулирования.

Настройка кинематической цепи заключается в ее подготовке к выполнению соответствующих движений с необходимыми скоростями. Для этого на станке необходимо установить в нужное положение рукоятки управления скоростями главного движения и движения подачи. В ряде случаев для этого необходимо определить передаточные отношения настраиваемых элементов кинематической цепи.

Для настройки кинематической цепи необходимо записать уравнение кинематического баланса, которое выражает математическую связь между скоростями движения начального (ведущего) и конечного (ведомого) звеньев.

В качестве примера рассмотрим упрощенную кинематическую схему токарно-винторезного станка (рис. 245).

От электродвигателя движение передается шпинделю через находящиеся в постоянном зацеплении зубчатые колеса  $z_1$  и  $z_2$  и различные механизмы зубчатых колес, позволяющие вводить в зацепление зубчатые колеса механизма в зависимости от требуемой скорости резания. Обозначим передаточное отношение этого механизма  $i_{\text{мех}1}$

Эта кинематическая цепь обеспечивает вращение шпинделя с заданным числом оборотов и называется скоростной цепью. Начальным ее звеном (ведущим) является электродвигатель, конечным (ведомым) — шпиндель.

Электродвигатель чаще всего имеет постоянное число оборотов, а шпиндель должен получать разные числа оборотов в зависимости от введения в зацепление зубчатых колес с разным числом зубьев.

Для того чтобы записать уравнение кинематического баланса, необходимо иметь в виду, что каждая

отдельная кинематическая пара характеризуется своей величиной передаточных отношений. При последовательном соединении кинематических пар суммарное передаточное отношение  $i_{\Sigma}$  всей цепи определяется произведением передаточных отношений составляющих кинематических пар и механизмов.

С учетом этого уравнение кинематического баланса для скоростной цепи, т.е. математическая

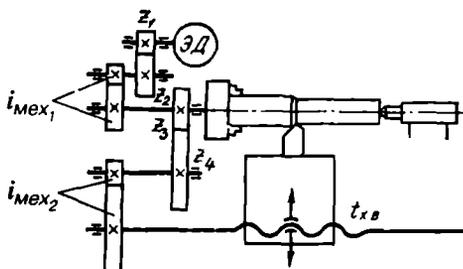


Рис. 245. Упрощенная кинематическая схема токарно-винторезного станка

связь между числами оборотов шпинделя  $n_{шп}$  и электродвигателя  $n_{эд}$ , будет определяться следующим образом:

$$\text{так как } i_{\Sigma} = n_{шп} / n_{эд}, \text{ то } n_{шп} = i_{\Sigma} n_{эд} \text{ и } n_{шп} = (z_1 / z_2) i_{мех1} n_{эд}.$$

В общем случае при наличии коробки скоростей с некоторым количеством зубчатых колес, находящихся в постоянном зацеплении (их общее передаточное отношение обозначим  $i_{пост}$ ), и определенным количеством настраиваемых механизмов зубчатых колес, например передвижных блоков зубчатых колес, конусов Нортона и т.д. (их передаточное отношение обозначим  $i_{настр}$ ), уравнение кинематического баланса будет иметь следующий вид:

$$n_{эд} i_{пост} i_{настр} = n_{шп}.$$

Отсюда получим формулу для определения передаточного отношения настраиваемых элементов, называемую формулой настройки:

$$i_{настр} = n_{шп} / (n_{эд} i_{пост}).$$

Второй кинематической цепью станка является цепь передач и резьбонарезания. Она согласует вращение шпинделя и перемещение суппорта так, чтобы за один оборот (заготовки) резец переместился на требуемую величину подачи или шаг нарезаемой резьбы.

Рассмотрим принцип настройки станка на нарезание резьбы. Цепь подачи (рис. 245), состоящая из постоянных передач ( $z_3 / z_4$ ) и настраиваемых механизмов ( $i_{мех2}$ ) должна обеспечивать заданную величину перемещения (шаг нарезаемой резьбы за один оборот шпинделя):

$$S = t_{н.р.} = t_{х.в.} n_{х.в.},$$

где  $t_{х.в.}$  — шаг ходового винта;  $n_{х.в.}$  — число оборотов ходового винта.

$$\text{Так как } i_{шп-хв} = n_{хв} / n_{шп}, \text{ то } n_{хв} = n_{шп} i_{шп-хв} \text{ и}$$

$$t_{н.р.} = t_{хв} n_{шп} i_{шп-хв}$$

$$\text{По определению } n_{шп} = 1, \text{ тогда } t_{н.р.} = t_{хв} (z_3 / z_4) i_{мех2}.$$

Между шпинделем и ходовым винтом в токарно-винторезных станках располагается коробка подач с некоторым количеством постоянных и настраиваемых кинематических пар и механизмов. В общем случае уравнение кинематического баланса резьбонарезной цепи выразится следующим уравнением:

$$i_{пост} i_{настр} t_{х.в.} = t_{н.р.},$$

а формула настройки

$$i_{настр} = t_{н.р.} / (i_{пост} t_{х.в.}).$$

Таким образом, для настройки любой кинематической цепи необходимо: 1) при заданном движении начального и конечного звеньев цепи написать уравнение кинематического баланса, 2) определить передаточное отношение настраиваемых элементов, исходя из формулы настройки этой цепи.

## Глава 3 СТАНКИ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ

### 1. Общие сведения

Станки токарной группы предназначены для обработки наружных и внутренних поверхностей вращения (цилиндрических, конических и фасонных), обработки плоских торцевых поверхностей (подрезание торцов), нарезания резьбы и некоторых других работ. Для обработки отверстий используются сверла, зенкеры, развертки и др. Для нарезания резьб наряду с резьбонарезными резцами часто используют метчики и плашки.

Главное движение у всех станков токарной группы — вращение заготовки. Подачей является поступательное перемещение инструментов вдоль или поперек оси шпинделя (продольная  $S_{пр}$  или поперечная  $S_{п}$ ).

В машиностроении станки токарной группы составляют 30—40 % от общего парка металлорежущих станков. В зависимости от масштаба производства, конфигурации, размеров и массы деталей их обработка осуществляется на токарных станках различных типов.

Токарно-винторезные станки предназначены для выполнения всех основных видов токарных работ в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Лобовые и токарно-карусельные станки применяются для обработки крупных деталей большого диаметра и относительно малой высоты. Наибольшее распространение они получили на заводах тяжелого машиностроения.

Многорезцовые токарные станки применяются для изготовления деталей, на которых возможна одновременная обработка поверхностей несколькими резцами в условиях крупносерийного и массового производства.

Токарно-револьверные станки используют при обработке некрупных деталей, преимущественно с центральными отверстиями в условиях серийного производства.

Токарные автоматы и полуавтоматы применяются для обработки при крупносерийном и массовом производствах.

Токарные станки с числовым программным управлением наиболее перспективны для автоматизации производства при мелкосерийном выпуске продукции и являются основным типом станков, предназначенных для построения гибких автоматических производств (ГАП).

## 2. Классификация и типы токарных резцов

Разнообразие работ, выполняемых на станках токарной группы, обуславливает разнообразие типов токарных резцов. Любой резец состоит из режущей части и стержня, за который осуществляется его закрепление. В зависимости от формы головки резца, ее положения относительно стержня и расположения главной режущей кромки (рис. 246) резцы подразделяются на правые 2 и левые 1, прямые 4, 6, 7, отогнутые 9, 13 и резцы с оттянутой головкой 3, 5.

По назначению резцы подразделяются на проходные 4, 7, 8, 9, и проходные упорные 11, применяемые при обработке наружных поверхностей тел вращения, подрезные 12, используемые при обработке торцевых поверхностей, отрезные 3, 5, предназначенные для разрезания заготовок или отрезания готовой детали от заготовки. Если отрезной резец при своем перемещении не доведен до оси, то на детали будет образована канавка.

Расточные резцы 13, 14 применяются для растачивания в заготовке соответственно сквозных и глухих отверстий.

Фасонные резцы имеют специально профилированную режущую кромку, профиль которой копируется на обрабатываемой заготовке 16. В качестве одной из разновидностей фасонных резцов можно назвать резьбовые резцы для нарезания наружной 10 и внутренней 15 резьб.

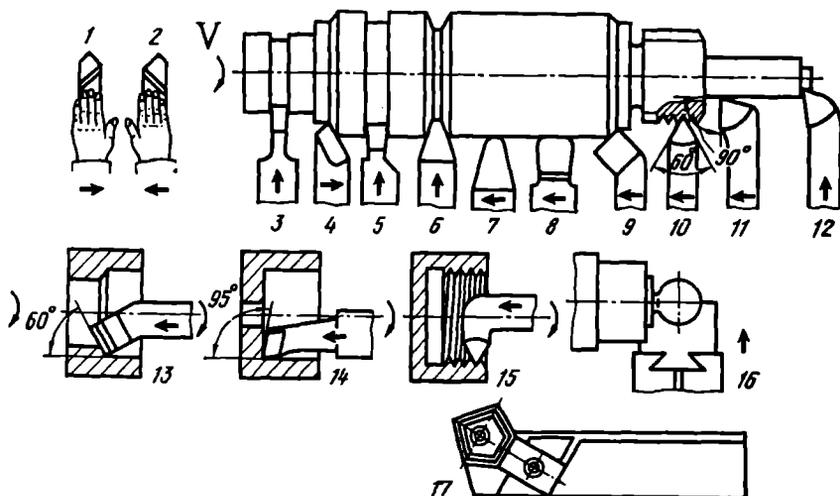


Рис. 246. Типы токарных резцов

В зависимости от требуемой шероховатости обработанной поверхности применяют черновые и чистовые резцы. Чистовые резцы могут иметь большой радиус закругления вершины резца 7, зачистную режущую кромку или широкое режущее лезвие 8.

В настоящее время 80—85 % всех резцов оснащены пластинами из твердых сплавов. Конструктивно эти резцы выполняются по-разному: с пластинами, напаянными на державку; с механическим креплением пластинок, с механическим креплением режущих вставок с напаянными пластинками и т.д.

Большое распространение получили резцы с многогранными непетачиваемыми пластинами 17. После затупления очередной кромки пластина поворачивается следующей гранью, а после затупления всех кромок возвращается в переработку.

### 3. Основные узлы токарно-винторезного станка

Токарно-винторезный станок состоит из следующих основных узлов (рис. 247). Станина 2 с горизонтальными направляющими служит для монтажа узлов станка и установлена на двух тумбах. В передней тумбе 1 смонтирован электродвигатель главного привода станка, в задней тумбе 16 — бак для смазочно-охлаждающей жидкости и насосная станция для ее подачи в зону резания.

В передней бабке 5, установленной с левой стороны станины, смонтированы коробка скоростей станка и шпиндель 6. Механизмы коробки скоростей позволяют получать разные частоты вращения шпинделя станка. На шпинделе закрепляются зажимные приспособления для закрепления заготовки и передачи ей вращения. На лицевой стороне передней бабки расположена панель управления 4 механизмами коробки скоростей.

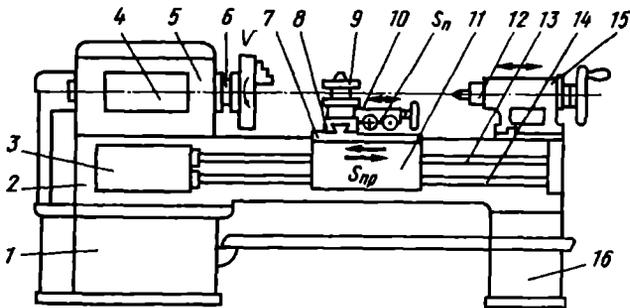


Рис. 247. Общий вид токарно-винторезного станка

В коробке подач 3 смонтированы механизмы, позволяющие придавать суппорту с резцами разные скорости перемещения.

Суппорт, предназначенный для закрепления и перемещения в нужном направлении резцов, состоит из нескольких частей. Продольные салазки 7, установленные на направляющих станины, перемещаются вдоль оси шпинделя, обеспечивая продольную подачу. Поперечные салазки 8 перемещаются в поперечном направлении по направляющим продольных салазок 7. Поворотные салазки 10, несущие четырехпозиционный резцедержатель 9, могут быть установлены под углом к оси шпинделя, что требуется при обработке конических поверхностей.

К продольным салазкам 7 крепится фартук станка 11, механизмы которого преобразуют вращательное движение ходового винта 13 или ходового валика 14 в поступательное движение суппорта. Задняя бабка 15 установлена с правой стороны станины и может перемещаться по ее направляющим. В пиноли задней бабки 12 устанавливаются центры, служащие для поддержания длинных деталей, а также инструменты для обработки отверстий (сверла, зенкеры, развертки).

Конструкция задней бабки позволяет осуществлять смещение ее оси в поперечном направлении, что используется при обработке длинных конических деталей с малым углом конусности.

Для предохранения работающего от травм сходящей стружкой на станке предусмотрены защитные устройства.

#### 4. Крепление заготовок и инструментов на токарно-винторезных станках

Разнообразие работ, выполняемых на токарно-винторезных станках и многообразии обрабатываемых заготовок привели к необходимости создания большого числа универсальных приспособлений.

Цилиндрические детали малой длины с соотношением  $l / d \leq 4$  закрепляются непосредственно в патроне (рис. 248, а). Заготовки большого диаметра типа дисков или те детали, которые сложно закрепить в патроне, крепятся на планшайбе (рис. 248, б, в).

Для цилиндрических деталей средней длины ( $4 < l / d \leq 10$ ) для повышения их жесткости при обработке дополнительно используется задний центр. При этом левый конец детали может крепиться в патроне (рис. 248, б) или опираться на передний центр. В последнем случае крутящий момент на деталь передается поводковым патроном 1 и хомутиком 2 (рис. 248, в).

При обработке деталей значительной длины ( $l / d > 10$ ) дополнительно применяются неподвижный или подвижный люнет. Первый закрепляется на станине станка, второй на каретке суппорта и перемещается вместе с суппортом (рис. 248, и, з).

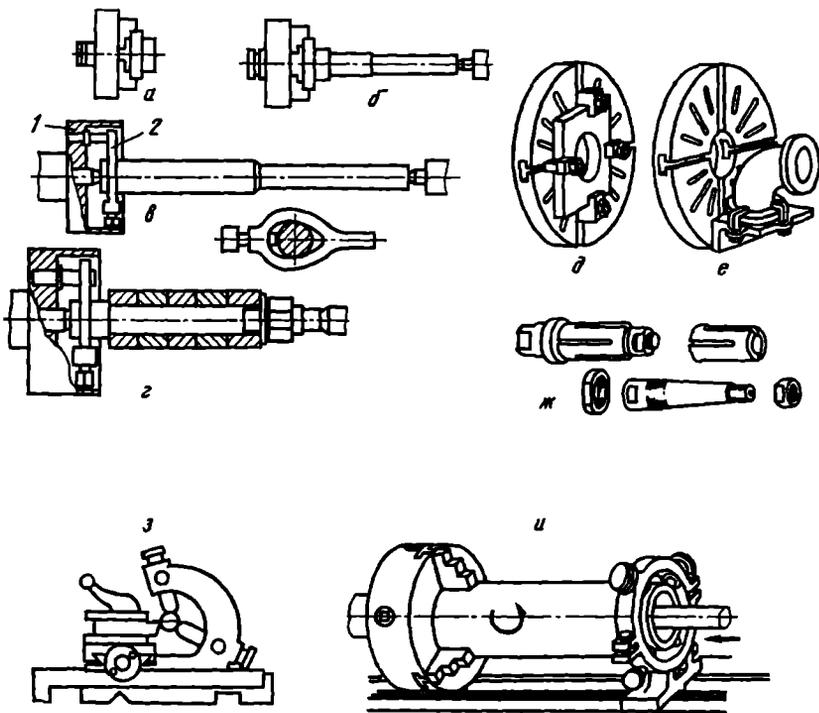


Рис. 248. Универсальные приспособления для токарно-винторезных станков

Детали типа втулок или колец, имеющие готовые отверстия, при обработке по наружному диаметру крепятся на оправках, устанавливаемых в центрах станка (рис. 248, з, ж).

Наиболее часто закрепление деталей на токарных станках выполняют в трех- и четырехкулачковом патронах.

Трехкулачковые самоцентрирующиеся патроны применяют для закрепления осесимметричных заготовок (рис. 248, а). Все три кулачка таких патронов осуществляют одновременное радиальное перемещение, закрепляя и центрируя заготовку относительно оси вращения шпинделя.

Четырехкулачковый патрон имеет независимое перемещение всех четырех кулачков, что позволяет закреплять несимметричные детали.

Для крепления длинных деталей применяются центры (рис. 249) различных конструкций.

Неподвижный упорный центр (рис. 249, а, б) состоит из корпуса, на который устанавливается обрабатываемая деталь, имеющая на оси спе-

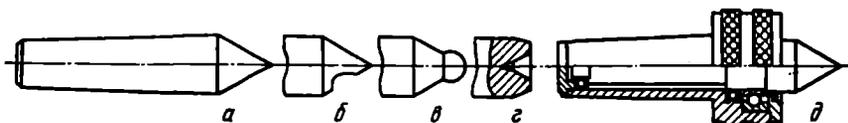


Рис. 249. Конструкции центров

циальное коническое отверстие, и конического хвостовика, служащего для закрепления центра в пиноль задней бабки. При обтачивании деталей на высоких скоростях или при больших нагрузках для уменьшения износа используют центры, концы которых оснащены твердыми сплавами. Однако в подобных случаях лучше применять вращающиеся центры (рис. 249, д).

При необходимости подрезки торца на деталях, закрепленных в центрах, применяются срезанные неподвижные центры (рис. 249, б).

Центры с шариками (рис. 249, в) применяются при обработке конусов методом смещения задней бабки.

Обратный центр (рис. 249, г) применяется при обработке заготовок малых диаметров, торцу которых придают соответствующую форму.

Резцы на токарно-винторезных станках закрепляются в резцедержателе на суппорте, а инструменты для обработки отверстий — в пиноли задней бабки.

## 5. Работы, выполняемые на токарно-винторезных станках

На токарно-винторезных станках обрабатывают преимущественно поверхности тел вращения. Обработка коротких деталей ( $l / d < 4$ ) всеми типами режущих инструментов производится при закреплении деталей в трех- или четырехкулачковый патрон. Обработка длинных ( $l / d > 4$ ) гладких и ступенчатых цилиндрических и конических валов производится при закреплении в центрах. При этом вал должен быть предварительно зацентрирован специальными центровочными сверлами. Так как передача вращения на деталь производится с помощью хомутика, закрепляемого на детали, то вначале обрабатывается одна часть детали, а затем деталь переворачивается и обрабатывается ее вторая часть.

Подрезание торцевых поверхностей, вытачивание галтелей (скругленных переходов между ступенями разных диаметров), канавок и разрезка заготовки осуществляется с поперечной подачей.

При обработке отверстий заготовки закрепляются в патронах, длинные заготовки дополнительно поддерживаются люнетами. Сверла, зенкеры, развертки, а также метчики закрепляются в пиноли задней бабки.

Конические поверхности обрабатываются следующими способами (рис. 250).

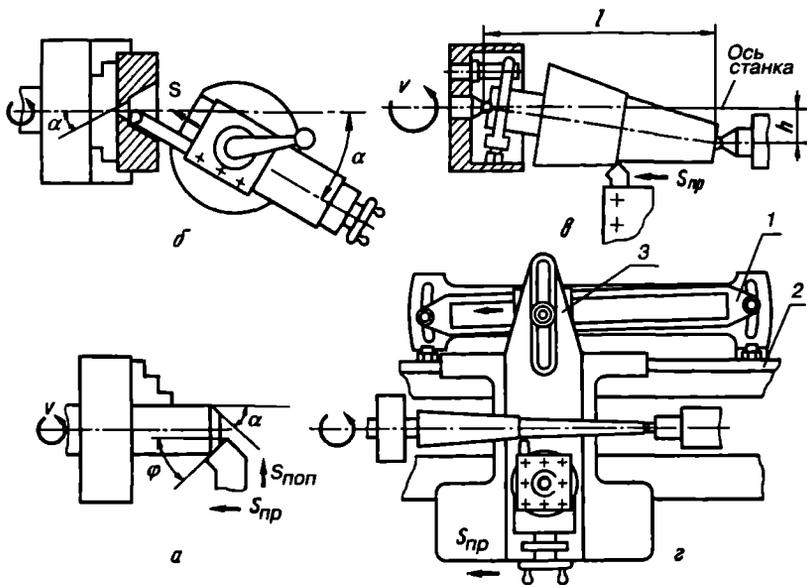


Рис. 250. Способы точения конусов

Наружные короткие конические поверхности, в том числе и фаски, обрабатываются широким резцом, главный угол в плане  $\varphi$  которого равен углу уклона  $\alpha$  обрабатываемого конуса (рис. 250, а). При этом резец перемещают с поперечной или продольной подачей. Максимальная длина конуса не более 20 мм и определяется шириной резца.

Обработка наружных и внутренних конусов с большим углом уклона и шириной более 20 мм производится за счет поворота верхней части суппорта (рис. 250, б).

Длинные конические поверхности с малым углом конусности ( $2\alpha \leq 8^\circ$ ) обрабатываются способом смещения задней бабки (рис. 250, в). При этом величина смещения задней бабки

$$h = L(D - d) / 2l \text{ или } h = L \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $L$  — длина обрабатываемой детали, мм;  $l$  — длина ее конической части, мм;  $D$  — больший диаметр конуса, мм;  $d$  — меньший диаметр конуса, мм;  $\alpha$  — угол наклона конуса, град.

В серийном производстве для обработки длинных конусов с углом наклона до  $10\text{--}12^\circ$  широко применяется обработка с помощью копировальной линейки  $l$  (рис. 250, в), закрепляемой на станине станка 2. Суппорту дают продольную подачу, предварительно открепив его от винта поперечной подачи. Заданный угол обеспечивается углом уста-

новки копировальной линейки, по прорези которой скользит ползун 3, связанный с суппортом.

Конические отверстия получаются в результате сверления и дальнейшего растачивания. Обработка внутренних конусов может производиться всеми указанными способами, кроме метода смещения задней бабки.

Обработка фасонных поверхностей малой длины производится фасонными резцами с поперечной подачей, а длинных поверхностей — с помощью копировальной линейки или специальных копировальных устройств.

Нарезание резьбы резцами — один из самых сложных видов работ, выполняемых на токарно-винторезных станках. Профиль резьбы обеспечивается соответствующей заточкой режущего инструмента, а шаг — настройкой кинематических цепей станка. При настройке необходимо так согласовать скорости главного движения и подачи, чтобы за один оборот заготовки резец переместился в продольном направлении на величину шага нарезаемой резьбы. Для нарезания большинства стандартных резьб настройка производится установкой рукояток коробки подач в заданное положение. Если требуется нарезать резьбы нестандартных шагов или резьбы повышенной точности, то производятся соответствующие расчеты гитары сменных зубчатых колес.

Резьбы высокого качества нарезаются резцами, а неотчетливые резьбы небольших диаметров — плашками и метчиками.

## 6. Обработка заготовок на токарно-револьверных станках

Токарно-револьверные станки предназначены для обработки деталей — тел вращения сравнительно небольшого диаметра и небольшой длины, имеющих отверстия, расположенные на оси и требующие многоинструментальной обработки различными режущими инструментами. При обработке таких деталей на токарно-винторезном станке затрачивается значительное время на смену инструментов, так как в его резцедержателе одновременно можно закрепить четыре резца и только один инструмент в пиноли задней бабки для обработки отверстий.

Токарно-револьверные станки в отличие от токарно-винторезных вместо задней бабки имеют револьверный суппорт, имеющий механическую продольную подачу и несущий поворотную револьверную головку.

В гнездах револьверной головки устанавливаются все необходимые для обработки инструменты (сверла, зенкеры, развертки, проходные, расточные и отрезные резцы, метчики и т.д.).

