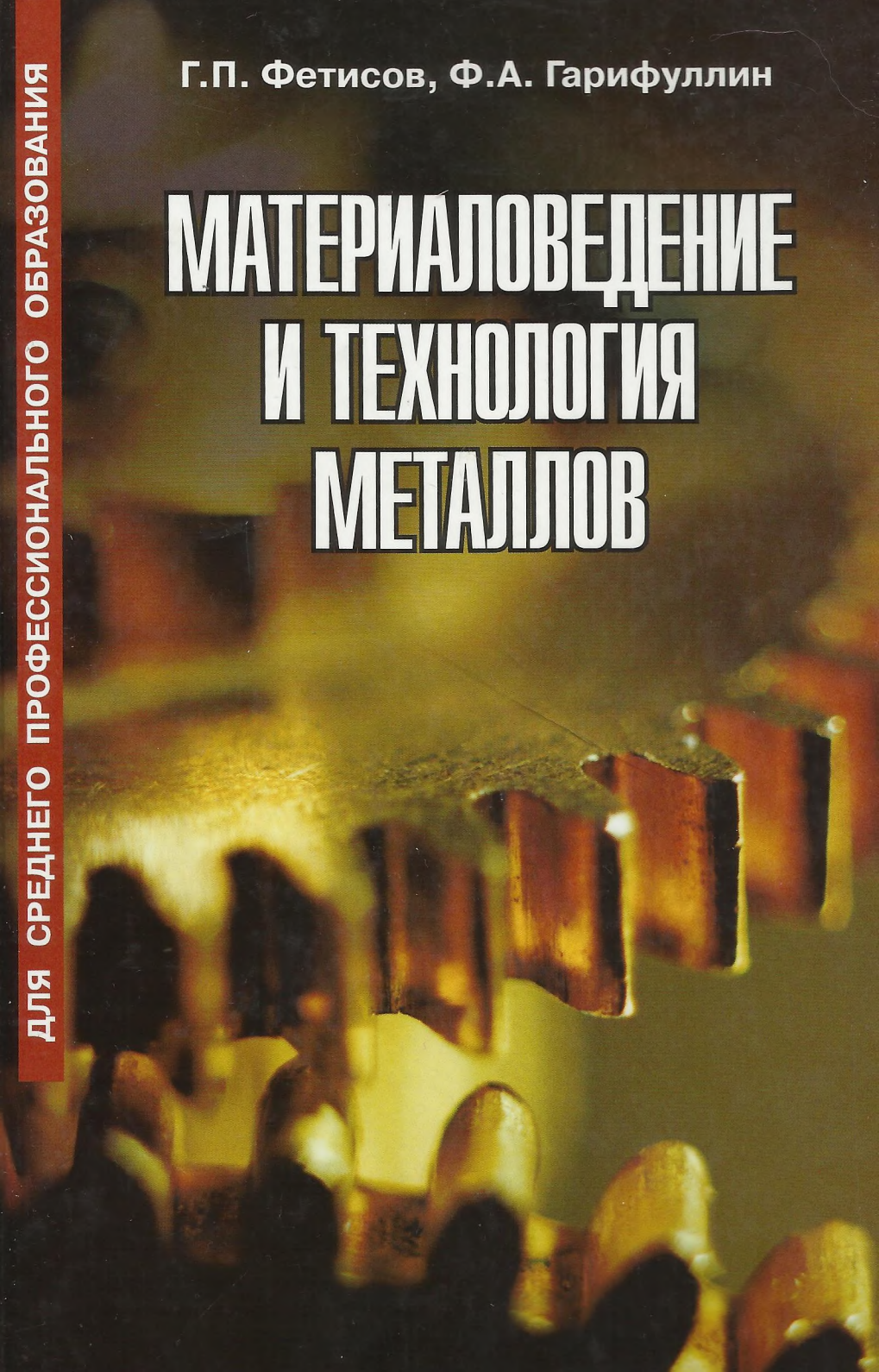


ДЛЯ СРЕДНЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифуллин

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛОВ



Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифуллин

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛОВ

Учебник

*Допущено*

*Министерством образования и науки*

*Российской Федерации в качестве учебника*

*для студентов учреждений среднего профессионального  
образования*

---

Москва  
ОНИКС

УДК 620  
ВБК 30.3:34  
Ф45

*Издано при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и  
массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы  
«Культура России»*

*Рецензенты:*

заведующий кафедрой «Технология металлов» Московского  
энергетического института (ТУ) д-р техн. наук, профессор *В.М.Матютин*;  
заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов»  
Нижегородского государственного технического университета  
д-р техн. наук, профессор *Г.Н.Гаврилов*

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие. ....	12
-------------------	----

## Часть 1. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

### Раздел I. СТРУКТУРА МАТЕРИАЛОВ

Глава 1. Введение в науку о материалах .....	14
1.1. Наука о материалах .....	14
1.2. Конструкционные материалы .....	16
Глава 2. Кристаллическое строение твердых тел .....	20
2.1. Кристаллы .....	20
2.2. Типы связей .....	21
2.3. Виды кристаллов .....	23
2.4. Анизотропия кристаллов .....	24
2.5. Характеристики кристаллических структур .....	26
2.6. Полиморфизм (аллотропия) .....	29
2.7. Аморфные структуры .....	30
2.8. Структура неметаллических твердых тел .....	31
2.9. Прочность и структура материалов .....	33
Глава 3. Дефекты кристаллической решетки .....	34
3.1. Реальное строение металлических кристаллов .....	36
3.2. Точечные дефекты .....	36
3.3. Линейные дефекты .....	37
3.4. Поверхностные, или плоские, дефекты .....	40
3.5. Объемные дефекты .....	40
3.6. Влияние облучения на свойства металлов .....	41
Глава 4. Кристаллизация .....	42
4.1. Энергетические условия процесса кристаллизации .....	42
4.2. Механизм процесса кристаллизации .....	45
4.3. Форма кристаллических образований .....	48
4.4. Строение слитка .....	49



4.5. Вторичная кристаллизация .....	51
4.6. Получение монокристаллов .....	53
<b>Глава 5. Строение сплавов .....</b>	<b>54</b>
5.1. Определение сплава .....	54
5.2. Механическая смесь .....	55
5.3. Твердые растворы .....	56
5.4. Химические соединения .....	57
5.5. Промежуточные фазы .....	58
<b>Глава 6. Диаграммы состояния .....</b>	<b>60</b>
6.1. Определение диаграммы состояния .....	60
6.2. Правило фаз .....	61
6.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы .....	63
6.4. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси чистых компонентов .....	67
6.5. Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии .....	69
6.6. Диаграмма состояния сплавов для случая перитектического превращения .....	70
6.7. Диаграмма состояния сплавов для случая образования химического соединения .....	70
6.8. Диаграмма состояния трехкомпонентного сплава .....	71
6.9. Зависимость между свойствами сплавов и их диаграммами состояния .....	72
 <b>Раздел II. ПЛАСТИЧНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ</b>	
<b>Глава 7. Физические основы пластичности и прочности металлов .....</b>	<b>74</b>
7.1. Общая характеристика механических свойств .....	74
7.2. Физическая природа деформации металлов .....	75
7.3. Пластическая деформация кристаллов .....	78
7.4. Характеристики прочности и пластичности .....	82
7.5. Твердость .....	86
<b>Глава 8. Пластичное и хрупкое состояние металлов .....</b>	<b>88</b>
8.1. Разрушение металлов .....	88
8.2. Факторы, влияющие на пластичное и хрупкое состояние .....	91
8.3. Усталость металлов .....	95
8.4. Изнашивание металлов .....	96
8.5. Остаточные напряжения .....	99
8.6. Влияние нагрева на структуру и свойства холоднореформированных металлов .....	101
8.7. Холодная и горячая деформация .....	106

## Раздел III. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ

<b>Глава 9. Железоуглеродистые сплавы.</b>	108
9.1. Введение	108
9.2. Компоненты и фазы в сплавах железа с углеродом	108
9.3. Диаграмма состояния «железо—цементит»	112
9.4. Диаграмма состояния «железо—графит»	116
9.5. Влияние легирующих элементов на равновесную структуру сталей.	118
<b>Глава 10. Общие положения термической обработки</b>	120
10.1. Температура и время	121
10.2. Классификация видов термообработки	122
10.3. Термообработка и диаграммы состояния	123
10.4. Основные виды термообработки стали	125
<b>Глава 11. Технология термической обработки сталей</b>	128
11.1. Нагрев и охлаждение	128
11.2. Отжиг и нормализация	129
11.3. Дефекты отжига и нормализации	135
11.4. Закалка	137
11.5. Выбор температуры закалки	138
11.6. Закалочные среды	139
11.7. Закаливаемость и прокаливаемость стали	141
11.8. Внутренние напряжения в закаленной стали	142
11.9. Способы закалки	143
11.10. Дефекты, возникающие при закалке	145
11.11. Отпуск	146
11.12. Старение	148
11.13. Обработка холодом	150
11.14. Термомеханическая обработка (ТМО) стали	152
<b>Глава 12. Химико-термическая обработка стали</b>	155
12.1. Определение химико-термической обработки	155
12.2. Цементация	158
12.3. Азотирование	161
12.4. Нитроцементация (цианирование)	164
12.5. Борирование	166
12.6. Диффузионная металлизация (насыщение металлами)	166

## Раздел IV. СТАЛИ И ЧУГУНЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

<b>Глава 13. Конструкционные стали.</b>	171
13.1. Общая классификация сталей	171
13.2. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей	174

13.3. Маркировка сталей . . . . .	177
13.4. Конструкционные стали . . . . .	180
13.5. Углеродистые конструкционные стали . . . . .	180
13.6. Углеродистые стали для фасонного литья . . . . .	184
<b>Глава 14. Легированные конструкционные стали . . . . .</b>	<b>186</b>
14.1. Влияние легирующих элементов на свойства конструкционных сталей . . . . .	186
14.2. Улучшаемые легированные стали . . . . .	191
14.3. Высокопрочные легированные стали . . . . .	192
14.4. Рессорно-пружинные легированные стали . . . . .	195
14.5. Конструкционные (строительные) низколегированные стали . . . . .	197
14.6. Шарикоподшипниковые стали . . . . .	198
14.7. Износостойкие стали . . . . .	199
14.8. Легированные стали для фасонного литья . . . . .	200
<b>Глава 15. Инструментальные стали и сплавы . . . . .</b>	<b>204</b>
15.1. Углеродистые инструментальные стали . . . . .	204
15.2. Легированные инструментальные стали . . . . .	206
15.3. Быстрорежущие стали . . . . .	208
15.4. Твердые сплавы . . . . .	211
15.5. Стали для измерительного инструмента . . . . .	213
15.6. Штамповые стали . . . . .	214
<b>Глава 16. Конструкционные легированные стали и сплавы с особыми свойствами . . . . .</b>	<b>220</b>
16.1. Коррозионностойкие стали . . . . .	220
16.2. Кислотостойкие стали и сплавы . . . . .	225
16.3. Коррозионностойкие чугуны . . . . .	226
16.4. Жаропрочные стали . . . . .	227
16.5. Жаропрочные сплавы на основе никеля и тугоплавких металлов . . . . .	230
16.6. Жаростойкие стали . . . . .	232
<b>Глава 17. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами . . . . .</b>	<b>234</b>
17.1. Магнитные стали и сплавы . . . . .	234
17.2. Стали и сплавы с высоким электрическим сопротивлением . . . . .	243
17.3. Сплавы с заданным значением коэффициента теплового расширения . . . . .	244
17.4. Сплавы с малым температурным коэффициентом модуля упругости . . . . .	246
17.5. Сплавы с особыми упругими свойствами . . . . .	248
17.6. Сплавы с эффектом памяти формы . . . . .	250
17.7. Сплавы для криогенной техники . . . . .	252

<b>Глава 18. Чугуны</b> .....	256
18.1. Структура и свойства чугунов .....	256
18.2. Влияние примесей .....	258
18.3. Серые чугуны .....	259
18.4. Антифрикционные чугуны .....	263
18.5. Белый и отбеленные чугуны .....	264
18.6. Высокопрочные чугуны .....	264
18.7. Ковкие чугуны .....	265
18.8. Легированные чугуны .....	266
18.9. Термообработка чугунов .....	269

## Раздел V. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

<b>Глава 19. Алюминий и его сплавы</b> .....	273
19.1. Характеристика алюминия .....	273
19.2. Классификация сплавов алюминия .....	274
19.3. Термообработка алюминиевых сплавов .....	276
19.4. Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой .....	279
19.5. Деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой .....	282
19.6. Литейные алюминиевые сплавы .....	283
19.7. Спеченные алюминиевые сплавы .....	286
19.8. Алюминиевые подшипниковые сплавы .....	287
<b>Глава 20. Сплавы на основе меди</b> .....	288
20.1. Свойства меди .....	288
20.2. Медные сплавы .....	291
20.3. Латунь .....	291
20.4. Бронзы .....	295
20.5. Медно-никелевые сплавы .....	300
<b>Глава 21. Сплавы на основе титана</b> .....	303
21.1. Свойства титана .....	303
21.2. Промышленные титановые сплавы .....	305
21.3. Термическая обработка титановых сплавов .....	309
<b>Глава 22. Сплавы на основе магния</b> .....	310
22.1. Свойства магния .....	310
22.2. Общая характеристика и классификация магниевых сплавов .....	312
22.3. Промышленные магниевые сплавы .....	313

<b>Глава 23. Сплавы на основе никеля, бериллия и свинца</b> . . . . .	319
23.1. Никель и его сплавы . . . . .	319
23.2. Бериллий и его сплавы . . . . .	325
23.3. Антифрикционные сплавы на свинцовой основе . . . . .	330

## Раздел VI. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

<b>Глава 24. Композиционные материалы</b> . . . . .	334
24.1. Определение композиционных материалов . . . . .	334
24.2. Структура и свойства композиционных материалов . . . . .	335
24.3. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы . . . . .	338
24.4. Композиты, армированные волокнами . . . . .	340
24.5. Наноккомпозиты . . . . .	343
<b>Глава 25. Пластические массы</b> . . . . .	348
25.1. Назначение, состав и классификация пластмасс . . . . .	348
25.2. Свойства пластмасс . . . . .	352
25.3. Классификация пластмасс . . . . .	359
25.4. Пластмассы, применяемые в промышленности . . . . .	360
<b>Глава 26. Резины</b> . . . . .	365
26.1. Основные свойства резины . . . . .	365
26.2. Приготовление резиновых смесей . . . . .	368

## Часть 2. ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛОВ

### Раздел VII. ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

<b>Глава 27. Физическая природа и условия кристаллизации</b> . . . . .	372
27.1. Общие сведения . . . . .	372
27.2. Развитие отечественного литейного производства . . . . .	373
27.3. Физическая природа кристаллизации металлов . . . . .	375
27.4. Литейные свойства . . . . .	379
<b>Глава 28. Литье в песчаные формы</b> . . . . .	385
28.1. Литейная технологическая оснастка . . . . .	385
28.2. Формовочные смеси . . . . .	395
28.3. Стержневые смеси . . . . .	400
28.4. Специальные формовочные смеси . . . . .	401
<b>Глава 29. Специальные виды литья</b> . . . . .	407
29.1. Литье по выплавляемым моделям . . . . .	407
29.2. Литье в оболочковые формы . . . . .	412



29.3. Литье в металлические формы (кокили) . . . . .	414
29.4. Литье под давлением . . . . .	417
29.5. Центробежное литье . . . . .	420
29.6. Специальные способы литья . . . . .	422

## Раздел VIII. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

<b>Глава 30. Физико-механические основы обработки</b>	
металлов давлением . . . . .	427
30.1. Сущность обработки металлов давлением . . . . .	427
30.2. Прокатное производство . . . . .	435
30.3. Волочение . . . . .	440
30.4. Прессование . . . . .	442
<b>Глава 31. Получение машиностроительных заготовок . . . . .</b>	<b>445</b>
31.1. Ковка . . . . .	445
31.2. Объемная штамповка . . . . .	447
<b>Глава 32. Листовая штамповка . . . . .</b>	<b>451</b>
32.1. Листовая штамповка — определение . . . . .	451
32.2. Разновидности листовой штамповки . . . . .	451

## Раздел IX. ОСНОВЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

<b>Глава 33. Общая характеристика сварочного производства . . . . .</b>	<b>458</b>
33.1. Физические основы получения сварного соединения . . . . .	459
33.2. Свариваемость . . . . .	464
<b>Глава 34. Термические виды сварки . . . . .</b>	<b>465</b>
34.1. Ручная дуговая сварка . . . . .	465
34.2. Понятие об электрической дуге и ее свойствах . . . . .	466
34.3. Электроды для ручной сварки . . . . .	471
34.4. Основные виды сварных соединений и металлургические процессы при сварке . . . . .	473
34.5. Оборудование для ручной электродуговой сварки . . . . .	477
34.6. Автоматическая сварка под флюсом . . . . .	481
34.7. Электрошлаковая сварка . . . . .	486
34.8. Электродуговая сварка в среде защитных газов . . . . .	487
34.9. Электронно-лучевая сварка . . . . .	491
34.10. Сварка лазерным лучом . . . . .	494
34.11. Газовая сварка металлов . . . . .	495
34.12. Специальные термические процессы в сварочном производстве . . . . .	501

<b>Глава 35. Сварка давлением с нагревом (термомеханический класс)</b>	<b>507</b>
35.1. Электрическая контактная сварка. Сущность процесса . . . .	507
35.2. Стыковая сварка . . . . .	508
35.3. Точечная сварка . . . . .	512
35.4. Шовная, или роликовая, сварка . . . . .	515
35.5. Сварка аккумулированной энергией . . . . .	516
35.6. Радиочастотная сварка . . . . .	519
35.7. Сварка трением . . . . .	520
35.8. Диффузионная сварка в вакууме . . . . .	521
35.9. Газопрессовая сварка . . . . .	523
<b>Глава 36. Сварка давлением без нагрева . . . . .</b>	<b>526</b>
36.1. Холодная сварка . . . . .	526
36.2. Ультразвуковая сварка . . . . .	528
36.3. Сварка взрывом . . . . .	530
<b>Глава 37. Пайка металлов и сплавов . . . . .</b>	<b>532</b>
37.1. Физическая сущность процесса пайки . . . . .	532
37.2. Материалы для пайки . . . . .	535
37.3. Способы пайки . . . . .	537
37.4. Типы паяных соединений . . . . .	541
37.5. Контроль качества сварных и паяных соединений . . . . .	542
<b>Раздел X. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b>	
<b>Глава 38. Классификация, физико-механические основы обработки металлов резанием . . . . .</b>	<b>549</b>
38.1. Сущность процесса . . . . .	549
38.2. Инструментальные материалы . . . . .	562
38.3. Выбор режима резания . . . . .	565
<b>Глава 39. Обработка заготовок на токарных станках. Типы станков токарной группы . . . . .</b>	<b>567</b>
39.1. Общие сведения о токарных станках . . . . .	567
39.2. Виды токарных резцов . . . . .	573
<b>Глава 40. Обработка заготовок на сверлильных, расточных, строгальных, долбежных и протяжных станках . . . . .</b>	<b>576</b>
40.1. Характеристика метода обработки сверлением и растачиванием . . . . .	576
40.2. Виды режущего инструмента. Элементы и геометрия спирального сверла . . . . .	577
40.3. Методы обработки строганием . . . . .	581

40.4. Особенности обработки на долбежных станках .....	584
40.5. Обработка на протяжных станках .....	585
<b>Глава 41. Обработка заготовок на фрезерных, шлифовальных и отделочных станках .....</b>	<b>587</b>
41.1. Обработка заготовок на фрезерных станках .....	587
41.2. Типы фрезерных станков .....	589
41.3. Виды фрез .....	591
41.4. Элементы и геометрия цилиндрической и торцевой фрез ..	593
41.5. Обработка заготовок на шлифовальных и отделочных станках .....	595
41.6. Шлифовальные круги .....	597
41.7. Типы шлифовальных станков .....	598
41.8. Специальные методы отделки поверхностей .....	600
<b>Глава 42. Основы механизации и автоматизации технологических процессов механической обработки ...</b>	<b>604</b>
42.1. Станки с программным управлением .....	604
42.2. Автоматические линии и комплексная автоматизация производства .....	608
<b>Глава 43. Основы технологии электроэрозионной обработки .....</b>	<b>610</b>
43.1. Электрофизические методы обработки .....	610
43.2. Электрохимические методы обработки .....	614
43.3. Ультразвуковой и лучевой методы обработки .....	615

## Предисловие

Материаловедение и технология материалов относятся к тем дисциплинам, которые формируют основу инженерной подготовки технического специалиста, являются показателями его технической образованности. Наличие необходимых материалов, технологических процессов позволяет претворить идею, замысел разработчика, конструктора в конкретное изделие — нужную для человека техническую продукцию. Повышение качества изделий, рост производительности труда, а в итоге — конкурентоспособности потребовали создания материалов с уникальными свойствами и новых технологических процессов их обработки. Особенно это заметно в авиационно-космической, электронной, радиотехнической, атомной промышленности. Поэтому справедливо утверждение, что производственный и экономический потенциал любой страны в значительной степени определяется состоянием ее материаловедческой и технологической базы, уровнем развития науки и техники. Если в далекие годы технологию могли рассматривать как простое ремесло, то сейчас материаловедение и технология представляют собой обширную, сложную область знаний, базирующуюся на многих смежных, и прежде всего фундаментальных, науках — физике, химии, математике.