Токарно-револьверный станок состоит (рис. 251) из станины 1, передней бабки 4 с коробкой скоростей 3, коробки подач 2, поперечного

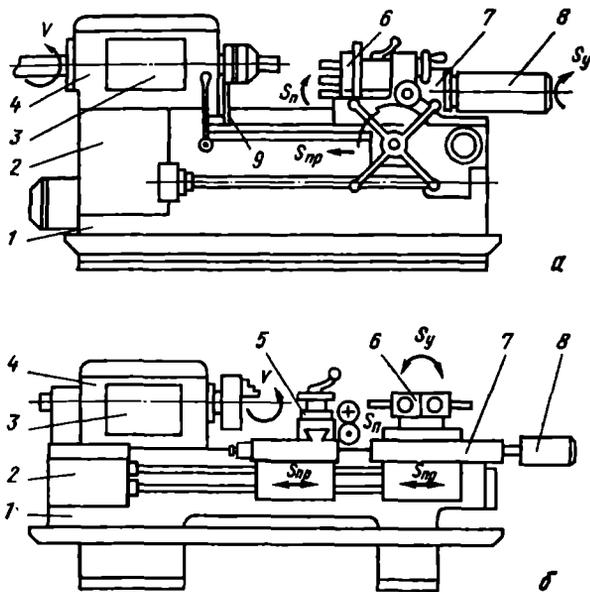


Рис. 251. Общий вид токарно-револьверного станка

суппорта 5, револьверного суппорта 7 с револьверной головкой 6, барабана 8 задних упоров и барабана 9 передних упоров.

Во время наладки станка в револьверной головке и в резцедержателе устанавливают необходимые для обработки инструменты.

В процессе обработки инструменты вводят в работу последовательно или параллельно. Параллельная обработка сокращает основное технологическое время за счет одновременной обработки нескольких поверхностей заготовки.

Предварительная наладка станка сокращает вспомогательное время, что повышает производительность труда.

Этому способствует также и обработка заготовок по налаженным на станке упорам, что позволяет рабочему автоматически выдерживать заданные размеры обрабатываемых поверхностей.

По конструкции револьверной головки различаются станки с вертикальной (рис. 251, а) и горизонтальной (рис. 251, б) осью поворота револьверной головки.

Револьверные станки с вертикальной осью поворота предназначены для обработки крупных и средних заготовок. Они оснащены четырех-, шестипозиционными револьверными головками, а также одним суппортом, совершающим продольную и поперечную подачи, или од-

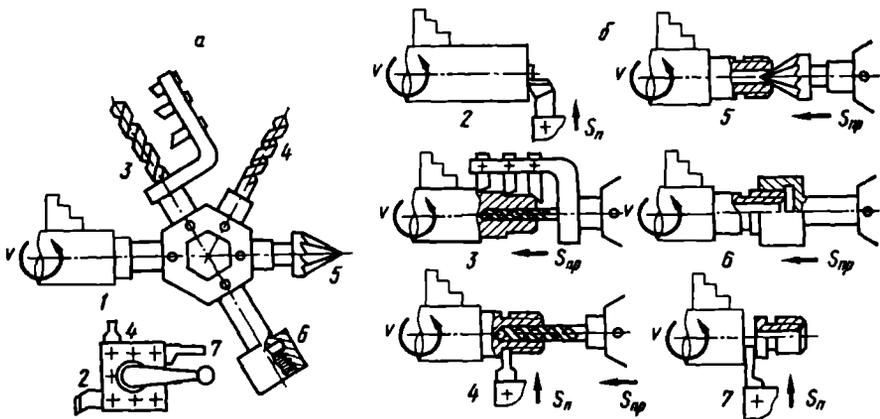


Рис. 252. Схема обработки на токарно-револьверном станке:

*a* — инструменты, используемые для обработки; *б* — схемы выполнения обработки;  $S_{пр}$  — продольная подача;  $S_{П}$  — поперечная подача

ним-двумя поперечными суппортами, предназначенными только для поперечных подач.

Револьверные станки, имеющие горизонтальную ось поворота револьверной головки, могут одновременно нести до 16 режущих инструментов, поэтому такие станки, как правило, не имеют боковых суппортов, и все инструменты закрепляются в гнездах револьверной головки. Поперечная подача инструмента заменяется в этом случае круговой подачей револьверной головки за счет ее медленного вращения вокруг оси.

На токарно-револьверных станках выполняют практически все виды токарных работ. Как правило, эти станки не имеют ходового винта и резьбы нарезают метчиками и плашками. На токарно-револьверном станке с вертикальной осью поворота револьверной головки (рис. 252). Обработку всех поверхностей выполняют за семь переходов.

В позиции 1 заготовка подается на требуемую длину  $l$  до упора. Поверхности заготовок в позициях 2, 4 и 7 (подрезание торца, протачивание канавки, отрезание готовой детали) обрабатываются с подачей поперечного суппорта, а в позициях 3 (обтачивание и сверление), 4 (рассверливание отверстия), 5 (зенкование фаски) и 6 (нарезание резьбы плашкой) с продольной подачей револьверной головки.

## 7. Токарно-карусельные и лобовые станки

Токарно-карусельные станки предназначены для обработки осесимметричных заготовок больших размеров, у которых отношение  $L/d = 0,3...0,7$ .

Лобовые станки (рис. 253) конструктивно подобны токарным станкам с горизонтальной осью вращения шпинделя.

В отличие от универсальных токарных станков у них нет задней бабки. Заготовки, диаметр которых составляет 1000—4000 мм, закрепляются на планшайбе. Обработка производится инструментами, закрепленными в резцедержателе суппорта.

Основные недостатки этих станков — трудность закрепления и выверки заготовок и большие изгибающие усилия, действующие на шпиндель станка. Этим обуславливаются низкая производительность, невысокая точность и недостаточная чистота обработки.

Значительно лучшие условия обеспечиваются при обработке заготовок на токарно-карусельных станках. Конструктивной особенностью этих станков является наличие круглого горизонтального стола — планшайбы (карусели), вращающейся вокруг вертикальной оси. Наличие планшайбы с вертикальной осью вращения значительно облегчает установку, выверку и закрепление тяжелых заготовок. Карусельные станки выполняются одностоечными и двухстоечными. Одностоечные карусельные станки (рис. 254, а) применяются для обработки деталей диаметром 300—1600 мм. Двухстоечные карусельные станки имеют планшайбы диаметром до 21 м, что позволяет обрабатывать заготовки диаметром до 25 м. Двухстоечный токарно-карусельный станок (рис. 254, б) состоит из планшайбы 1, установленной на станине, и стоек 2,

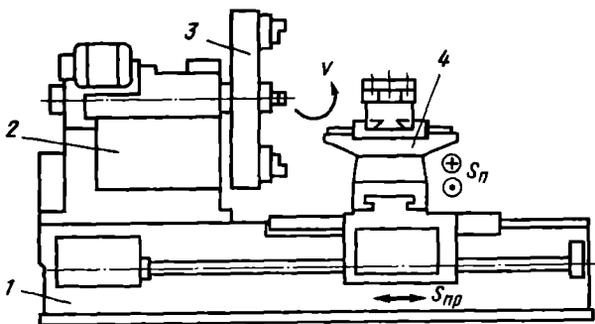


Рис. 253. Общий вид лобового станка:

1 — станина; 2 — передняя бабка; 3 — планшайба; 4 — суппорт с резцедержателем;  $S_{пр}$  — продольная подача;  $S_{п}$  — поперечная подача

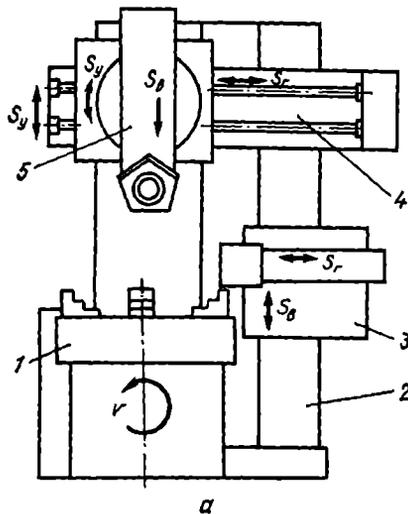
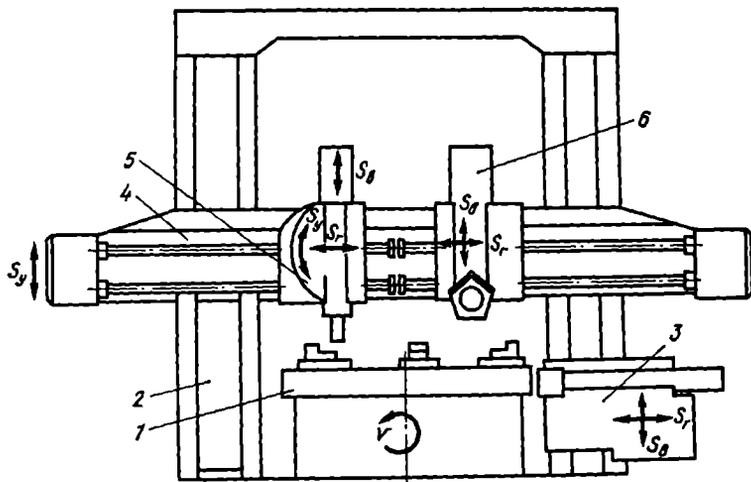


Рис. 254. Общий вид токарно-карусельных станков:

$S_r$  — подача в горизонтальном направлении;  $S_B$  — подача в вертикальном направлении;  $S_y$  — установочные перемещения



соединенных между собой поперечиной. По вертикальным направляющим стоек перемещается в вертикальном направлении подвижная траверса 4, которая устанавливается в зависимости от высоты обрабатываемой заготовки на определенном уровне от плоскости планшайбы. На траверсе установлен верхний суппорт 5 с коробкой подач и револьверный суппорт 6 с револьверной головкой и коробкой подач. Коробки подач

имеют независимый привод. На правой стойке установлен боковой суппорт 3 с резцедержателем. Режущие инструменты закрепляются в резцедержателях верхнего и бокового суппортов и гнездах револьверной головки. Каждый суппорт имеет горизонтальную и вертикальную подачи. Аналогичную конструкцию имеет одностоечный токарно-карусельный станок.

На токарно-карусельных станках обрабатываются наружные и растачиваются внутренние цилиндрические и конические поверхности, обрабатываются фасонные поверхности, сверлят, зенкеруют, развертывают отверстия, обрабатывают плоские торцевые поверхности. Применение специальных приспособлений позволяет нарезать резьбы резцами, обрабатывать сложные фасонные поверхности по электрокопирам, фрезеровать, шлифовать и выполнять другие виды обработки. Для сокращения основного технологического времени на станках может осуществляться многоинструментальная обработка одновременно нескольких поверхностей.

## **8. Обработка заготовок на токарных автоматах и полуавтоматах**

Автоматами называют станки, на которых после их настройки обработка производится без участия рабочего, а полуавтоматами — станки, у которых автоматизированы все движения, кроме установки заготовки и снятия готовых деталей.

Токарные автоматы и полуавтоматы подразделяются на одно- и многошпиндельные. Одношпиндельные автоматы применяются главным образом для обработки деталей из прутков диаметром до 36 мм, а многошпиндельные — для обработки прутковых заготовок диаметром 15—100 мм. Выбор типа автомата для обработки деталей из прутков диаметром 15—36 мм определяется экономическими соображениями и требуемой точностью. При меньшей серийности и высоких требованиях к точности изготовления предпочтительнее применять одношпиндельные автоматы.

Одношпиндельные токарные автоматы подразделяются на токарно-револьверные, фасонно-отрезные и продольно-фасонного точения.

Токарно-револьверные автоматы подобны токарно-револьверным станкам и имеют продольный суппорт с револьверной головкой и два-три поперечных суппорта. Все движения процесса обработки, начиная от подачи прутка до упора и кончая отрезанием готовой детали, автоматизированы.

Фасонно-отрезные автоматы применяются для обработки коротких деталей простой формы, которые могут быть обработаны несколькими одновременно действующими резцами при их поперечной подаче, а затем отрезаются от прутка. Некоторые модели подобных автоматов

оборудуются дополнительными продольными суппортами для установки инструментов (сверл, зенкеров, разверток, метчиков и т.п.), позволяющих обрабатывать отверстия.

Автоматы продольно-фасонного точения применяются в основном для обработки деталей типа валиков малого диаметра. Пруток, вращающийся вместе со шпинделем, получает продольное перемещение вместе со шпиндельной бабкой. Резцы, установленные в поперечных суппортах, могут получать только радиальную подачу или оставаться неподвижными. При продольном обтачивании резец выставляется на требуемый размер, после чего суппорт остается неподвижным. В случае поперечного точения суппорт с резцами перемещается с поперечной подачей, а шпиндельная бабка прекращает свое перемещение. Станок имеет четыре-шесть поперечных суппортов. Для сверления центральных отверстий и нарезания резьб применяются специальные приспособления.

Многошпиндельные токарные автоматы подразделяются на многопозиционные и отрезные.

Многошпиндельные многопозиционные автоматы применяются для обработки деталей требующих последовательного применения нескольких инструментов. Автоматы этой группы чаще всего четырех- и шестишпиндельные. В шпиндельном блоке таких станков одновременно вращаются с одинаковым числом оборотов все шпиндели, каждый из которых несет прутковую заготовку. В каждой позиции прутки подвергаются обработке резцами поперечных суппортов и инструментами продольных суппортов. Для этого на станке в каждой позиции имеется четыре поперечных и три продольных суппорта. Обработка детали производится за число переходов, соответствующее числу позиций, занимаемых прутком за один полный оборот шпиндельного блока. Резец поперечного суппорта последней позиции — отрезной. В этой же позиции сразу после отрезки готовой детали производится подача прутка вперед на длину, равную сумме длины детали и ширины отрезного резца.

После выполнения каждого перехода суппорты быстро отводятся назад, а шпиндельный блок поворачивается в следующую позицию.

Производительность многошпиндельных автоматов значительно выше, чем одношпиндельных, однако наладка станков сложнее и требует больше времени, чем одношпиндельных.

Многошпиндельные отрезные автоматы применяются для обработки деталей простейшей формы, требующих не более двух-трех инструментов. На всех шпинделях производится одна и та же операция и после каждого цикла обработки от прутков отрезается число деталей, равное числу шпинделей.

## 1. Сверление отверстий

Сверление — наиболее распространенный метод получения отверстий в сплошном материале. При сверлении главным является вращательное движение, а движение подачи — поступательное. Эти движения могут сообщаться как инструменту, так и заготовке в разных комбинациях. При сверлении на большинстве сверлильных станков оба движения совершает режущий инструмент, а заготовка неподвижно закрепляется на столе. При сверлении на токарных станках и на специальных станках для глубокого сверления сверлу сообщается только поступательное движение подачи, а заготовка совершает главное, вращательное движение.

Процесс резания при сверлении протекает в более сложных условиях, чем при точении, так как затруднен отвод стружки и подвод смазочно-охлаждающей жидкости к режущим лезвиям инструмента.

В зависимости от назначения сверла по конструкции подразделяются на спиральные, перовые, центровочные, сверла для глубокого сверления и другие. Они изготавливаются из инструментальных сталей, оснащаются пластинками из твердого сплава, а иногда изготавливаются из твердого сплава.

Наиболее широко применяются спиральные сверла. Они изготавливаются в диапазоне диаметров 0,1—80 мм.

Сверло состоит (рис. 255) из рабочей части  $l_1$ , шейки  $l_3$ , хвостовика  $l_4$  и лапки  $l_5$ . Сверла малого диаметра изготавливаются с цилиндрическим хвостовиком, а большего — с коническим.

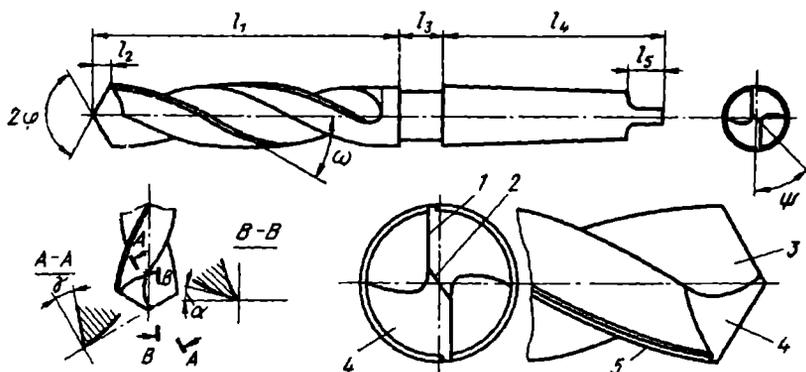


Рис. 255. Элементы спирального сверла

На рабочей части различают режущую  $l_2$  и направляющую ( $l_1-l_2$ ) части. Направляющая часть направляет сверло по оси и позволяет осуществлять многократную его переточку. По всей ее длине выполнены узкие направляющие ленточки, которые и служат для направления инструмента в отверстия. Для уменьшения сил трения сверла о поверхность просверленного отверстия на направляющей части сверла делается небольшой обратный конус (0,04—0,09 мм на 100 мм длины).

Шейка соединяет рабочую часть и хвостовик и служит для вывода шлифовального круга при обработке хвостовика и направляющих ленточек.

Хвостовик служит для закрепления сверла в шпинделе станка, а лапка — упором для клина при выбивании сверла из шпинделя.

Главные функции в процессе резания выполняет рабочая часть, на которой расположены все ее режущие элементы: главные режущие кромки 1, поперечная режущая кромка 2, а также передние 3 и задние поверхности 4.

Сверло, как и все остальные режущие инструменты, имеет вспомогательные режущие кромки, улучшающие качество поверхности обработанного отверстия. Этими кромками являются винтовые кромки направляющих ленточек 5.

Сверло состоит из двух симметричных относительно оси режущих зубьев, каждый из которых по сути является тем же самым токарным резцом. Поэтому аналогично резцу режущая часть сверла характеризуется передним углом  $\gamma$ , задним углом  $\alpha$ , углом при вершине  $2\varphi$ , углом наклона поперечного режущего лезвия  $\psi$  и углом наклона винтовой канавки  $\omega$ .

При работе сверла поперечная режущая кромка сама металл не режет, а вытесняет его от оси под главные режущие кромки. Измерения показывают, что при сверлении около 65 % общего усилия подачи приходится на внедрение поперечной режущей кромки в металл. Поэтому для обеспечения более благоприятных условий работы сверла производят подточку поперечной режущей кромки.

При сверлении глубоких отверстий ( $L > 5D$ ) необходимо применять специальные сверла. Особенность этих видов сверл заключается в том, что они должны обеспечивать большую точность расположения оси отверстия, меньшие тепловыделения при резании и лучшие условия для вывода стружки и отвода тепла.

## 2. Элементы и силы резания при сверлении

Скоростью резания при сверлении называется окружная скорость вращения наиболее удаленной от оси сверла точки режущей кромки

$$v = \pi Dn / 1000,$$

где  $D$  — наружный диаметр сверла, мм;  $n$  — частота вращения сверла,  $\text{мин}^{-1}$ .

Подачей  $S$  называется перемещение сверла вдоль оси за один его оборот, мм/об. Так как сверло имеет две главные режущие кромки, то подача, приходящаяся на каждую из них,  $S_z = S / 2$ .

За глубину резания  $t$  при сверлении отверстия в сплошном материале принимается половина диаметра сверла:  $t = D / 2$ .

Основное время при сверлении подсчитывается по формуле

$$T_0 = (l + l_1 + l_2) / (nS),$$

где  $l$  — глубина сверления, мм;  $l_1$  — величина врезания сверла, мм [ $l_1 = (D / 2) \operatorname{ctg} \varphi + (2-3)$  мм];  $l_2$  — величина перебега при выходе сверла ( $l_2 = 2-3$  мм).

В процессе резания на сверло действуют осевая сила подачи  $P_0$  и крутящий момент  $M_{\text{кр}}$ . Их определяют по эмпирическим формулам:

$$P_0 = C_p D^{x_p} S^{y_p} K_p; \quad M_{\text{кр}} = C_m D^{x_m} S^{y_m} K_m,$$

где  $C_p$  и  $C_m$  — постоянные коэффициенты, характеризующие обрабатываемый материал и условия резания;  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $x_m$ ,  $y_m$  — показатели степеней;  $K_p$  и  $K_m$  — поправочные коэффициенты, учитывающие реальные условия обработки. Значения коэффициентов и показателей степеней приведены в справочниках.

Осевая сила и крутящий момент являются исходными для расчета сверла и узлов станка на прочность, а также для определения эффективной мощности, затрачиваемой на резание:  $N_e = M_{\text{кр}} n / 60 \cdot 10^3$ , кВт.

Вследствие того что в процессе резания на сверло действуют значительные силы, а обработка производится всего двумя режущими кромками, качество поверхности и размерная точность обработанного отверстия невысоки.

Кроме того, при сверлении отверстий значительной глубины зачастую наблюдается искривление оси отверстия.

### 3. Зенкерование, развертывание, нарезание резьб

Для обработки полученного ранее отверстия применяется зенкерование, которое обеспечивает более высокое качество обработки, чем сверление. Зенкеры имеют все конструктивные элементы, подобно сверлу (рис. 256, а): рабочую часть  $l_1$ , на которой разделяют режущую  $l_2$  и остальное калибрующая части, шейку  $l_3$ , хвостовик  $l_4$  с лапкой  $l_5$ . Поскольку зенкер предназначен для обработки уже имеющихся отверстий, у него отсутствует поперечная режущая кромка.

В отличие от сверла он имеет три или четыре режущих зуба, на каждом из которых имеется главная и вспомогательная режущая кромки. Наличие большего количества режущих кромок обеспечивает более

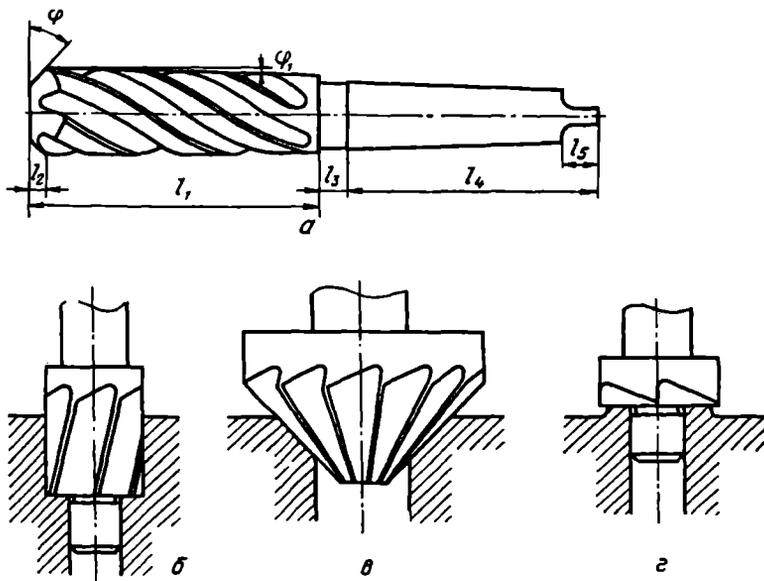


Рис. 256. Типы зенкеров

высокую производительность и точность обработки по сравнению со сверлением.

Для выполнения специальных технологических операций применяются зенкеры соответствующей формы: для обработки цилиндрических углублений при входе в отверстие — цилиндрические зенкеры (рис. 256, б), для подрезки торцевых поверхностей приливов (бобышек) используются цековки, для конических углублений — конические зенкеры (рис. 256, в, г).

Элементы резания при зенкерование аналогичны сверлению. Припуск под зенкерование оставляют в диапазоне 0,5—3,5 мм на сторону.

Развертывание применяется для изготовления наиболее точных отверстий высокой чистоты, предварительно обработанных сверлом и зенкером.

По способу применения развертки делятся на машинные, используемые на металлорежущих станках, и ручные, работа которыми производится вручную.

Число зубьев у развертки делается четным (6—12) для удобства измерения рабочего диаметра. Чтобы избежать огранку обрабатываемого отверстия, развертки делают с неравномерным угловым шагом, но

так, чтобы противоположные зубья попарно лежали в диаметральной плоскости. Припуск на развертывание в пределах 0,05—0,50 мм.

Внутреннюю резьбу нарезают метчиками. По конструкции метчик представляет собой винт с продольными канавками, образующими режущие зубья. Подобно другим инструментам для обработки отверстий метчик имеет (рис. 256, д) рабочую часть  $l_1$ , которая делится на режущую (заборную)  $l_2$ , осуществляющую черновое нарезание, и калибрующую  $l_3$  части. Хвостовая часть метчика представляет собой стержень для его закрепления, а квадрат  $l_4$  служит для передачи крутящего момента.

Для нарезания резьб в сквозных отверстиях применяются гаечные метчики, имеющие длинную заборную часть.

Применяются также и другие типы метчиков — машинные, конические, бесканавочные и т. д.

#### 4. Приспособления для сверлильных станков

При обработке деталей разной формы и размеров их необходимо надежно закрепить на станке, для чего применяются различные приспособления (рис. 257).

Детали плоской формы очень часто закрепляются в тисках или прижимах к поверхности стола станка с помощью различных прижимов (рис. 257, а, б).

При сверлении сквозных отверстий под заготовки устанавливаются подкладки. Для сверления отверстий на цилиндрических деталях их устанавливают на призмах (рис. 257, в). При необходимости детали могут закрепляться с помощью угольника (рис. 257, г).

Для сверления отверстий в деталях, выпускаемых небольшими партиями, используют шаблоны, а при обработке больших партий используют кондукторы (рис. 257, д).

Положение отверстий в деталях 8 обеспечивается направляющими втулками 7, установленными в отверстия крышки 6 кондуктора.

При работе по шаблонам и кондукторам не требуется предварительной разметки отверстий, что обеспечивает повышение производительности труда.

Режущие инструменты на сверлильных станках закрепляются в зависимости от формы и размеров хвостовиков разными способами. Инструменты с коническими хвостовиками, размеры которых совпадают с размерами конических отверстий шпинделя станка, закрепляются непосредственно в шпинделе. Если конус хвостовика инструмента меньше конуса отверстий в шпинделе, то применяются переходные втулки (рис. 257, е).

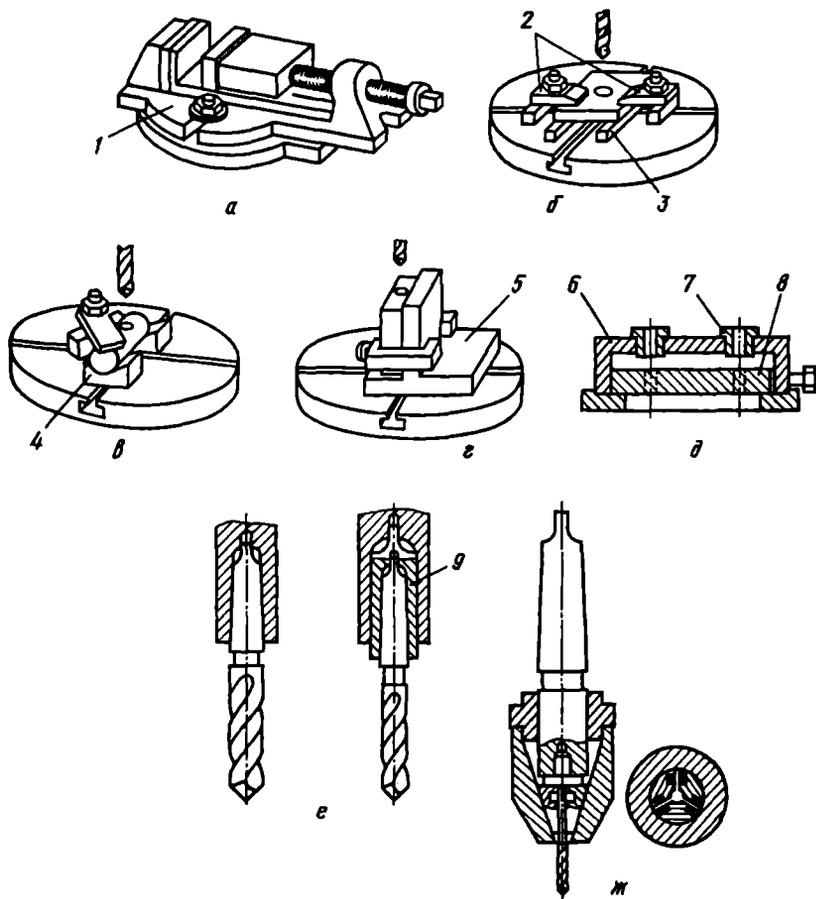


Рис. 257. Приспособления для сверлильных станков:

1 — машинные тиски; 2 — прихваты; 3 — подкладки; 4 — призмы; 5 — угольник; 6 — крышка кондуктора; 7 — направляющие кондукторные втулки; 8 — деталь; 9 — переходная втулка

Инструменты с цилиндрическими хвостовиками закрепляются в трехлапчатых патронах. Для зажима сверл небольшого диаметра с цилиндрическими хвостовиками используются цанговые патроны (рис. 257, ж).

Закрепление инструмента, вставленного в отверстие цанги осуществляется завинчиванием втулки на резьбовую часть корпуса. При этом цанга сжимается внутренним конусом втулки и закрепляет хвостовик сверла.

## 5. Сверлильные станки

Обработка отверстия является одним из самых распространенных видов работ, что обусловило разнообразие конструкций сверлильных станков. Наиболее часто применяются следующие типы сверлильных станков: вертикально-сверлильные, радиально-сверлильные и станки для глубокого сверления.

Наибольшее распространение в общем машиностроении получили вертикально- и радиально-сверлильные станки.

Вертикально-сверлильные станки предназначены для обработки отверстий в деталях малых и средних размеров массой до 25 кг, с наибольшим диаметром сверления в стали средней прочности 75 мм.

На рис. 258 представлен общий вид вертикально-сверлильного станка. Заготовка 1 закрепляется на столе станка 2, который может иметь вертикальные установочные ( $S_y$ ) перемещения по направляющим колонны 3, смонтированной на фундаментной плите 4. Режущий инструмент 5, закрепленный в шпинделе, получает главное вращательное движение  $v$  от коробки скоростей 6, а движение подачи  $S_B$  — от коробки подач 7, смонтированной в кронштейне 8. Для регулирования положения шпинделя по высоте кронштейн 8 имеет установочные вертикальные перемещения.

Ручная подача инструмента производится маховиком 9.

В отличие от вертикально-сверлильных станков, на которых ось обрабатываемого отверстия совмещается с осью инструмента за счет перемещения заготовки, у радиально-сверлильных станков совмещение осей осуществляется перемещением шпиндельной головки (рис. 259). Благодаря этому на радиально-сверлильных станках обрабатываются отверстия массивных, крупногабаритных заготовок. Заготовки 1 закрепляются на столе 2 или непосредственно на фундаментной плите 3. Режущие инструменты устанавливаются в шпинделе 4, осуществляющем с помощью коробки скоростей 5 и коробки подач 6 главное вращательное движение  $v$  и движение подачи  $S_B$  (вдоль оси шпинделя). Совмещение оси инструмента с осью отверстия производится за счет перемещения шпиндельной головки 7 вдоль траверсы 8 ( $S_y$ ) и поворота траверсы вокруг оси колонны 10 ( $S_{y2}$ ). Кроме того, траверса может перемещаться по вертикали ( $S_{y3}$ ) и закрепляться на необходимой высоте с помощью механизма 9.

У универсальных радиально-сверлильных станков траверса и шпиндельная головка делаются поворотными, что дает возможность устанавливать ось шпинделя под любым углом в пространстве для сверления наклонных отверстий.

В условиях крупносерийного и массового производства применяются многошпиндельные сверлильные станки. Они могут быть использованы

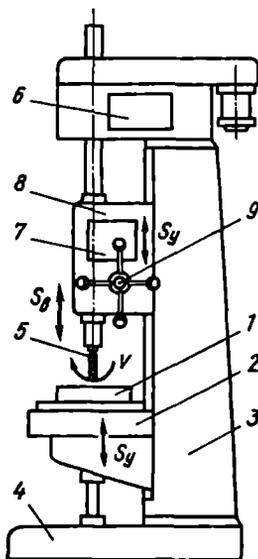


Рис. 258. Общий вид вертикально-сверлильного станка:

$S_B$  — вертикальная подача;  $S_y$  — установочное перемещение

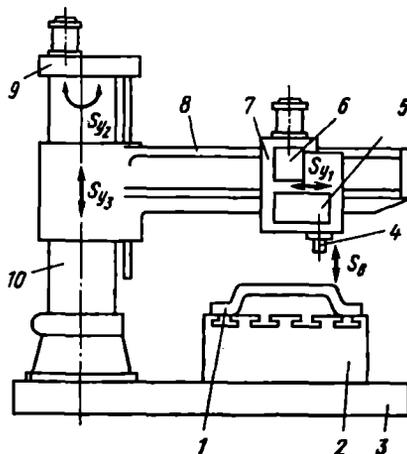


Рис. 259. Общий вид радиально-сверлильного станка:

$S_B$  — вертикальная подача;  $S_{y1}$ ,  $S_{y2}$ ,  $S_{y3}$  — установочные перемещения

для последовательного сверления отверстий различного диаметра на одной детали, для последовательной обработки одного отверстия несколькими режущими инструментами, а также для одновременной обработки нескольких отверстий.

## 6. Обработка заготовок на расточных станках

Расточные станки применяются для обработки отверстий в крупных и средних заготовках корпусных деталей, отверстий с точно координированными осями, требующих высокой точности размеров и чистоты поверхности.

На расточных станках выполняется в основном растачивание отверстий специальными расточными резцами или блоками. Также производится сверление, зенкерование и развертывание отверстий, обрабатываются наружные цилиндрические поверхности, плоские торцевые поверхности, нарезаются наружные и внутренние резьбы, осуществляется фрезерование всеми видами фрез.

Формообразование поверхностей на расточных станках осуществляется сочетанием главного вращательного движения режущего инструмента и движения подачи, сообщаемого инструменту или заготовке.

На расточных станках могут быть использованы все виды инструментов, применяемых на сверлильных станках, но кроме этого существует целый ряд инструментов, предназначенных в основном для расточных станков. К ним относятся оправочные расточные резцы, расточные пластины и блоки.

Расточные станки выполняются различных конструкций. Наибольшее распространение нашли горизонтально-расточные станки, предназначенные для обработки крупногабаритных деталей в условиях единичного и серийного производства (рис. 260).

Станок состоит из станины 1, по горизонтальному направляющим которой перемещаются салазки 9. На салазках 9 расположены каретка 10 и поворотный стол 11, на котором устанавливается заготовка. Конструкция стола позволяет осуществлять продольную подачу перемещением салазок 9, поперечную подачу с помощью каретки 10, а также точный поворот заготовки на заданный угол относительно вертикальной оси.

На правом конце станины 1 установлена стойка 2, несущая шпиндельную бабку 3. Режущие инструменты закрепляются в расточном шпинделе 6 и радиальном суппорте 5 планшайбы 4.

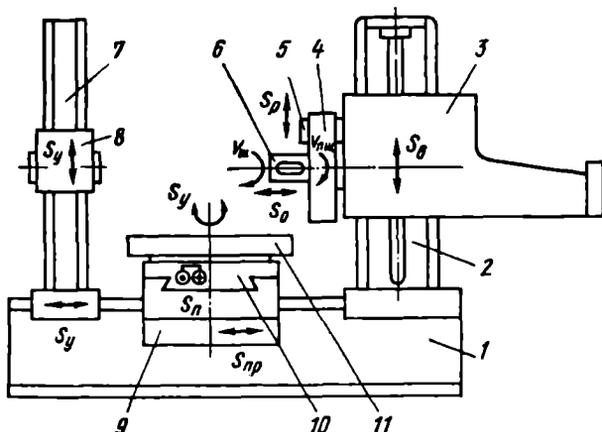


Рис. 260. Общий вид горизонтально-расточного станка:

$S_{пр}$  — продольная подача;  $S_{п}$  — поперечная подача;  $S_y$  — установочное перемещение;  $S_p$  — радиальная подача;  $S_v$  — вертикальная подача

Привод планшайбы и шпинделя осуществляется от коробки скоростей и подач, смонтированных в шпиндельной бабке. Расточной шпиндель 6 имеет главное вращательное движение, а в некоторых случаях (расточивание неглубоких отверстий, нарезание резьб и т.п.) — движение продольной подачи. Планшайба 4 также имеет вращательное движение, а суппорт 5 — радиальную подачу.

При установке длинных оправок (борштанг) один ее конец закрепляется в шпинделе, а другой — в подвижном люнете 8 задней стойки 7. Шпиндельная бабка 3 имеет вертикальную подачу. При этом люнет задней стойки перемещается синхронно с ней.

Главное движение в зависимости от выполняемой работы может сообщаться расточному шпинделю или планшайбе. Движение подачи может получать стол с закрепленной на нем заготовкой или инструмент за счет продольного перемещения расточного шпинделя, радиального перемещения суппорта или вертикального перемещения шпиндельной бабки. Кроме указанных основных движений на станке предусмотрены ускоренные установочные перемещения по направлениям всех подач.

На горизонтально-расточном станке обрабатывают отверстия, наружные цилиндрические и плоские (торцевые) поверхности, уступы, канавки, конические отверстия, наружную и внутреннюю резьбу.

Растачивание отверстий — основной тип обработки. При обработке достигается высокая точность, при этом исправляется погрешность геометрической формы отверстия, а также положение оси чернового отверстия.

Координатно-расточные станки предназначены для обработки отверстий высокой точности с точным их взаимным расположением. Они снабжены специальными оптическими или электрическими отсчетными устройствами, позволяющими устанавливать стол относительно шпинделя по двум координатам с точностью до 0,001 мм.

Особенно широкое распространение эти станки нашли в инструментальных цехах для изготовления кондукторов, приспособлений и штампов. Расточной шпиндель 5 (рис. 261) координатно-расточного станка получает вращательное (главное) движение от коробки скоростей 3, расположенной на расточной головке 4. Шпиндель имеет также вертикальную подачу. На станине станка 1 кроме стойки 2 установлен стол 6, который может перемещаться в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью салазок 7 от привода 8. Конструкция шпинделя позволяет закреплять инструменты для расточных, сверлильных и фрезерных работ.

Алмазно-расточные станки предназначены для обработки особо точных отверстий с очень малой шероховатостью поверхности. Существует большое разнообразие алмазно-расточных станков. В большинстве случаев эти станки работают с полуавтоматическим циклом. На рис. 262

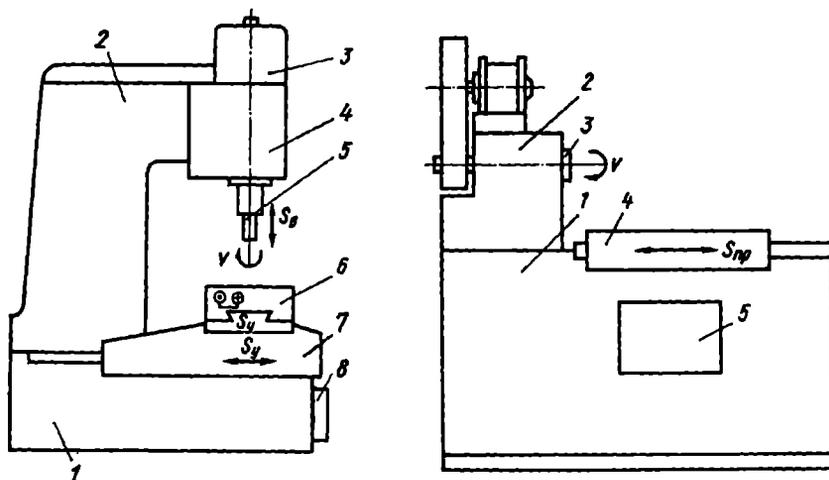


Рис. 261. Общий вид координатно-расточного станка:

$S_v$  — вертикальная подача;  $S_y$  — установочное перемещение

Рис. 262. Общий вид алмазно-расточного станка

показан одношпиндельный алмазно-расточной станок с горизонтальным расположением шпинделя. На станине станка 1 установлена расточная головка 2 со шпинделем 3, в котором с помощью оправки закрепляются резцы, оснащенные алмазами или пластинками твердого сплава. Заготовка закрепляется на столе 4, который с помощью механизма бесступенчатого регулирования 5 получает продольную подачу.

Высокая точность размеров и малая шероховатость обработанной поверхности обеспечивается применением высоких скоростей (200—1000 м/мин), малых глубин резания (0,05—0,2 мм) и малых величин подач (0,01—0,1 мм/об).

## 1. Сущность фрезерования и классификация фрез

Фрезерование — один из высокопроизводительных и широко распространенных методов обработки заготовок резанием. Работа производится многозубыми режущими инструментами — фрезами.

При фрезеровании главным движением является вращение фрезы, а движением подачи — чаще всего поступательное перемещение заготовки.

Фрезерные станки в основном предназначены для обработки различных ориентированных плоских поверхностей, пазов, уступов, а также фасонных линейчатых поверхностей. Особенностью фрезерования является прерывистость процесса резания. Это обусловлено тем, что при вращении фрезы каждый зуб врезается в заготовку с ударом, а затем работает только на некоторой части оборота и выходит из зоны резания. При дальнейшем движении зуб не касается заготовки, что способствует его охлаждению и обуславливает более благоприятные условия для работы. Врезание зубьев фрезы в заготовку с ударами приводит к возникновению вибраций, что отрицательно влияет на точность и шероховатость обработки.

Многообразие работ, выполняемых на фрезерных станках, обусловило большое разнообразие типов, форм и размеров фрез.

По конструкции фрезы разделяются на следующие группы.

1. Цельные, полностью изготовленные из высококачественного инструментального материала.

2. Напайные фрезы, изготовленные из конструкционных сталей, на рабочие поверхности зубьев которых напайваются пластинки из высококачественных инструментальных сталей или твердых сплавов.

3. Наборные, состоящие из корпуса, изготовленного из конструкционной стали, и вставных зубьев — ножей, оснащенных пластинками твердого сплава.

Зубья могут оснащаться пластинками твердого сплава, напаянными на державку или закрепляемыми механически. Наборными изготавливаются крупные фрезы.

По геометрической форме фрезы делятся на цилиндрические, дисковые, торцевые, концевые, угловые и фасонные (рис. 263).

Цилиндрические фрезы (рис. 263, а) имеют режущие кромки только на образующей цилиндра и применяются для обработки плоских поверхностей. Эти фрезы изготавливают с прямыми и винтовыми зубьями. Фрезы с винтовыми зубьями работают более плавно.

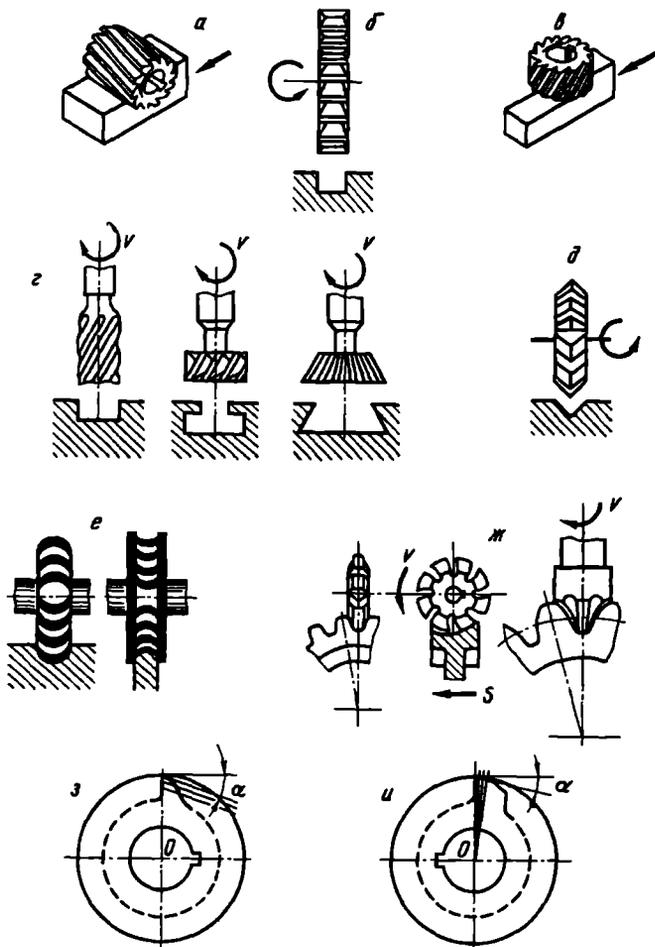


Рис. 263. Типы фрез и операций, выполняемых фрезерованием

Дисковые фрезы (рис. 263, б) имеют ширину значительно меньше диаметра. В зависимости от назначения фрезы режущие кромки могут располагаться только на образующей цилиндра, а также дополнительно на одной или двух боковых сторонах. Разновидностью дисковых фрез являются угловые фрезы (рис. 263, д), предназначенные для фрезерования угловых пазов.

Торцевые фрезы (рис. 263, а) применяются для обработки плоских поверхностей. Своё название они получили из-за того, что у них режу-

шие кромки располагаются на торцевой поверхности. Торцевые фрезы вследствие большой жесткости самой фрезы и ее закрепления обеспечивают значительно большую производительность, чем цилиндрические.

Концевые фрезы (рис. 263, *г*) характеризуются тем, что у них режущие кромки располагаются как на торцевой, так и на боковой поверхностях. Эти фрезы в отличие от всех рассмотренных выше имеют хвостовик конической или цилиндрической формы. Концевые фрезы предназначаются главным образом для обработки глубоких пазов, уступов и нешироких плоских поверхностей. Разновидностью концевых фрез являются шпоночные двухзубые фрезы, которые благодаря наличию на торце режущих кромок, доходящих до оси, могут углубляться в металл, подобно сверлу, на заданную глубину резания, а затем получают продольное перемещение вдоль канавки.

Широкое распространение для обработки разнообразных фасонных поверхностей находят фасонные фрезы (рис. 263, *е, ж*). По геометрической форме эти фрезы могут выполняться цилиндрическими, дисковыми и концевыми. По конструкции зубьев фасонные фрезы разделяются на фрезы с затылованными и остроконечными зубьями.

Зубья затылованных фрез (рис. 263, *и*) имеют плоскую переднюю поверхность, по которой производится их переточка в процессе эксплуатации. Задняя поверхность выполнена по спирали Архимеда, что обуславливает после переточки неизменность размеров и формы зуба.

В некоторых случаях фасонные фрезы изготавливаются и с остроконечными зубьями. Такие зубья образованы плоскими передней и задней поверхностями.

Фасонные фрезы с остроконечными зубьями (рис. 263, *з*) затачиваются по задней поверхности. Они дают более чистую поверхность, имеют повышенную стойкость по сравнению с затылованными фрезами. Однако переточка таких фрез требует сложных копировальных устройств для получения неизменного контура фасонных режущих кромок. Любая фреза состоит из корпуса и режущих зубьев. Каждый режущий зуб является несколько видоизмененным резцом и поэтому имеет все те же элементы.

## 2. Элементы резания при фрезеровании

При фрезеровании, как и при других способах обработки, режим резания характеризуется скоростью резания, подачей, глубиной резания, а также шириной фрезерования.

Скоростью резания при фрезеровании называется окружная скорость наиболее удаленной от оси фрезы точки режущей кромки:

$$V = \pi D n / 1000 ,$$

где  $D$  — диаметр фрезы, мм;  $n$  — частота вращения шпинделя, мин<sup>-1</sup>.

Для расчета оптимальной скорости резания используется ее эмпирическая зависимость от основных факторов, как и при точении.

Глубиной резания  $t$  называется толщина слоя металла, снимаемая за один проход фрезы. Глубина резания измеряется в миллиметрах.

Подачей при фрезеровании называется перемещение заготовки относительно вращающейся фрезы. Рассматриваются три вида подачи: подача на зуб  $S_z$  — величина перемещения заготовки относительно фрезы за время ее поворота на один зуб (мм/зуб), подача на оборот  $S_o$  — величина перемещения заготовки за время одного оборота фрезы (мм/об) и минутная подача  $S_m$  — скорость перемещения заготовки относительно фрезы (мм/мин).

Эти величины связаны между собой зависимостью

$$S_m = S_o n = S_z z n,$$

где  $z$  — число зубьев фрезы,  $n$  — частота вращения фрезы.

В зависимости от направления вращения фрезы и подачи заготовки различают встречное и попутное фрезерование.

При встречном фрезеровании (рис. 264, а) направление подачи заготовки противоположно направлению вращения фрезы. При этом зуб постепенно врезается в металл, и нагрузка увеличивается от нуля до максимального значения. Такой метод рационально применять при черновой обработке деталей, имеющих твердую поверхностную корку, так как зуб работает из-под корки. При этом усилия резания стремятся оторвать заготовку от поверхности стола, что при больших сечениях стружки приводит к вибрациям, ухудшению качества обработки.