Этот учебник позволит учащемуся войти подготовленным в интересный мир производства, обеспечит ему базу для изучения последующих дисциплин технологического цикла.

Раздел «Материаловедение» написан профессором Ф.А. Гарифуллиным, раздел «Технология металлов» — профессором Г.П. Фетисовым.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам — профессорам Г.Н. Гаврилову и В.М. Матюнину — за ценные предложения по улучшению содержания учебника.

# Часть 1

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



---

## *Раздел I*

# СТРУКТУРА МАТЕРИАЛОВ

## Глава 1

### ВВЕДЕНИЕ В НАУКУ О МАТЕРИАЛАХ

#### **1.1. Наука о материалах**

Первые шаги на пути к реальному пониманию свойств материалов были сделаны с наступлением XIX в. Начало этому положила химия, затем физика. Теоретическая химия оказалась весьма полезной и при решении практических вопросов, способствовала появлению более эффективных методов обработки материалов. Так, известный физик Майкл Фарадей (1791–1867) использовал химический анализ при изучении свойств булатной стали. Затем знаменитый русский металлург Павел Петрович Аносов (1799–1851) при исследовании структуры булатной стали одним из первых (в 1831 г.) использовал микроскоп. Он увидел, что булатные узоры связаны со структурой стали и с ее механическими свойствами. Анализ структуры металлов и различных минералов с помощью оптического микроскопа в дальнейшем нашел широкое распространение в трудах английского геолога Генри Сорби (1826–1908).

Эти первые наблюдения изменений, происходящих с внутренней структурой металла, а также новые сведения о со-

ставе вещества, полученные с помощью химии, существенно изменили представления о возможности проникновения в природу материалов.

В последней четверти XIX в. химия и физика уже играли ключевую роль в развитии многих сложившихся к тому времени отраслей, связанных с производством материалов. Здесь уместно отметить роль русского ученого Дмитрия Константиновича Чернова (1839—1921) в становлении науки о материалах. На заседании Российского технического общества в 1868 г. он сообщил об открытии критических точек сталей, впоследствии названных «точками Чернова». На основе глубокого научного анализа Д.К. Чернов объяснил удивительные свойства булатной стали. Его труды ускорили становление науки о материаловедении как точной науки.

В XX столетии химикам и физикам удалось сделать ряд фундаментальных открытий, на которые опираются все современные разработки новых материалов и технологические методы их получения и обработки.

Основной вклад науки в рассматриваемую область состоял в том, что ученым удалось установить взаимосвязь между внешне проявляющимися свойствами материалов и их внутренним строением. Как выяснилось, материалам свойственна определенная внутренняя архитектура, иными словами — иерархическая последовательность структурных уровней, что объясняло многообразие проявляемых материалами свойств. Это предполагало, что поведение того или иного материала можно предсказать заранее, если тщательно изучить его внутреннюю архитектуру.

Появление новых приборов и методов позволило глубже проникнуть в природу материалов. П.П. Аносов и Г.Сорби с помощью оптического микроскопа сумели разглядеть лишь микроструктуру стали. Со временем на смену оптическому пришел электронный микроскоп, позволивший увидеть элементы субструктуры, а затем — растровый электронный микроскоп, с помощью которого стало возможным получать информацию о пространственной структуре поверхности. Кар-

тину пространственного расположения атомов и молекул в кристалле можно получить методом дифракции рентгеновских лучей, а характерные особенности атомов того или иного материала — различными методами спектроскопии, основанными на возбуждении атомов исследуемого материала.

Раскрытие внутренней структуры материалов создало основу для понимания твердого состояния вещества вообще и конкретных материалов в частности. Объединение знаний, полученных теоретическим и опытным путем, позволило не только разработать более эффективные методы обработки природных материалов, но и создать огромное количество новых искусственных материалов, таких, как синтетические волокна и пластмассы; высоконапряженные и жаропрочные металлические сплавы; стеклянные волокна, используемые в качестве оптических волноводов; магниты, изготовленные из редкоземельных элементов; различные виды высоконапряженной керамики; композиты и полупроводники, составляющие основу современной микроэлектроники.

Эти результаты достигнуты наукой, сформировавшейся на основе интеграции различных дисциплин и получившей название *материаловедение*. Ее представители имеют дело с изучением взаимосвязей между структурой, свойствами и поведением материалов, а также зависимости этих взаимосвязей от методов обработки материалов.

Появление материалов с качественно новыми свойствами возможно благодаря развитию технологии их производства. Современные достижения теории позволяют предсказать существование новых структур и новых свойств, а используемая для анализа материалов аппаратура может оценить степень реализации этих предсказаний.

## 1.2. Конструкционные материалы

*Конструкционными* называются материалы, которые применяют для изготовления деталей машин, приборов и

строительных конструкций. Конструкционные материалы можно разделить на две обширные группы:

- металлические материалы;
- неметаллические материалы.

**Металлические** конструкционные материалы — это черные металлы, цветные металлы и сплавы.

**Черные металлы** имеют темно-серый цвет, большую плотность, высокую температуру плавления, относительно высокую твердость и во многих случаях обладают полиморфизмом. Наиболее типичными в этой группе являются железо, его сплавы — сталь, чугун, а также ферросплавы.

**Техническое железо** (с минимальным содержанием углерода и других примесей) производят в небольших количествах для нужд электротехники и др.

**Ферросплавы**, например ферросилиций (до 2,5 % С, 9—13 % Si, основа — железо) и др., применяют при выплавке стали.

**Сталь** — основа современной техники; это обобщенное название очень большой группы железоуглеродистых сплавов (до 2,14 % С).

**Чугун** (известен еще до новой эры) — наиболее распространенный литейный сплав (до 6,67 % С). С XIII—XIV вв. чугун — основной исходный материал для выплавки стали.

**Цветные (нежелезные) металлы** — все остальные металлы и сплавы, кроме черных. В настоящее время используют около 65 цветных металлов и их сплавов. Они широко применяются в машино- и приборостроении, а в некоторых областях техники имеют особо важное значение.

Цветные металлы подразделяют на:

**легкие металлы** — бериллий, магний, алюминий, обладающие малой плотностью;

**благородные металлы** — серебро, золото, металлы платиновой группы; к ним может быть отнесена и «полублагородная» медь. Обладают высокой устойчивостью против коррозии;

*легкоплавкие металлы* — цинк, кадмий, ртуть, олово, свинец, висмут, сурьма и др.;

*тугоплавкие металлы* — металлы, температура плавления которых выше, чем железа (то есть выше 1539 °С). Гафний, рутений, осмий, рений — элементы весьма редкие и рассеянные в земной коре. Цирконий, хром и ванадий — достаточно доступные металлы, имеющие относительно высокую температуру плавления. Наиболее тугоплавки вольфрам, молибден, ниобий, тантал.

По *строению электронных оболочек* металлы принято разделять на нормальные и переходные.

У *нормальных* металлов внутренние электронные оболочки (уровни) полностью заполнены. К таким металлам относятся Na, Sn, Mg, Al, Pb и др. У *переходных* металлов внутренние *p*- и *d*-оболочки недостроены. Наиболее характерные представители переходных металлов Fe, Pd, Pt и т. п.

Производство стали примерно в двадцать раз превышает общее производство всех цветных металлов и сплавов; 80—85 % чугуна используют для выплавки стали.

К *неметаллическим* конструкционным материалам относятся:

- органические и неорганические полимерные материалы;
- пластмассы;
- композиционные материалы;
- каучуки и резины;
- лакокрасочные материалы;
- клеи и герметики;
- керамика;
- стекло;
- бетон;
- графит;
- дерево;
- другие материалы.

Такие их свойства, как достаточная прочность, жесткость и эластичность при малой плотности, светопрозрачность, химическая стойкость, диэлектрические и другие свойства, час-



то делают эти материалы незаменимыми. Также следует отметить их технологичность и эффективность при использовании. Неметаллические конструкционные материалы находят все большее применение в различных областях машиностроения. Основой неметаллических материалов являются полимеры, главным образом синтетические.

Основу современной техники составляют металлы и металлические сплавы. Правильный выбор конструкционных материалов для деталей машин, механизмов и конструкций обеспечивает снижение их массы и габаритов, повышение их эксплуатационной надежности и долговечности. Развитие ядерной, ракетной, космической и других новейших областей техники во многом зависит от наличия современных конструкционных материалов.

Громадное, все увеличивающееся производство и потребление металлов — одна из характерных особенностей нашего времени. Несмотря на открытие и массовое применение значительного числа новых неметаллических материалов, роль металлов все более возрастает.

К ряду особенно прогрессивных конструкционных материалов, обуславливающих высокий экономический эффект, относятся композиционные материалы. Современные технологии позволяют получать композиты с заданными механическими свойствами, сочетающими малую плотность с высокой прочностью, жесткостью, ударостойкостью и долговечностью. К тому же этим материалам можно придать нужные электрические, магнитные, теплофизические и другие свойства.

Материаловедение и технология материалов не только позволяют удовлетворять потребность экономики в материалах. Они также открывают обществу возможности и пути решения таких насущных проблем, как истощение природных ресурсов и поддержание высоких темпов экономического развития. Производительность труда и структура производительных сил также в значительной степени зависят от прогресса в этой области.

## Глава 2

# КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

## 2.1. Кристаллы

Различают два вида твердых тел: *кристаллические* и *аморфные*. Примером кристаллического тела является каменная (или поваренная) соль. Типичный пример аморфного тела — обыкновенное стекло. У аморфного тела отсутствует определенная температура плавления. В этом состоит одно из основных его отличий от кристаллического. Вместо фиксированной температуры плавления у аморфного тела наблюдается более или менее растянутый интервал размягчения, в котором оно переходит из твердого в жидкое состояние.

*Кристаллы* — это вещества, в которых составляющие их частицы (то есть атомы, ионы, молекулы, группы атомов) расположены правильными, симметричными, периодически повторяющимися рядами, сетками, решетками. Кристаллы растут из паров, растворов, расплавов и вырастают в виде на удивление правильных многогранников. В земле вырастают кристаллы природных минералов. На заводах и в лабораториях выращивают синтетические кристаллы.

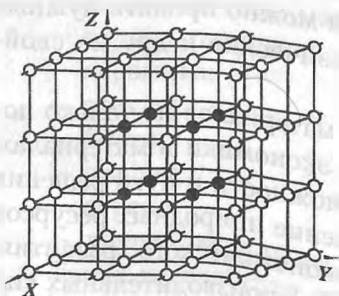


Рис. 2.1. Кристаллическая решетка

Всякий кристалл состоит из отдельных атомов одного или нескольких видов. Совокупность атомов образует то, что называется *кристаллической решеткой* (рис. 2.1). Эта строгая пространственная периодичность в структуре кристалла — характерная его черта. Силы связи между атомами заставляют частицы в кристалле собираться в кристал-

лические решетки и вырастать в виде многогранников. И характерна для кристалла не сама многогранная форма, не результат роста, а способность расти в такой форме; эта способность не исчезает, даже если кристаллу не удалось принять многогранную форму.

Пространственная решетка, основная роль которой сводится к размножению идентичных точек, является лишь геометрическим построением, помогающим выявить законы симметрии структуры кристалла.

Решетку можно описать с помощью периодически повторяющегося в пространстве элементарного параллелепипеда — элементарной ячейки. Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла, называется *элементарной кристаллической ячейкой*. На рис. 2.1 она выделена жирным.

## 2.2. Типы связей

Природа сил, удерживающих ионы, атомы или молекулы в определенных местах кристаллической решетки, определяет строение кристалла и его свойства. Характер связи, возникающей между элементарными частицами в кристалле, формируется электронным строением атомов, вступающих во взаимодействие. Элементарные частицы в кристалле сближаются на расстояние, которое обеспечивает кристаллу наибольшую термодинамическую стабильность. Силы притяжения возникают благодаря взаимодействию электронов с положительно заряженным ядром собственного атома, а также с ядрами соседних атомов. Силы отталкивания возникают в результате взаимодействия положительных ядер соседних атомов при их сближении (рис. 2.2).

Уравновешивание сил происходит при сближении элементарных частиц на расстояние  $R_0$ . Сближению соответствует минимум энергии, что делает кристалл термодинамически устойчивым.

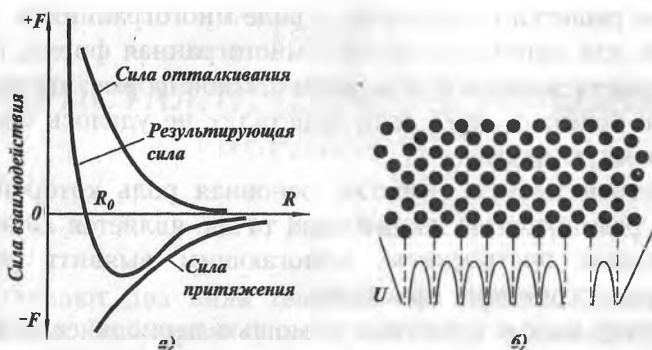


Рис. 2.2. Силы взаимодействия двух атомов (а) и изменения потенциальной энергии атомов в кристаллической решетке (б)

Все кристаллы по характеру связи подразделяют на ковалентные, ионные, металлические, силы Ван-дер-Ваальса.

**Ковалентная связь.** Такая связь встречается в органических молекулах и керамике, когда атомы совместно владеют парой электронов. В случае ковалентной связи предполагается, что электроны находятся «в общем пользовании» или «распределены» между двумя ядрами, участвующими в образовании связи.

**Ионная связь.** Если взаимодействие двух нейтральных атомов сопровождается истинным переносом электрона от одного атома к другому, то говорят, что связь в образовавшейся молекуле ионная или электровалентная. Такая связь встречается между положительно и отрицательно заряженными элементами, или ионами.

Если ковалентная связь является направленной, то ионные силы стремятся равномерно распределяться вокруг элементов.

**Металлическая связь.** Такая связь возникает в металлах и их сплавах, когда не образуются химические соединения. В металлическом кристалле валентные энергетические зоны атомов перекрываются, образуя общую зону с подуровнями. Это дает возможность валентным электронам свободно перемещаться в пределах этой зоны от атома к атому. Происходит

обобществление валентных электронов в объеме всего кристалла. Валентные электроны в металле нельзя считать потерянными или приобретенными атомами. Они обобществлены атомами в объеме всего кристалла, в отличие от ковалентных кристаллов, в которых такое обобществление ограничено одной группой атомов. Металлическая связь ненаправленная, поэтому каждый атом стремится притянуть к себе как можно больше соседних атомов. Следствием этого является большая компактность кристаллических структур металлов.

Металлическая связь образуется относительно легко и легко разрушается, она слабее ковалентной связи.

Электронное облако внутри решетки легко привести в движение с помощью электрического поля; следовательно, металл — хороший проводник электричества.

Большая тепловая проводимость металлов обеспечивается наличием этого облака электронов. Если часть металла нагрета, то кинетическая энергия электронов в этой области возрастает. Электроны распространяются по всему металлу, вызывая таким образом рост температуры во всей решетке.

*Силы Ван-дер-Ваальса.* Малые локальные изменения заряда могут привести к слабым связям между молекулами. Они могут возникать между любыми элементарными частицами (ионами, атомами, молекулами).

Силы Ван-дер-Ваальса не имеют направленного характера, так как мгновенный диполь образуется с каждым из соседних атомов. В результате атомы, стремясь увеличить число соседей в кристаллической решетке, укладываются наиболее компактным образом.

Энергия связи сил Ван-дер-Ваальса невелика, поэтому молекулярные кристаллы имеют низкую температуру плавления и испарения.

### 2.3. Виды кристаллов

Кристаллическое вещество вообще является плотноупакованным агрегатом из атомов и ионов, так как благодаря ван-



дер-ваальсовым, кулоновским и другим взаимодействиям наиболее стабильными являются структуры, в которых межатомные расстояния имеют минимальные возможные значения.

Металлы имеют преимущественно три типа ячеек:

1. *Объемно-центрированная кубическая структура (ОЦК)*, показанная на рис. 2.3, содержит атом в каждой вершине единичной ячейки, один атом находится в центре куба.

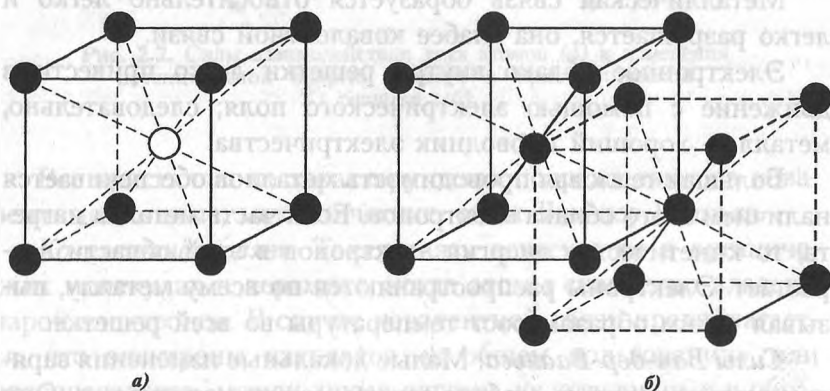


Рис. 2.3. Объемно-центрированная кубическая структура: а – единичная ячейка; б – кристаллическая решетка

2. *Гранецентрированная кубическая структура (ГЦК)*, представленная на рис. 2.4, содержит атом в каждой вершине куба и один атом в центре каждой грани куба; атом в центре объема отсутствует. Это плотноупакованная кубическая структура.

3. *Плотнупакованная гексагональная структура (ГПУ)* показана на рис. 2.5. Каждый атом в слое находится непосредственно в верхнем и нижнем промежутках трех атомов в соседних слоях. Также каждый атом соприкасается с шестью атомами в нижнем слое, тремя атомами сверху и тремя атомами снизу.

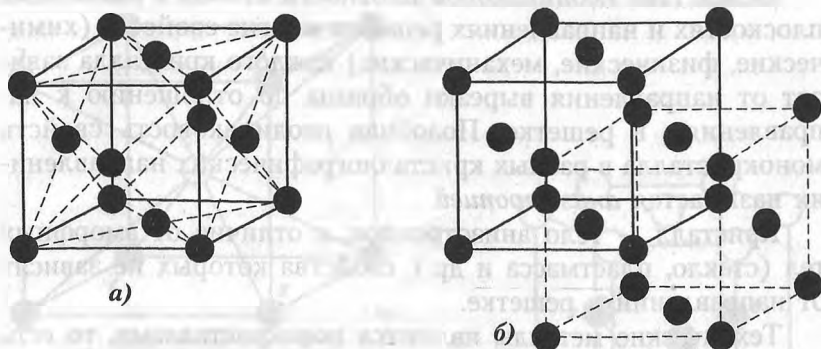


Рис. 2.4. Гранецентрированная кубическая структура: *a* – единичная ячейка; *б* – кристаллическая решетка

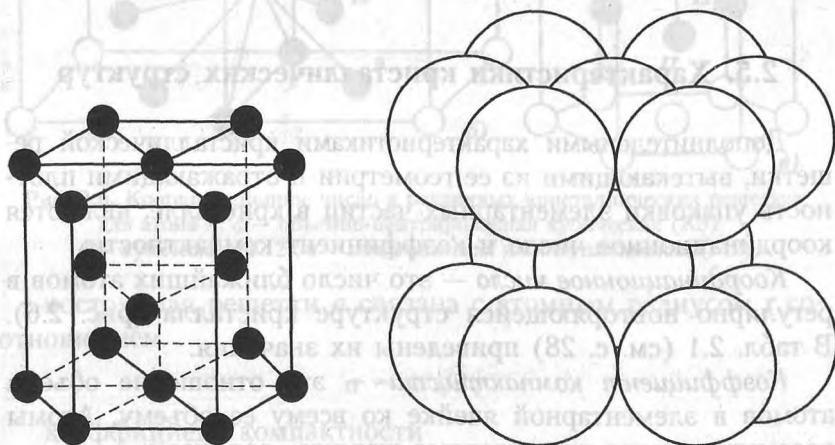


Рис. 2.5. Плотноупакованная гексагональная структура

## 2.4. Анизотропия кристаллов

Плотность расположения атомов по различным плоскостям неодинакова.

Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки многие свойства (химические, физические, механические) каждого кристалла зависят от направления вырезки образца по отношению к направлениям в решетке. Подобная неодинаковость свойств монокристалла в разных кристаллографических направлениях называется *анизотропией*.

Кристалл — тело анизотропное, в отличие от аморфных тел (стекло, пластмасса и др.), свойства которых не зависят от направлений в решетке.

Технические металлы являются поликристаллами, то есть состоят из большого количества анизотропных кристаллов. В большинстве случаев они *статистически* неупорядоченно ориентированы один по отношению к другому; поэтому во всех направлениях свойства более или менее одинаковы, то есть поликристаллическое тело является псевдоизотропным.