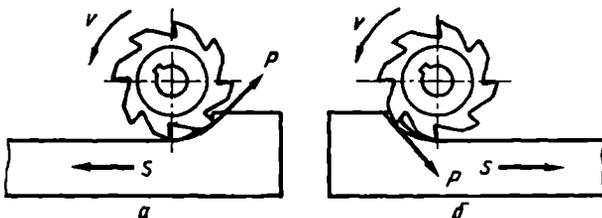


Рис. 264. Методы фрезерования

При попутном фрезеровании направление вращения фрезы и подача заготовки совпадают (рис. 264, б). В этом случае зуб фрезы сразу подвергается максимальной нагрузке, заготовка прижимается к поверхности стола.

При обработке таким методом обеспечиваются более высокое качество обработанной поверхности, повышается стойкость режущего инструмента.

Шириной фрезерования  $B$ , мм, называется величина обработанной за один проход поверхности. Для цилиндрических фрез она измеряется параллельно оси фрез, а при торцевом фрезеровании — перпендикулярно направлению подачи.

Заданные величины элементов резания будут определять основное технологическое время при фрезеровании:

$$T_0 = L / S_m = (l + l_1 + l_2) / (S_z z n),$$

где  $L$  — общая длина прохода фрезы в направлении подачи, мм;  $l$  — длина фрезеруемой поверхности, мм;  $l_1$  — путь врезания, мм;  $l_2$  — перебега фрезы, мм;  $S_m$  — минутная подача, мм/мин;  $S_z$  — подача на зуб, мм;  $z$  — число зубьев фрезы;  $n$  — частота вращения фрезы, мин<sup>-1</sup>.

Величины пути врезания и перебега фрезы рассчитываются в зависимости от диаметра фрезы, глубины и ширины фрезерования и составляют 1—5 мм каждая.

### 3. Силы и мощность резания при фрезеровании

В процессе фрезерования на каждый зуб фрезы действуют силы сопротивления со стороны обрабатываемой детали, а на фрезу в целом воздействует суммарная сила резания  $R$  (рис. 265), которую должны преодолеть механизмы привода главного движения и подачи. Для прямозубой цилиндрической фрезы равнодействующую сил резания  $R$  принято складывать на окружную  $P_z$  и радиальную  $P_y$  или на горизонтальную  $P_r$  и вертикальную  $P_b$  составляющие. В зависимости от условий обработки величины этих сил и их направление в пространстве изменяются.

При фрезеровании фрезой с винтовыми зубьями возникает дополнительное осевое усилие  $P_x$ , направленное вдоль оси фрезы. Величина этой силы, кроме прочих факторов, зависит от величины угла наклона винтовых канавок фрезы  $\omega$ .

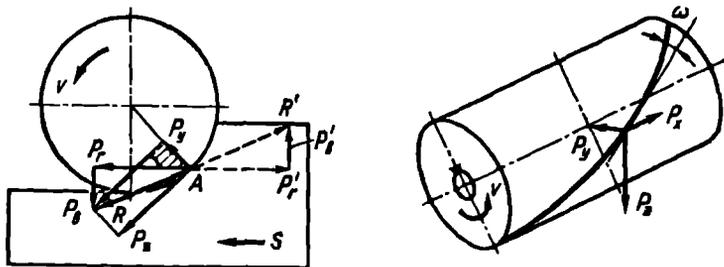


Рис. 265. Силы резания при фрезеровании

Основную работу по срезанию стружки с заготовки совершает окружная сила  $P_z$ . По ней рассчитывается необходимый вращающий момент на шпинделе:

$$M_{кр} = P_z D / (2 \cdot 1000) ,$$

где  $D$  — диаметр фрезы, мм. Эффективная мощность на шпинделе

$$N_e = M_{кр} n / (60 \cdot 10^3) ,$$

где  $n$  — частота вращения фрезы, мин<sup>-1</sup>.

Составляющие равнодействующей силы резания  $R$  необходимы для расчетов на прочность механизмов станка и приспособлений и оказывают значительное влияние на качество обработки.

Для расчета составляющих сил резания при фрезеровании имеются соответствующие эмпирические зависимости.

#### 4. Обработка заготовок на консольно-фрезерных станках

Консольно-фрезерные станки — наиболее распространенный тип фрезерных станков. Они предназначены для обработки деталей небольшой массы и габаритов. Стол этих станков с закрепленной на нем деталью может перемещаться в трех взаимно перпендикулярных направлениях. В зависимости от конструкции консольно-фрезерные станки подразделяются на горизонтально-фрезерные, вертикально- и универсально-фрезерные.

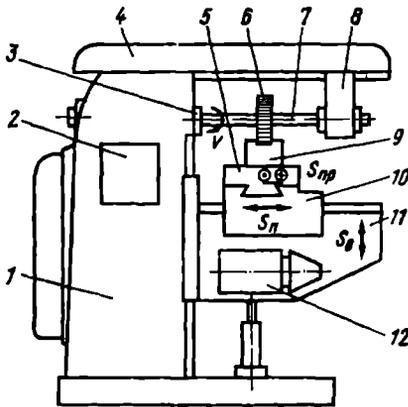


Рис. 266. Общий вид горизонтально-фрезерного станка:

$S_{пр}$  — продольная подача;  $S_{п}$  — поперечная подача;  $S_{в}$  — вертикальная подача

На горизонтально-фрезерном станке (рис. 266) заготовка 9 закрепляется на столе 5 и получает подачу в трех взаимно перпендикулярных направлениях: продольном — перемещением стола по направляющим салазок 10, поперечном — перемещением салазок по направляющим консоли 11 и вертикальном — перемещением консоли по направляющим станины 1. Главным движением является вращение фрезы 6, закрепленной с помощью оправки 7 в шпинделе станка 3, ось которого расположена горизонтально. Коробка скоростей 2 расположена в станине 1 и обеспечивает шпинделю с фрезой разные скорости вра-

нения. Коробка подач 12 расположена в консоли.

Для поддержания второго конца длинных оправок предназначена подвеска 8, которая может устанавливаться в необходимом положении перемещением ее вдоль хобота 4.

Горизонтально-фрезерные станки, имеющие поворотную плиту, позволяющую поворачивать стол на требуемый угол в горизонтальной плоскости, называются универсально-фрезерными станками. Они позволяют изготавливать детали со спиральными канавками (сверла, зенкеры, развертки, фрезы и т.д.).

Вертикально-фрезерные консольные станки в отличие от горизонтально-фрезерных имеют шпиндель с вертикальной осью вращения.

Конструктивно они имеют много общего с горизонтально-фрезерными станками. Заготовка, установленная на столе, также может получать подачу в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Вращение шпинделю с закрепленной в нем фрезой сообщает коробка скоростей, расположенная в станине станка. Коробка подач располагается в консоли. Некоторые конструкции вертикально-фрезерных станков имеют поворотную шпиндельную головку, позволяющую устанавливать шпиндель под разными углами, а также поворотный стол. Такие станки называются широкоуниверсальными и используются главным образом в инструментальных цехах.

На консольно-фрезерных станках нельзя обрабатывать массивные заготовки вследствие малой жесткости механизмов, осуществляющих вертикальное перемещение консоли. Поэтому у вертикально-фрезерных станков, предназначенных для обработки массивных заготовок, консоль отсутствует, заготовка вместе со столом получает подачу в двух направлениях в горизонтальной плоскости, а вертикальная подача осуществляется шпиндельной бабкой, несущей инструмент.

## 5. Обработка заготовок на продольно-фрезерных станках

Продольно-фрезерные станки предназначены для обработки заготовок большой массы и размеров. Обработка проводится торцевыми и концевыми фрезами, закрепленными в шпинделях станка. Заготовка закрепляется на столе 1 (рис. 267), который совершает по направляющим станины 2 продольное перемещение. Продольно-фрезерные станки изготавливаются одностоечными и двухстоечными с длиной стола 1250—12000 мм и шириной 400—5000 мм. На станине смонтированы мощные боковые стойки 4, на которых установлены боковые фрезерные головки 3, имеющие вертикальные и горизонтальные перемещения. На стойках 4 располагается также траверса 5, которая может совершать установочные вертикальные перемещения. Для обеспечения высокой жесткости станка стойки в верхней части соединены поперечиной 6. На траверсе 5

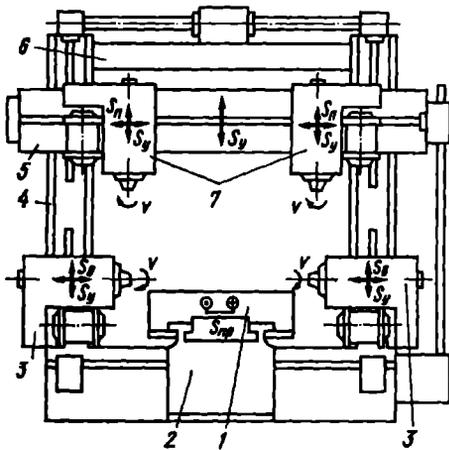


Рис. 267. Общий вид продольно-фрезерного станка

Продольно-фрезерные станки обладают высокой жесткостью, что позволяет работать на повышенных скоростях резания.

## 6. Приспособления для фрезерных станков.

### Универсальные делительные головки

Для закрепления заготовок на фрезерных станках применяется большое число универсальных и специальных приспособлений. Универсальные приспособления применяются при обработке деталей простой геометрической формы при единичном и мелкосерийном производстве. Для закрепления детали непосредственно на столе станка применяются прихваты с болтами, прижимами, упорами, угольники, машинные тиски и другие приспособления, аналогичные применяемым на сверлильных станках. Круглые детали при фрезеровании лысок или пазов удобно закреплять в призмах.

При обработке больших партий деталей сложной формы используются специальные приспособления, пригодные для закрепления заготовок только данной формы и размеров.

При работе на консольно-фрезерных станках широко используются такие универсальные приспособления, как делительные головки. Различают простые, универсальные и оптические делительные головки (рис. 268). Они служат для периодического поворота заготовок на требуемый угол (деление на части), для установки оси заготовки под требуемым углом, для непрерывного вращения заготовки при нарезании винтовых канавок. Выпускаются универсальные делительные головки (УДГ) моделей УДГ—160, УДГ—200, УДГ—500 и т. д. Цифра показы-

установлены вертикальные фрезерные головки 7, обеспечивающие фрезам продольные перемещения. Фрезерные головки, установленные на траверсе, могут поворачиваться на угол  $\pm 30^\circ$ . Шпиндель каждой фрезерной головки может выдвигаться в осевом направлении на 100—200 мм. Каждая шпиндельная головка имеет индивидуальный привод и индивидуальную коробку скоростей, обеспечивающую шпинделю 12 различных чисел оборотов.

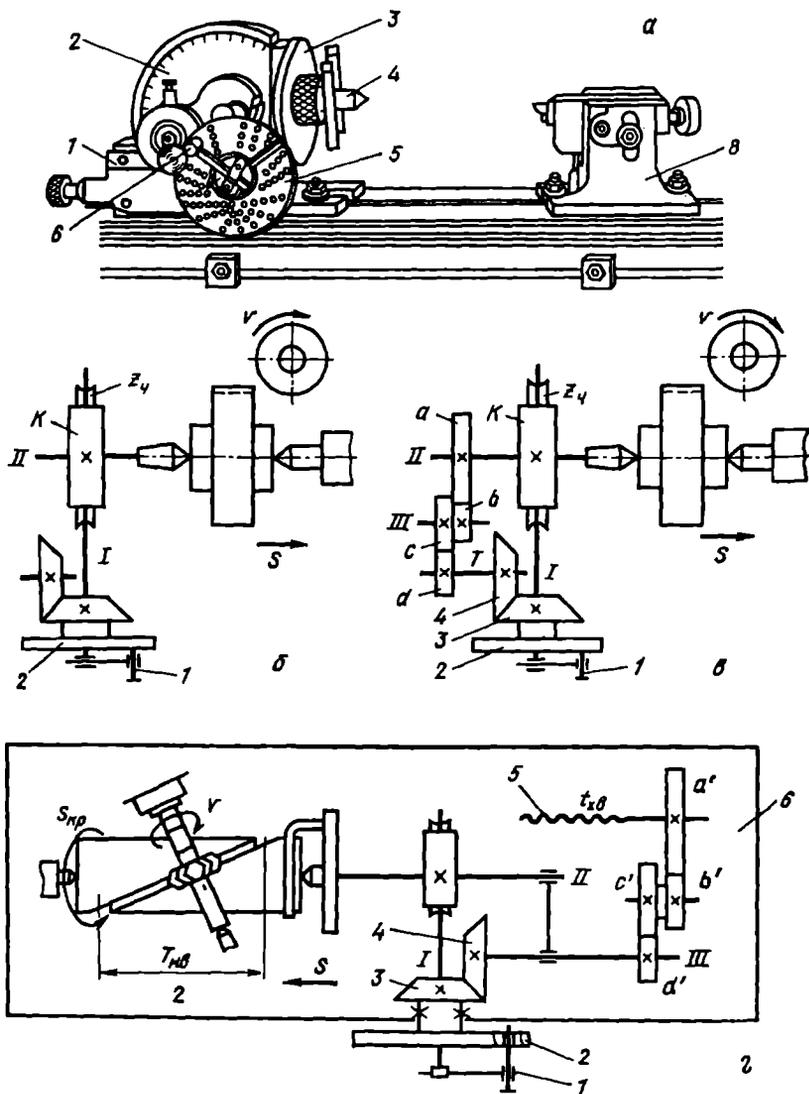


Рис. 268. Универсально-делительная головка и схемы ее настройки

вает максимальный диаметр заготовки, которую можно обрабатывать с помощью данной делительной головки.

Универсальная делительная головка состоит из корпуса 1, поворотной части 2, лимба непосредственного деления 3, шпинделя 4, лимба простого и дифференциального деления 5 и рукоятки 6 с фиксирующим штифтом. На переднем конце шпинделя неподвижно закреплен лимб непосредственного деления с градуировкой на 360°. При обработке длинной детали второй ее конец поддерживается задней бабкой 7. В комплект универсальной делительной головки входит один или два сменных лимбовых диска для осуществления простого и дифференциального деления.

В зависимости от числа частей, на которые необходимо разделить заготовку, используются три способа деления: непосредственное, простое и дифференциальное.

Непосредственное деление применяется при делении на малое число частей (2, 3, 4 и т.д.). В этом случае червяк выводится из зацепления с червячным колесом (рис. 268, а) и шпиндель с закрепленной заготовкой вручную поворачивается относительно корпуса делительной головки. Угол поворота отсчитывают по шкале, нанесенной на лимбе непосредственного деления 3.

При простом делении (рис. 268, б) поворот шпинделя с заготовкой осуществляется вращением рукоятки 1 относительно неподвижного лимбового диска 2. Вращение от рукоятки передается валу 1 и далее червяком — червячному колесу  $z_4$ , закрепленному на шпинделе. Отечественные делительные головки изготавливаются с червячной парой, имеющей передаточное отношение 1/40. В этом случае, для того чтобы шпиндель с заготовкой повернулся на один целый оборот, рукоятку необходимо повернуть 40 раз. Поэтому эта величина  $N$ , показывающая сколько раз надо повернуть рукоятку для поворота шпинделя на один оборот, и называется характеристикой делительной головки:

$$N = 1 / i_4 = 40.$$

Для деления заготовки на  $z$  частей, т.е. для поворота шпинделя на  $1/z$  часть оборота, рукоятку надо повернуть  $n_p$  раз:

$$n_p = N / z = A + m / n = A + em / (en),$$

где  $A$  — целое число оборотов рукоятки;  $m, n$  — числитель и знаменатель правильной несократимой дроби, указывающий часть оборота, на которую необходимо повернуть рукоятку;  $e$  — общий множитель для  $m$  и  $n$ , выбранный таким образом, чтобы произведение  $en$  представляло число отверстий, имеющих на какой-либо окружности лимба, а  $em$  — число отверстий, на которое надо повернуть рукоятку относительно круга с числом отверстий  $en$ .

Дифференциальное деление применяют в том случае, когда нельзя применить простое деление, т.е. нельзя подобрать на лимбовом диске числа делений, обеспечивающего простое деление.

При дифференциальном делении вместо заданного числа делений  $z$  выбирается достаточно близкое к нему приближенное число  $z_{\text{пр}}$ , удовлетворяющее условию простого деления. Получившаяся при этом погрешность в повороте шпинделя будет компенсироваться соответствующим поворотом лимба 2, происходящим автоматически в период поворота рукоятки 1. Лимб получает вращение от шпинделя через гитару сменных зубчатых колес:  $i_{\text{см}} = (a / b) (c / d)$  и конические колеса 4, 3 с передаточным отношением  $i = 1$  (рис. 268, в).

Таким образом, необходимый поворот шпинделя осуществляется одновременно двумя движениями: поворотом рукоятки относительно лимба и дополнительным поворотом лимба относительно рукоятки. Алгебраическая сумма этих двух движений должна дать необходимую величину поворота рукоятки, при котором шпиндель повернется на необходимый угол  $1 / z$ .

Поворот рукоятки относительно лимба производится из расчета деления на  $z_{\text{пр}}$  частей и равняется  $N / z_{\text{пр}}$ . Поворот лимба относительно рукоятки за период поворота детали на  $1 / z$  равняется  $(1 / z) i_{\text{см}}$ . Тогда величина поворота рукоятки должна быть равна

$$n_{\text{р}} = N / z = (N / z_{\text{пр}}) + (i_{\text{см}} / z)$$

Для обеспечения этого условия, т.е. для деления заготовки на  $z$  частей дифференциальным способом, надо настроить гитару сменных колес:

$$i_{\text{см}} = (a / b) (c / d) = N (z_{\text{пр}} - z) / z_{\text{пр}}$$

При расчете величин  $i_{\text{см}}$  может встретиться два случая:  $i_{\text{см}} > 0$  и  $i_{\text{см}} < 0$ . Положительные значения передаточного отношения получают, если  $z_{\text{пр}} > z$ . В этом случае направления вращения рукоятки и лимбового диска совпадают. Во втором случае ( $i_{\text{см}} < 0$ )  $z_{\text{пр}} < z$  рукоятка и лимбовый диск должны вращаться в противоположных направлениях, что достигается постановкой дополнительного колеса с любым числом зубьев между колесами  $a$  и  $b$  или  $c$  и  $d$ .

Таким образом, для осуществления дифференциального деления необходимо:

1) выбрать приближенное число делений  $z_{\text{пр}}$ , позволяющее производить простое деление;

2) определить число оборотов рукоятки по выбранному числу делений:  $n_{\text{р}} = N / z_{\text{пр}}$ ;

3) подобрать сменные зубчатые колеса гитары по формуле  $i_{\text{см}} = N (z_{\text{пр}} - z) / z_{\text{пр}}$  и передать вращение с помощью гитары сменных колес от шпинделя лимбовому диску.

Для нарезания спиральной винтовой канавки заготовка должна получать одновременно два движения — вращательное и поступательное вдоль оси. Оба движения должны быть согласованы так, чтобы при перемещении заготовки вдоль оси на величину шага нарезаемой канав-

ки она повернулась вокруг оси на один оборот. Для этого заготовка (рис. 268, *з*) устанавливается в центрах делительной головки и задней бабки. Ходовой винт продольной подачи стола фрезерного станка 5 с шагом  $t_{х.в.}$  с помощью гитары сменных колес  $a' b' c' d'$  связывается с валиком III универсальной делительной головки, который через конические колеса 3, 4, лимбовый диск 2, фиксатор 1, вал I и червячную пару передает вращение заготовке. Одновременно винт  $t_{х.в.}$  сообщает столу фрезерного станка 6 с установленной на нем делительной головкой продольное перемещение.

Составим уравнение кинематического баланса рассмотренной кинематической цепи, исходя из того, что продольное перемещение стола с УДГ производится винтовой подачей:

$$S = t_{х.в.} n_{х.в.} = T_{н.в.},$$

где  $T_{н.в.}$  — шаг нарезаемой винтовой канавки,  $n_{х.в.}$  — число оборотов ходового винта стола, которое он должен сделать для перемещения стола с заготовкой на величину  $T_{н.в.}$ . Как видно из кинематической схемы (рис. 268, *з*),

$$n_{х.в.} = n_{шп} i_{шп-х.в.},$$

где  $n_{шп}$  — число оборотов шпинделя УДГ;  $i_{шп-х.в.}$  — передаточное отношение кинематической цепи от шпинделя делительной головки до ходового винта.

По нашему условию  $n_{шп} = 1$  и

$$n_{х.в.} = 1(1 / i_{ч}) (d' / c') (b' / a') = 1(1 / i_{ч}) (1 / i_{см}) = N(1 / i_{см}).$$

$$\text{Тогда } T_{н.в.} = N t_{х.в.} / i_{см} \text{ и } i_{см} = (a' / b') (c' / d') = N t_{х.в.} / T_{н.в.}.$$

По этой формуле подбираются сменные колеса, согласующие вращательное и поступательное движения заготовки в соответствии с поставленными условиями.

Фрезерование винтовых канавок может производиться концевыми и дисковыми фрезами. При работе дисковыми фрезами стол станка должен быть повернут относительно оси фрезы на угол подъема спирали  $\beta$ , который определяется по формуле  $\beta = \arctg(\pi D / T_{н.в.})$ , где  $D$  — диаметр заготовки.

## 7. Приспособления для закрепления фрез

В зависимости от конструкции фрез по-разному осуществляется их закрепление в шпинделях станков. По способу закрепления фрезы делятся на насадные, имеющие центральное отверстие, и хвостовые, имеющие хвостовик конической или цилиндрической формы. Цилиндрические и дисковые фрезы чаще всего применяются при обработке на горизонтально-фрезерных станках и закрепляются (рис. 269, *а*) на двухопорных центровых оправках. Фреза 3 надевается на оправку и соединяется с ней посредством шпонки 4. Для обеспечения требуемого положения фрезы

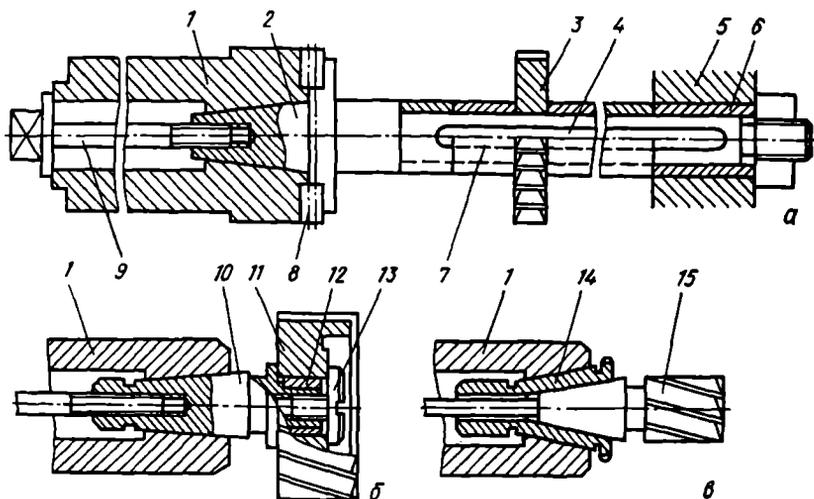


Рис. 269. Схемы установки и закрепления фрезы

вдоль оси оправки используются установочные кольца 7. Оправка коническим хвостовиком 2 устанавливается в коническое отверстие шпинделя 1 и закрепляется в нем затяжным болтом 9. Для предохранения от проворачивания оправки относительно шпинделя в пазы 8, выполненные в шпинделе и оправке, вставляют «сухари». Для обеспечения жесткости оправки второй ее конец поддерживается серьгой 5 с подшипником 6. Торцевые фрезы закрепляются на коротких концевых оправках (рис. 269, б). Фреза 11 насаживается на оправку и закрепляется на ней с помощью шпонки 12 и винта 13. Оправка коническим хвостовиком 10 вставляется в шпиндель 1 непосредственно или через переходные втулки 14 (рис. 269, в) и закрепляется затяжным винтом.

Хвостовые фрезы с коническим хвостовиком 15 закрепляются либо непосредственно (рис. 269, в), либо через переходные втулки 14. Фрезы с цилиндрическим хвостовиком закрепляются в цанговом или кулачковом патроне.

# Глава 6 ОБРАБОТКА НА СТРОГАЛЬНЫХ, ДОЛБЕЖНЫХ, ПРОТЯЖНЫХ СТАНКАХ

## 1. Особенности обработки строганием и долблением

Обработка строганием характеризуется прямолинейным возвратно-поступательным главным движением и прерывистым движением подачи. Главное возвратно-поступательное движение состоит из двойных ходов. Во время прямого хода с заготовки срезается стружка (рабочий ход), а во время обратного (холостого хода) происходит возвращение исполнительных органов (стола или резца) в исходное положение и стружка не снимается. В зависимости от конструктивного исполнения различают поперечно- и продольно-строгальные станки. На поперечно-строгальном станке (рис. 270, а) главное возвратно-поступательное движение совершает режущий инструмент, а заготовка — периодическое движение подачи поперек направления главного движения. При обработке вертикальных или наклонных поверхностей периодическое движение подачи сообщается режущему инструменту. Поперечно-строгальные станки применяются для обработки малых и средних заготовок. Схема обработки на продольно-строгальном станке (рис. 270, б) характеризуется главным возвратно-поступательным перемещением заготовки и периодическим движением подачи режущего инструмента в горизонтальном, вертикальном и наклонном направлениях.

Разновидностью строгания является долбление (рис. 270, в), которое характеризуется главным возвратно-поступательным движением режущего инструмента в вертикальном направлении, периодическим пере-

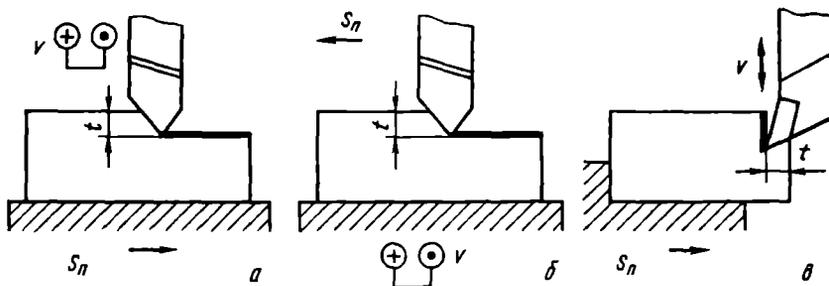


Рис. 270. Схемы обработки на поперечно-строгальном (а), продольно-строгальном (б) и долбежном (в) станках

мещением заготовки в горизонтальной плоскости и при необходимости вращением вокруг вертикальной оси.

Особенность строгания — прерывистость процесса обработки. Наличие холостого хода, когда обработка не производится, приводит к значительному увеличению времени обработки и снижению производительности труда, а ударное врезание инструмента в заготовку и непостоянство скорости резания обуславливают невысокое качество обработки. В то же время прерывистый характер обработки способствует охлаждению режущего инструмента во время холостого хода, что повышает стойкость инструмента и позволяет выполнять обработку без применения смазочно-охлаждающих жидкостей.

Важным достоинством станков строгальной группы является их универсальность, простота конструкции и возможность использования простых и недорогих режущих инструментов. Кроме того, при обработке длинных, но узких поверхностей производительность строгальных станков выше, чем при фрезеровании. Применение специального финишного строгания для окончательной обработки станин станков позволило значительно сократить объем ручных доводочных работ (шабрения).

Строгальные станки находят применение в мелкосерийном и единичном производствах. Более широко они применяются в станкостроении и тяжелом машиностроении для обработки крупногабаритных тяжелых заготовок станин, корпусов, рам, колонн и т.д.

При строгании, как и при токарной обработке, рассматривают аналогичные элементы режимов резания: скорость резания  $v$ , м/мин; глубину резания  $t$ , мм; подачу  $S$ , мм/двойной ход; ширину срезаемого слоя  $b$ , мм; толщину срезаемого слоя  $a$ , мм.

Скорость главного движения при строгании непостоянна и при расчетах за скорость резания принимают среднюю скорость возвратно-поступательного перемещения режущего инструмента, которую рассчитывают по эмпирическим формулам. По рассчитанной скорости резания определяют необходимое число двойных ходов:

$$n_{\text{дв.х.}} = 1000 v_{\text{р.х.}} / L (K + 1),$$

где  $L = l + (l_1 + l_2)$  — расчетная длина хода, мм;  $l$  — длина обработанной поверхности;  $l_1 + l_2$  — длина перебега резца в обе стороны, мм;  $K$  — отношение скорости рабочего хода ( $v_{\text{р.х.}}$ ) к скорости холостого хода ( $v_{\text{х.х.}}$ ). Силы и мощность резания определяются по эмпирическим формулам, как и при точении.

Основное технологическое время при строгании пропорционально длине и ширине обрабатываемой заготовки:

$$T_0 = (B + l_1 + l_2) i / n_{\text{дв.х.}} S,$$

где  $B$  — ширина обрабатываемой поверхности, мм;  $S$  — подача, мм;  $l_1$  и  $l_2$  — длина резания и перебег резца, мм;  $i$  — число проходов.

Для повышения производительности обработки строганием применяются методы силового резания, при которых основное технологическое время уменьшается за счет увеличения подачи и глубины резания (сокращения числа рабочих ходов  $i$ ).

## 2. Строгальные и долбежные резцы

На строгальных станках обрабатываются плоские горизонтальные, вертикальные и наклонные поверхности, уступы, пазы различной формы, фасонные поверхности и производится разрезка заготовок. На долбежных станках обрабатываются пазы в отверстиях, изготавливаются фасонные отверстия, наружные поверхности фасонной формы.

Разнообразие выполняемых работ обуславливает разнообразие применяемых типов резцов. Строгальные резцы аналогичны токарным, но работают в более тяжелых условиях, так как испытывают ударные нагрузки. Поэтому строгальные резцы выполняют более жесткими, а на станках устанавливают с малым «вылетом». По назначению строгальные резцы делятся (рис. 271) на проходные ( $a$ ), подрезные ( $b$ ), отрезные ( $в$ ), фасонные ( $г$ ). При черновом строгании выгодно применять изогнутые резцы ( $д$ ). При деформации таких резцов происходит уменьшение глубины резания в отличие от прямых резцов ( $e$ ), что сказывается на увеличении стойкости инструмента. При чистовой обработке используются резцы, имеющие режущую кромку длиной до 40 мм, расположенную параллельно направлению подачи. Такие резцы работают с малой глубиной резания ( $t$  до 0,02 мм) и большими подачами ( $S$  до 20 мм/дв.х.), обеспечивая высокое качество обработки. Резцы для долбежных станков подобны строгальным, но должны быть еще более прочными, так как длина их частей, выступающих из суппорта станка, значительно больше, чем у строгальных резцов.

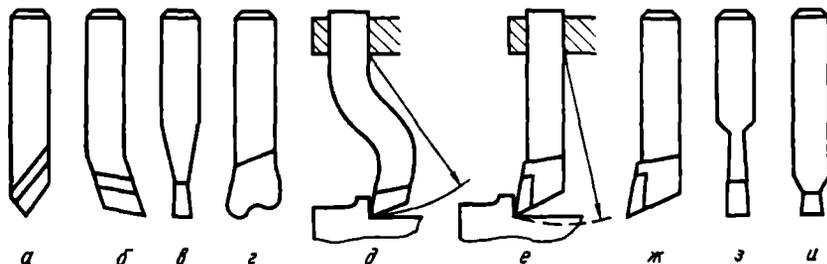


Рис. 271. Типы строгальных и долбежных резцов

Долбежные резцы изготавливаются трех основных видов: проходные (ж), прорезные (з) и для обработки шпоночных пазов (и) (см. рис. 271).

Для закрепления заготовок на строгальных и долбежных станках не требуется сложных приспособлений. Заготовки небольших размеров и простых форм закрепляются в машинных тисках, устанавливаемых на столе станка. Крупные заготовки закрепляются непосредственно на столе с помощью прихватов, подкладок, клиньев, упоров и т.д.

### 3. Строгальные станки

Из группы строгальных станков наиболее часто применяются поперечно-строгальные и продольно-строгальные станки. Поперечно-строгальные станки предназначены для обработки небольших заготовок и выпускаются с максимальным ходом ползуна до 1000 мм. Заготовка закрепляется на столе станка, совершающем движение подачи поперек направления главного движения. Главным движением является возвратно-поступательное движение резца.

Рассмотрим основные узлы поперечно-строгального станка с кулисным приводом (рис. 272). Фундаментная плита 1 служит для установки и закрепления станка на фундаменте. По направляющим станины 2, в которой располагается коробка скоростей и коробка подач, совершает главное возвратно-поступательное перемещение ползун 9. На торце ползуна закреплен суппорт 8, который можно устанавливать под заданным углом для обработки наклонных поверхностей. Резец закреплен в откидном резцедержателе 7, поэтому при обратном ходе ползуна откидная планка позволяет резцу свободно скользить по поверхности детали, предохраняя обработанную поверхность от задиrow, а резец от поломки.

Стол станка 6 с установленной на нем заготовкой получает поперечную подачу  $S_n$ . Регулировка положения стола по вертикали может осуществляться телескопическим винтом 4, перемещающим траверсу 3 по вертикальным направляющим станины.

На продольно-строгальных станках обрабатываются крупные тяжелые заготовки с большей длиной строгания. В отличие от поперечно-строгальных главным движением на этих станках является возвратно-поступательное перемещение заготовки, устанавливаемой на столе, а движение подачи сообщается режущему инструменту. В нашей стране выпускаются продольно-строгальные станки с длиной стола 1,5—12,0 м и шириной 0,7—4,0 м. По конструкции продольно-строгальные станки подразделяются на одностоечные и двухстоечные. Двухстоечные станки, имеющие большую жесткость, предназначены для обработки более крупных заготовок с большими величинами подач и глубин резания.

На двухстоечном продольно-строгальном станке (рис. 273) заготовка устанавливается на столе станка 1, который получает главное воз-

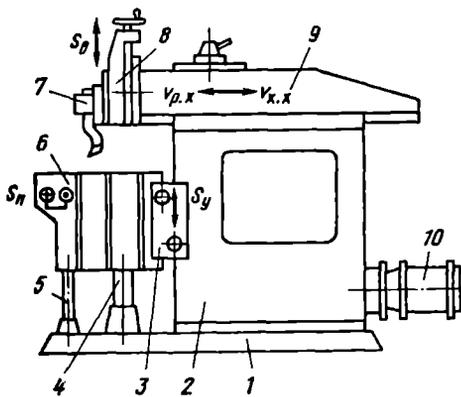


Рис. 272. Общий вид поперечно-строгального станка:  $V_{p.x}$  — скорость рабочего хода;  $V_{к.х}$  — скорость холостого хода;  $S_{п}$  — поперечная подача;  $S_{в}$  — вертикальная подача;  $S_{у}$  — установочное перемещение

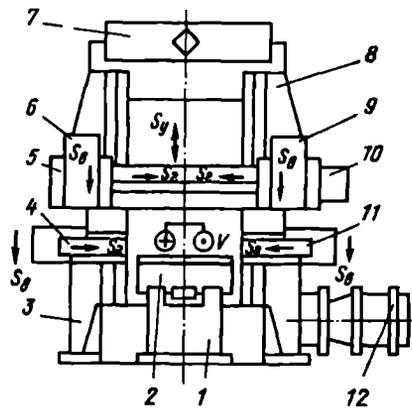


Рис. 273. Общий вид двухстоечного продольно-строгального станка:  $S_{г}$  — горизонтальная подача;  $S_{в}$  — вертикальная подача;  $S_{у}$  — установочное перемещение

вратно-поступательное перемещение по направляющим станины 2. Для привода главного движения используется двигатель постоянного тока 12, который в сочетании со шестеренной коробкой скоростей позволяет осуществлять бесступенчатое регулирование скорости рабочего и холостого ходов независимо друг от друга. Вследствие большой массы перемещаемых частей стола и заготовки для получения возвратно поступательного перемещения стола применяется червячно-реечная передача. Станина станка связана с вертикальными стойками 3 и 8, которые для большей жесткости сверху скреплены поперечиной 7. По направляющим стоек перемещаются боковые суппорты 4 и 11, имеющие кроме вертикальной также горизонтальную подачу. На станках находится также траверса 5, несущая два суппорта 6 и 9. Траверса в зависимости от размеров детали может устанавливаться на заданном уровне от поверхности стола. Верхние суппорты имеют горизонтальные и вертикальные подачи от отдельных коробок подач. Суппорты можно разворачивать вокруг горизонтальной оси для обработки наклонных поверхностей. Все суппорты оснащены откидными резцедержателями, которые в начале холостого хода стола автоматически поднимают резцы над поверхностью обрабатываемой заготовки. Наличие четырех суппортов позволяет одновременно обрабатывать несколько поверхностей заготовок.

#### 4. Обработка заготовок на долбежных и протяжных станках

Долбежные станки предназначены для обработки фасонных отверстий, различной формы канавок в отверстиях, а также для обработки наружных вертикальных поверхностей плоской или фасонной формы (рис. 274).

Главное вертикальное возвратно-поступательное движение совершает ползун 6, несущий суппорт 5 с резцом. Для этого движение от электродвигателя 10, установленного в станине 1, валом 8 передается кулисному механизму, который и сообщает ползуну движение по вертикальным направляющим стойки 7. Все движения подачи получает обрабатываемая заготовка 4. Стол станка 3 может перемещаться в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях вручную от маховика 2 или механически от коробки подач 9, а также поворачиваться вокруг вертикальной оси.

Долбежные станки являются универсальными. Они не обеспечивают высокой производительности и точности обработки и применяются в единичном и мелкосерийном производстве.

Обработка заготовок протягиванием широко применяется в условиях крупносерийного и массового производства для обработки внутренних и наружных поверхностей. Она заменяет фасонное строгание, фрезерование, долбление и в некоторых случаях растачивание. Производительность протягивания в 8—10 раз выше, чем при фрезеровании, а качество выполнения работы очень высокое. Протяжка представляет собой многозубый режущий инструмент с постепенно увеличивающимися размерами и постепенно изменяющейся формой каждого последующего зуба. Первый зуб имеет форму и размеры поверхности, подлежащей обработке, а последний соответствует обработанной поверхности. Работу протяжки можно представить как последовательную работу ряда строгальных или долбежных резцов, скрепленных таким образом,

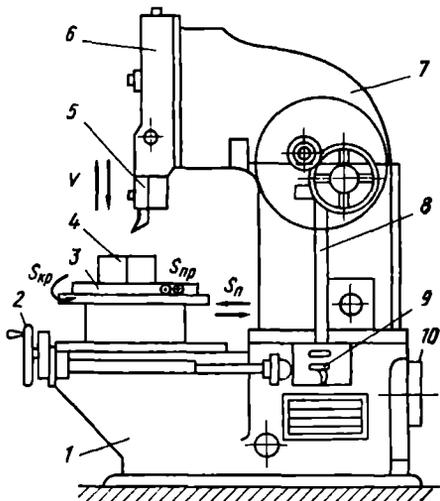


Рис. 274. Общий вид долбежного станка:  $S_{пр}$  — продольная подача;  $S_{п}$  — поперечная подача;  $S_{кр}$  — круговая подача

что режущая часть каждого последующего резца выступает над предыдущим на небольшую величину  $S_z$  (рис. 275, а).

Главным движением при протягивании является поступательное перемещение протяжки, а подачей — превышение каждого последующего зуба над предыдущим. Для черновых зубьев  $S_z = 0,05 \dots 0,4$  мм, а для чистовых  $S_z = 0,01 \dots 0,02$  мм.

Протягивание осуществляется протяжками и прошивками. Если рабочее усилие прилагается к заднему торцу инструмента, то такая протяжка работает на сжатие и называется прошивкой (рис. 275, в). Во

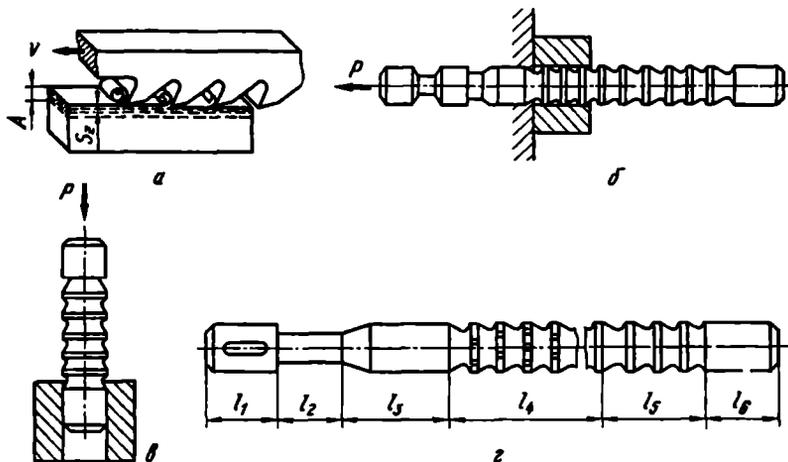


Рис. 275. Схемы работы протяжек

избежание продольного изгиба прошивка должна быть по возможности короткой и обычно ее длина не превышает 15 диаметров. Допускаемая длина протяжки (рис. 275, а, б) значительно больше и достигает 1500 мм. Скорость резания при протягивании невысокая (8—15 м/мин). Однако, несмотря на относительно низкие скорости, протягивание является высокопроизводительным методом обработки из-за большой суммарной длины одновременно работающих режущих кромок.

По назначению протяжки подразделяются на внутренние (рис. 275, б, в), предназначенные для обработки внутренних замкнутых поверхностей, и наружные (рис. 275, а) — для обработки незамкнутых поверхностей.

Протяжка состоит из следующих частей (рис. 275, з): замковой части или хвостовика  $l_1$ , предназначенного для закрепления инструмента в

патроне протяжного станка, шейки  $l_2$ , соединяющей замковую часть и переднюю направляющую  $l_3$ , служащую для центрирования обрабатываемой заготовки относительно протяжки. Режущая часть  $l_4$  состоит из режущих зубьев, размер которых постепенно увеличивается на величину  $S_z$ , а форма постепенно приближается к форме заданной поверхности. Калибрующая часть предназначена для повышения качества обработанной поверхности. Все зубья калибрующей части имеют форму и размеры обработанной поверхности и как бы производят ее выглаживание. Задняя направляющая  $l_6$  препятствует перекосу детали при прохождении в ней последнего калибрующего зуба и повреждению вследствие этого обработанной поверхности. Геометрия зубьев протяжки аналогична геометрии обычных резцов.

Различают следующие методы протягивания (рис. 276): профильную, генераторную и групповую (прогрессивную). При профильной схеме (рис. 276, а) профиль каждого зуба подобен конфигурации протягиваемой поверхности. Однако сложность изготовления таких протяжек

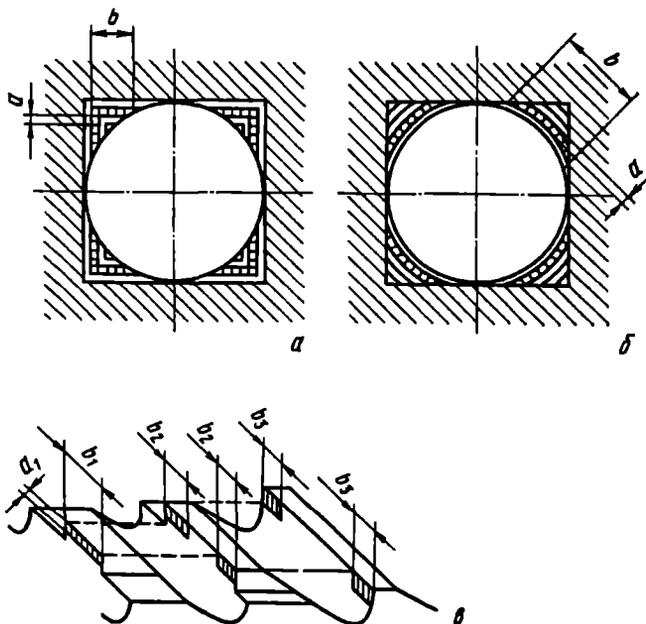


Рис. 276. Схемы резания при протягивании:

а — профильная; б — генераторная; в — прогрессивная (групповая)

ограничивает применимость профильной схемы. Генераторная схема (рис. 276, б) предусматривает срезание припуска концентрическими слоями. Достоинством такого метода является относительная простота изготовления и заточки зубьев инструмента. Эта схема широко применяется для изготовления круглых, шлицевых, квадратных и других видов протяжек. При снятии больших припусков и обработки широких поверхностей используется групповая схема обработки (рис. 276, в), когда все зубья распределены по группам по два—три зуба в каждой, а каждый зуб в группе снимает слой металла не по всей ширине, а частями. Такая схема обеспечивает уменьшение силы резания по сравнению с другими методами.

## 5. Протяжные станки

Протяжные станки характеризуются простотой конструкции и эксплуатации. Это объясняется тем, что при этом методе обработки получение любой фасонной поверхности производится за счет прямолинейного перемещения протяжки, фасонные зубья которой обеспечивают изготовление заданной формы детали. Протяжные станки имеют гидравлический привод, что позволяет обеспечивать любые необходимые тяговые усилия. В зависимости от вида обрабатываемых поверхностей различают станки для внутреннего и наружного протягивания, а по направлению перемещения протяжек — на горизонтальные и вертикальные.

Горизонтально-протяжные станки применяются для обработки отверстий (рис. 277). Протяжка 5 вставляется хвостовиком в предварительно изготовленное отверстие заготовки 7 и закрепляется в патроне каретки станка 4. При включении станка гидроцилиндр 3, установлен-

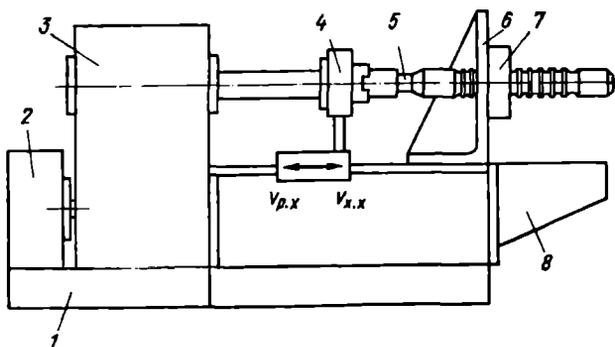


Рис. 277. Общий вид горизонтально-протяжного станка

ный на станине 1 с помощью гидростанции 2, сообщают каретке 4 с закрепленной в ней протяжкой поступательное движение. Заготовка при протягивании опирается торцом на опорный кронштейн 6. После прохождения протяжки через обрабатываемую заготовку заготовка падает в корыто 8, а протяжка освобождается из патрона каретки, и каретка вхолостую возвращается в исходное положение.

Вертикально-протяжные станки применяются в основном для наружного протягивания. Принцип работы таких станков аналогичен принципу работы горизонтально-протяжных. Для повышения производительности труда в массовом производстве широко применяются протяжные станки непрерывного действия.

Поверхности, подлежащие обработке протягиванием, должны быть предварительно подготовлены путем сверления отверстий или их растачиванием. В некоторых случаях отверстия, полученные при литье или штамповке, можно протягивать без предварительной подготовки. Если торец заготовки, в которой протягивается отверстие, не обработан, то для установки детали применяются приспособления со сферической опорной поверхностью, обеспечивающие самоустановку детали по оси протяжки.

На специальных протяжных станках можно обрабатывать наружные поверхности заготовок типа тел вращения дисковыми протяжками. В этом случае заготовке сообщается круговая подача, а протяжке главное движение — вращение вокруг оси. Протягиванием изготавливают также цилиндрические и конические зубчатые колеса с прямыми зубьями.

Вследствие сложности и трудоемкости изготовления протяжек и их высокой стоимости протягивание экономически выгодно только в условиях крупносерийного и массового производства.

## Глава 7 ЗУБОНАРЕЗАНИЕ

### 1. Общие сведения

Зубчатые передачи — наиболее распространенные и важные из всех типов передач, применяемых в технике. Они делятся на цилиндрические, конические, винтовые, гипоидные, червячные, спиральные. Форма зубьев и размеры зубчатых колес определяются числом зубьев  $z$  и величиной модуля  $m$ , равного отношению диаметра делительной окружности к числу зубьев колеса:  $m = D / z$ . Для изготовления зубчатого

колеса на заготовке необходимо прорезать канавки, профиль которых должен соответствовать профилю зубьев нарезаемого колеса. Изготовление зубчатых колес может осуществляться двумя методами — копированием и обкаткой.