## 2.5. Характеристики кристаллических структур

Дополнительными характеристиками кристаллической решетки, вытекающими из ее геометрии и отражающими плотность упаковки элементарных частиц в кристалле, являются координационное число и коэффициент компактности.

*Координационное число* — это число ближайших атомов в регулярно повторяющейся структуре кристалла (рис. 2.6). В табл. 2.1 (см. с. 28) приведены их значения.

*Коэффициент компактности* — это отношение объема атомов в элементарной ячейке ко всему ее объему. Атомы рассматриваются как «твердые шарики» радиуса  $r$ .

Примеры:

а) простая кубическая ячейка с постоянной решетки  $a$ : коэффициент компактности

$$\eta = \frac{\text{объем атомов}}{\text{объем ячейки}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{(2l)^3} = 0,52;$$

б) объемно-центрированный куб:

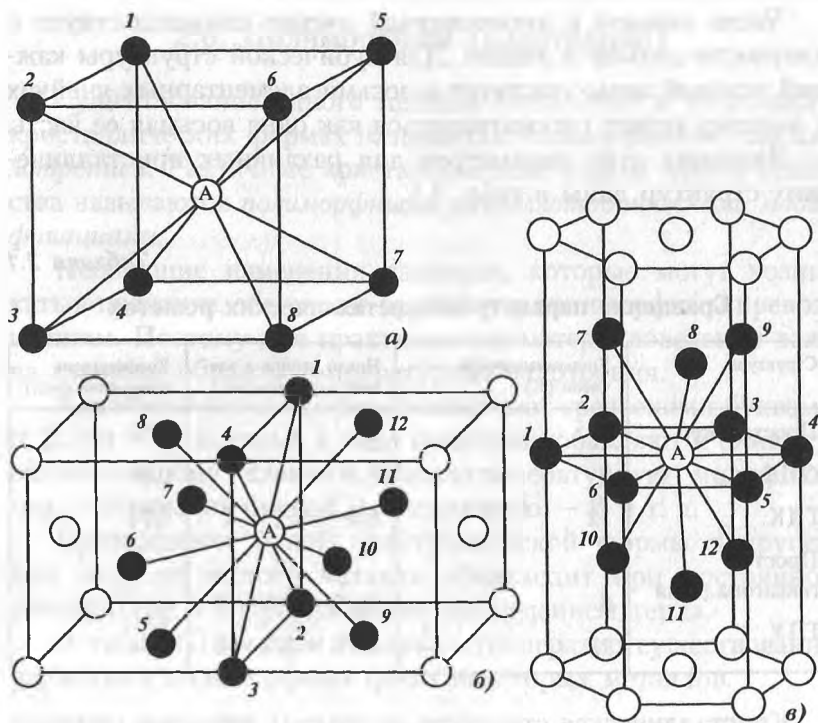


Рис. 2.6. Координационное число в различных кристаллических решетках для атома  $A$ :  $a$  — объемно-центрированная кубическая (K8);  $б$  — кубическая (K12);  $в$  — гексагональная плотноупакованная (Г12)

постоянная решетки  $a$  связана с атомным радиусом  $r$  соотношением

$$a = 4r\sqrt{3};$$

коэффициент компактности

$$\eta = \frac{2\frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{2\frac{4}{3}\pi r^3}{(4r\sqrt{3})^3} = 0,68;$$

в) гранецентрированный куб:

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}};$$

тогда коэффициент компактности  $\eta = 0,74$ .

Число атомов в элементарной ячейке свидетельствует о плотности атомов в ячейке. Для кубической структуры каждый угловой атом участвует в восьми элементарных ячейках и поэтому может рассматриваться как одна восьмая ее часть.

Значения этих параметров для различных кристаллических структур даны в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Сравнение параметров кристаллических решеток**

Структура	Координационное число (K)	Число атомов в элементарной ячейке	Коэффициент компактности ( $\eta$ )
Простой куб	6	1	0,52
ОЦК	8	$8/8 + 1 = 2$	0,68
ГЦК	12	$8/8 + 6/2 = 4$	0,74
Простая гексагональная	8	$12/6 + 2/2 = 3$	—
ГПУ	12	$12/6 + 2/2 = 6$	0,74

Кристаллическая структура некоторых металлов приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Структура металлов**

Структура	Металлы	Примечание
ОЦК	Nb, Ta, W, Cr, Mo, V	Хрупкие металлы. Тугоплавки, имеют высокую температуру плавления и высокую растворимость для малых атомов
ГЦК	Al, Cu, Pb, Ag, Ni, Au, Pt	Пластичные металлы
ГПУ	Zn, Mg, Cd	—

## 2.6. Полиморфизм (аллотропия)

Существование одного металла (вещества) в нескольких кристаллических формах называется *полиморфизмом* или *аллотропией*. Различные кристаллические формы одного вещества называются *полиморфными* или *аллотропическими модификациями*.

Небольшие изменения давления, которые могут возникать в практике, обычно не приводят к полиморфным превращениям. Поэтому для практического материаловедения важна главным образом температурная аллотропия.

Аллотропические формы обозначают греческими буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и т. д., которые в виде индексов добавляют к символу, обозначающему элемент. Низкотемпературную модификацию обозначают буквой  $\alpha$ , следующую —  $\beta$  и т. д.

Превращение одной аллотропической формы в другую при нагреве чистого металла происходит при постоянной температуре и сопровождается поглощением тепла.

В табл. 2.3 показан интервал температур существования различных полиморфных форм некоторых металлов.

Таблица 2.3

Аллотропические формы металлов

Металл (элемент)	Аллотропическая форма	Интервал температур устойчивого состояния, °C	Кристаллическая решетка
1	2	3	4
Fe	$\alpha$	< 911	Кубическая объемно-центрированная (K8)
	$\delta$	1392—1539	То же
	$\gamma$	911—1392	Кубическая гранецентрированная (K12)
Co	$\alpha$	< 450	Гексагональная (Г12)
	$\beta$	450—1480	Кубическая гранецентрированная (K12)
Sn	$\alpha$	< 18	Решетка алмаза
	$\beta$	18—232	Тетрагональная объемно-центрированная

Окончание табл. 2.3

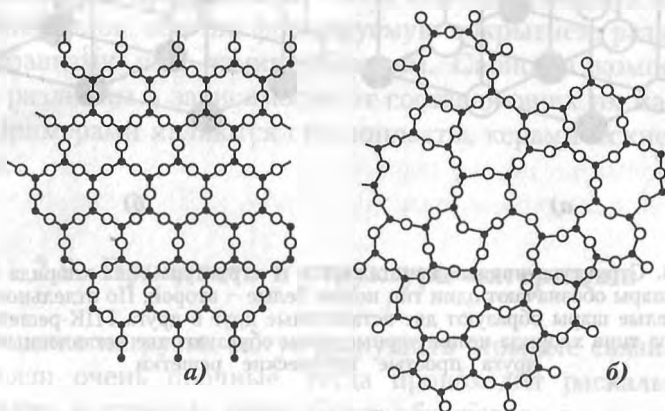
1	2	3	4
Mn	$\alpha$	< 700	Кубическая сложная многоатомная
	$\beta$	700—1079	То же
	$\gamma$	1079—1143	Тетрагональная гранецентрированная
	$\delta$	1143—1244	Кубическая объемно-центрированная (K8)
Ti	$\alpha$	< 882	Гексагональная (Г12)
	$\beta$	882—1668	Кубическая объемно-центрированная (K8)
Zr	$\alpha$	< 867	Гексагональная (Г12)
	$\beta$	867—1860	Кубическая объемно-центрированная (K8)
U	$\alpha$	< 660	Ромбическая
	$\beta$	660—770	Тетрагональная
	$\gamma$	770—1133	Кубическая объемно-центрированная (K8)

## 2.7. Аморфные структуры

Аморфные вещества не имеют постоянной температуры плавления, они размягчаются и плавятся при повышении температуры. Это отличает их от кристаллических тел, имеющих постоянную температуру плавления. Аморфные вещества можно рассматривать как материалы с большим числом дефектов, которые определяют их свойства, значительно отличные от свойств других веществ. Слово «аморфный» означает «без формы», и это могут быть газы, жидкости и стекло. Обычными аморфными материалами при комнатной температуре являются вода, нефть, ртуть, стекло. При высокой температуре стекло является жидкостью.

Большинство аморфных материалов обладает ближним порядком. В то же время упаковка молекул без дальнего порядка позволит создать большие плотности — ведь часть молекул может менять свою форму; если разные молекулы деформируются по-разному, то дальний порядок становится невозможным, а плотная упаковка вполне осуществима.

Если форма молекул такова, что образование дальнего порядка приводит к большей доле пустого места, чем при отсутствии его при плотной упаковке, то кристалл не образуется. Такие вещества не кристаллизуются, а медленно густеют, давая аморфные вещества. К аморфным относится большое число органических веществ, построенных из гигантских молекул; таковы многие пластмассы, стекло, кварц (рис. 2.7).



**Рис. 2.7.** Схема строения кварца. Черные кружки — атомы кремния, белые — кислорода. Рисунок упрощает действительную картину, так как изображает плоскую модель. Аморфный кварц (б) с точки зрения изображенной модели представляет собой «испорченную» решетку кристаллического кварца (а)

## 2.8. Структура неметаллических твердых тел

*Ионные кристаллы* подобны металлическим кристаллам, но у них в решетке вместо атомов расположены ионы. Каждый ион расположен в окружении нескольких ионов противоположного знака. В решетке NaCl, являющейся гранецентрированным кубом, один ион расположен в узле решетки, а другие ионы (противоположного знака) — на половине ребра элементарной ячейки. Молекулу NaCl представляет ионный кристалл (рис. 2.8). Однако имеются некоторые ионные кристаллы, в узлах решетки которых — молекулы (оба иона).



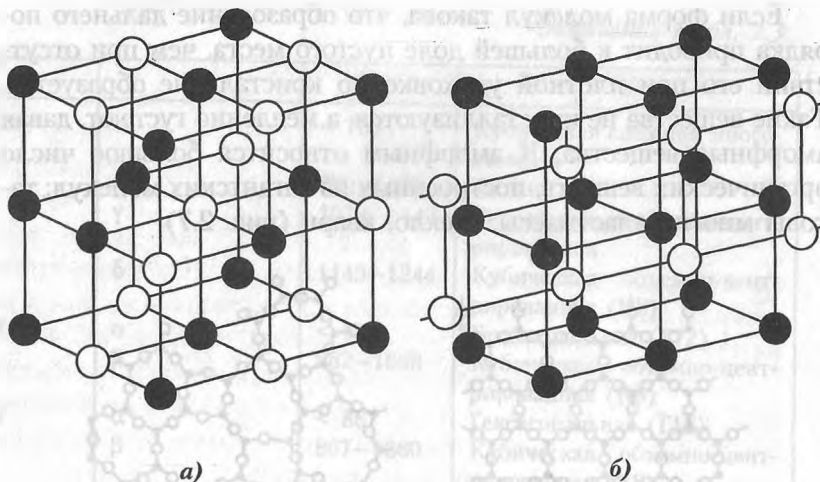


Рис. 2.8. Структура ионных кристаллов: *а* – структура типа хлорида натрия: черные шары обозначают один тип ионов, белые – второй. По отдельности черные и белые шары образуют две вставленные друг в друга ГЦК-решетки; *б* – структура типа хлорида цезия: черные шары образуют две вставленные друг в друга простые кубические решетки

*Ковалентные кристаллы*, основанные на пространственных решетках, были описаны выше. Здесь между соседними атомами имеется очень жесткая ковалентная связь. Прочность связи вызвана распределением валентных электронов. Ковалентные связи являются типичными для керамических материалов.

*Полимеры* состоят из длинных цепей повторяющихся органических молекул. Атомы внутри повторяющихся молекулярных цепей связаны сильной ковалентной связью. Однако связь между цепями вызвана слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Некоторые полимеры бывают кристаллическими, хотя этот термин здесь понимается не в обычном смысле. Его используют для описания условий расположения длинноцепных молекул параллельно друг другу, таким образом образуется регулярная структура в некоторой области объема полимера. Когда цепи запутанны, они проявляют аморфность. Степень кристалличности зависит от расположения цепей.

Молекулярная масса полимера является важным свойством, которое можно использовать как показатель прочности материала. Так как не все цепи имеют одинаковую длину, измеряется среднее значение молекулярной массы. Один из способов определения молекулярной массы — измерение скорости истечения расплава полимера через отверстия при стандартных условиях.

*Композиты* представляют собой комбинацию двух или более материалов, обычно формируемую покрытием, различными добавками или ламинированием. Свойства композитов очень различны в зависимости от составляющих их материалов. Примерами являются стеклопласты, керамические материалы.

## 2.9. Прочность и структура материалов

Внешние нагрузки могут разрушить атомные связи. Если эти связи очень прочные, тогда происходит раскалывание кристалла, а атомные связи будут обрываться вдоль некоторых плоскостей. Это может случиться в хрупких металлах и сплавах, керамиках, обладающих ковалентной связью, а также в кристаллах с ионной связью. В металлах связи таковы, что при комнатных температурах наблюдается текучесть, которая происходит в результате скольжения атомов и обуславливает пластическую деформацию металлов. Если это скольжение будет ограничено, например, легированием, холодной обработкой или закалкой, тогда прочность металлов будет увеличиваться.

Упругие свойства материалов проявляются при условиях, когда не наблюдается остаточной деформации. Модуль упругости (модуль Юнга) кристалла является мерой силы, требуемой для смещения атомов кристалла из их нормального равновесного состояния. А это зависит от сил связи между атомами. Модуль Юнга и модуль сдвига аморфных материалов одинаковы (изотропия упругости), каким бы ни было направление приложимого напряжения. Однако кубические

кристаллы являются упругоанизотропными, и их свойства зависят от направления нагрузки. В поликристаллических металлах упругие постоянные усредняются вследствие случайной ориентации зерен в пространстве. Поэтому металл ведет себя как изотропный упругий материал.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как по своему строению различают твердые тела?
2. Какие типы связей между атомами и молекулами наиболее сильные или слабые?
3. Какие существуют виды кристаллов и как они различаются по своему строению?
4. Чем аморфные тела отличаются от кристаллических?

## Глава 3

### ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Дефекты кристаллов являются важным признаком кристаллов, так как определяют их механические свойства, такие, как сопротивление к пластической деформации, ковкость, предел текучести и напряжение разрушения. Дефекты также вызывают снижение прочности материалов. В совершенном кристалле атомы располагаются регулярно. В действительных реальных кристаллах присутствуют дефекты, которые существенно изменяют как механические, так и технологические свойства металлов.

Обычно металл состоит из скопления большого числа маленьких кристаллов неправильной формы, называемых *зернами*. Кристаллические решетки в отдельных зернах ориентированы относительно друг друга случайным образом. В некоторых случаях, например при холодной прокатке, наблюдается преимущественная ориентация зерен — текстура (рис. 3.1 и 3.2). Поверхности раздела зерен называются *границами зерен*. Такой

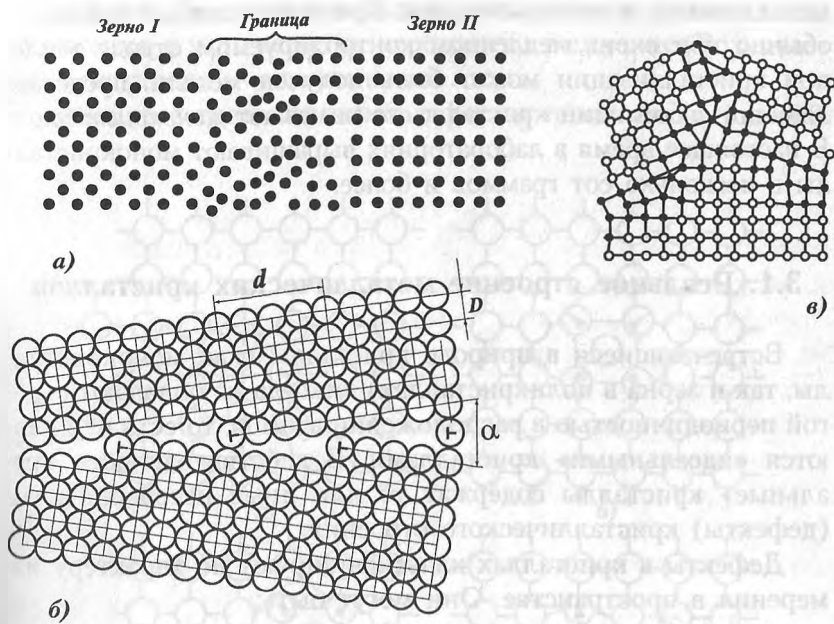


Рис. 3.1. Схема строения границы между зернами: а — большеугловая граница; б — границы между блоками (малоугловые границы):  $\alpha$  — угол разориентировки соседних блоков; в — схема поликристаллического строения

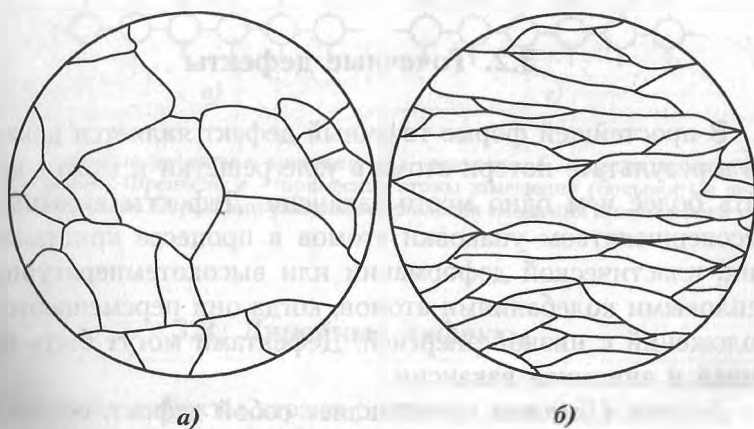


Рис. 3.2. Влияние пластической деформации на микроструктуру металла (схема)  
 а — до деформации; б — после деформации

металл является *поликристаллом*. При определенных условиях, обычно при очень медленном контролируемом отводе тепла, при кристаллизации может быть получен металл, представляющий собой один кристалл; его называют *монокристаллом*. В настоящее время в лабораториях выращивают монокристаллы в несколько сот граммов и более.

### 3.1. Реальное строение металлических кристаллов

Встречающиеся в природе кристаллы (как монокристаллы, так и зерна в поликристаллах) никогда не обладают строгой периодичностью в расположении атомов, то есть не являются «идеальными» кристаллами. В действительности «реальные» кристаллы содержат те или иные несовершенства (дефекты) кристаллического строения.

Дефекты в кристаллах классифицируют по характеру измерения в пространстве. Они могут быть:

- точечными (нульмерными);
- линейными (одномерными);
- поверхностными (двухмерными);
- объемными (трехмерными).

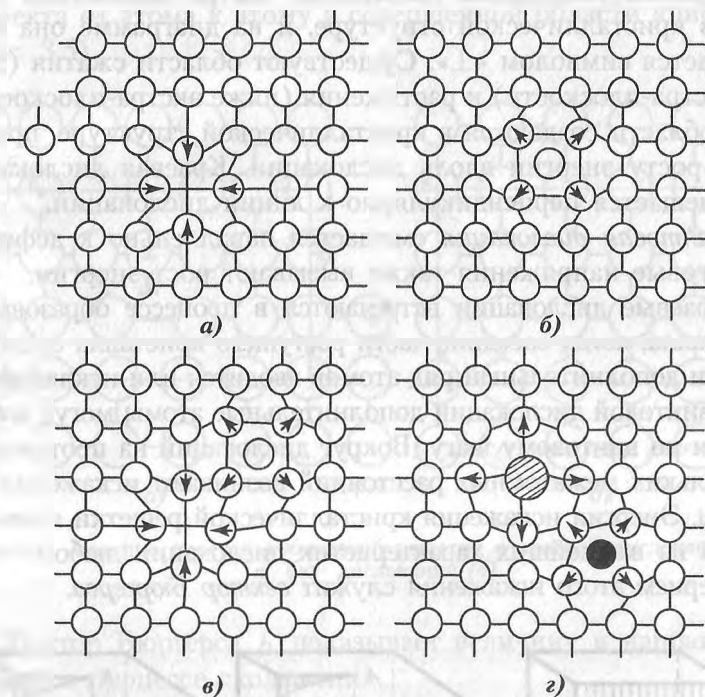
### 3.2. Точечные дефекты

В простейшей форме точечный дефект является вакансией в результате потери атома в узле решетки и может включать более чем одно место вакансии. Дефекты вызываются несовершенством упаковки атомов в процессе кристаллизации, пластической деформации или высокотемпературными тепловыми колебаниями атомов, когда они перемещаются из положений с низкой энергией. Дефектами могут быть катионная и анионная вакансии.

*Дефект Шоттки* представляет собой дефект, состоящий из анионной или катионной вакансии, встречающийся в соединении, которое может сохранять баланс заряда.