## 2. Нарезание зубчатых колес методом копирования

Метод копирования (рис. 278) основан на том, что каждая впадина нарезаемого зубчатого колеса 2 образуется фрезерованием ее фасонной фрезой 1, форма зубьев которой соответствует форме впадины между зубьями колеса. Для этого чаще используются модульные фрезы (рис. 278, а), а иногда концевые модульные фрезы (рис. 278, б) на вертикально-фрезерных станках. При таком методе за один проход на заготовке

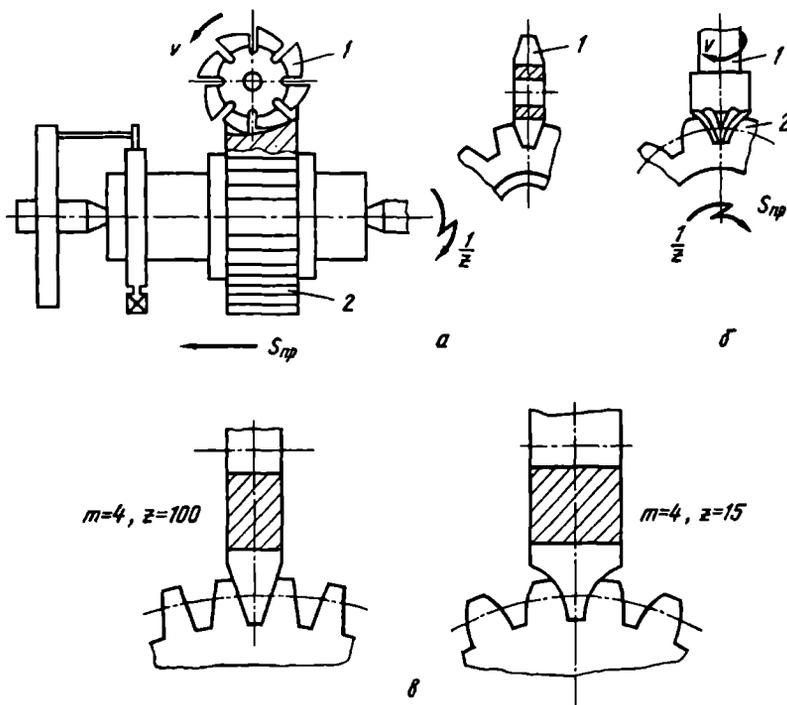


Рис. 278. Схемы фрезерования зубьев по методу копирования

нарезается одна впадина, а затем с помощью делительной головки заготовка поворачивается на  $1/z$  часть окружности для фрезерования следующей впадины ( $z$  — число зубьев зубчатого колеса).

Необходимо иметь в виду, что при одном и том же модуле зацепления  $m$  форма боковой поверхности зуба зависит от числа зубьев зубчатого колеса (рис. 278, в). Поэтому для нарезания методом копирования зубчатых колес с точным профилем надо иметь для каждого модуля и числа зубьев отдельные фрезы, что нереально. На практике для каждого модуля используются наборы фрез, состоящие из 8, 15 или 26 фрез. Каждая фреза из данного набора предназначена для нарезания колес в некотором диапазоне чисел зубьев данного модуля с некоторой погрешностью.

Нарезание зубчатых колес методом копирования не обеспечивает высокой точности профиля и допускается в тех случаях, когда возможно использовать зубчатые колеса с неточным профилем, а также для предварительного нарезания колес больших модулей.

Производительность этого метода невысока. Однако для этого способа не требуется сложных станков и работу можно выполнять на универсальных фрезерных станках относительно несложным и недорогим режущим инструментом.

### 3. Нарезание зубчатых колес методом обкатки

Метод обкатки состоит в том, что при нарезании зубчатого колеса заготовке и инструменту принудительно сообщаются движения, воспроизводящие работу соответствующего зубчатого зацепления: пары зубчатых колес, зубчатого колеса с рейкой, червяка с червячным зубчатым колесом. Причем взаимные движения заготовки и инструмента должны осуществляться с передаточным отношением воспроизводимой передачи, т. е. в соответствии с передаточным отношением зубчатой передачи  $i = n_2 / n_1 = z_1 / z_2$  или червячной пары  $i = n_2 / n_1 = K / z$ . В случае нарезания колеса методом обкатки профиль зуба нарезаемого колеса не будет зависеть от профиля зубьев режущего инструмента, а обеспечивается автоматически установкой заготовки и инструмента на требуемое расстояние и настройкой скорости взаимного перемещения инструмента и заготовки. Производство зубчатых колес методом обкатки значительно производительнее метода копирования и обеспечивает большую точность обработки. Нарезание зубьев по методу обкатки производится на специальных зубофрезерных, зубодолбежных и зубострогальных станках.

### 4. Изготовление зубчатых колес на зубофрезерных станках

Нарезание зубчатых колес на зубофрезерных станках основано на имитации работы червячной пары, в которой в роли червяка выступает режущий инструмент — червячная модульная фреза 1, а заготовка 2 имитирует червячное зубчатое колесо (рис. 279, а). Червячная фреза

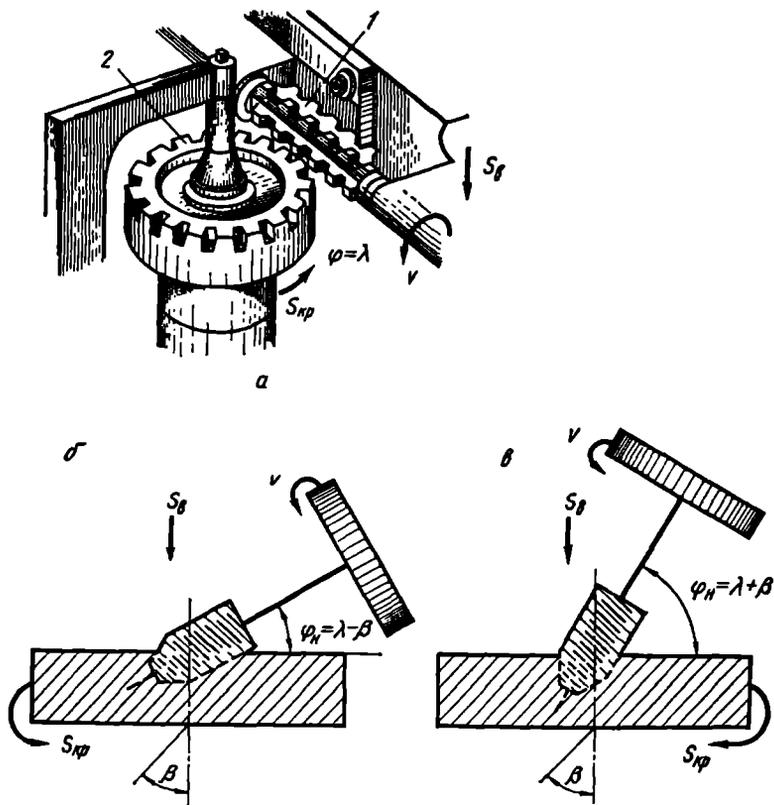


Рис. 279. Схемы фрезерования зубьев по методу обкатки

представляет собой винт-червяк, в котором перпендикулярно его виткам прорезаны канавки, в результате чего образованы режущие зубья. Червячные модульные фрезы используются для нарезания цилиндрических колес с прямыми и косыми зубьями и червячных зубчатых колес. Зубья червячной фрезы расположены по винтовой линии, составляющей с осью угол  $\lambda$ . Для нарезания зубчатых колес фрезу необходимо поставить таким образом, чтобы траектория перемещения ее зубьев в процессе резания проходила по касательной к поверхности зубьев нарезаемого зубчатого колеса. Для этого при изготовлении прямозубых колес фрезу надо установить под углом  $\varphi$ , равным углу подъема витков

фрезы  $\lambda$ . При нарезании косозубых зубчатых колес фрезой с зубьями одинаковой направленности с зубьями колеса угол установки фрез  $\varphi = \lambda - \beta$  (рис. 279, б), где  $\beta$  — угол наклона зубьев зубчатого колеса.

Если наклон зубьев фрезы и нарезаемого зубчатого колеса имеет различную направленность (рис. 279, в), то угол установки фрезы  $\varphi = \lambda + \beta$

При нарезании червячных зубчатых колес угол наклона оси фрезы  $\varphi = 0$ .

Для нарезания зубчатых колес с заданным числом зубьев заготовке и червячной фрезе необходимо придать движения в соответствии с передаточным отношением имитируемой червячной пары

$$i = K / z = n_3 / n_\phi, \text{ откуда } n_3 = n_\phi K / z,$$

где  $K$  — число заходов червячной фрезы;  $z$  — число зубьев нарезаемого колеса;  $n_\phi$  — частота вращения фрезы;  $n_3$  — частота вращения заготовки.

Главное движение при нарезании зубчатых колес на зубофрезерных станках — вращение червячной фрезы  $V$ . Заготовке сообщается круговое движение подачи  $S_{кр}$ , кинематически связанное с вращением фрезы. Для нарезания зубьев по всей ширине зубчатого колеса фрезе сообщается также вертикальная подача  $S_v$ .

На рис. 280 представлена схема зубофрезерного станка. На станине 1 закрепляется неподвижная стойка 2, по вертикальному направляющему которой может перемещаться фрезерный суппорт 3. На шпинделе фрезерного суппорта устанавливается червячная фреза, совершающая главное вращательное движение  $V$ . Заготовки устанавливаются и закрепляются на оправке вращающегося стола 5, совершающего круговую подачу  $S_{кр}$ . Салазки 6 обеспечивают столу с заготовками и стойке 4 горизонтальное установочное перемещение  $S_r$  по направляющим станины 1.

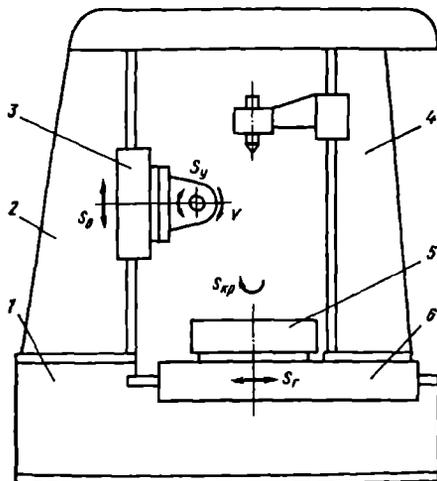


Рис. 280. Общий вид зубофрезерного станка:

$S_v$  — вертикальная подача;  $S_r$  — горизонтальная подача;  $S_{кр}$  — круговая подача

На зубофрезерных станках обрабатываются только цилиндрические зубчатые колеса внешнего зацепления с прямым, наклонным, винтовым, шевронным зубом, а также червячные зубчатые колеса, звездочки, шлицевые валы, червяки.

## 5. Изготовление зубчатых колес на зубодолбежных и зубострогальных станках

Обработка зубчатых колес на зубодолбежных станках также производится методом обкатки. При этом имитируется работа пары сопряженных цилиндрических зубчатых колес. В этом случае режущим инструментом является зуборезный долбяк, представляющий собой цилиндрическое зубчатое колесо с модулем, равным модулю нарезаемого колеса, которое заточкой переднего  $\gamma$  и заднего  $\alpha$  углов (рис. 281, а) преобразовано в режущий инструмент. Главным движением при обработке долблением является вертикальное возвратно-поступательное перемещение долбяка, которое состоит из рабочего  $v_{x.p.}$  (движение вниз) и холостого  $v_{x.x.}$  ходов (возвращение долбяка в исходное положение). Движением подачи является взаимное вращение заготовки и долбяка. Для обеспечения условия обкатки эти движения должны быть кинематически согласованы в соответствии с передаточным отношением имитируемой пары зубчатых колес:

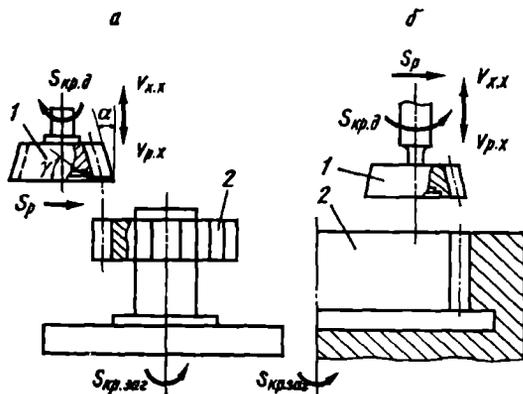


Рис. 281. Схемы нарезания зубчатых колес зубодолблением:

$V_{x.p.}$  — скорость рабочего хода;  $V_{x.x.}$  — скорость холостого хода;  $S_{кр.д.}$  — круговая подача долбяка;  $S_{кр.заг.}$  — круговая подача заготовки;  $S_p$  — радиальное перемещение

$$i = n_3 / n_{\text{долб}} = z_{\text{долб}} / z_3; \quad n_3 = n_{\text{долб}} \cdot z_{\text{долб}} / z_3.$$

При выполнении этого условия долбяк и заготовка в процессе резания как бы находятся в постоянном зацеплении, обкатываясь по начальным окружностям без скольжения.

В начальный период обработки осуществляется плавное радиальное врезание долбяка в заготовку на глубину зуба, а дальнейший процесс зубонарезания происходит при постоянном межцентровом расстоянии между инструментом и заготовкой в течение ее одного оборота.

На зубодолбежных станках нарезаются прямозубые и косозубые колеса. Зубодолбление по сравнению с зубофрезерованием червячными фрезами более производительно при малых модулях ( $m < 2,5$ ). Только методом зубодолбления можно нарезать блоки зубчатых колес с близко расположенными венцами (рис. 281, а), а также колес с внутренним зацеплением (рис. 281, б).

Нарезание прямозубых конических колес осуществляется на зубострогальных станках, работающих методом обкатки. При строгании зубьев воспроизводится зацепление нарезаемого колеса 1 с плоским коническим колесом 2 (рис. 282), представляющим собой кольцевую рейку. Роль двух зубьев воображаемого плоского колеса выполняют два специально профилированных резца, имеющих кроме вращательного движения, имитирующего вращение воображаемого плоского колеса, еще возвратно-поступательное строгальное движение. Вращения нарезаемого и воображаемого плоского колес кинематически увязаны так, как если бы они были в действительном зацеплении. В процессе обкатки два резца обстрагивают один зуб заготовки, после чего резцы выходят из зацепления с нарезаемым колесом, а делительный механизм станка поворачивает нарезаемое колесо на один зуб, и цикл повторяется.

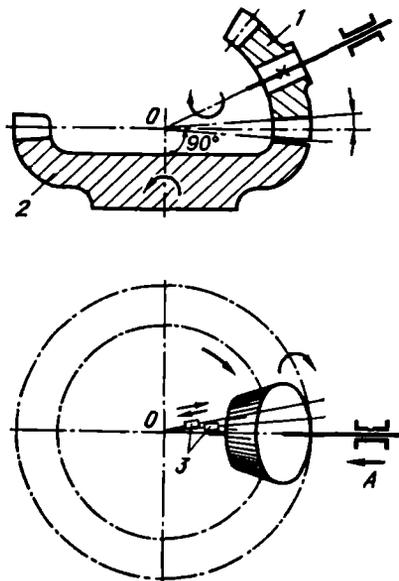


Рис. 282. Принципиальная схема строгания зубьев конического колеса

В тех случаях, когда к точности и шероховатости изготовленных зубчатых колес предъявляются повышенные требования, производится последующая чистовая обработка.

Незакаленные зубчатые колеса подвергаются шевингованию, при котором с рабочих поверхностей зубьев соскабливаются неровности в виде очень тонких стружек инструментом — шевером, или производится совместное обкатывание изготавливаемого колеса с точно выполненным колесом высокой твердости. В этом случае неровности сглаживаются и дополнительно упрочняется рабочая поверхность зубьев. Отделочная обработка закаленных зубчатых колес осуществляется абразивным режущим инструментом методами зубошлифования, зубохонингования и зубопритирки.

## Глава 8 ОБРАБОТКА АБРАЗИВНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

### 1. Общие сведения

Абразивные материалы — это вещества, обладающие чрезвычайно высокой твердостью, теплостойкостью и износостойкостью. Для обработки конструкционных материалов применяются как не связанные друг с другом абразивные зерна (при полировании, притирке и т.д.), так и абразивные инструменты различной формы, в которых абразивные зерна скреплены друг с другом специальными связками.

Шлифование — это процесс резания материалов с помощью абразивного инструмента, режущими элементами которого служат зерна абразивных материалов. Шлифование применяется как для черновой, так и для чистовой и отделочной обработки. При шлифовании главным движением является вращение режущего инструмента (чаще абразивного круга) с очень большой скоростью. Каждое абразивное зерно, удерживаемое связующим материалом, работает как зуб фрезы, снимая стружку. Процесс резания при шлифовании значительно отличается от работы лезвийного инструмента. Это объясняется тем, что зерна имеют не одинаковую геометрическую форму, так как они получаются при дроблении крупных кусков абразивного материала, а в процессе изготовления инструмента расположение зерен относительно обрабатываемой поверхности также не определено. На практике наиболее часто процесс резания происходит при отрицательных передних углах  $\gamma$ , в результате чего происходит интенсивное трение зерен по обрабатываемой поверхности. Вследствие высоких скоростей (30—60 м/с) это при-

водит к мгновенному местному разогреву металла в зоне контакта, что резко повышает его пластичность, способствуя обработке. Однако если при шлифовании не применять смазочно-охлаждающие жидкости, то температура может достигнуть таких величин, при которых в материале обрабатываемой заготовки происходят структурные изменения, отрицательно влияющие на их работоспособность. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей улучшает качество обработки и значительно повышает период стойкости инструмента.

## 2. Абразивные материалы и инструменты

В промышленности находят применение как естественные, так и искусственные абразивные материалы.

К естественным абразивным материалам относятся алмаз, корунд, наждак и некоторые другие. Однако ввиду того, что свойства этих материалов нестабильны, а запасы их ограничены, основное применение в промышленности получили искусственные материалы. К искусственным абразивным материалам относятся электрокорунд, карбид бора, синтетические алмазы и сверхтвердые материалы, полученные на основе кубического нитрида бора.

Электрокорунд представляет собой кристаллический оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ). В зависимости от содержания оксида алюминия различают три типа электрокорунда: нормальный электрокорунд (Э), содержащий до 95 %  $Al_2O_3$ , электрокорунд белый (ЭБ), содержащий 95—98 %  $Al_2O_3$ , и монокорунд, содержащий 98—99 %  $Al_2O_3$ . Чем выше содержание кристаллического оксида алюминия в электрокорунде, тем выше его режущие свойства. Электрокорунд применяется для шлифования сталей, чугунов и цветных металлов. Абразивные инструменты из монокорунда предназначены для полуматового и чистового шлифования деталей из цементированных, закаленных и высоколегированных сталей.

Карбид кремния (карборунд  $SiC$ ) по сравнению с электрокорундом обладает большей твердостью, но и большей хрупкостью. При дроблении его зерна имеют более острые кромки, что обеспечивает повышенную производительность обработки. Карбид кремния выпускается двух марок. Карбид кремния черный (КЧ) содержит 95—97 %  $SiC$  и применяется для обработки хрупких металлических материалов, цветных металлов и неметаллов. Карбид кремния, содержащий не менее 97 %  $SiC$ , имеет зеленый цвет (КЗ) и обладает более высокими свойствами. Он преимущественно используется для заточки твердосплавного режущего инструмента.

Карбид бора ( $B_4C$ ) отличается чрезвычайно высокой твердостью, но очень хрупок и дорог. Используется в основном в виде несвязанных

абразивных зерен для доводки твердосплавного режущего инструмента, притирки, резки драгоценных камней и т.д.

Синтетические алмазы (СА) получают из графита (99,7 % С и 0,3 % примеси) в специальных камерах при давлении около 1,3 ГПа в присутствии катализатора и температурах 1200—2400 °С. В зависимости от температуры получается различная форма кристаллов и окраска от черного цвета при низких температурах до светлого — при высоких.

Синтетические алмазы имеют большую остроту режущих кромок по сравнению с естественными и потому более производительны в качестве абразивного инструмента. Алмаз имеет чрезвычайно высокие режущие свойства, так как он является самым твердым веществом, обладает очень высокой теплопроводностью и износостойкостью, имеет малый коэффициент трения по металлу. Однако он недостаточно теплоустоек (до 800 °С), что позволяет использовать его в основном для обработки хрупких материалов, цветных металлов и неметаллов.

Кубический нитрид бора (КНБ) — эльбор, боразон и другие — синтетический сверхтвердый материал близок по твердости к алмазам, но имеет теплоустойкость почти вдвое более высокую (до 1500 °С). Высокая теплоустойкость и малое химическое сродство с железом позволяет успешно использовать его для обработки высокопрочных и закаленных сталей и сплавов на основе железа.

Зерна абразивных материалов являются режущими элементами абразивных инструментов. Основным видом абразивных инструментов являются шлифовальные круги разной формы и диаметром от 3 до 1100 мм. Среди них наиболее часто применяются следующие формы: плоские прямые (ПП), плоские с выточкой (ПВ), чашечные цилиндрические (ЧЦ) и конические (ЧК), кольца (КК), тарельчатые (ТТ) и т.д.

Свойства абразивных инструментов и их работоспособность определяются маркой абразивного материала, а также характеристиками инструмента — зернистостью абразива, видом смазки, твердостью и структурой.

По размеру абразивные зерна подразделяются на 26 номеров зернистости и делятся на шлиф-зерна (номера зернистости 200—16), шлифпорошки (номера 12—3) и микропорошки (номера зернистости М40—М5). Номер шлифзерна и шлифпорошка соответствует размеру зерен в сотых долях миллиметра, а номер микропорошков показывает размер зерна в микрометрах.

Выбор зернистости абразивного инструмента определяется величиной припуска на обработку, чистотой обработанной поверхности и точностью обработки. Для грубой предварительной обработки и обработки вязких материалов рекомендуются крупнозернистые инструменты, обеспечивающие высокую производительность, но низкое качество. Отделочные работы производятся мелкозернистыми кругами.

Для соединения абразивных зерен в абразивный инструмент служит связка. Связки подразделяются на неорганические и органические. Из неорганических связок чаще всего применяются керамические (К) и силикатные (С).

Керамическая связка состоит из огнеупорной глины, полевого шпата, талька, мела, кварца и жидкого стекла. Благодаря высокой прочности, водостойкости и жаропрочности она является самой распространенной. Недостаток керамической связки — значительная хрупкость.

Силикатная связка представляет собой жидкое стекло и имеет небольшую прочность. Круги на силикатной связке предназначены для обработки деталей в тех случаях, когда не допускается повышение температуры и нельзя применять смазочно-охлаждающие жидкости.

К органическим связкам относятся вулканитовая (В) и бакелитовая (Б).

Вулканитовая связка состоит из 70 % каучука и 30 % серы. Абразивные инструменты на такой связке обладают большой прочностью, но имеют малую теплостойкость (150—190 °С). Связка применяется для узких фасонных кругов.

Бакелитовая связка представляет собой синтетическую смолу. Круги, изготовленные на этой связке, прочны и эластичны, допускают большие окружные скорости, но также могут применяться при температуре не выше 180 °С.

Алмазные круги состоят из стального, алюминиевого или пластмассового кольца (основания) и закрепленного на нем алмазоносного слоя толщиной 1,5—5,0 мм.

Абразивный инструмент должен обладать определенной твердостью. Под твердостью понимается способность связки удерживать абразивные зерна. В соответствии с этим разработана шкала твердости, согласно которой все абразивные круги делятся на 16 степеней твердости. Для каждого конкретного случая обработки необходимо подбирать инструмент определенной твердости. В круге повышенной твердости при работе продолжают удерживаться затупившиеся зерна, что приводит к повышению температуры в зоне резания и прижогу обрабатываемой поверхности. Такой круг требует частой правки для восстановления режущей способности. Слишком мягкий круг будет сильно изнашиваться, при этом будут выкрашиваться зерна, не потерявшие еще своей остроты.

При подборе круга для данных условий обработки стремятся добиться «самозатачивания» инструмента. В этом случае своевременно будут выкрашиваться затупившиеся зерна и открываться новые, острые.