*Дефект Френкеля* возникает, когда атом из равновесного положения в узле решетки переходит в межузلية. Возникает пара «вакансия — межузельный атом».

Основные типы точечных дефектов показаны на рис. 3.3.



**Рис. 3.3.** Точечные дефекты в кристалле: а — вакансия; б — дислоцированный атом; в — дефект Френкеля; г — примесные атомы замещения (большой) и внедрения (маленький). Стрелками указаны направления смещения атомов в решетке

### 3.3. Линейные дефекты

Линейные дефекты характеризуются тем, что их поперечные размеры не превышают нескольких межатомных расстояний, а длина может достигать размера кристалла.

Таковыми дефектами являются краевые и винтовые дислокации. Возможно существование смешанных дислокаций (например, петли дислокаций) (рис. 3.4). Графическое изображение дислокаций было предложено Бюргерсом и модифицировалось Франком.

*Краевая дислокация* вызывается экстра-плоскостью атомов в кристаллической структуре, и на диаграмме она изображается символом « $\perp$ ». Существуют области сжатия (около экстра-плоскости) и растяжения (ниже экстра-плоскости). Эти области создаются в кристаллической структуре, приводя к росту энергии вдоль дислокации. Краевая дислокация перемещается перпендикулярно к линии дислокации.

*Винтовая дислокация* смещается параллельно к дефекту. Сдвиговые напряжения также вызывают рост энергии.

Краевые дислокации встречаются в процессе образования кристалла, когда соседние части растущего кристалла отклоняются и дополнительный ряд атомов вводится или исключается. При винтовой дислокации дополнительные атомы могут добавляться по винтовому шагу. Вокруг дислокаций на протяжении нескольких межатомных расстояний возникают искажения решетки. Энергия искажения кристаллической решетки является одной из важнейших характеристик дислокации любого типа. Критерием этого искажения служит *вектор Бюргерса*.

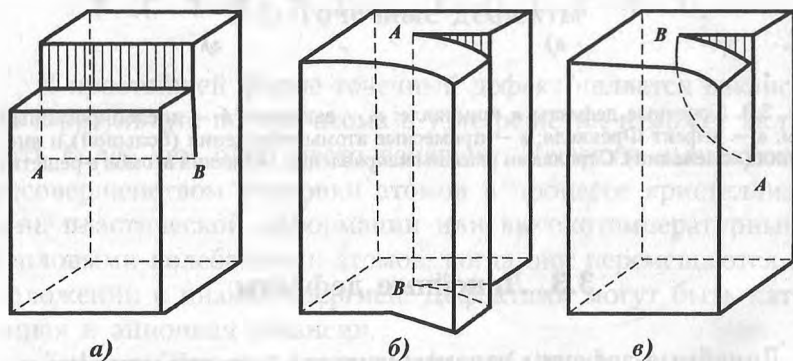


Рис. 3.4. Краевая (а), винтовая (б) и смешанная (в) дислокации в кристалле. Смешанная дислокация в точке А имеет краевую ориентацию, в точке В – винтовую

Чтобы оценить степень искаженности решетки, вызванной дислокацией, следует сравнить несовершенный кристалл, содержащий дислокацию, с совершенным кристаллом. Для этого строят контур Бюргерса, представляющий собой замкнутый контур произвольной формы, условно выделенный в реальном кристалле путем последовательного обхода дефекта от атома к атому в совершенной области кристалла (рис. 3.5).

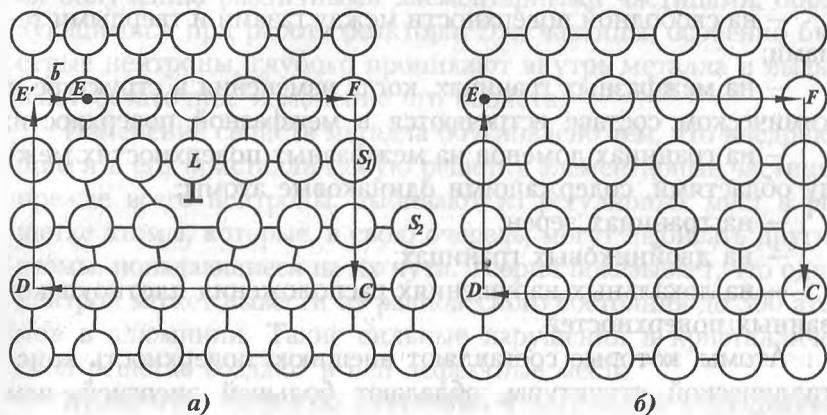


Рис. 3.5. Сечение простой кубической решетки с краевой дислокацией (а) и без дислокации (б)

Вектор Бюргерса  $\vec{b}$  показывает величину и направление сдвига в процессе скольжения.

Вектор Бюргерса для кристалла, содержащего винтовую дислокацию, определяют аналогично. В краевой дислокации он перпендикулярен к ее линии, а у винтовой — параллелен ей.

Если контур Бюргерса охватывает несколько дислокаций, то величина его соответствует геометрической сумме векторов Бюргерса отдельных дислокаций. Квадрат вектора Бюргерса характеризует энергию дислокаций и силы их взаимодействия.

Дислокации образуются в процессе кристаллизации металлов при «захлопывании» группы вакансий, а также в процессе пластической деформации и фазовых превращений.



### 3.4. Поверхностные, или плоские, дефекты

Под *поверхностными* (плоскими) *дефектами* понимают такие нарушения в кристаллической решетке, которые обладают большой протяженностью в двух измерениях и протяженностью лишь в несколько межатомных расстояний — в третьем измерении.

Такие кристаллические несовершенства могут встречаться в различных физических ситуациях:

- на свободной поверхности между газами и твердыми телами;
- на межфазных границах, когда изменения в структуре и химическом составе встречаются в межфазной поверхности;
- на границах доменов на межфазных поверхностях между областями, содержащими одинаковые атомы;
- на границах зерен;
- на двойниковых границах;
- на локальных нарушениях расположения плотноупакованных поверхностей.

Атомы, которые составляют внешнюю поверхность кристаллической структуры, обладают большей энергией, чем внутренние атомы, поскольку внешние атомы не полностью окружены другими атомами. Примером такого состояния является сферическая форма жидких капель, обладающих минимумом поверхностной энергии в единицу объема.

Форма зерен определяется окружающими зернами. Атомы в зернах имеют одинаковую упаковку, которая определяется устройством решетки. На границе между двумя соседними зернами атомы не могут располагаться совершенным образом для обеих кристаллических решеток. Существует переходная зона между двумя зернами, где структура отличается от структуры зерен.

### 3.5. Объемные дефекты

*Объемными дефектами* являются:

- литейные дефекты, например усадочные раковины или газовые полости;
- дефектыковки или обработки, например трещины;

— дефекты сварки или соединений, например трещины, газовые полости, шлаковые включения, области коррозии.

Размеры различных типов структурных дефектов важны при рассмотрении их влияния на материалы.

### 3.6. Влияние облучения на свойства металлов

Металлы, из которых изготовлены реакторы, подвергаются облучению различными элементарными частицами, образующимися при работе реактора. Эти частицы, особенно быстрые нейтроны, глубоко проникают внутрь металла и вызывают остаточное изменение его свойств.

Изменение свойств металла обусловлено тем, что внедряющиеся в его кристаллическую решетку элементарные частицы, прежде всего нейтроны, выбивают из регулярных мест в решетке атомы, которые, в свою очередь, могут выбивать другие атомы, попадающие на их пути. Теория показывает, что один нейтрон может вывести из равновесного состояния до 300 атомов в алюминии. Такие сильные нарушения в кристаллической решетке создают в ней дефектные места.

Кроме того, дефекты возникают в результате образования термических пиков. Дело в том, что часть энергии нейтронов затрачивается на возбуждение упругих колебаний отдельных групп атомов. Это резко увеличивает температуру в небольшом объеме. Посредством теплопроводности происходит быстрое рассеивание тепла, и металл в этом месте получает локальную закалку, что сильно искажает решетку.

Образование таких дефектов затрудняет перемещение дислокаций и упрочняет металл. В общем, по влиянию на свойства металла ядерное облучение похоже на наклеп.

Так, ядерное облучение, увеличивая прочность простых сталей в полтора-два раза, примерно в такой же степени уменьшает их пластичность и вязкость. Эффект ядерного упрочнения металла, подвергнутого предварительно обычным методам упрочнения (наклепу, закалке), меньше, чем в случае неупрочненного, отожженного металла. С повышением температуры эффект ядерного облучения уменьшается, и при температурах выше порога рекристаллизации он практически отсутствует.

Необходимо иметь в виду, что при облучении могут появиться атомы новых элементов в результате деления или захвата нейтрона ядром атома основного металла. При длительном облучении чистый металл может превратиться в сплав вследствие превращения некоторого числа его атомов в другие элементы.

Наконец, в результате нейтронного облучения металл становится радиоактивным и опасным для здоровья человека.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Какие дефекты встречаются в кристаллических телах?*
2. *Каковы основные причины возникновения дефектов в металлических кристаллах?*
3. *Что такое объемные дефекты?*
4. *Какие дефекты в кристаллической решетке возникают при радиоактивном облучении металлов и как они влияют на их свойства?*

## Глава 4

### КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Любое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком, твердом. В чистых металлах при определенных температурах происходит изменение агрегатного состояния: твердое состояние сменяется жидким при температуре плавления, жидкое состояние переходит в газообразное при температуре кипения. Температуры перехода зависят от давления, но при постоянном давлении они вполне определены.

#### 4.1. Энергетические условия процесса кристаллизации

Переход металла из жидкого или парообразного состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется *первичной кристаллизацией*.

Образование новых кристаллов в твердом кристаллическом веществе называется *вторичной кристаллизацией*.

Процесс кристаллизации складывается из двух одновременно идущих процессов: *зарождения* и *роста* кристаллов. Кристаллы могут зарождаться (самопроизвольная кристаллизация) или расти (несамопроизвольная кристаллизация) на имеющихся готовых центрах кристаллизации.

Самопроизвольная кристаллизация обусловлена стремлением вещества иметь более устойчивое состояние, характеризующее уменьшением термодинамического потенциала, называемого *свободной энергией*  $F$ :

$$F = U - TS,$$

где  $U$  — внутренняя энергия;  $T$  — температура;  $S$  — энтропия.

С повышением температуры свободная энергия вещества как в твердом, так и в жидком состоянии уменьшается (рис. 4.1).

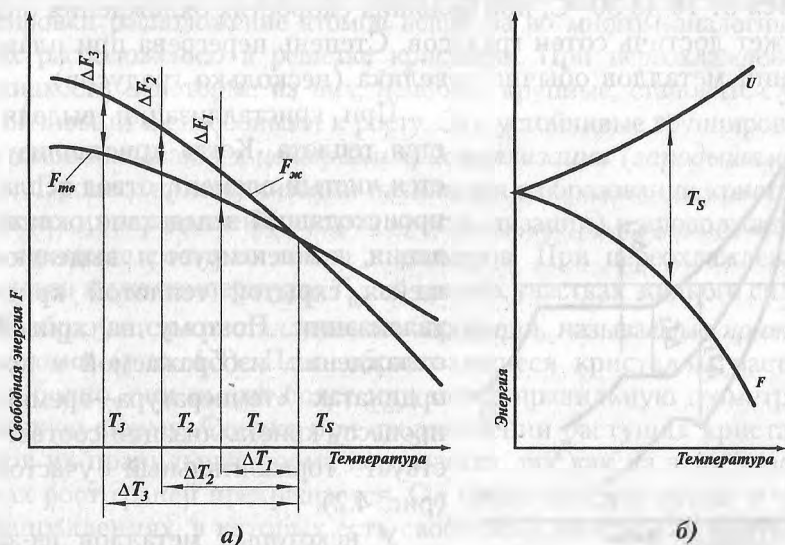


Рис. 4.1. Влияние температуры на свободную энергию жидкой и твердой фаз (а); на внутреннюю и свободную энергии и энтропийный член (б) мономорфного вещества

Температура, при которой свободная энергия в твердом и жидком состояниях равна, называется *равновесной кристаллизацией*. Кристаллизация происходит в том случае, если  $F_{\text{ТВ}}$  в твердом состоянии будет меньше  $F_{\text{ж}}$  в жидком состоянии, то есть при переохлаждении жидкого металла до температуры ниже равновесной.

Плавление — обратный процесс кристаллизации — происходит при перегреве выше равновесной температуры. Разница между реальными температурами плавления и кристаллизации называется *температурным гистерезисом*.

Температура, при которой практически начинается кристаллизация, называется *фактической температурой кристаллизации*.

Величиной или степенью переохлаждения называют разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации. Обычная степень переохлаждения металлов при кристаллизации в производственных условиях колеблется от 10 до 30 °С; при больших скоростях охлаждения она может достичь сотен градусов. Степень перегрева при плавлении металлов обычно невелика (несколько градусов).

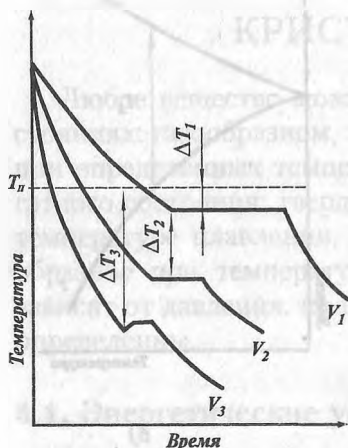


Рис. 4.2. Кривые охлаждения металла при кристаллизации:  
 $V_1 < V_2 < V_3$

При кристаллизации выделяется теплота. Когда кристаллизуется чистый элемент, отвод тепла, происходящий вследствие охлаждения, компенсируется выделяющейся скрытой теплотой кристаллизации. Поэтому на кривой охлаждения, изображаемой в координатах «температура—время», процессу кристаллизации соответствует горизонтальный участок (рис. 4.2).

У некоторых металлов из-за большого переохлаждения скрытая теплота плавления выделяется в первый момент кристаллиза-

ции настолько бурно, что температура скачкообразно повышается, приближаясь к теоретической (кривая  $V_3$ , рис. 4.2). Так кристаллизуется, например, сурьма.

Чем больше скорость охлаждения, тем больше величина переохлаждения. Для того чтобы полностью переохладить металл в жидком состоянии, требуются большие скорости охлаждения (миллион градусов в секунду). Металл, не имеющий кристаллическую структуру, можно получить, переохладив его за ничтожную долю секунды. Такой металл называется *аморфным* или *металлическим стеклом*.

## 4.2. Механизм процесса кристаллизации

В жидком состоянии атомы вещества вследствие теплового движения перемещаются беспорядочно. В то же время в жидкости имеются сравнительно устойчивые группировки атомов небольшого объема. Эти группировки неустойчивы, рассасываются и вновь появляются в разных местах жидкости. В пределах группировки расположение атомов вещества во многом аналогично их расположению в решетке кристалла. При переохлаждении жидкости некоторые из них, наиболее крупные, становятся устойчивыми и способными к росту. Эти устойчивые группировки атомов называются *центрами кристаллизации (зародышами)*.

Процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей (центров кристаллизации) и продолжается в процессе роста их числа и размеров. При переохлаждении сплава ниже температуры  $T_{пл}$  во многих участках жидкого сплава образуются кристаллические зародыши, называемые *критическими* (рис. 4.3). Пока образовавшиеся кристаллы растут свободно, они имеют более или менее правильную геометрическую форму. Однако при столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается, так как на этих участках рост граней прекращается. Он продолжается только в тех направлениях, в которых есть свободный доступ для «питающей» жидкости. В результате растущие кристаллы, имеющие сначала геометрически правильную форму, после затвердевания получают неправильную внешнюю форму; они называются *кристаллитами (зернами)*.

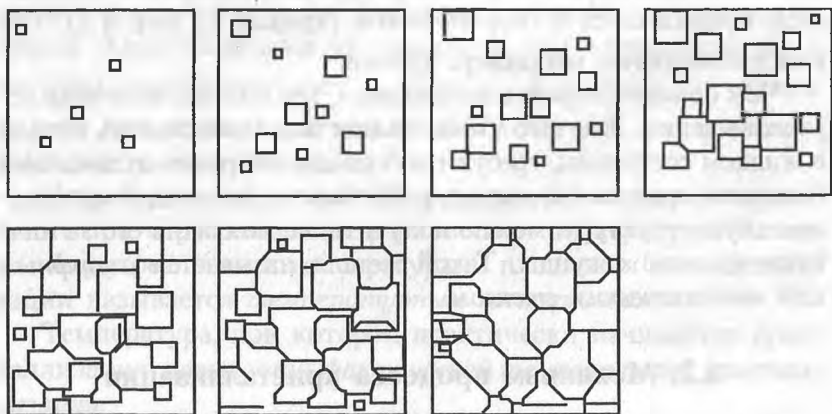


Рис. 4.3. Схема кристаллизации металла

Появление зародышей изменяет свободную энергию. С одной стороны, при переходе жидкости в кристаллическое состояние свободная энергия уменьшается, с другой — она увеличивается вследствие появления поверхности раздела между жидкостью и зародышем.

Превращение произойдет тогда, когда выигрыш в энергии от перехода в более устойчивое состояние будет больше потери энергии, идущей на образование поверхности раздела. Другими словами, свободная энергия системы  $\Delta\Phi$  определяется как сумма двух членов, характеризующих поверхностную  $S\sigma$  и объемную  $V\Delta F$  энергии:

$$\Delta\Phi = S\sigma - V\Delta F,$$

где  $S$  — поверхность;  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $V$  — объем;  $\Delta F$  — разность свободных энергий жидкого и кристаллического состояний, приходящаяся на единицу объема.

По мере увеличения зародыша (сферической формы) свободная энергия  $\Delta\Phi$  изменяется следующим образом:

$$\Delta\Phi = 4\pi r^2 n\sigma - \frac{3}{4}\pi r^3 n\Delta F,$$

где  $r$  — радиус частицы новой фазы;  $n$  — число частиц.

Исследование этого уравнения показывает, что функция  $\Delta\Phi$  имеет максимум (рис. 4.4). Зародыш будет расти, если его радиус  $r \geq r_{кр}$ , так как увеличение размера зародыша приведет к уменьшению  $\Delta\Phi$ . Таким образом, для данной степени переохлаждения имеется некоторый зародыш критического размера  $r_{кр}$ . Все зародыши большего размера будут центрами кристаллизации, а зародыши меньшего размера окажутся неустойчивыми и вновь рассасываются в жидкости.

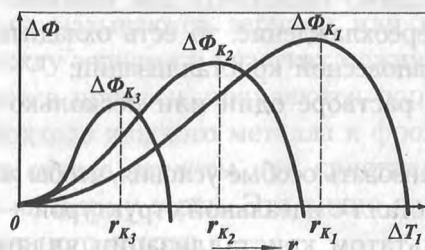


Рис. 4.4. Зависимость  $\Delta\Phi$  от  $r$  для различных переохлаждений:  
 $\Delta T_3 > \Delta T_2 > \Delta T_1$

Критический размер связан с термодинамическими параметрами зависимостью

$$r_{кр} = \frac{2\sigma}{\Delta F}$$

В реальных условиях процессы кристаллизации в значительной мере зависят от имеющихся готовых центров кристаллизации. Такими центрами могут быть твердые частицы разнообразных примесей, стенки формы. Особенно эффективны частицы таких веществ, которые по своему кристаллическому строению похожи на затвердевающий металл. Это сходство проявляется в близком соответствии расположения атомов на определенных плоскостях решеток металла и примеси.



Растворенные примеси в металле способствуют увеличению числа центров, если примеси будут поверхностно-активными веществами, понижающими поверхностное натяжение. В этом случае уменьшается критический размер зародыша, что эквивалентно увеличению степени переохлаждения.

### 4.3. Форма кристаллических образований

Расплавленные металлы, как правило, кристаллизуются без значительного переохлаждения. Для кристаллизации из раствора необходимо выполнить два условия:

- создать переохлаждение, то есть охладить раствор ниже температуры равновесной кристаллизации;
- создать в растворе один или несколько центров кристаллизации.

Следует реализовать особые условия, чтобы жидкость затвердела в один кристалл с идеальной структурой — монокристалл.

Чаще результатом кристаллизации являются не моно-, а поликристаллы.

Форма зерен, образующихся при кристаллизации, зависит от условий их роста, главным образом от скорости и направления отвода теплоты и температуры жидкого металла, а также от примесей.

В направлении отвода теплоты кристалл растет быстрее, чем в другом направлении. В результате образуется древовидный кристалл, так называемый *дендрит*, схема которого показана на рис. 4.5. Дендриты часто образуются при кристаллизации сплавов. Дендритное строение типично для литого металла. Установ-

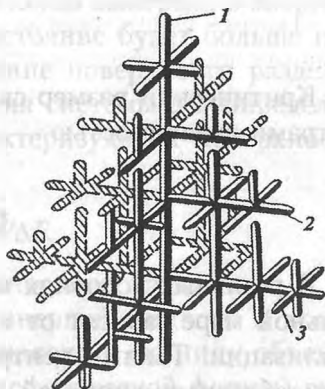


Рис. 4.5. Схема дендритного роста кристалла: 1 — ось первого порядка; 2 — ось второго порядка; 3 — ось третьего порядка

лено, что наибольшая скорость роста кристаллов наблюдается по таким плоскостям и направлениям решетки, которые имеют наибольшую плотность упаковки атомов. В результате вырастают длинные ветви, которые называются *осями первого порядка*. Затем на этих осях появляются и начинают расти ветви второго порядка и т. д.

Одновременно идет кристаллизация в участках между осями дендритов. Дендриты растут до тех пор, пока не соприкоснутся друг с другом. После этого окончательно заполняются межосные пространства, и дендриты превращаются в полновесные кристаллы с неправильной внешней огранкой. Такие кристаллы называются зернами или кристаллитами. На границах между зернами в участках между осями дендритов накапливаются примеси, появляются поры из-за усадки и трудностей подхода жидкого металла к фронту кристаллизации. Условия отвода теплоты при кристаллизации значительно влияют на форму зерен. Это видно на примере кристаллизации стального слитка.

Дендритообразование характерно для веществ, мало склонных к переохлаждению и имеющих большую скорость кристаллизации. В противном случае от центров кристаллизации равномерно по всем направлениям растут кристаллические иголки, образуя так называемые сферолиты.

#### 4.4. Строение слитка

Структура любого слитка состоит из трех основных зон. *Первая зона* — наружная мелкозернистая корка 1, состоящая из дезориентированных мелких кристаллов — дендритов. При соприкосновении со стенками изложницы в тонком прилегающем слое жидкого металла возникают резкий градиент температур и явление переохлаждения, ведущее к образованию большого количества центров кристаллизации. В результате корка получает мелкозернистое строение (рис. 4.6).

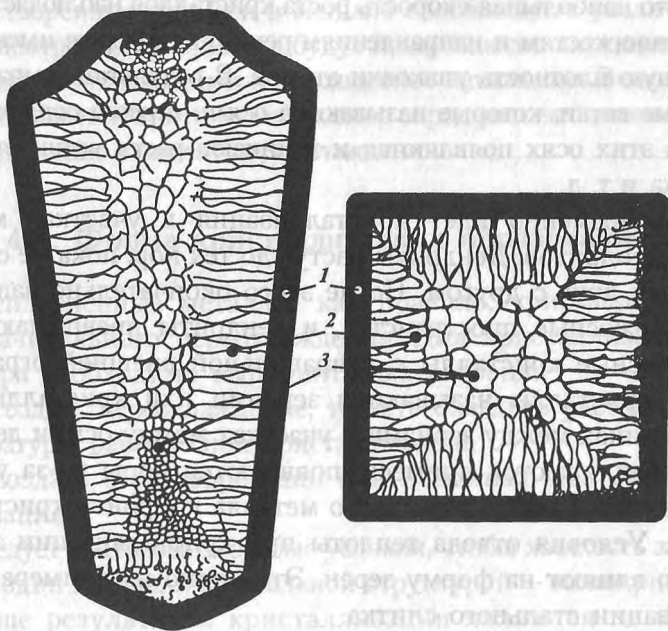


Рис. 4.6. Схема строения стального слитка

*Вторая зона слитка* — зона столбчатых кристаллов 2. После образования корки 1 условия теплоотвода меняются (из-за теплового сопротивления, повышения температуры стенки изложницы и других причин), градиент температуры в прилегающем слое жидкого металла резко уменьшается и, следовательно, уменьшается степень переохлаждения стали. В результате из небольшого числа центров кристаллизации начинают расти нормально ориентированные к поверхности корки (то есть в направлении отвода теплоты) столбчатые кристаллы.

*Третья зона слитка* — зона равноосных кристаллов 3. В центре слитка уже нет определенной направленности отдачи тепла. В результате в середине слитка, где наблюдается наименьшая степень переохлаждения, образуются равноосные кристаллы больших размеров.

При некоторых условиях (перегретый жидкий металл, малое содержание примесей и др.) зона крупных равноосных

кристаллов полностью исчезает. Структура слитка практически состоит из одних столбчатых кристаллов и называется *транскристаллической*. Зона столбчатых кристаллов характеризуется наибольшей плотностью, но в месте стыка столбчатых кристаллов собираются нерастворимые примеси, и слитки с транскристаллической структурой часто растрескиваются при обработке давлением. Транскристаллизация часто наблюдается в сварных швах, уменьшая их прочность.

В верхней части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь, концентрируется усадочная раковина. Под усадочной раковиной металл получается рыхлым, в нем содержится много усадочных пор. Часть слитка с усадочной раковиной и рыхлым металлом отрезают. Слиток имеет неоднородный состав. Например, в стали по направлению от поверхности к центру и снизу вверх увеличивается концентрация углерода и вредных примесей — серы и фосфора. Химическая неоднородность по отдельным зонам слитка называется *зональной ликвацией*. Она отрицательно влияет на механические свойства.

## 4.5. Вторичная кристаллизация

*Вторичной кристаллизацией* называется процесс, в результате которого происходит полная замена одной кристаллической структуры на другую (аллотропическое превращение) или частичное изменение структуры (выделение новой фазы из твердого раствора при изменении его концентрации). Как и первичная кристаллизация, вторичная кристаллизация идет путем образования центров кристаллизации и их роста. Здесь справедливы

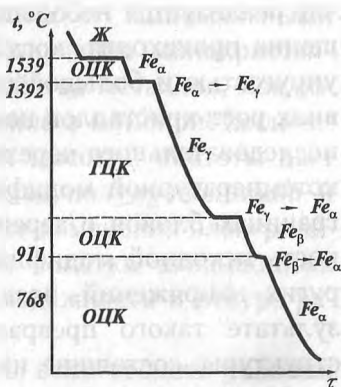


Рис. 4.7. Кривая охлаждения чистого железа

и другие закономерности первичной кристаллизации. В частности, с увеличением степени переохлаждения уменьшается критический размер зародыша. Однако для процессов вторичной кристаллизации характерны и свои, присущие им особенности. При охлаждении превращение начинается ниже равновесной температуры  $T_s$  и идет с выделением теплоты, при нагреве оно наступает выше  $T_s$  и протекает с поглощением тепла. На кривой охлаждения (нагрева) чистого металла аллотропическому превращению соответствует остановка. На рис. 4.7 приведена кривая охлаждения чистого железа.

Поскольку кристаллическая решетка каждой аллотропической модификации обладает определенной присущей ей плотностью, превращение сопровождается изменением объема и возникновением внутренних напряжений.

Например, аллотропическое превращение белого олова с плотностью  $7,3 \text{ г/см}^3$  в серое с плотностью  $5,7 \text{ г/см}^3$  вызывает разрушение серого олова в порошок.

Механизм роста новой модификации может быть нормальным и мартенситным.

*Нормальный* механизм роста кристаллов присущ металлам с высокой температурой аллотропического превращения (Fe, Ti, Zr) при условии их медленного охлаждения. В этом случае реализуется небольшая степень переохлаждения, превращение происходит, когда металл пластичен, обладает малой упругостью и большой подвижностью атомов. В таких условиях рост кристаллов новой модификации происходит путем последовательного перехода к ним атомов от исходной высокотемпературной модификации. Новая фаза зарождается на границах блоков с зерен исходной модификации. Пластичность исходной модификации соответствует релаксации упругих напряжений, возникающих при превращении. В результате такого превращения образуются полиэдрические структуры, состоящие из равноосных кристаллов.

*Мартенситный* механизм роста кристаллов присущ металлам с низкой температурой аллотропического превращения (Co). В металлах с высокой температурой аллотро-

пического превращения (Fe, Ti, Zr) он наблюдается при больших переохлаждениях, то есть также при низких температурах.

При мартенситном превращении  $\text{Fe}_\gamma$  в  $\text{Fe}_\alpha$  подавляется диффузия углерода. В результате получается мартенсит, значительно пересыщенный углеродом, отличающийся от безуглеродистого более высокой прочностью и твердостью.

Таким образом, аллотропия позволяет изменять структуру и свойства металлов, особенно сплавов, путем нагрева выше температуры аллотропических (фазовых) превращений и охлаждения с различными скоростями, иначе говоря, при помощи термической обработки.

Превращение, при котором осуществляется мартенситный механизм, называется *мартенситным превращением*, а образующаяся при этом фаза — *мартенситом*.

## 4.6. Получение монокристаллов

Большое научное и практическое значение имеют монокристаллы. Металлы в монокристаллическом состоянии отличаются высокой степенью чистоты и минимальными структурными несовершенствами. Получение монокристаллов позволяет изучить истинные свойства металлов, исключить влияние границ зерен. Применение в монокристаллическом состоянии германия и кремния высокой чистоты дает возможность использовать их свойства полупроводников и свести к минимуму неконтролируемые изменения электрических свойств. Монокристаллические лопатки авиационных двигателей позволяют повысить их надежность и ресурс работы.

Монокристаллы можно получить, если создать условия для роста кристалла только из одного центра кристаллизации.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое равновесная кристаллизация?
2. Каковы условия перехода металла из жидкого состояния в твердое?
3. Какие факторы обуславливают форму зерен при кристаллизации металла?
4. Каковы особенности вторичной кристаллизации?
5. Какие свойства имеют монокристаллы и каковы условия их получения?

## Глава 5

# СТРОЕНИЕ СПЛАВОВ

### 5.1. Определение сплава

Чистые металлы находят довольно ограниченное применение. Их используют главным образом в электрорадиотехнике (проводниковые, электровакуумные и другие материалы). Основными конструкционными материалами являются металлические сплавы.

Преимущественное использование в технике металлических сплавов объясняется тем, что они обладают более ценными, чем чистые металлы, комплексами механических, физических и технологических свойств.

**Сплавом** называется вещество, полученное сплавлением двух или более элементов. Сплав, приготовленный преимущественно из металлических элементов и обладающий металлическими свойствами, называется **металлическим сплавом**. Металлические сплавы можно получать методом порошковой металлургии, диффузией, возгонкой, электролизом и другими методами.

К основным понятиям в теории сплавов относятся: система, компонент, фаза.

**Система** — группа тел, выделяемых для изучения и наблюдений. В материаловедении системами являются металлы и

металлические сплавы. Чистый металл является простой системой. Сплавы из двух или более составляющих элементов являются сложными системами.

*Компоненты* сплава — это вещества, образующие систему. В металлических сплавах компонентами могут быть элементы (металлические и неметаллические) и химические соединения (не диссоциирующие при нагревании).

*Фазой* называется однородная часть системы, отделенная от другой части системы (фазы) поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или структура изменяются скачком. В твердых сплавах фазами могут быть зерна чистого металла, зерна твердого раствора и зерна химического соединения.

Почти все металлы в жидком состоянии растворяются один в другом в любых соотношениях. В результате растворения образуется однородный жидкий раствор с равномерным распределением атомов одного металла среди атомов другого металла. Лишь очень немногие металлы, главным образом сильно различающиеся размерами атомов, не растворяются в жидком состоянии, а если и растворяются, то ограниченно.

При образовании сплавов в процессе их затвердевания возможны различные взаимодействия входящих в них компонентов, что обуславливает разное строение сплавов.

## 5.2. Механическая смесь

Механическая смесь образуется после кристаллизации сплава, если в процессе кристаллизации сила взаимодействия между однородными атомами окажется больше силы взаимодействия между разнородными атомами. В этом случае в твердом сплаве будут присутствовать зерна одного чистого металла и рядом с ними — зерна другого чистого металла. Такая фаза возникает при большом различии в свойствах входящих в сплав металлов.



### 5.3. Твердые растворы

*Твердые растворы* — это такие твердые фазы, в которых соотношения между компонентами могут изменяться. В твердом растворе, так же как и в чистых металлах, атомы в пространстве расположены закономерно, образуя кристаллическую решетку. Этим твердые растворы отличаются от жидких растворов. В твердом растворе одно из входящих в состав сплава веществ сохраняет присущую ему кристаллическую решетку, а второе вещество, утратив свое кристаллическое строение, в виде отдельных атомов распределяется в кристаллической решетке первого. Первое вещество называется *растворителем*, второе — *растворимым*.

Твердые растворы обозначают буквами греческого алфавита:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

В зависимости от характера распределения атомов растворимого элемента различают твердые растворы внедрения или замещения. Независимо от типа твердого раствора общим для них является то, что они однофазны и существуют в интервале концентраций. Для твердых растворов характерен металлический тип связи.

В *твердых растворах внедрения* атомы растворимого элемента распределяются в кристаллической решетке металла-растворителя, занимая место между его атомами (рис. 5.1, б). Поскольку у металлов атомы в кристаллической решетке располагаются близко один к другому и пустоты имеют малые размеры, разместиться в таких пустотах могут только атомы с очень малыми размерами.

Наименьшие размеры атомов имеют некоторые металлоиды — водород, азот, углерод, бор, которые и образуют с металлами твердые растворы внедрения. Но и у этих элементов размеры атомов несколько превышают размеры межатомных промежутков в кристаллической решетке металлов. Поэтому при образовании твердых растворов внедрения решетка искажается, и в ней возникают напряжения. При этом концентрация твердого раствора внедрения не может быть высокой: она редко превышает 1–2 %.

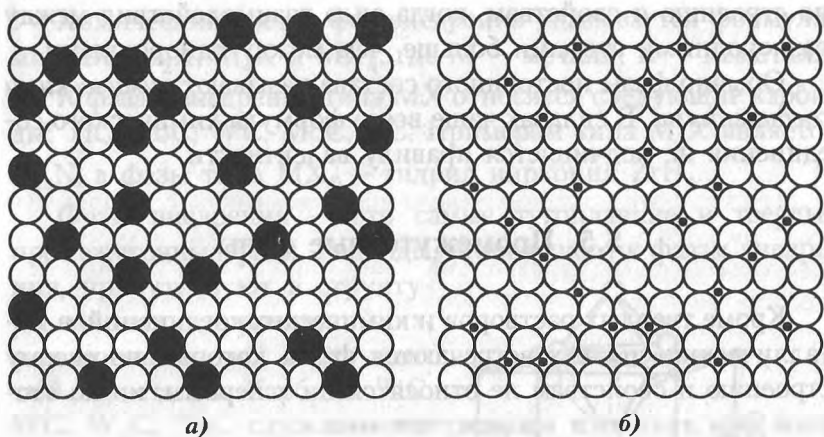


Рис. 5.1. Атомно-кристаллическая структура твердого раствора (схема):  
а — твердый раствор замещения; б — твердый раствор внедрения

В *твердых растворах замещения* атомы растворимого элемента занимают место атомов основного металла (рис. 5.1, а). Посторонние атомы могут замещать атомы растворителя в любых местах, поэтому такие растворы называют *неупорядоченными твердыми растворами*. Размеры атомов растворимого элемента всегда отличаются от размеров атома растворителя (они больше или меньше), поэтому при образовании твердого раствора замещения кристаллическая решетка металла-растворителя немного искажается, не утрачивая при этом своего основного строения. Твердые растворы замещения могут быть ограниченными и неограниченными. Одно из условий неограниченной растворимости — размерный фактор: чем больше различие в атомных радиусах, тем меньше растворимость.

#### 5.4. Химические соединения

Химические соединения чаще всего образуются между элементами, расположенными далеко один от другого в таблице Д.И. Менделеева, то есть существенно различающимися

по строению и свойствам, когда сила взаимодействия между разнородными атомами больше, чем между однородными.

Обычно фазы постоянного состава называют *химическими соединениями*. В сплавах чаще всего формула химического соединения не подчиняется правилу валентности.

### 5.5. Промежуточные фазы

Кроме твердых растворов и химических соединений, в металлических сплавах встречаются фазы, которые по своему строению и свойствам не относятся ни к первым, ни ко вторым; они являются промежуточными.

Как и химические соединения, такие промежуточные фазы имеют свою, отличную от образующих их компонентов кристаллическую решетку, но в то же время они могут существовать в интервале концентраций, как твердые растворы.

Промежуточные фазы могут быть постоянного и переменного состава.

Промежуточные фазы многочисленны и разнообразны. Эти соединения не подчиняются закону валентности. Рассмотрим некоторые из них.

*Интерметаллиды* — соединения между металлами (например,  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{MoFe}_2$ ,  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  и др.).

*Металлические соединения* — это фазы с металлическим типом связи. Такие фазы образуются при взаимодействии переходных металлов с C, N, H, которые называются соответственно карбидами, нитридами, гидридами. Кристаллическая структура этих соединений зависит от относительных размеров атомов неметалла  $R_{\text{нм}}$  и атомов металла  $R_{\text{м}}$ . Если отношение  $R_{\text{нм}}/R_{\text{м}} < 0,59$ , образуются промежуточные фазы с простыми пространственными решетками. Эти промежуточные фазы называются *фазами внедрения*.

Если  $R_{\text{нм}}/R_{\text{м}} > 0,59$ , образуются сложные пространственные решетки с большим числом атомов в элементарной ячейке.

Химический состав фаз внедрения указывается формулами:  $\text{MX}$ ,  $\text{M}_2\text{X}$ ,  $\text{M}_4\text{X}$  и  $\text{MX}_4$ , где  $\text{M}$  — металл;  $\text{X}$  — неметалл.

К фазам внедрения типа  $\text{MX}$  относятся следующие карбиды:  $\text{TiC}$ ,  $\text{NbC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{MoC}$ ,  $\text{VC}$ . Примером типа  $\text{M}_4\text{X}$  является  $\text{Fe}_4\text{N}$ , а фазы типа  $\text{MX}_4$  — гидрид циркония  $\text{ZrH}_4$ .

Фазы внедрения — это самые тугоплавкие и твердые промежуточные фазы. Карбиды, относящиеся к фазам внедрения, присутствуют в структуре многих коррозионноустойчивых, жаропрочных и инструментальных сталей. Карбиды  $\text{TiC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{W}_2\text{C}$ ,  $\text{TaC}$  служат основой спеченных твердых сплавов для режущих инструментов. Использование таких карбидных сплавов позволило увеличить скорость резания в десятки раз.

Карбид железа имеет сложную ромбическую структуру (рис. 5.2).

Эти промежуточные фазы отличаются высокой твердостью и хрупкостью, они также достаточно тугоплавки, но уступают по этим свойствам карбидам, являющимся фазами внедрения.

*Электронные соединения* характеризуются определенным отношением числа валентных электронов к числу атомов (электронной концентрацией) и образуются при взаимодействии металлов 1-го класса ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ) с металлами 2-го класса ( $\text{Zn}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Cd}$  и др.). Подобные соединения встречаются во многих важных технических сплавах ( $\text{Cu} + \text{Zn}$ ), ( $\text{Cu} + \text{Sn}$ ), ( $\text{Fe} + \text{Al}$ ), ( $\text{Cu} + \text{Si}$ ) и т. д.

Обычно в системе наблюдаются следующие фазы:

—  $\beta$ -фаза, электронная концентрация которой равна  $\frac{3}{2}$ , решетка ОЦК —  $\text{CuZn}$ ,  $\text{CuBe}$ ,  $\text{Cu}_3\text{Al}$ ,  $\text{Cu}_5\text{Sn}$ ,  $\text{AgMg}$  и др.;

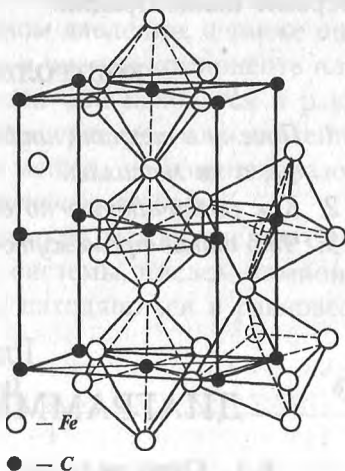


Рис. 5.2. Кристаллическая структура карбида железа  $\text{Fe}_3\text{C}$

—  $\gamma$ -фаза, электронная концентрация которой равна  $\frac{21}{13}$ , решетка сложная кубическая —  $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ,  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ,  $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$  и др.;

—  $\Sigma$ -фаза, электронная концентрация которой равна  $\frac{7}{4}$ , решетка ГПУ —  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Ag}_5\text{Al}_3$ ,  $\text{CuZn}_3$ ,  $\text{AuCd}_3$  и т. д.

Электронные соединения могут образовывать с компонентами, из которых они состоят, твердые растворы в широком интервале концентрации.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в технике наибольшее применение получили сплавы, а не металлы?
2. Как различаются по своему строению сплавы?
3. Что такое промежуточные фазы и каковы их свойства?

## Глава 6

## ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

### 6.1. Определение диаграммы состояния

Сплавы называют *однородными (гомогенными)*, если структура их однофазная, и *разнородными (гетерогенными)*, если структура их состоит из нескольких фаз. Для сплавов, образованных одними и теми же компонентами, фазовое состояние описывается диаграммой состояния.

*Диаграмма состояния* — графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от его концентрации и температуры. Диаграмма состояния показывает равновесные, устойчивые состояния, то есть такие, которые обладают минимальной свободной энергией. Изучение любого сплава прежде всего начинается с построения и анализа диаграммы состояния, так как именно она дает возможность изучать фазы и структурные составляющие сплава.