В любом абразивном инструменте наряду с абразивными зернами и связкой имеются поры (пустоты), способствующие его охлаждению в процессе работы. Структура абразивного инструмента определяется ко-

личественным соотношением в нем зерен, связки и пор. Имеется 13 номеров структур. Чем больше номер структуры, тем меньше в единице объема зерен и больше пор.

Характеристики абразивных кругов маркируются на нерабочей поверхности круга, где приводятся их условные обозначения: вид абразивного материала, зернистость, твердость, связка, структура, форма, размер и допустимая максимальная скорость вращения.

В процессе работы шлифовального круга абразивные зерна изнашиваются и теряют режущую способность, а круг засаливается продуктами обработки. Для восстановления режущих свойств и геометрической формы производится периодическая правка круга. Наиболее качественная правка производится алмазными инструментами. Более грубая правка осуществляется шарошками, оснащенными монолитными твердосплавными дисками, металлическими дисками и звездочками из износостойких сталей или правочными кругами из карбида кремния, термокорунда и т. д.

### 3. Схемы шлифования

В зависимости от вида обрабатываемых поверхностей различают следующие способы шлифования: наружное круглое, внутреннее круглое, плоское и шлифование фасонных поверхностей. При всех способах шлифования главным движением является вращение шлифовального круга, а характер движений подачи определяется схемой шлифования.

Наружное круглое шлифование (рис. 283) применяется для обработки наружных осесимметричных поверхностей (цилиндрических, конических, канавок и т. п.) и может осуществляться четырьмя основными способами.

При круглом шлифовании с продольной подачей (рис. 283, *a*) инструмент имеет главное движение, заготовка совершает вращательное движение (круговую подачу  $V_з$ ), столу совместно с деталью сообщается продольное перемещение вдоль оси  $S_{пр}$ .

В конце продольного перемещения шлифовальному кругу сообщается движение подачи  $S_n$  перпендикулярно оси заготовки для установки его на глубину резания  $t$ . Этот способ шлифования обеспечивает максимальную точность обработки.

Шлифование с поперечной подачей или врезное шлифование (рис. 283, *б*) применяется для обработки заготовок небольшой длины. В отличие от предыдущего метода здесь отсутствует продольная подача, а поперечная подача непрерывная. В некоторых станках для обеспечения равномерного износа шлифовального круга он получает небольшие продольные перемещения. Метод обеспечивает высокую производительность обработки, но невысокую точность и требует частой правки круга.

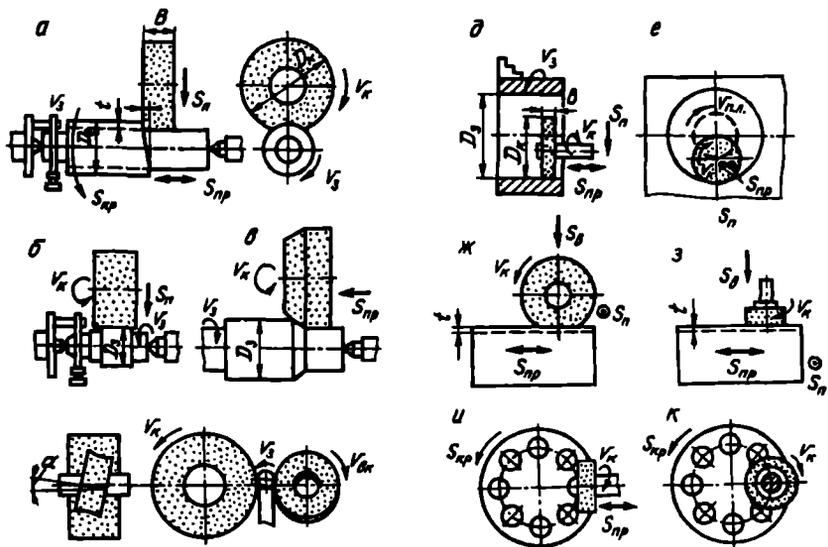


Рис. 283. Схемы шлифования:  $V_3$  — скорость вращения заготовки;  $V_k$  — скорость вращения шлифовального круга;  $D_3$  — диаметр заготовки;  $D_k$  — диаметр шлифовального круга;  $B$  — ширина шлифовального круга;  $S_{np}$  — продольная подача;  $S_{п}$  — поперечная подача;  $S_{кр}$  — круговая подача;  $S_v$  — вертикальная подача;  $t$  — глубина резания

Этот метод применяется также для обработки фасонных поверхностей небольшой длины.

При глубинном шлифовании (рис. 283, в) шлифовальный круг сразу устанавливается на полную глубину шлифования  $t$  и весь припуск (0,1—0,3 мм на сторону) снимается за один проход с продольной подачей 1—5 мм/об. Для обеспечения процесса резания круг заправляется (затачивается) на конус. Этот способ обеспечивает высокую производительность, но не обеспечивает высокой точности обработки.

Бесцентровое шлифование (рис. 283, г) используется в крупносерийном и массовом производстве. Заготовка не закрепляется в центрах, как в предыдущих методах, а, опираясь на упор, подается между вращающимися в одном направлении ведущим и шлифующим абразивными кругами. Ведущий круг выполнен на эластичной основе, вращается с малой скоростью ( $V_{в.к.} = 10...80$  м/мин) и, вдавливаясь абразивными зернами в поверхность заготовки, производит ее вращение (круговая подача  $V_3$ ). Шлифующий круг вращается с обычными для шлифования скоростями ( $V_{в.к.} = 30...40$  м/с) и производит обработку поверхности.

Для обработки длинных деталей ведущий круг устанавливается под углом к оси шлифующего ( $\alpha = 1...5^\circ$ ), чем обеспечивается заготовке продольная подача.

Достоинствами бесцентрового шлифования является высокая производительность, уменьшение времени на установку, снятие деталей, легкость встраивания в автоматические линии. Однако при этом способе невозможно обеспечить строгую соосность внутренних и наружных поверхностей.

При круглом внутреннем шлифовании различают обычное (рис. 283, *д*) и планетарное (рис. 283, *е*) шлифование. При обычном внутреннем шлифовании все движения аналогичны движениям при наружном шлифовании с продольной подачей. Диаметр круга  $D_k$  выбирается в зависимости от диаметра  $D_3$  шлифуемого отверстия:

$$D_k = (0,75...0,95) D_3.$$

Планетарное шлифование применяется при обработке отверстий в крупных заготовках или в тех случаях, когда заготовку неудобно вращать вокруг оси обрабатываемого отверстия (длинные пластины и рычаги с отверстиями на концах и т.д.). В этом случае деталь неподвижна, а круг совершает все необходимые для обработки движения: вращение вокруг своей оси со скоростью резания  $V_k$ , круговое движение вокруг оси обрабатываемого отверстия (круговую подачу  $V_{пл}$ ), возвратно-поступательное движение вдоль оси отверстия (продольную подачу  $S_{пр}$ ) и в конце двойного хода поперечную подачу  $S_{п}$ .

Плоское шлифование осуществляется периферией или торцом круга. Движение продольной подачи может быть прямолинейным (рис. 283, *ж*, *з*) или круговым (рис. 283, *и*, *к*). Если ширина круга меньше ширины обрабатываемой поверхности, то кругу сообщают поперечную подачу в конце каждого продольного хода. Шлифование торцом круга более производительно, но менее точно.

Перспективным является скоростное шлифование при скоростях круга 50—100 м/с. Для этого используют специальные круги с повышенным сопротивлением на разрыв. Это, как правило, высокопористые круги малой массы. Скоростное шлифование позволяет улучшить чистоту обработки при небольших величинах подач, а при увеличенных подачах повышает производительность.

В зависимости от назначения шлифования (черновое или чистовое) и способа задаются различные величины элементов резания.

Глубина резания при круглом наружном и внутреннем шлифовании задается в диапазоне  $t = 0,005...0,05$  мм. При чистовом шлифовании выбирается глубина меньше  $t = 0,002...0,01$  мм. В случае глубинного шлифования, когда весь припуск снимается за один проход:  $t = 0,1...0,4$  мм. При плоском шлифовании глубины резания несколько больше и составляют  $0,015...0,15$  мм.

Скорость резания выгодно задавать возможно большей, однако она ограничивается прочностью круга. При шлифовании кругами на керамической связке  $V_{в.к.} = 30...35$  м/с, на бакелитовой —  $V = 35...40$  м/с. Специальные круги для скоростного шлифования выдерживают скорость до 100 м/с.

Круговая подача (скорость вращения заготовки) значительно меньше скорости вращения круга  $V_3 = 15...80$  м/мин.

Силы резания при шлифовании значительно меньше, чем при точении. Однако, несмотря на это, они могут вызвать отжим детали, соизмеримый с выбранной глубиной резания. Это заставляет ограничивать величины глубины резания, а в конце обработки для повышения точности и чистоты рекомендуется давать несколько ходов без поперечной подачи — так называемое «выхаживание».

В промышленности наибольшее применение находят круглошлифовальные, внутришлифовальные, плоскошлифовальные и заточные станки. Кинематическая схема шлифовальных станков несложная. Как правило, вращение круга и заготовки осуществляется непосредственно с помощью гидравлических механизмов возвратно-поступательного перемещения. Вследствие малых величин сил резания при плоском шлифовании заготовки закрепляются на электромагнитных столах, что сокращает вспомогательное время, а также уменьшает деформацию деталей.

#### 4. Отделочные методы абразивной обработки

При изготовлении высокоскоростных и высокоточных изделий качество поверхностей, полученных при шлифовании, не отвечает требованиям, необходимым для нормального функционирования деталей. В этих случаях применяют отделочные методы обработки: полирование, притирку, хонингование, суперфиниширование.

Полированием уменьшают высоту микронеровностей после шлифования и получают зеркальные поверхности. Обработка производится абразивными пастами, нанесенными на быстро вращающиеся эластичные круги. Хорошие результаты достигаются полированием движущимися бесконечными абразивными лентами. Обрабатываемая деталь подносится к носителю абразивного вещества и перемещается относительно него так, чтобы обработке подвергались заданные участки поверхности. Полирование может производиться автоматически и вручную.

При полировании не исправляются дефекты формы, полученные во время предыдущей обработки. Полирование поверхности приводит к повышению усталостной прочности и коррозионной стойкости. Его используют также для декоративных целей и перед нанесением гальванических покрытий. Полирование заготовок сложной формы и особенно

фасонных полостей обычными методами чрезвычайно сложно, а в ряде случаев невозможно.

Метод абразивно-жидкостной обработки позволяет достаточно просто решать эти задачи. Обработка производится струей водоабразивной суспензии, которая под большим давлением подается на обрабатываемую поверхность (рис. 284, а).

Регулируя давление в нагнетающей магистрали, скорость струи, угол наклона потока к обрабатываемой поверхности и зернистость абразива, можно регулировать интенсивность съема металла и качество обработки.

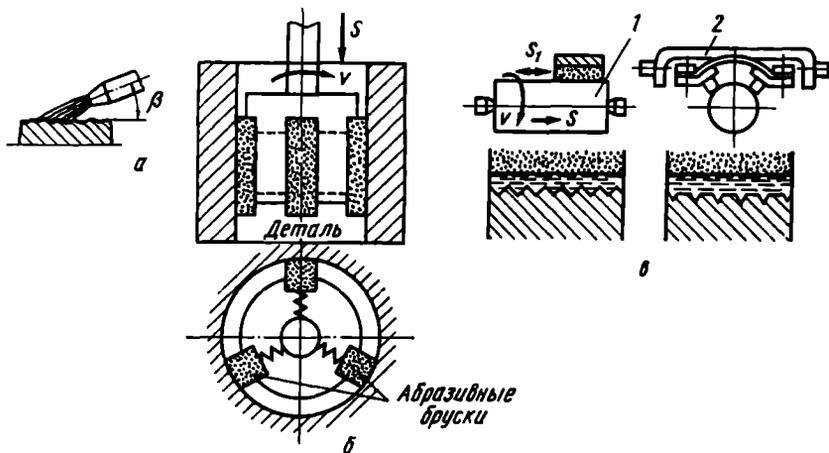


Рис. 284. Схемы отделочных методов абразивной обработки

Детали, обработанные на металлорежущих станках, практически всегда имеют некоторые отклонения по форме и размерам от заданных чертежом. Если величина этих отклонений значительна, то их устраняют тонкими методами обработки резанием, а оставшиеся макроотклонения (волнистость, отклонение от плоскостности, цилиндричности и т.д.) могут быть устранены притиркой (доводкой). Этот метод позволяет достичь наивысшей степени точности и наименьшей шероховатости поверхности. Притиркой обрабатываются плоские, осесимметричные и фасонные поверхности. Процесс осуществляется с помощью очень точно изготовленных притиров соответствующей формы, на которые наносятся притирочные пасты. Так как материал притира выбирается мягче материала обрабатываемой детали, то абразивные зерна вдавливаются в поверхность притира, образуя как бы очень точный абразивный инст-

румент. В процессе притирки притир и обрабатываемая деталь совершают движения относительно друг друга.

Разновидностью притирки является доведение двух сопрягаемых поверхностей до нужной степени плотности контакта (на запорной гидравлической и газовой арматуре, горловинах герметичных емкостей и т.д.). В этом случае на поверхность одной из деталей наносится притирочная паста и производится взаимная приработка соединяемых поверхностей. В зависимости от масштаба производства и формы обрабатываемых деталей притирка может производиться на универсальных или специальных станках или вручную.

Хонингование применяется для получения отверстий высокой точности, малой шероховатости и высокой степени цилиндричности, а также для создания на стенках отверстия специфического микропрофиля, способствующего лучшему удержанию смазки.

Обработка производится мелкозернистыми абразивными брусками, установленными в хонинговальной головке (рис. 284, б), конструкция которой позволяет раздвигать их для увеличения диаметра отверстия. В процессе обработки хонинговальная головка совершает вращательное движение и возвратно-поступательное перемещение вдоль оси отверстия.

В отличие от внутреннего шлифования при хонинговании отсутствует упругий отжим инструмента, что определяет значительное увеличение качества обработки.

Число брусков в хонинговальной головке кратно трем, что обеспечивает высокую цилиндричность обрабатываемых отверстий. Однако при хонинговании не удастся исправить положение оси отверстия из-за шарнирного закрепления хонинговальной головки в шпинделе станка.

Для обеспечения высокого качества обработки процесс ведется при обильной подаче смазочно-охлаждающей жидкости.

Суперфиниширование является окончательным методом тонкой обработки, в процессе которого получается особо гладкая поверхность (рис. 284, в). При этом значительно уменьшается высота микронеровностей, а микровыступы срезаются и образуют прямолинейную поверхность.

Суперфинишированием чаще обрабатывают наружные цилиндрические поверхности, но в некоторых случаях также плоские, конические, сферические и внутренние цилиндрические поверхности.

Суперфиниширование осуществляется с помощью мелкоабразивных брусков, установленных в специальной головке 2, при вращательном и поступательном движениях заготовки 1 и колебательном движении головки с очень малой амплитудой и большой частотой. Процесс резания осуществляется при постоянном давлении брусков в присутствии смазки малой вязкости.

В начале обработки, когда на поверхности имеются острые гребешки, масляная пленка под давлением абразивных брусков прорывается и гребешки срезаются. Когда гребешки сглажены, смазка образует сплошную пленку на поверхности детали, давления брусков становится недостаточно, чтобы ее прорвать, и процесс обработки прекращается.

Суперфинишированием значительно уменьшается величина шероховатости поверхности, но практически не устраняются погрешности формы, получаемые в процессе предыдущей обработки.

## Глава 9

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

### 1. Общие сведения

В зависимости от масштаба производства (единичного, серийного, массового) предприятия оборудуются различными станками.

При единичном производстве используется универсальное оборудование, позволяющее выполнять различные работы при быстрой переналадке на изготовление других деталей. Однако производительность такого оборудования низкая и для ее повышения осуществляются механизация и автоматизация наиболее трудоемких процессов. Под механизацией понимается применение устройств, заменяющих мускульный труд человека (ускоренные перемещения суппортов, установка и закрепление деталей и т.д.). При автоматизации ручное управление производственным процессом заменяется автоматическими устройствами (автоматизация цикла обработки на станках с различного рода копировальными устройствами).

В условиях массового производства наиболее рентабельны станки-автоматы, в которых автоматизирован как процесс установки и съема заготовки, так и весь цикл ее обработки. Достоинствами таких станков являются высокая производительность, автоматический цикл обработки, но такие станки предназначены чаще всего для изготовления деталей определенного типоразмера и требуют чрезвычайно длительной переналадки для изготовления другой, даже подобной детали.

Значительно более быструю переналадку по сравнению со станками автоматами обеспечивает применение агрегатных станков, рентабельных в серийном производстве. Причем такие станки имеют высокую производительность, позволяют осуществлять многоинструментальную обработку деталей одновременно с нескольких сторон при автоматиче-

ском цикле обработки. Агрегатные станки komponуются из нормализованных элементов (станины, стойки, многопозиционные столы, шпиндельные и силовые головки) в соответствии с назначением данного станка.

Агрегатные станки экономически невыгодны в условиях мелкосерийного и единичного производства.

## 2. Станки с программным управлением

В настоящее время большое количество изделий изготавливается в условиях единичного и мелкосерийного производства. Для обеспечения высокой производительности и низкой себестоимости их изготовления требуются особые станки, которые наряду с автоматическим циклом обработки позволяют осуществлять быструю переналадку на изготовление других, значительно отличающихся по форме деталей. Такими станками являются станки с числовым программным управлением. Сущность станков с ЧПУ состоит в том, что программа выполнения всех необходимых для изготовления детали перемещений исполнительных органов (скорости, направления, величины) записывается с помощью числового кода на программоносителе. Записанная программа выводится в считывающее устройство станка, в котором она преобразуется в командные импульсы, передающиеся исполнительным органом станка и обеспечивающие их необходимые перемещения.

Эффективность систем с ЧПУ объясняется тем, что изменение программы не требует существенной перестройки станка. Станки с ЧПУ позволяют в 3—6 раз повысить производительность труда в мелкосерийном и единичном производстве, одновременно повышая качество обработки и стабильность размеров. Существует несколько систем числового программного управления. По виду управления движениями исполнительных органов различают позиционные, прямоугольные и непрерывные системы.

Позиционные системы управления обеспечивают заданное положение инструмента относительно заготовки. Прямоугольные предназначены для сообщения исполнительным органам рабочих перемещений параллельно или перпендикулярно выбранным осям координат, а непрерывные системы управления обеспечивают перемещение исполнительных органов по сложным, криволинейным траекториям.

По характеру контроля правильности выполнения заданных команд системы управления подразделяются на разомкнутые, замкнутые и самонастраивающиеся. Наиболее простыми являются разомкнутые системы (без обратной связи). В них не осуществляется контроля правильности выполнения исполнительными органами заданных команд.

В замкнутых системах (с обратной связью) осуществляется контроль за правильностью выполнения каждой заданной команды, что обеспечивает значительно большую точность обработки.

В самонастраивающихся системах, кроме контроля правильности выполнения команд, осуществляется непрерывный контроль формы и размеров изготавливаемых деталей и при появлении отклонений от эталона система автоматически поднастраивается для ликвидации этих отклонений.

### 3. Многооперационные станки

Обработка сложных корпусных деталей состоит из ряда разных операций: фрезерования, сверления, точения, нарезания резьб и т.д. Выполнение каждой операции на соответствующем станке связано с установкой, выверкой, закреплением, снятием заготовки и ее транспортировкой к следующему станку. Практика показывает, что суммарное время обработки сложной детали на всех станках в соответствии с технологическим процессом может составлять до 5 % от времени, затраченного на изготовление детали. Остальное время расходуется на установку — снятие заготовки, транспортировку, складирование деталей в ожидании обработки и т.п. Кроме того, многократная перестановка детали значительно снижает их точность.

Для обработки таких сложных деталей предназначены высокоавтоматизированные станки с ЧПУ, оснащенные устройствами для размещения и автоматической смены режущих инструментов в заданной последовательности. Такие станки называют обрабатывающими центрами или многооперационными (многофункциональными) станками. Это не просто усовершенствованные станки с ЧПУ, а одно из перспективных направлений развития металлорежущего оборудования. Несмотря на значительное удорожание многооперационных станков, их применение экономически выгодно из-за резкого повышения производительности, за счет сокращения вспомогательного времени, повышения точности обработки, высокой степени автоматизации и возможности быстрой переналадки на изготовление другой, значительно отличающейся детали.

Наиболее часто используются многооперационные фрезерно-сверльно-расточные станки. Число инструментов, установленных в инструментальных магазинах станков, достигает 120 штук. Причем смена инструментов производится автооператором (роботом) по заданной программе. Для уменьшения времени, затрачиваемого на смену заготовки, применяются различные конструкции поворотных или сменных столов. При этом одна заготовка подвергается обработке, вторая устанавливается и выверяется на другом столе.

Многооперационные станки являются новым этапом развития программного управления. Они позволяют эффективно осуществлять программы большого объема. Если на отдельных простых операциях фрезерования, сверления, резьбонарезания и т.п. возможности станков программного управления используются слабо и их применение часто является нерациональным, то интеграция простых операций в одну общую совокупную программу обработки делает применение станков программного управления рациональным и экономически выгодным. Возможность быстрой переналадки станка на новую деталь делает многооперационные станки особо эффективными в условиях мелкосерийного производства при обработке сложных деталей.

#### **4. Автоматические поточные линии и гибкие автоматические производства**

Автоматизация цикла работы отдельных станков не решает задачи комплексной автоматизации производства. При автоматическом осуществлении отдельных операций остаются нерешенными вопросы межоперационной передачи детали со станка на станок, что обуславливает их пролеживание в ожидании освобождения следующих по технологическому циклу станков.

Комплексно автоматизировать процесс обработки деталей удастся с помощью автоматических поточных линий, под которыми понимается совокупность станков, производящих автоматическую обработку деталей, связанных воедино транспортными и установочными механизмами, которые автоматически осуществляют и связывают технологические операции в установленной последовательности без вмешательства рабочего.

В условиях массового производства автоматические линии komponуются из универсальных автоматов и полуавтоматов или агрегатных станков. Применение таких автоматических линий позволяет в 2 раза сократить количество станков, сэкономить производственные площади. Количество работающих сокращается в 5—8 раз, себестоимость понижается в 3—4 раза, улучшается качество изделий.

Однако в настоящее время большая часть изделий изготавливается в условиях мелкосерийного производства и для того, чтобы автоматизация их изготовления была экономически выгодной, необходимо иметь поточные линии, обеспечивающие быструю переналадку. Поэтому такие линии должны компоноваться на базе станков с ЧПУ, а передающие устройства и роботы также должны управляться по программе. Такие автоматические линии управляются ЭВМ, которая обеспечивает заданную последовательность обработки заготовки на станках и синхронную работу складов заготовок и готовых деталей, смену и установку инстру-

ментов, контроль размеров, работу транспортирующих и всех остальных устройств. Смена программ на всем оборудовании такой линии для перехода на изготовление другой детали происходит быстро, что обеспечивает маневренность производства. Такие автоматические линии являются основным элементом гибких автоматических производств (ГАП).

Использование в ГАП станков с ЧПУ дает возможность их автоматического программирования ЭВМ и централизованное управление действующих линий открывает перспективы распространения автоматизации на функции планирования и управления производством и даже на конструирование изделий. На базе таких участков и линий создаются автоматически действующие цехи и заводы, что является крупным шагом на пути изготовления изделий по безлюдной технологии.

## **Глава 10**

### **ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

#### **1. Сущность методов обработки пластическим деформированием**

Методы обработки поверхностей заготовок без снятия стружки за счет пластической деформации все более широко используются при изготовлении ответственных деталей. Это обусловлено тем, что в процессе пластической деформации происходит упрочнение обработанной поверхности, а за счет пластического смятия микровыступов и заполнения этим металлом микровпадин происходит значительное уменьшение шероховатости поверхностей, резко увеличивается способность деталей сопротивляться знакопеременным (нагрузкам) циклическим нагрузкам, существенно возрастает коррозионная стойкость и износостойкость, сокращается период приработки деталей.

При больших величинах пластической деформации заготовкам можно придавать требуемую форму и размеры. По сравнению с обработкой резанием при этом значительно повышается производительность, экономится материал и повышаются эксплуатационные свойства деталей.