Пользуясь диаграммой состояния, можно установить возможность проведения термической обработки и ее режимы, температуры литья, горячей пластической деформации и т. д.

## 6.2. Правило фаз

Правило фаз устанавливает температурные условия процесса кристаллизации при заданном давлении, а также определяет, сколько фаз должно быть в чистом компоненте или в сплаве определенного состава, если они находятся в равновесном состоянии при данной температуре (или давлении). Число факторов, которые можно менять, не изменяя фазового состава сплава, называется *степенью свободы*.

Правило фаз выражает зависимость между числом степеней свободы  $S$  (вариантностью) системы, числом компонентов  $K$  и числом фаз  $\Phi$  системы, находящихся в равновесии (рис. 6.1).

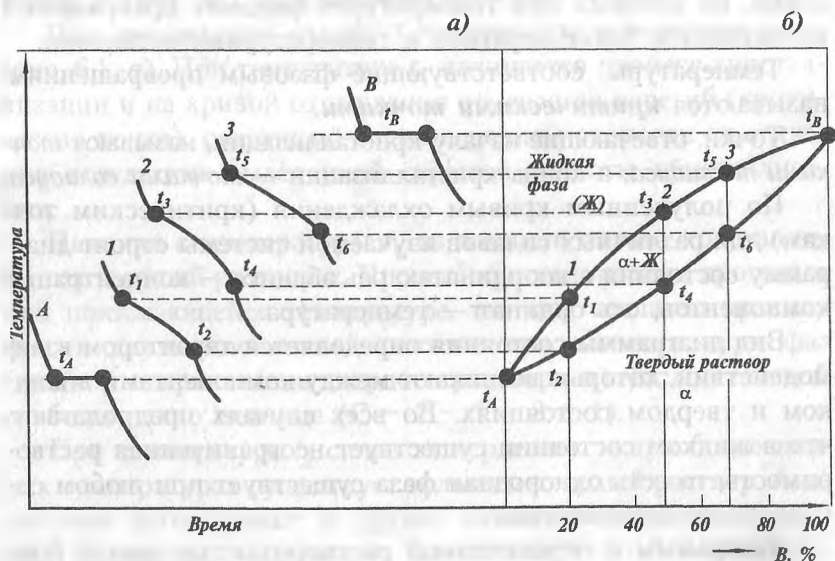


Рис. 6.1. Построение диаграммы состояния для случая неограниченной взаимной растворимости компонентов А и В: а — кривые охлаждения; б — диаграмма состояния

Обычно все превращения в металлах и сплавах происходят при постоянном давлении (атмосферном). Тогда правило фаз записывается так:

$$C = K - \Phi + 1.$$

Уравнение правила фаз позволяет корректировать правильность построения диаграмм состояния.

Построение диаграмм состояния осуществляют экспериментальными методами. Наиболее часто пользуются методом термического анализа. Сущность этого метода заключается в следующем. Отбирают несколько сплавов данной системы с различным отношением масс входящих в них компонентов. Сплавы помещают в огнеупорные тигли и нагревают в печи. После расплавления сплавов тигли с ними медленно охлаждают и фиксируют скорость охлаждения. По полученным данным строят термические кривые в координатах «время—температура» (рис. 6.1).

В результате измерений получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки.

Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называются **критическими точками**.

Точки, отвечающие началу кристаллизации, называют *точками ликвидуса*, а конца кристаллизации — *точками солидуса*.

По полученным кривым охлаждения (критическим точкам) для различных сплавов изучаемой системы строят диаграмму состояния в координатах; ось абсцисс — концентрация компонентов, ось ординат — температура.

Вид диаграммы состояния определяется характером взаимодействий, которые возникают между компонентами в жидком и твердом состояниях. Во всех случаях предполагают, что в жидком состоянии существует неограниченная растворимость, то есть однородная фаза существует при любом соотношении компонентов.

Диаграммы с ограниченной растворимостью или с полным отсутствием растворимости в жидком состоянии практического значения не имеют, так как сплавы этих систем мало применяются в технике.

### 6.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы

Полная взаимная растворимость металлов в твердом состоянии возможна лишь для изоморфных металлов. При их сплавлении образуется непрерывный ряд твердых растворов замещения. Например, имеются компоненты А и В; фазы — жидкий раствор Ж и твердый раствор  $\alpha$ . Температура охлаждающегося чистого компонента А понижается до  $t_A$  (рис. 6.1, а, кривая А), при которой компонент А затвердевает. На кривой отмечается остановка (горизонтальная линия), так как, согласно правилу фаз, в этом случае при постоянной температуре могут сосуществовать только две фазы — твердая и жидкая ( $C = 1 + 1 - 2 = 0$ ). После затвердевания компонента А, когда  $\Phi = 1$ , температура снова понижается. Аналогично может быть рассмотрена кристаллизация и компонента В (рис. 6.1, а, кривая В).

При охлаждении сплава 1 температура понижается до  $t_1$  (рис. 6.1, а). При температуре  $t_1$  начинается процесс кристаллизации и на кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделенной скрытой теплоты кристаллизации.

Начиная с температуры  $t_1$  из жидкого сплава кристаллизуется твердый раствор  $\alpha$ . Процесс кристаллизации протекает при понижающейся температуре, так как, согласно правилу фаз, в двухкомпонентной системе при наличии двух фаз (жидкой и кристаллов твердого раствора  $\alpha$ ) число степеней свободы равно единице ( $C = 2 + 1 - 2 = 1$ ).

При температуре  $t_2$  сплав затвердевает, и при более низких температурах существует только  $\alpha$ -твердый раствор. Аналогично затвердевают и другие сплавы (например, 2 и 3) этой системы.

Если найденные критические точки от  $t_1$  до  $t_2$  перенести на диаграмму, где по оси абсцисс нанесен состав сплава, а по оси ординат — температура, и одноименные критические точ-



ки соединить плавными кривыми, то получается диаграмма состояния системы сплавов А и В, образующих непрерывный ряд твердых растворов (рис. 6.1, б).

Начало затвердевания сплавов происходит при температурах, соответствующих линии ликвидус  $t_A$   $t_3$   $t_B$ . Температура окончания кристаллизации соответствует линии солидус  $t_A$ .

В интервале температур между линиями ликвидус и солидус сосуществуют две фазы — жидкий сплав и твердый раствор  $\alpha$ .

Линии  $m_2n_2$  и  $m_3n_3$  и другие, соединяющие составы фаз в равновесии, называются *конодами* (рис. 6.2).

Пользуясь диаграммой состояния, можно для любой температуры определить не только число фаз, но и их состав и количественное соотношение.

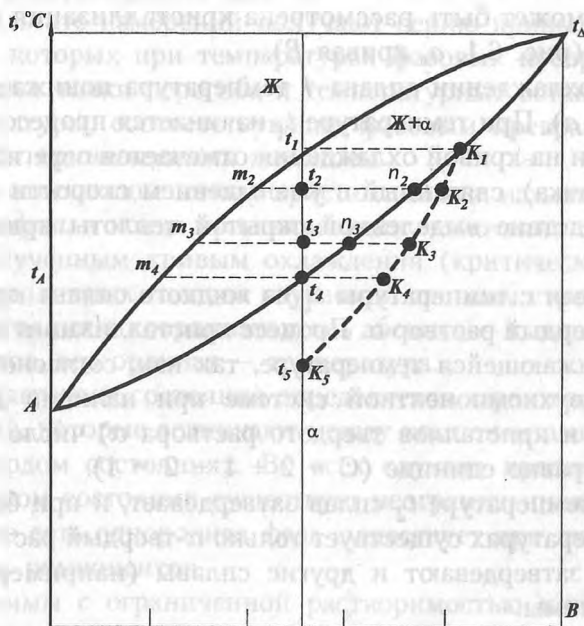


Рис. 6.2. Диаграмма состояния для случая неограниченной растворимости компонентов А и В

*Правило отрезков* позволяет определять это соотношение. Оно может быть использовано только для двухфазной области диаграммы состояния. Согласно этому правилу необходимо вычислить отношение длины отрезка, примыкающего к составу жидкой фазы, к длине всей коноды, что показывает массовое, или объемное, количество твердой фазы. Для определения количества жидкой фазы вычисляется отношение длины отрезка, примыкающего к составу твердой фазы, к длине коноды.

Следовательно, количество твердой фазы (в процентах) при температуре  $t_2$  определится отношением отрезка  $t_2m_2$  к длине коноды  $m_2n_2$ :

$$\alpha = \frac{t_2m_2}{m_2n_2} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Количество жидкой фазы

$$\text{Ж} = \frac{t_2n_2}{m_2n_2} \cdot 100 \text{ \%}.$$

**Неравновесная кристаллизация.** В реальных условиях охлаждения состав в пределах каждого кристалла и разных кристаллов не успевает выравниваться, и он не будет одинаковым (рис. 6.2).

При температуре  $t_2$  состав жидкой фазы будет соответствовать точке  $m_2$ , а  $\alpha$ -фазы — точке  $n_2$ . Но отдельные части кристаллов  $\alpha$ -фазы, которые образовались при температуре выше  $t_2$ , не изменили своего начального состава, и средний состав кристаллов будет соответствовать точке  $K_2$ . При понижении температуры средний состав кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора все более отклоняется от равновесного. При температурах  $t_3$  он будет соответствовать не  $n_3$ , а  $K_3$ . Если через точки  $K_1 - K_5$  провести кривую, то она будет характеризовать средний состав кристаллов  $\alpha$  при данной скорости охлаждения. При температурах  $t_4$  в условиях равновесия фаз выбранный сплав должен затвердеть. В неравновесных условиях этого

не произойдет, так как в сплаве останется жидкая фаза, количество которой определится из соотношения  $(t_4 K_4 / m_4 K_4)$ . Сплав затвердеет тогда, когда средний состав  $\alpha$ -фазы будет соответствовать составу взятого сплава. Это произойдет при температуре  $t_5$ , когда периферийные зоны кристаллов будут иметь состав, отвечающий 50 % компонента В. Следовательно, в неравновесных условиях сплав затвердевает ниже равновесной температуры затвердевания. Линию  $K_1-K_5$  называют *линией неравновесного солидуса*. Каждый сплав при заданной скорости охлаждения характеризуется своим неравновесным солидусом.

Скорость приращения твердой фазы при понижении температуры называется *темпом кристаллизации*.

*Дендритная (внутрикристаллитная) ликвация*. В результате неравновесной кристаллизации химический состав образующихся кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора по сечению оказывается переменным.

В процессе кристаллизации образуются кристаллы твердого раствора дендритного типа. Поэтому оси первого порядка, возникающие в начальный момент кристаллизации, обогащены более тугоплавким компонентом В. Периферийные слои кристаллов и межосные пространства, кристаллизующиеся в последнюю очередь, будут обогащены компонентом А, понижающим температуру плавления сплава, и их состав близок к концентрации, соответствующей исходной концентрации сплава. Такую неоднородность состава сплава внутри отдельных кристаллов называют *внутрикристаллитной* или *дендритной ликвацией*.

Чем больше температурный интервал кристаллизации сплава, то есть чем больше расстояние между линиями ликвидуса и солидуса, тем больше проявляется дендритная ликвация.

Дендритная ликвация может быть ослаблена продолжительным нагревом сплава при температурах, обеспечивающих достаточную скорость диффузии  $(0,8-0,9 T_{пл})$ . После такого нагрева, называемого *диффузионным отжигом* или *гомогенизацией*, дендритная ликвация литого сплава уменьшается.

**Зональная ликвация.** Кроме внутрикристаллитной ликвации, химическая неоднородность образуется по зонам слитка; такую неоднородность называют *зональной ликвацией*.

Зональная ликвация по сечению слитка бывает прямой и обратной. При прямой зональной ликвации поверхностные зоны слитка обогащены компонентом, повышающим температуру плавления, а центральные зоны слитка содержат больше компонента, понижающего эту температуру. При обратной ликвации наблюдается противоположная закономерность. Развитие зональной ликвации зависит от скорости охлаждения, размера слитка, скорости диффузии, интервала температур кристаллизации и т. д. Обычно чем больше развита дендритная ликвация, тем меньше зональная ликвация. Для ослабления зональной ликвации применяют высокие скорости охлаждения, так как при этом развивается дендритная ликвация.

#### **6.4. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси чистых компонентов**

Компоненты А и В; фазы — жидкий расплав; кристаллы А и В.

Диаграмма состояния для случая, когда компоненты А и В взаимно неограниченно растворимы в жидком состоянии и нерастворимы в твердом состоянии и при этом не образуют химические соединения, дана на рис. 6.3. Выше линии *ACB*, называемой линией ликвидус, все сплавы находятся в жидком состоянии, ниже линии *DCE*, называемой линией солидус, — в твердом, между ними — в двухфазном состоянии.

Рассмотрим кристаллизацию сплавов I, II, III, отличающихся содержанием компонентов А и В. Температуры начала кристаллизации у них различные, но заканчивают кристаллизацию они при одной температуре  $t_3$ .

Кривая кристаллизации сплава II аналогична кривым охлаждения чистых металлов, но температура плавления сплава

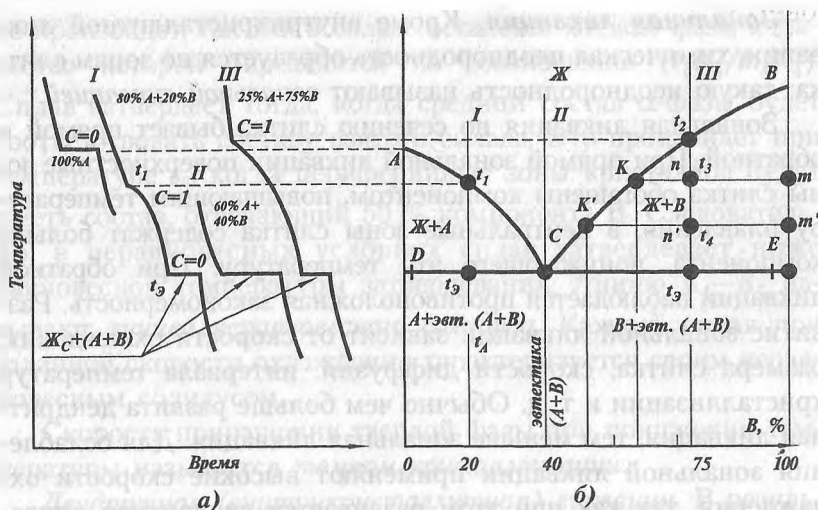


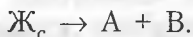
Рис. 6.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии механические смеси: а — кривые охлаждения; б — диаграмма состояния

ниже, чем у образующих его компонентов. Особенность кристаллизации заключается в том, что кристаллизация обоих компонентов происходит одновременно, то есть одновременно появляются и растут кристаллы компонентов А и В, и таким образом образуется мелкокристаллическая смесь обоих компонентов.

Механическая смесь двух (или более) разнородных кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкости определенного химического состава при постоянной и минимальной для сплавов данной системы температуре, называется *эвтектикой*. Химический состав эвтектической смеси определенных компонентов всегда одинаков (определяется точкой С на рис. 6.3). Для этого случая по правилам фаз имеем:  $K = 2$  (А и В);  $\Phi = 3$  (жидкость кристаллов А и В);  $C = 2 + 1 - 3 = 0$ .

Сплавы I и III кристаллизуются в интервалах температур  $(t_1 - t_3)$  и  $(t_2 - t_3)$ . При  $t_1$  и  $t_2$  образуются кристаллы того элемента, которому легче образовать устойчивый зародыш. При  $t_3$  перераспределение закончится, остатки жидкой фазы достигнут эвтектической концентрации (точка С) и произойдет

совместная кристаллизация компонентов (число степеней свободы  $C = 0$ ) по эвтектической реакции



В неравновесных условиях охлаждения может образоваться квазиэвтектика, когда механическая смесь имеет химический состав, несколько отличающийся от равновесного эвтектического.

### 6.5. Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии

Компоненты А и В такой системы обладают в жидком состоянии неограниченной растворимостью, а в твердом — ограниченной, меняющейся в зависимости от температуры. На рис 6.4 изображена диаграмма такой системы.

Выше линии  $ACB$  (ликвидус) расположена область жидкого сплава. Линия  $ADCEB$  — солидус, линия  $DCE$  — линия эвтектического превращения, точка  $C$  — эвтектическая точка. Области ниже линий  $AD$  и  $BE$  отвечают соответственно твердым растворам  $\alpha$  и  $\beta$ . При понижении температуры в застывшей системе происходит процесс выделения кристаллов твердого раствора, из которого затем выделяются кристаллы другого раствора. Этот процесс носит название *вторичной кристаллизации*. В интервале от точки  $D$  до точки  $E$  затвердевание происходит согласно диаграмме системы элементов, образующих механическую смесь. В точке  $C$  образуется эвтектика, состоящая из смеси компонентов твердых растворов  $\alpha$  и  $\beta$ .

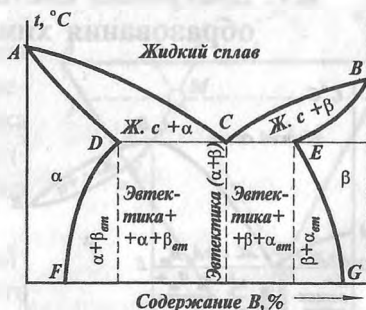


Рис. 6.4. Диаграмма состояния сплава из двух элементов для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом растворе

## 6.6. Диаграмма состояния сплавов для случая перитектического превращения

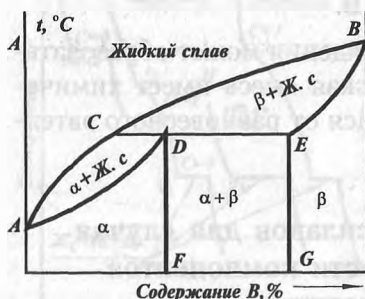


Рис. 6.5. Диаграмма состояния сплавов для случая перитектического превращения

Слово *перитектика* — греческое и означает «окружение». В этой системе компоненты в жидком состоянии обладают полной растворимостью, а в твердом состоянии растворимы частично. Выпавшие из жидкости кристаллы одного твердого раствора (строго определенного состава), реагируя с оставшейся жидкостью, образуют кристаллы

другого твердого раствора, которые окружают первые. Диаграмма такой системы изображена на рис. 6.5. Перитектическое превращение происходит при температурах, соответствующих горизонтальной линии  $CDE$ , называемой линией перитектического превращения, выше которой находятся твердый раствор  $\beta$  и жидкий сплав. Перитектическое превращение протекает очень медленно и в технических сплавах обычно не доходит до конца.

## 6.7. Диаграмма состояния сплавов для случая образования химического соединения



Рис. 6.6. Диаграмма состояния сплавов для случая образования химического соединения

На рис. 6.6 изображена диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют устойчивое химическое соединение, рассматриваемое как самостоятельный компонент, образующий с компонентами А и В простейшие диаграммы состояния. На приведенной диаграмме левая часть представляет случай отсутствия раствори-

мости компонентов в твердом растворе, а правая — случай полной растворимости.

Существуют еще диаграммы так называемого аллотропического превращения, изображенные на рис. 6.7, а, б. Подобные диаграммы характерны для сплавов железа, титана.

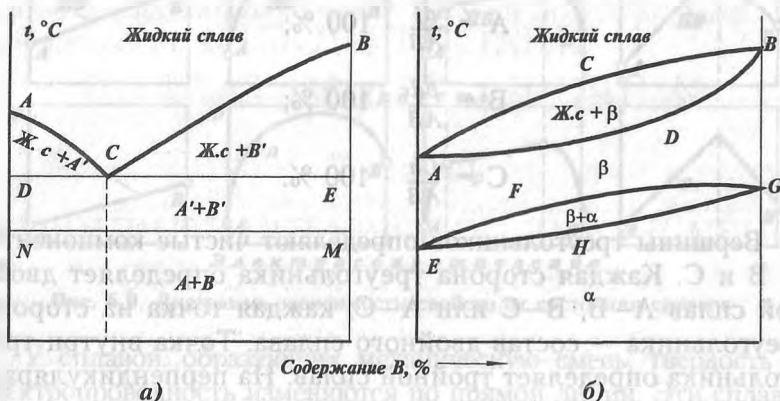


Рис. 6.7. Диаграмма аллотропического превращения

## 6.8. Диаграмма состояния трехкомпонентного сплава

Основанием такой диаграммы является равносторонний треугольник (рис. 6.8). Каждая точка внутри треугольника отвечает определенному составу сплава из трех компонентов: А, В и С.

Для определения состава тройного сплава можно применить правило, известное из геометрии: сумма трех отрезков, отсеченных на стороне равностороннего треугольника прямыми, проведенными

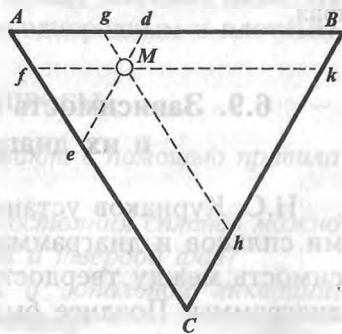


Рис. 6.8. Диаграмма состояния сплава из трех компонентов



ми через любую точку внутри него параллельно сторонам, является постоянной величиной и равна длине его стороны. Например, для точки  $M$  (рис. 6.8)

$$Af + Bd + Ch = AB.$$

Принимая сторону  $AB$  за 100 %, можно определить состав сплава в точке  $M$  по компонентам:

$$A = \frac{af}{AB} \cdot 100 \%;$$

$$B = \frac{bd}{AB} \cdot 100 \%;$$

$$C = \frac{ch}{AB} \cdot 100 \%.$$

Вершины треугольников определяют чистые компоненты  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Каждая сторона треугольника определяет двойной сплав  $A-B$ ,  $B-C$  или  $A-C$ ; каждая точка на стороне треугольника — состав двойного сплава. Точка внутри треугольника определяет тройной сплав. На перпендикулярах, восставленных из вершин треугольника, откладываются критические температуры. В отличие от диаграмм двойных сплавов, изображаемых на плоскости и имеющих линии ликвидуса и солидуса, диаграммы тройных сплавов имеют поверхности ликвидус и солидус, между которыми в пространстве сплав состоит из жидкости и кристаллических фаз.

## 6.9. Зависимость между свойствами сплавов и их диаграммами состояния

Н.С. Курнаков установил зависимость между свойствами сплавов и диаграммами состояния. Он наблюдал зависимость между твердостью, электропроводностью и типом диаграммы. Позднее была установлена зависимость механических и физических свойств сплавов от их состояния. На рис. 6.9 представлены диаграммы зависимости свойств от состояния сплавов.

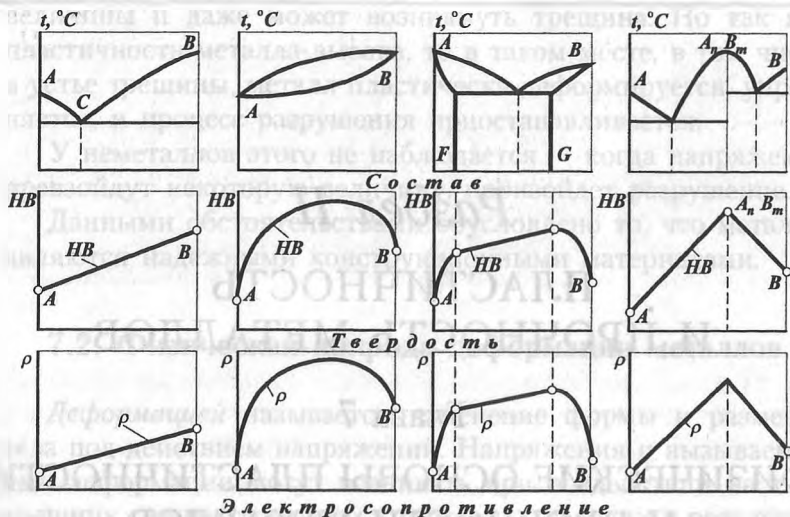


Рис. 6.9. Диаграмма зависимости свойств от состояния сплавов

У сплавов, образующих механическую смесь, твердость и электропроводность изменяются по прямой линии. Эти сплавы имеют эвтектический состав, легкоплавки, обладают хорошей жидкотекучестью. У сплавов с ограниченной растворимостью твердость и электропроводность изменяются по кривой. Структурно неоднородные сплавы легче обрабатываются инструментом. При широком интервале застывания получается пористый металл, а при небольшом расстоянии между линиями ликвидуса и солидуса сплав получается более однородным и плотным.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие зависимости устанавливают с помощью правила фаз?
2. Каким образом по диаграмме состояния сплавов можно определить количество жидкой и твердой фаз?
3. Каковы отличия дендритной и зональной ликваций; факторы, влияющие на их величину?
4. Назовите основные типы диаграмм состояния сплавов.
5. Какова связь свойств сплавов с типом диаграмм состояния?

## Раздел II

# ПЛАСТИЧНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

### Глава 7

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

### 7.1. Общая характеристика механических свойств

Под *механическими свойствами* понимают характеристики, определяющие поведение материала под действием приложенных внешних механических сил. Основными механическими свойствами являются прочность, пластичность, упругость, вязкость, твердость. Зная механические свойства, конструктор при проектировании обоснованно выбирает соответствующий материал, обеспечивающий надежность и долговечность машин и конструкций при их минимальной массе.

В результате механических испытаний получают числовые значения механических свойств, то есть значения напряжений или деформаций, при которых происходят изменения физического и механического состояний материала.

Наличие металлической связи придает металлу способность к пластической деформации и к самоупрочнению в результате пластической деформации. Поэтому если внутри материала есть дефект или имеются концентраторы напряжений, то в этих местах напряжения достигают большой

величины и даже может возникнуть трещина. Но так как пластичность металла высока, то в таком месте, в том числе в устье трещины, металл пластически деформируется, упрочняется, и процесс разрушения приостанавливается.

У неметаллов этого не наблюдается — когда напряжения преобладают некоторую величину, произойдет разрушение.

Данными обстоятельствами обусловлено то, что металлы являются надежными конструкционными материалами.

## 7.2. Физическая природа деформации металлов

*Деформацией* называется изменение формы и размеров тела под действием напряжений. Напряжения и вызываемые ими деформации могут возникать при воздействии на тело внешних сил растяжения, сжатия и т. д., а также в результате фазовых (структурных) превращений, усадки и других протекающих в металле физико-химических процессов, связанных с изменением объема.

Деформация под действием напряжения может быть упругой и пластической (остаточной). Пластическая деформация происходит только под действием касательных напряжений, достаточных для необратимого перемещения атомов в кристаллической решетке.

*Упругой* называется деформация, полностью исчезающая после прекращения действия (снятия) вызвавших ее напряжений.

При упругой деформации происходит незначительное изменение расстояний между атомами в кристаллической решетке (рис. 7.1, а, б). С увеличением межатомных расстояний существенно возрастают силы взаимного притяжения атомов. При снятии напряжения под действием этих сил атомы возвращаются в исходное положение.

Если нормальные напряжения достигают значения сил межатомной связи, то произойдет хрупкое разрушение путем отрыва одной части объекта от другой (рис. 7.1, в, г). Упругую деформацию вызывают также и небольшие касательные напряжения (рис. 7.2, б).

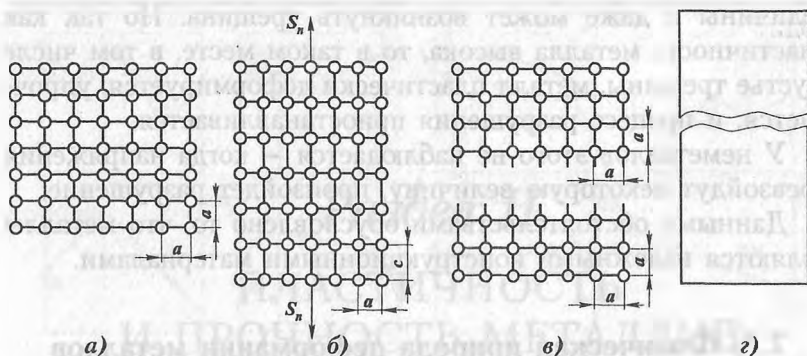


Рис. 7.1. Схема упругой деформации и хрупкого разрушения под действием нормальных напряжений: *а* — ненапряженная решетка металла; *б* — упругая деформация; *в*, *г* — хрупкое разрушение в результате отрыва

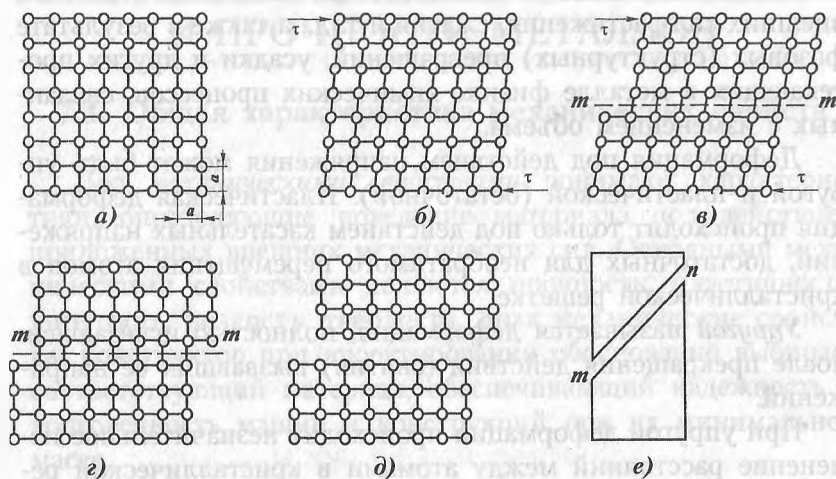


Рис. 7.2. Схема упругой пластической деформации и пластического (вязкого) разрушения под действием касательных напряжений: *а* — ненапряженная решетка; *б* — упругая деформация; *в* — упругая и пластическая деформация; *г* — пластическая деформация, остаточные напряжения сняты; *д*, *е* — пластическое (вязкое) разрушение в результате сдвига

*Пластической* или *остаточной* называется деформация, остающаяся после прекращения действия вызвавших ее напряжений. При пластической деформации в кристаллической решетке металла под действием касательных напряжений проис-

ходит необратимое перемещение атомов (рис. 7.2, *з*). При небольших напряжениях (рис. 7.2, *б*) атомы смещаются незначительно и после снятия напряжений возвращаются в исходное положение. При увеличении касательного напряжения наблюдается необратимое смещение атомов (рис. 7.2, *в*), то есть происходит пластическая деформация, причем сплошность тела не нарушается (рис. 7.2, *г*). В результате развития пластической деформации может произойти пластическое (вязкое) разрушение путем сдвига (рис. 7.2, *д*, *е*).

В кристаллической решетке сдвиг (скольжение) происходит по плоскостям и в направлениях с наиболее плотной упаковкой атомов. Эти плоскости, называемые *плоскостями сдвига* или *скольжения*, зависят от типа кристаллической решетки. Чем больше элементов сдвига в решетке, тем выше пластичность.

*Деформация двойникованием* представляет собой перестройку части кристалла в новое положение, зеркально симметричное по отношению к недеформированной части кристалла (рис. 7.3). Плоскость, по отношению к которой выполняется зеркальная симметрия, называется *плоскостью двойникования*. При двойниковании атомные плоскости сдвигаются параллельно плоскости двойникования на разные рас-

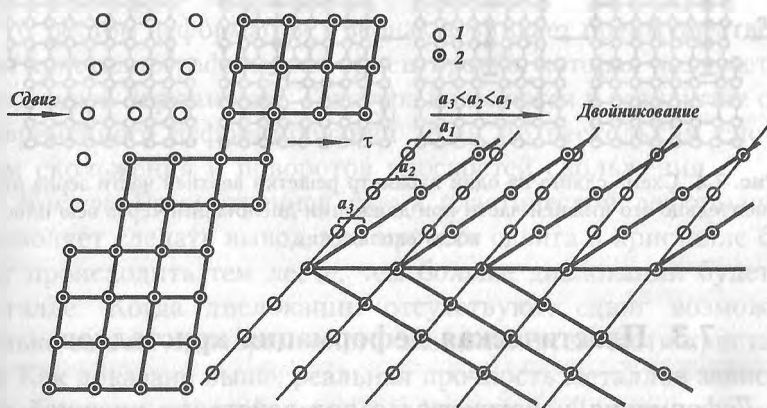


Рис. 7.3. Перемещение атомов при сдвиге (слева) и двойниковании (справа). Положение атомов до (1) и после (2) деформации

стояния. По сравнению со скольжением двойникование занимает второстепенное положение, деформация за счет двойникования всегда меньше деформации скольжения. Роль двойникования возрастает, если скольжение невозможно или сильно затруднено. В металлах с ОЦК- и ГЦК-решетками двойникование наблюдается лишь при низких температурах и высоких скоростях деформации. В металлах с ГПУ-решеткой, где немного систем скольжения, деформирование при нормальных условиях сопровождается двойникованием.

*Дислокационный механизм пластической деформации.* Атомы, расположенные в поле дислокации, возбуждены, их энергия повышена, они уже выведены из регулярных положений с минимальной свободной энергией. Такое состояние кристалла нестабильно. Достаточно приложить существенно меньшие напряжения, чем при синхронном сдвиге, чтобы ограниченная группа атомов, слегка сместившись, заняла новые устойчивые положения. Так совершается элементарный акт пластической деформации с затратой минимума энергии (рис. 7.4).

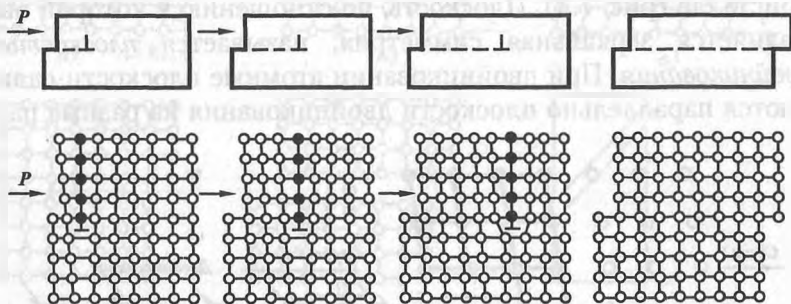


Рис. 7.4. Схема сдвига на один параметр решетки верхней части зерна относительно его нижней части при движении дислокации через всю плоскость скольжения

### 7.3. Пластическая деформация кристаллов

*Деформация монокристалла* под действием внешней нагрузки начинается в той системе, где касательное напряжение превысит критическое напряжение. Эту систему называют

ют *главной*. Первоначально дислокации движутся только по плоскостям главной системы. При этом слои кристалла сдвигаются относительно друг друга вдоль плоскостей скольжения. Пока скольжение идет по главной системе, монокристалл упрочняется слабо, поэтому начальную стадию скольжения называют *стадией легкого скольжения*. С ростом деформации скольжение распространяется на другие системы и возникает множественное скольжение. На этой стадии дислокации движутся в пересекающихся плоскостях, возрастает сопротивление их движению, образуется сложная дислокационная структура. Как следствие — увеличивается прочность.

*Деформация поликристалла* начинается сразу по нескольким системам скольжения и сопровождается изгибами и поворотами плоскостей скольжения. Из-за беспорядочного расположения зерен в поликристалле деформация отдельных зерен и распределение в них деформационных искажений неоднородны. С ростом деформации различие между зернами уменьшается и изменяется форма самих зерен, которые постепенно вытягиваются; плотность дефектов повышается настолько, что границы зерен становятся неотличимыми от деформированного металла. При значительных, свыше 40 %, деформациях образуется волокнистая структура.

С ростом деформации в зернах возникает преимущественная кристаллографическая ориентировка, которая называется *текстурой деформации*. Текстура появляется в результате одновременного деформирования зерен по нескольким системам скольжения и поворотов плоскостей скольжения.

*Наклеп*. Рассмотренная схема пластической деформации позволяет сделать вывод, что процесс сдвига в кристалле будет происходить тем легче, чем больше дислокаций будет в металле. Когда дислокации отсутствуют, сдвиг возможен только за счет одновременного смещения всей части кристалла. Как доказано выше, реальная прочность металлов зависит от плотности дислокации при деформации. Достигнув минимального значения при некоторой плотности дислокации, реальная прочность начинает возрастать.



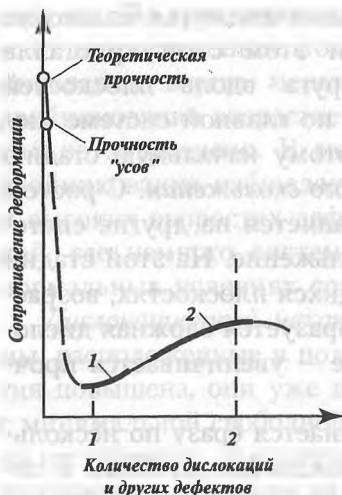


Рис. 7.5. Зависимость прочности от количества дислокаций и других дефектов кристаллической решетки (схема И.А. Одингга): 1 — чистые отожженные металлы; 2 — сплавы, упрочненные легированием, термической обработкой, пластической деформацией (наклеп) и т. п.

$10^7$ — $10^8$  см<sup>-2</sup>. С уменьшением количества дислокаций прочность возрастает и может достигать теоретического значения. Так, например, у нитевидных металлических кристаллов «усов» толщиной 0,5—2 мкм и длиной до 10 мм структура практически бездефектна. Они имеют прочность, почти равную теоретической:  $\sigma_{\text{в}} = 13\,500$  МПа. Увеличение размеров «усов» приводит к появлению дислокаций и резкому снижению прочности.

*Наклеп* называется изменение свойства металла в результате холодной пластической деформации. С увеличением степени пластической деформации повышаются прочность и твердость. Одновременно понижаются пластичность и вязкость металла, то есть происходит его охрупчивание. Наибо-

Техническая (реальная) прочность металлов в 10—1000 раз меньше, чем их теоретическая прочность, определяемая силами межатомного сцепления. Так, для железа теоретически вычисленное значение сопротивления отрыву  $S_{\text{от}} = 21 \cdot 10^3$  МПа. Техническая же прочность  $S_{\text{от}} = 700$  МПа. Такое большое различие объясняется тем, что теоретическая прочность соответствует идеальной бездефектной структуре металла. В реальных металлах всегда имеются дислокации и другие дефекты кристаллической решетки, включения, микротрещины, понижающие прочность и инициирующие разрушение (рис. 7.5).

Минимальную прочность имеют чистые отожженные металлы при плотности дислокаций около

лее высокопрочным материалом в современной технике является нагартованная стальная проволока, получаемая в результате холодного волочения при степени деформации 80—90 % и имеющая временное сопротивление 3000—4000 МПа. Такая прочность не может быть достигнута легированием и термообработкой. В результате наклепа существенно изменяются физические и химические свойства металлов (например, повышаются электросопротивление, растворимость в кислотах, уменьшается теплопроводность).

Упрочнение при наклепе объясняется прежде всего тем, что с увеличением степени пластической деформации на несколько порядков возрастает число дислокаций. По теоретическим расчетам и экспериментальным данным в поликристаллическом отожженном металле число дислокаций составляет  $10^6$ — $10^8$ , в сильно деформированном металле — до  $10^{11}$ — $10^{12}$  на  $\text{см}^{-2}$ . При увеличении числа дислокаций их свободное перемещение затрудняется взаимным влиянием. Упрочнение вызывается также торможением дислокаций в связи с измельчением блоков и зерен, искажением решетки металла, возникновением напряжений. Особо эффективными «барьерами» для дислокаций являются границы зерен и блоков. Дислокации могут тормозиться дисперсионными частицами, выделяющимися из твердого раствора при деформировании.

*Сверхпластичность.* В общем случае способность металла к значительной равномерной деформации без упрочнения называется *сверхпластичностью*. Действительно, почему нельзя продеформировать образец (например, растяжением) как угодно много? Во-первых, потому, что в процессе деформации металл наклепывается (размножение дислокаций) и теряет способность пластически деформироваться; во-вторых, например, при температурах выше температуры рекристаллизации образуется шейка (локальная деформация) и происходит разрушение образца.

Поэтому состояние сверхпластичности может быть достигнуто в специальных сплавах при соответствующей термообработке и особых условиях деформирования.

## 7.4. Характеристики прочности и пластичности

**Прочность** — способность тела (металла) сопротивляться деформациям и разрушениям. Большинство технических характеристик прочности определяют в результате статического испытания на растяжение. На рис. 7.6 приведена диаграмма растяжения отожженной стали. При нагрузке, соответствующей начальной части диаграммы, материал испытывает только упругую деформацию. До точки *a*, определяющей конец прямолинейного участка диаграммы растяжения, соответствует предел пропорциональности.

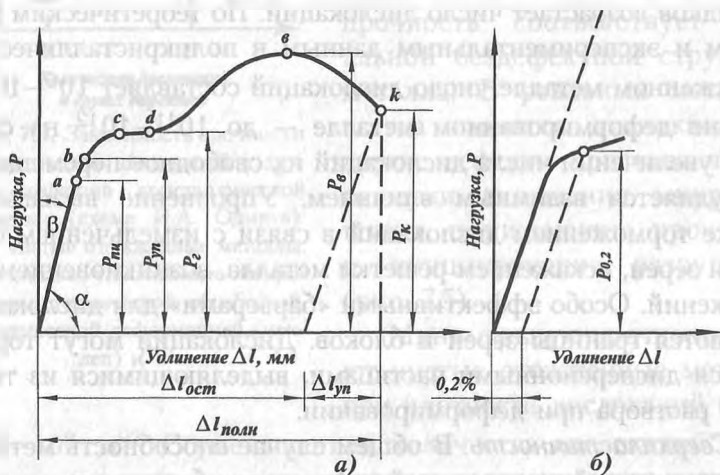


Рис. 7.6. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали (а) и схема определения условного предела текучести  $\sigma_{0.2}$  (б)

Теоретический предел пропорциональности — максимальное напряжение, до которого сохраняется линейная зависимость между напряжением и деформацией. Прямолинейную зависимость между напряжением и деформацией выражают законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

где  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \%$  — относительная деформация;  $\Delta l$  — абсолютное удлинение;  $l_0$  — начальная длина отрезка. Коэффици-

ент пропорциональности  $E(\operatorname{tg} \alpha)$ , характеризующий упругие свойства материала, называется *модулем нормальной упругости*. При заданном напряжении с увеличением модуля уменьшается значение упругой деформации, то есть возрастает жесткость (устойчивость) конструкции. Поэтому модуль  $E$  также называют *модулем жесткости*. Значение модуля зависит от природы сплава и меняется незначительно при изменении его состава, структуры, термообработки. Например, для различных углеродистых и легированных сталей после любой обработки

$$E = 210 \text{ МПа.}$$

Теоретический предел упругости — максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию  $\sigma_{\text{уп}}$ .