Все методы обработки пластическим деформированием подразделяются на формообразующие и упрочняюще-калибрующие.

## 2. Формообразующие методы

Методы пластического деформирования широко применяются для накатывания резьб, зубчатых колес, шлицевых валов, рифлений, клем и т.п.

При накатывании резьб инструмент, имеющий форму, противоположную профилю накатываемой резьбы, вдавливается в обрабатываемую заготовку и формирует на ней резьбу требуемой формы.

Для накатывания резьб чаще всего применяются две схемы. В первом случае (рис. 285, а) заготовка прокатывается между двумя плоскими резьбовыми плашками 1, 3, одна из которых неподвижна (3), а вторая (1) совершает поступательное перемещение. На рабочих поверхностях плашек нанесена развертка винтовой поверхности накатываемой резьбы. При прокатывании заготовки между плашками на ней выдавливается резьбовой профиль.

При накатывании резьбы роликами (рис. 285, б) заготовка 2 помещается на специальной поддержке 5 между роликами 4. Ролики совершают вращательное движение, а один из них, кроме того, получает движение подачи, перпендикулярное оси заготовки для обеспечения требуемой высоты профиля резьбы.

Для накатывания резьб используют специальные резьбонакатные станки. Производительность таких станков значительно выше, чем производительность резьбонарезных станков. Из-за отсутствия перерезания волокон металла прочность и работоспособность таких резьб значи-

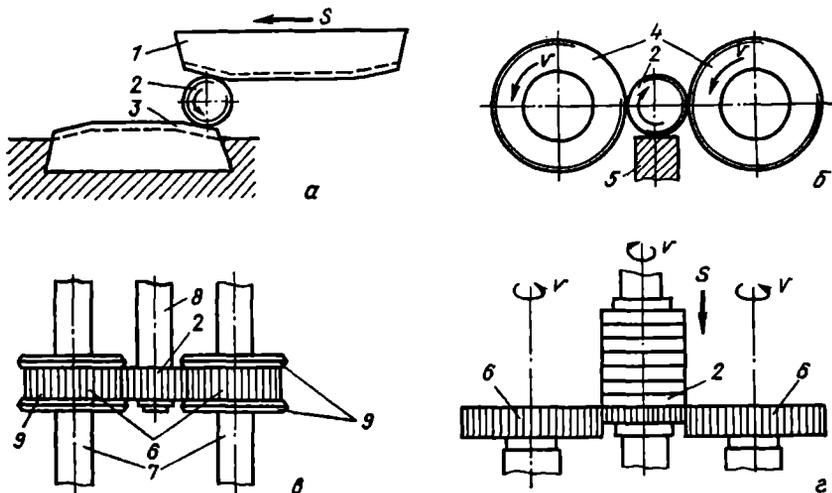


Рис. 285. Схемы обработки заготовок методом пластического деформирования

тельно выше, а поверхность значительно чище, без задигов и рваных витков.

Накатывание зубьев зубчатых колес производится в холодном и горячем состоянии. Мелкомодульные колеса ( $m \leq 1$  мм) накатываются в холодном состоянии, а крупномодульные (до  $m \leq 10$  мм) — в горячем. При накатывании зубчатых колес используется метод обкатки, т.е. воспроизводится зацепление пары зубчатых колес с заданным передаточным отношением  $i = z_3 / z_1$  ( $z_3$  — число зубьев колеса,  $z_1$  — число зубьев инструмента).

Накатывание можно осуществлять с радиальной или с продольной подачей (рис. 285, а, з). В первом случае накатники 6, установленные на шпинделях 7, получают вращательное движение с заданной скоростью и перемещение перпендикулярно оси заготовки 2, установленной на валу 8. После сближения накатников на требуемое расстояние осуществляется накатывание зубьев на заготовке. В процессе работы направление вращения валков периодически изменяется для получения требуемого профиля на обеих сторонах зубьев зубчатого колеса.

При накатывании с продольной подачей (рис. 285, з) заготовки 2, установленные на валу, совершают перемещение вдоль оси. Межосевое расстояние между накатниками и заготовками постоянно. Накатные валки имеют коническую заборную часть с постепенно увеличивающейся высотой зубьев. В процессе накатывания осуществляется синхронизированное вращение валков 6 и заготовок 2 в соответствии с передаточным отношением.

Для получения зубчатых колес высокой точности сначала производится горячее накатывание, а затем холодное калибрование.

Накатыванием изготавливаются как цилиндрические, так и конические зубчатые колеса. Производительность накатывания зубчатых колес во много раз производительнее зубофрезерования. При этом достигается значительная экономия металла, а прочность и работоспособность накатанных зубчатых колес из-за создания в них благоприятной волокнистой структуры и наклепа на поверхности значительно повышены.

Подобными методами производится накатывание шлицевых валков, клейм и рифлений.

### 3. Упрочняюще-калибрующие методы

Прочность и глубина наклепанного слоя, а также степень сглаживания микронеровностей зависят от величины пластической деформации. В промышленности из группы упрочняюще-калибрующих методов чаще всего применяются обкатывание и раскатывание осесимметричных по-

верхностей, калибрование отверстий и упрочняющая обработка поверхностей.

Обкатыванию и раскатыванию подвергаются осесимметричные наружные и внутренние, а иногда и плоские поверхности. Процесс обработки заключается в том, что поверхность вращающейся детали обкатывается прижатыми к ней твердыми роликами различной конструкции (рис. 286, *a*). В зависимости от пластичности обрабатываемого металла и режима обкатки (давления  $p$  и соотношения скоростей вращения и подачи роликов) глубина наклепанного слоя изменяется от 0,2 до 20 мм. Твердость обработанной поверхности после обкатывания повышается на 40—50 %, а предел усталости — на 80 %. Обработка отверстий производится аналогично специальными инструментами — раскатками. В некоторых случаях раскатывание и обкатывание обеспечивает более высокие параметры обработки, чем шлифование и хонингование.

Для обработки выглаживанием нормализованных и закаленных сталей можно рекомендовать алмазное выглаживание. Сущность метода заключается в том, что оставшиеся после предыдущей обработки микронеровности выглаживаются перемещающимся по поверхности прижатым алмазным инструментом. Алмаз, закрепленный в державке, не вращается, а скользит с весьма малым коэффициентом трения. Достоинством алмазного выглаживания является возможность обработки тонкостенных деталей.

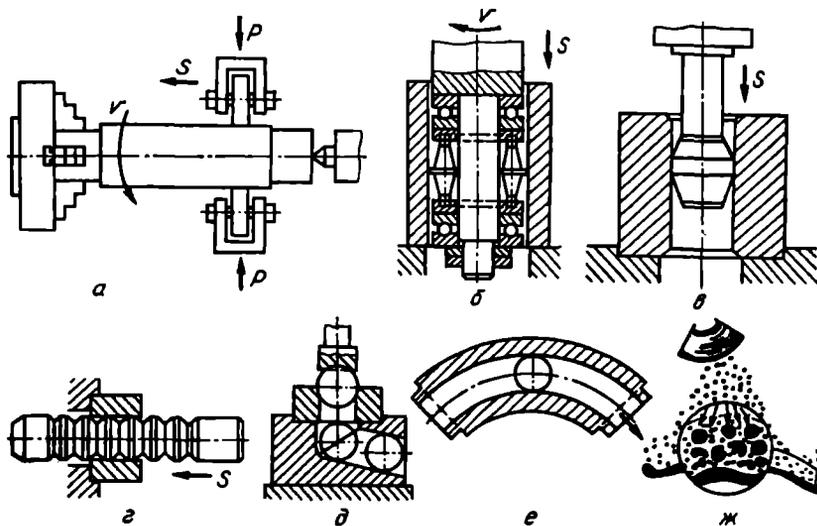


Рис. 286. Схемы упрочняюще-калибрующих методов обработки

Калиброванием повышается точность и качество поверхности отверстий. Метод характеризуется высокой производительностью. Сущность процесса состоит в перемещении сквозь отверстия с натягом жесткого инструмента, размеры которого несколько больше диаметра калибруемого отверстия (рис. 286, б — д).

Наиболее распространена схема калибрования закаленным шариком (рис. 286, з, д), который штоком продавливается через отверстие. Особенно удобен такой метод при калибровании отверстий с криволинейной осью (рис. 286, д, е). В качестве инструмента используется также специальная оправка — дорн, представляющая собой уплотняющую протяжку или прошивку, которая протягивается или проталкивается сквозь обрабатываемое отверстие (рис. 286, б, в).

Процесс калибрования производится со специальной смазкой, благодаря чему уменьшаются рабочие усилия, повышается качество поверхности, увеличивается точность обработки и стойкость инструмента.

Дробеструйная упрочняющая обработка (рис. 286, ж) в основном увеличивает предел усталости обработанных деталей. При таком методе обработки удары концентрируются на поверхности малой площади, в результате чего возникают очень большие местные давления. Наиболее известна упрочняющая обработка стальной или чугуновой дробью. В зависимости от режима обработки глубина наклепанного слоя колеблется в пределах 0,1—1,0 мм. В поверхностном слое создаются благоприятные напряжения сжатия, повышающие работоспособность деталей.

Дробеструйная обработка весьма эффективна при изготовлении деталей, работающих при знакопеременных нагрузках. Ей подвергаются рессоры, пружины, шатуны, лопатки турбин, коленчатые валы, зубчатые колеса и т.д.

## Глава 11

### ЭЛЕКТРОФИЗИКОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки, основанные на различных процессах непосредственного энергетического воздействия на обрабатываемую заготовку, находят в промышленности все более широкое применение. Если при традиционных методах обработки материалов резанием всегда возникает вопрос о возможности обработки определенных типов материалов (твердых сплавов, жаропрочных и коррозионностойких сталей, высокотвердых минералов и т.п.), а некоторые виды работ (отверстия с криволинейной осью некруглого сечения размерами порядка 0,05 мм и т.д.) просто невозможно

выполнить, то с помощью новых методов оказывается возможным решать не только перечисленные, но и многие другие, более сложные задачи. Особенности этих методов является возможность обработки заготовок независимо от твердости материала. При этом твердость обрабатывающего инструмента может быть значительно меньше твердости обрабатываемой заготовки.

В процессе обработки инструмент не оказывает силового воздействия на заготовку, что исключает образование наклепанного поверхностного слоя. Станки для электрической обработки чрезвычайно просты, что позволяет легко автоматизировать их работу.

На станках данной группы изготавливают сложные штампы не только из жаропрочных сталей, но и из твердых сплавов, пресс-формы и другие детали, имеющие в том числе некруглые отверстия очень малых размеров.

В зависимости от вида физико-химических процессов, осуществляющих съем материала, эти методы подразделяются на следующие группы.

*Электроэрозионные методы* основаны на разрушении материала обрабатываемой заготовки с помощью электрических разрядов, возникающих между инструментом и заготовкой. В зависимости от длительности разряда и принятой схемы обработки различают электроискровой, электроимпульсный, электроконтактный и анодно-механический методы.

*Химические и электрохимические методы* основаны на удалении металла с заданных участков заготовки за счет протекания либо химических, либо электрохимических процессов, при которых металл заготовки превращается в химические соединения, легко удаляемые с заготовки.

*Ультразвуковые методы* основаны на снятии с заготовки припуска за счет импульсных воздействий абразивных частиц, которые они совершают под действием ультразвуковых колебаний инструмента.

*Лучевые методы обработки* основаны на воздействии на заготовку высококонцентрированной энергии светового или электронного луча, которая в месте падения преобразуется в тепловую энергию.

В настоящее время наиболее распространены установки для электроэрозионной и химической обработки (75 %), значительно меньше — ультразвуковые (18 %), электрохимические (7 %) и лучевые (1 %).

Широкому применению электрохимических методов препятствуют существенные недостатки. Их точность и производительность значительно ниже, чем традиционных методов, а энергоемкость значительно выше. Поэтому они находят применение лишь в тех случаях, когда другими методами нельзя обеспечить выполнение поставленных задач.

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П.* Технология и оборудование сварки плавлением: Учебное пособие для вузов. — М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
- Бернштейн М.Л., Займовский В.А.* Механические свойства металлов: Учебник для вузов. — 2-е изд. — М.: Металлургия, 1979. 495 с.
- Брок Д.* Основы механики разрушения: Пер. с англ. — М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
- Ван Флек Л.* Теоретическое и прикладное материаловедение. Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1975. 472 с.
- Геллер Ю.А.* Инструментальные стали. — 5-е изд. — М.: Металлургия, 1983. 527 с.
- Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г.* Материаловедение: Учебное пособие для вузов. — 4-е изд. — М.: Металлургия, 1975. 445 с.
- Горбунов Б.И.* Обработка металлов резанием, металлорежущий инструмент и станки: Учебное пособие для вузов. — М.: Машиностроение, 1981. 287 с.
- Грановский Г.И., Грановский В.Г.* Резанием металлов: Учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
- Гуляев А.П.* Материаловедение: Учебник для вузов. — 6-е изд. — М.: Металлургия, 1986. 544 с.
- Жук Н.П.* Курс теории коррозии и защиты металлов: Учебное пособие для вузов. — М.: Металлургия, 1976. 472 с.
- Иванова В.С.* Разрушение металлов. — М.: Металлургия, 1979. 167 с.
- Кочергин К.А.* Контактная сварка. — Л.: Машиностроение, 1987. 240 с.
- Латкин Ю.М.* Материаловедение и термическая обработка металлов: Учебник для вузов. — 4-е изд. — М.: Металлургия, 1993. 447 с.
- Литейное производство: Учебник для вузов. / *Михайлов А.М., Бауман Б.В., Благоев Б.Н.* и др. Под общ. ред. *А.М. Михайлова*. — М.: Машиностроение, 1987. 256 с.
- Материаловедение: Учебник для вузов. / *Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф.* и др. Под общ. ред. *Б.Н. Арзамасова*. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1986. 384 с.
- Материаловедение и термическая обработка стали. Справочник: В 3-х т. Под ред. *М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта*. — М.: Металлургия, 1983.
- Новиков И.И., Строганов Г.Б., Новиков А.И.* Материаловедение, термообработка и рентгенография. — М.: «МИСИС», 1994. 479 с.
- Романов О.А.* Вязкость разрушения конструкционных сталей. — М.: Металлургия, 1979. 176 с.
- Солнцев Ю.П., Степанов Г.А.* Конструкционные стали и сплавы для низких температур. — М.: Металлургия, 1985. 271 с.
- Солнцев Ю.П., Степанов Г.А.* Материалы в криогенной технике. Справочник. — Л.: Машиностроение, 1982. 314 с.
- Степанов Ю.А., Баладин Г.Ф., Рыбкин В.А.* Технология литейного производства. Специальные виды литья. под ред. *Ю.А. Степанова*. — М.: Машиностроение, 1983. 287 с.
- Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. — 4-е изд. — М.: Машиностроение, 1977. 447 с.
- Технология конструкционных материалов: Учебник для вузов. / *Дальский А.М., Арутюнова И.А., Барсукова Т.М.* и др. Под общ. ред. *А.М. Дальского*. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1985. 448 с.
- Технология металлов и материаловедение. / *Кнорозов Б.В., Усова Л.Ф., Третьяков А.В.* и др. — М.: Металлургия, 1987. 800 с.

# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абсорбция 179  
Агломерация 15  
Азотирование 182  
Алитирование 184  
Анизотропия 55, 56  
Аустенит 124, 151, 162, 186  
— остаточный 208  
— превращения 155-159, 187

Борирование 185  
Бюргера вектор 59

Вагранка 21  
Вакансия 57  
Возврат 84  
Время вспомогательное 480  
— обслуживания 480  
— основное технологическое 480  
— штучное 480, 481  
Выносливости предел 100  
Выпор 337, 343  
Вязкость ударная 95

Гидроэкструзия 395—397  
Гинье-Престона зона 238  
Гомогенизация 163  
Графитизация 132  
Гриффитса критерий разрушения 104

Дендрит 69  
Десульфурация стали 30, 33  
— чугуна 20

Дефекты отливки 365—367  
— строения линейные (дислокации) 58  
— — объемные 64  
— — поверхностные 63  
— — точечные 56  
Деформация двойникованием 75  
— пластическая 75  
— при обработке давлением 373  
— — сварке 443—447  
— скольжением 75  
— упругая 74, 75, 91, 373  
Дефосфорация 30

Жаропрочность 224  
Жаростойкость 224  
Жидкость смазочно—охлаждающая 477

Закалка, скорость критическая 167  
— среда 168, 189  
— температура 165  
Заливы 366  
Заусеницы 402  
Зернистости шкала 155  
Зерно действительное 153, 154  
— наследственное 153

Изложница 38  
Излом 97  
Инструмент абразивный 551—554  
— износ 478  
— стойкость 478  
Иоффе—Давиденкова схема 81

**Коагуляция** 163  
**Кокиль** 352, 353  
**Конвертер кислородный** 22, 23  
**Коррозия:**  
    ингибиторы 224  
    межкристаллитная 220  
    местная 220  
    равномерная 220  
    химическая 219  
    электрохимическая 219  
**Кристаллизация** 64—71  
— вторичная 120  
— избирательная 69  
— механизм 67, 68

**Ледебурит** 125  
**Ликвация дендритная** 69  
**Ликвидуса линия** 117

**Мартенсит** 151, 159—161, 208  
**Материалы абразивные** 551—554  
— керамические 324—329  
— — области применения 326  
— — свойства 326  
— — — технические 327, 328  
— клеящие 316, 317  
— композиционные 243, 245  
— — дисперсноупрочненные 242  
— — слоистые 242  
— лакокрасочные 318—320  
— неметаллические, применение 328—335  
— порошковые антифрикцион-  
    ные 265—268  
— связующие 360  
— формовочные 340, 341  
**Машины для литья под давлением** 358—360  
— — — центробежного 356  
— стержневые 348  
— формовочные 344

**Металлизация диффузионная** 184  
**Металлы аморфные** 68  
— свойства механические 74—83  
— — технологические 294, 295  
— — физические 74, 292—294  
— тугоплавкие 226  
**Микролегирование** 185, 186, 274—276  
**Модели выплавляемые** 355  
— для литья в оболочковые формы 361  
**Модифицирование** 68, 145  
**Молоты высокоскоростные** 399, 410  
— газовые 399  
— паровоздушные 399  
— пневматические 399  
— электромеханические 399

**Наклеп** 84—88, 478  
**Напряжения внутренние** 167  
**Нормализация** 150, 165

**Олигомеры** 296  
**Отжиг** 149  
— второго рода 150, 164  
— первого рода 150, 163  
**Отливка** 336  
**Отпуск** 150, 151  
**Отрезков правило** 117, 118

**Пассивация** 221, 223, 231  
**Перегрев** 154, 374  
**Пережог** 154, 374  
**Перекристаллизация** 150, 164  
**Переохлаждение** 66  
**Переплав вакуумно—дуговой** 36  
— электронно—лучевой 37  
— электрошлаковый 36  
**Перитектика** 121  
**Перлит** 126, 151

Плакирование 223, 238

Пластичность 290

Пластмассы:

вещества связующие 303

волокниты 311

гетинакс 312

наполнители 303

пластификаторы 303

свойства 303, 304

термопласты 304—310

— винилпласт 308

— полиамиды 309

— поливинилхлорид 307, 308

— поликарбонат 310

— полипропилен 306

— полистирол 307

— полиуретан 309

— полиэтилен 306

— стекло органическое 309

— текстолит 312

Плены 366

Ползучесть 101, 102, 225

Полимеры:

аморфные 299

искусственные (синтетические) 297

природные 297

свойства механические 300

состав 297

состояние высокоэластическое 301, 302

— вязкотекучее 301, 302

— стеклообразное 301

старение 302

структура 297, 298

— типы 297, 298

термопластичные 299

терморезистивные 299

Потенциал электродный 220

Превращения полиморфные 54, 55

Прибыль 337

Пригар 366

Припой 259, 456, 457

Прокаливаемость 168

Прокатка листов 378, 380

— поперечная 376, 377

— поперечно—винтовая 376, 377

— продольная 378

Прочность теоретическая 60—63

— фактическая 60—63

Разрушение вязкое 76—80

— усталостное 100

— хрупкое 76—80

Раковины газовые 340, 365

— усадочные 340, 365

Раскисление стали 25, 30

Растворимость неограниченная 114, 117

— ограниченная 114, 119

Раствор твердый 115

Рафинирование алюминия 46

— магния 48

— меди 43, 44

— стали 35—37

Резины 313

Рекристаллизация первичная 86

— порог температурный 86

— собирательная 87

Сверхпластичность 407—409

Сверхпроводимость 228

Силицирование 184

Система литниковая 338, 354, 362

Смесь механическая 113, 116

— стержневая 340, 348

— формовочная 340, 341

Солидуса линия 117

Сопrotивление временное 91

Сталь:

автоматная 193

аустенитная 225, 278—281

быстрорежущая 207—209

- высококачественная 136, 137  
 высокопрочная 198, 199  
 Гадфильда 202  
 для работы при низких температурах 273  
 — упругих элементов 229  
 жаропрочная 224—226  
 жаростойкая 224—226  
 износостойкая 202  
 конструкционная 192—202  
 коррозионностойкая 218—224  
 магнитно—мягкая 227  
 магнитно—твердая 227  
 маркировка 191  
 перлитная 225  
 подшипниковая 201, 202  
 раскисление 25, 30, 33, 134, 136  
 рессорно—пружинная 200, 201  
 с малым температурным коэффициентом линейного расширения 228  
 со специальными свойствами 217, 218  
 спокойная 26, 136  
 строительная 193, 194  
 улеродистая 132—137, 204, 205  
 улучшаемая 195—197  
 ферритная 186, 277, 278  
 кладостойкая 274—276  
 цементуемая 195  
 электротехническая 228  
 Старение 151  
 Стекло:  
   виды 321, 322  
   ситаллы 324  
   свойства 322, 323  
 Суперфиниширование 559  
 Твердость по Бринелло 92  
 — — Виккерсу 92  
 — — Роквеллу 92  
 Текстура 84  
 Текучесть, предел 91  
 Теплоемкость 292  
 Теплопроводность 481  
 Теплостойкость 203, 481  
 Трещиностойкость 103—109  
 Удлинение относительное 91  
 Усадка литейных сплавов 365  
 Усталость 98, 99, 101  
 Феррит 124, 186  
 Ферросплав 14  
 Флокены 135  
 Флюсы для пайки 458  
 — — сварки 439, 440  
 — доменные 16  
 Фурма 19, 21, 25  
 Хладагент 90  
 Хладноломкость 82, 96  
 Холла—Петча уравнение 64  
 Хонингование 559  
 Хромирование 184  
 Хрупкость 173  
 Цементация 179, 180  
 Чугун:  
   белый 139  
   высокопрочный 139, 145  
   ковкий 139, 146  
   серый 139, 143, 144  
   с отбеленной поверхностью 139  
 Чушки 22

**Шихта 17, 22, 27, 32**

**Шлак 20, 22, 24, 30, 31, 427**

**Шлифование 550, 554—556**

— внутреннее 556

— наружное 554, 556

— планетарное 556

— плоское 556

**Шов сварной 418, 420, 441, 443, 447**

**Эвтектика 120, 125**

**Эвтектоид 122**

**Электроды для сварки атомно—водородной  
419**

— — — дуговой 416

— — — контактной 429

— — — электрошлаковой 420

**Электропроводность 248**

Учебник для вузов

**СОЛНЦЕВ Юрий Порфирьевич**  
**ВЕСЕЛОВ Владимир Александрович**  
**ДЕМЯНЦЕВИЧ Владимир Петрович**  
**КУЗИН Анатолий Васильевич**  
**ЧАШНИКОВ Дмитрий Иванович**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Редактор издательства *В.П.Молокова*  
Художественный редактор *Л.В.Коновалова*  
Корректор *Т.М.Подгорная*  
Переплет художника *С.К.Девина*

**ИБ-21**

ЛР №020777 от 13 мая 1993 г.  
Подписано в печать 29.01.96. Формат бумаги 60×88 1/16.  
Бумага офсетная №2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 36.  
Уч.-изд. л. 38,78. Тираж 2000 экз. Заказ 336  
Изд. № 188/08-А

•МИСИС• 117936, Москва В-49, Ленинский проспект, д. 4

Производственно-издательский комбинат **ВИНИТИ**  
140010, г. Люберцы 10, Московской обл.,  
Октябрьский проспект, 403