Из-за трудности определения истинных напряжений пользуются условными стандартными характеристиками прочности. Дело в том, что при определении условных напряжений площадь образца считается неизменной, но на самом деле при растяжении она все время уменьшается. Истинное напряжение получается при делении нагрузки на площадь, которую образец имел в тот же момент. Истинные напряжения больше условных во всей области пластического деформирования.

В повседневной практике пользуются условными напряжениями, которые достаточно точно характеризуют прочность и определяются проще, чем истинные. Условный предел упругости определяет напряжение, при котором пластическая деформация достигает некоторой малой величины. Часто используют величины остаточной деформации: 0,005; 0,01; 0,03 и 0,05 %. В обозначении условного предела упругости указывают значение остаточной деформации:  $\sigma_{0,005}$ ;  $\sigma_{0,01}$  и т. д.

*Предел упругости* — важная характеристика пружинных материалов, которые используются для упругих элементов приборов и машин.

*Предел текучести* — физический и условный — характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям.

*Физический (истинный) предел текучести* — напряжение, при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}.$$

На диаграмме растяжения (см. рис. 7.6) пределу текучести соответствует горизонтальный участок ( $c-d$ ), когда наблюдается пластическая деформация (удлинение) — «течение» металла при постоянной нагрузке.

*Условный предел текучести* — напряжение, вызывающее остаточную деформацию, равную 0,2 % от начальной расчетной длины образца:  $\sigma_{0,2}$ .

При дальнейшем нагружении пластическая деформация все больше увеличивается, равномерно распределяясь по всему объему образца. В точке  $b$ , где нагрузка достигает максимального значения, начинается образование «шейки» — сужение поперечного сечения; деформация сосредоточивается на одном участке — из равномерной переходит в местную. В этот момент испытания напряжение называется временным сопротивлением.

*Временное сопротивление разрыву* — напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения:  $\sigma_B$ .

По своей физической сущности  $\sigma_B$  характеризует прочность как сопротивление значительной равномерной пластической деформации. За точкой  $b$  (см. рис. 7.6) вследствие развития шейки нагрузка уменьшается, в точке  $K$  при нагрузке  $P_K$  происходит разрушение образца.

Истинное сопротивление разрушению — максимальное напряжение, которое выдерживает материал в момент, предшествующий разрушению образца:  $S_K = P_K / F_K$ , где  $F_K$  — конечная площадь поперечного сечения образца в месте разрушения.

**Истинные напряжения.** Рассмотренные показатели прочности:  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  и другие, за исключением  $S_K$ , являются условными напряжениями, так как при их определении соответствующие нагрузки относят к начальной площади сечения образца  $F_0$ , хотя последняя постепенно уменьшается по мере деформации образца. Более точное представление о напряжениях в образце дают диаграммы истинных напряжений (рис. 7.7). Истинные напряжения  $S_i = P_i / F_i$  определяют по нагрузке  $P_i$  и площади поперечного сечения  $F_i$  в данный момент испытания. Примерно до точки  $b$  различие между истинными и условными напряжениями невелико и  $S_B \approx \sigma_B$ . Затем истинные напряжения увеличиваются, достигая максимального значения  $S_K$  в момент, предшествующий разрушению.

**Пластичность** — способность тела (металла) к пластической деформации, то есть способность получать остаточные изменения формы и размеров без нарушения сплошности. Это свойство используют при обработке металлов давлением. Характеристиками пластичности являются относительное удлинение и относительное сужение.

Относительное удлинение:

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100 \% = \frac{\Delta l_{\text{ост}}}{l_0} \cdot 100 \%,$$

где  $l_K, l_0$  — соответственно конечная и начальная длина образца;  $\Delta l_{\text{ост}}$  — удлинение образца.

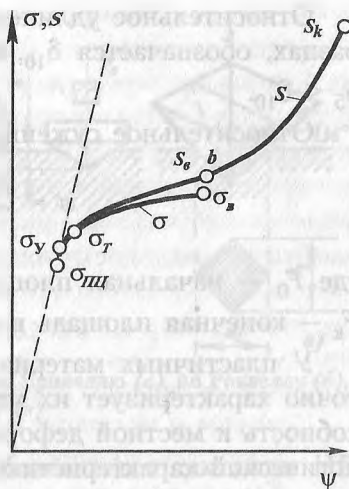


Рис. 7.7. Диаграмма истинных ( $S$ ) и условных ( $\sigma$ ) напряжений;  $\psi$  — поперечное сужение образца

Относительное удлинение, определяемое на длинных образцах, обозначается  $\delta_{10}$ , на коротких —  $\delta_5$ , причем всегда  $\delta_5 < \delta_{10}$ .

Относительное сужение:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100 \%,$$

где  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца;  $F_k$  — конечная площадь в шейке после разрыва.

У пластичных материалов относительное сужение более точно характеризует их максимальную пластичность — способность к местной деформации — и нередко служит технологической характеристикой при листовой штамповке.

## 7.5. Твердость

*Твердостью* металла называют его свойство оказывать сопротивление пластической деформации при контактном воздействии (внедрении) стандартного тела-наконечника (индентора) на поверхностные слои материала. Измерение твердости вследствие быстроты и простоты осуществления получило широкое применение для контроля качества изделий. Испытание на твердость — основной метод оценки качества термообработки изделия.

*Определение твердости по методу Бринелля.* Метод основан на том, что в плоскую поверхность под нагрузкой  $P$  внедряют стальной шарик диаметром  $D$  (рис. 7.8, а). Число твердости НВ определяется отношением нагрузки  $P$  к сферической поверхности отпечатка — лунки (шарового сегмента)  $E$  диаметром  $d$ :

$$\text{НВ} = \frac{P}{F} = \frac{20}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}.$$

Диаметр шарика выбирают в зависимости от толщины изделия:  $D = 10; 5; 2,5$  мм.

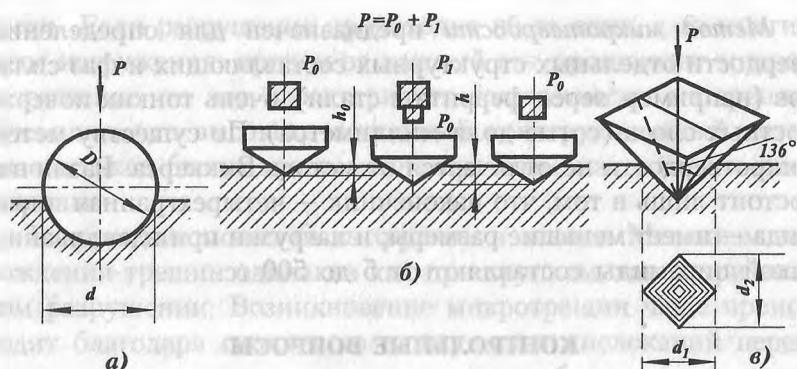


Рис. 7.8. Схемы определения твердости по Бринеллю (а), по Роквеллу (б), по Виккерсу (в)

*Метод Роквелла* (обобщенно обозначается символом HR) основан на статическом вдавливании в испытываемую поверхность наконечника под определенной нагрузкой (рис. 7.8, б). В качестве наконечников для материалов с твердостью до 450 HR используют стальной шарик. В этом случае твердость обозначают как HRB. В зависимости от нагрузки на наконечник при использовании алмазного конуса твердость обозначают как HRA и HRC.

*Твердость по методу Виккерса* определяют путем статического вдавливания в испытываемую поверхность алмазной четырехгранной пирамиды с углом  $\alpha = 136^\circ$  между противоположными гранями (рис. 7.8, в). Число твердости определяют по формуле

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

где  $d$  — диагональ отпечатка;  $P = 5-100$  кгс.

При испытании измеряют обе диагонали ( $d_1$  и  $d_2$ ) отпечатка с точностью до 0,001 мм при помощи микроскопа, который является составной частью прибора Виккерса. Числа твердости определяют как среднеарифметическое значение  $(d_1 + d_2)/2$  обеих диагоналей.



*Метод микротвердости* предназначен для определения твердости отдельных структурных составляющих и фаз сплавов (например, зерен феррита в сталях), очень тонких поверхностных слоев (сотые доли миллиметра). По существу метод микротвердости не отличается от метода Виккерса. Различие состоит лишь в том, что наконечник — четырехгранная пирамида — имеет меньшие размеры, и нагрузки при вдавливании такой пирамиды составляют от 5 до 500 гс.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа различий в механических свойствах металлов и неметаллов?
2. В чем заключается механизм деформации металлов?
3. Каковы различия в деформациях монокристалла и поликристалла?
4. С какой целью в технике может использоваться наклеп и какова природа его образования?
5. Каким образом определяют основные механические характеристики металлов?

## Глава 8

# ПЛАСТИЧНОЕ И ХРУПКОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛОВ

### 8.1. Разрушение металлов

Под *разрушением* понимают процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящий к разделению его на части. Разрушение происходит в результате или развития нескольких трещин, или слияния рядом расположенных трещин в одну магистральную трещину, по которой происходит полное разрушение.

Обычно сопротивление деформации объединяют в общее понятие *прочность*, а сопротивление разрушению — *надеж-*

ность. Если разрушение происходит не за один, а за многие акты нагружения, причем за каждый акт происходит микро-разрушение, то это характеризует *долговечность* материала. Очевидно, что высококачественный конструкционный материал должен быть одновременно прочным, надежным и долговечным.

Разрушение может быть *хрупким* и *вязким*. Механизм зарождения трещин одинаков как при хрупком, так и при вязком разрушении. Возникновение микротрещин чаще происходит благодаря скоплению движущихся дислокаций перед препятствием, например перед границами блоков и зерен, перед слиянием дислокаций и т. д. При большой плотности дислокаций происходит их слияние с образованием микротрещины. Трещина образуется в плоскости, перпендикулярной плоскости скольжения, когда плотность дислокаций достигает  $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Возможны и «безбарьерные» механизмы образования трещин, например в результате взаимодействия дислокаций в кристаллической решетке (рис. 8.1, б).

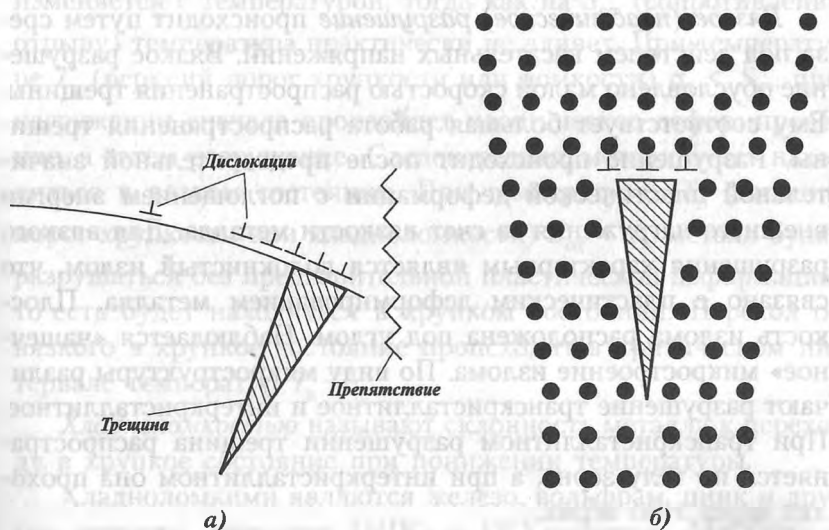


Рис. 8.1. Скопление дислокаций у препятствий (а); слияние дислокаций и образование зародышевой трещины (б)

*Хрупкое разрушение* происходит путем отрыва под действием нормальных растягивающих напряжений, когда они достигают значения сопротивления отрыву. До разрушения материал испытывает упругую деформацию, иногда — небольшую пластическую деформацию. Характеристикой хрупкого разрушения является сопротивление отрыву. Для хрупкого разрушения характерным является кристаллический излом, обычно по границам зерен, плоскость разрушения перпендикулярна к нормальным растягивающим напряжениям. Хрупкое разрушение имеет «ручьеистое» строение поверхности излома.

Скорость распространения хрупкой трещины велика — близка к скорости звука. Поэтому хрупкое разрушение называют *внезапным* или *катастрофическим* разрушением.

В реальных материалах обычно происходит не абсолютно хрупкое разрушение, а микропластическое. Когда материал находится в упругодеформированном состоянии, у вершины трещины из-за концентрации напряжений происходит пластическая микродеформация.

*Вязкое (пластическое) разрушение* происходит путем среза под действием касательных напряжений. Вязкое разрушение обусловлено малой скоростью распространения трещины. Ему соответствует большая работа распространения трещины. Разрушение происходит после предварительной значительной пластической деформации с поглощением энергии внешнего нагружения за счет вязкости металла. Для вязкого разрушения характерным является волокнистый излом, что связано с пластическим деформированием металла. Плоскость излома расположена под углом. Наблюдается «чашечное» микростроение излома. По виду микроструктуры различают разрушение транскристаллитное и интеркристаллитное. При транскристаллитном разрушении трещина распространяется по телу зерна, а при интеркристаллитном она проходит через тело зерна.

## 8.2. Факторы, влияющие на пластичное и хрупкое состояние

*Вязкость* — способность материала поглощать механическую энергию внешних сил за счет пластической деформации. По физическому смыслу вязкость — энергетическая характеристика и выражается в единицах работы, например в Дж.

Вязкость металлов и сплавов определяется их химическим составом, термической обработкой и другими внутренними факторами. Наряду с этим вязкость зависит от условий, в которых находится металл при работе в изделии. При определенных условиях один и тот же металл будет находиться в пластичном (вязком) состоянии, при других — он перейдет в хрупкое состояние. Такими условиями являются: температура, скорость нагружения, наличие концентраторов напряжения, вид напряженного состояния, масштабный фактор.

*Влияние температуры.* Предел текучести  $\sigma_T$  существенно изменяется с температурой, тогда как на  $S_{от}$  (сопротивление отрыву) температура практически не влияет. При температуре  $T_v$  (верхний порог хрупкости или ломкости)  $\sigma_T < S_{от}$ , при нагружении сначала произойдет пластическое деформирование, а затем разрушение. Следовательно, металл будет находиться в вязком состоянии. При температурах  $T_n$  (нижний порог хрупкости или хладноломкости)  $S_{от} < \sigma_T$  металл будет разрушаться без предварительной пластической деформации, то есть будет находиться в хрупком состоянии. Переход от вязкого в хрупкое состояние происходит в критическом интервале температур  $T_v - T_n$ .

*Хладноломкостью* называют склонность металла к переходу в хрупкое состояние при понижении температуры.

Хладноломкими являются железо, вольфрам, цинк и другие металлы, имеющие ОЦК- и ГПУ-решетки. Металлы и сплавы с ГЦК-решеткой не склонны к хладноломкости; такие металлы можно использовать в криогенной технике.

*Влияние скорости деформации* проявляется в том, что при переходе от статического к динамическому нагружению предел текучести увеличивается, то есть  $S_{\text{т.дин}} > S_{\text{т}}$ , тогда как сопротивление отрыву  $S_{\text{от}}$  от скорости деформации практически не зависит. С увеличением скорости деформации интервал хрупкости сдвигается в область более высоких температур. Металл, находящийся при статическом нагружении в вязком состоянии, при динамическом нагружении может перейти в хрупкое состояние.

*Влияние концентраторов напряжений (надреза)* как фактора охрупчивания очень значительно. Концентраторами напряжения могут быть отверстия, выточки, канавки, включения и т. д. Особую опасность как очаги хрупких разрушений представляют трещины. Влияние надрезов проявляется прежде всего в том, что у вершины надреза создается концентрация напряжений. Чем острее и глубже надрез, тем больше влияние коэффициента концентрации напряжений.

У пластичных материалов около вершины надреза при  $\sigma_{\text{max}} \geq S_{\text{от}}$  начинается местная пластическая деформация; при этом металл упрочняется, уменьшаются острота надреза и концентрация напряжения, что может обеспечить надежную работу изделия. У материалов, не способных к местной пластической деформации, при  $\sigma_{\text{max}} \geq S_{\text{max}}$  у вершины надреза может образоваться трещина; при ее развитии и создается хрупкое разрушение.

*Влияние вида напряженного состояния.* Различные способы нагружения характеризуются коэффициентом мягкости:

$$\alpha = \tau_{\text{max}} / S_{\text{max}},$$

где  $\tau_{\text{max}}$  — наибольшие касательные напряжения;  $S_{\text{max}}$  — наибольшие растягивающие напряжения. Для осевого сжатия  $\alpha = 2$ ; для кручения — 0,8; для осевого растяжения — 0,5. Для одного и того же материала при сжатии происходит вязкое разрушение путем среза с предварительной пластической деформацией. При растяжении происходит хрупкое разрушение путем отрыва.

*Влияние размеров изделия (масштабный фактор)* заключается в том, что с увеличением массы возрастает вероятность наличия в объеме металла дефектов, инициирующих процесс разрушения.

*Ударная вязкость.* Для оценки вязкости материалов, установления их склонности к переходу из вязкого в хрупкое состояние наиболее часто проводят испытания надрезанных образцов на маятниковых копрах (рис. 8.2). Для получения сопоставимых результатов испытания проводят на стандартных образцах нескольких типов с надрезами определенной формы и размеров. На разрушение образца затрачивается работа

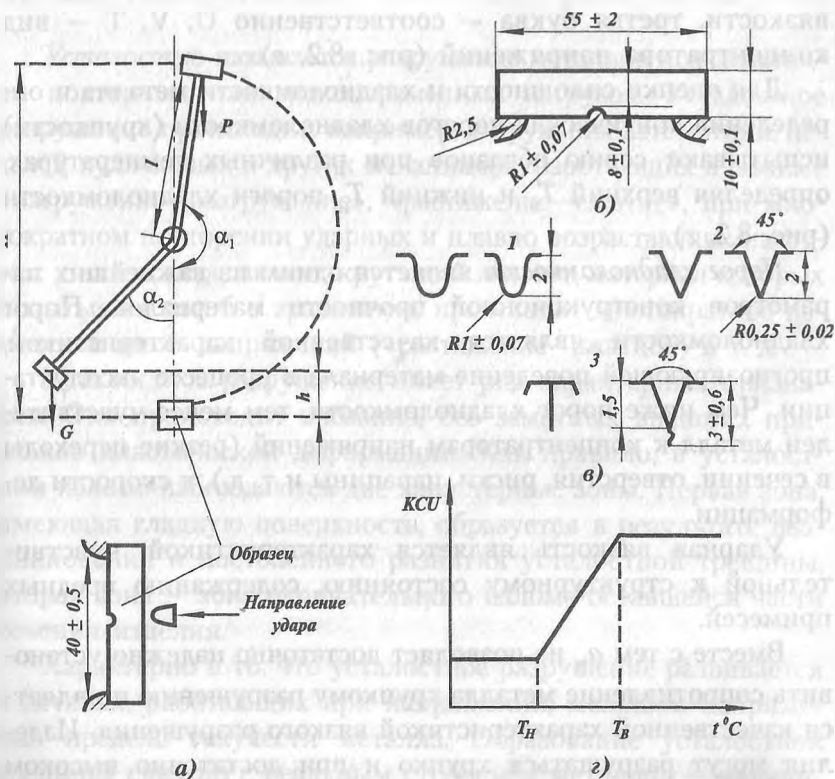


Рис. 8.2. Схема испытания на ударную вязкость: а – схема маятникового копра; б – стандартный образец с надрезом вида 1; в – виды концентраторов напряжений; г – зависимость вязкости от температуры

$A = P(H - h)$ , где  $P$  — масса маятника, кг;  $H, h$  — соответственно высота подъема маятника до и после удара, м.

Характеристикой вязкости является ударно-надрезная вязкость, называемая просто *ударной вязкостью*:

$$a_{\text{н}} = \frac{A}{F_0} \cdot \frac{\text{М} \cdot \text{Дж}}{\text{М}^2},$$

где  $F_0$  — площадь сечения образца в месте надреза.

Ударную вязкость обозначают буквенными сочетаниями: КСУ, КСВ, КСТ. Буквы КС означают символ ударной вязкости, третья буква — соответственно U, V, T — вид концентратора напряжений (рис. 8.2, в).

Для оценки сплошности и хладноломкости металла и определения критических порогов хладноломкости (хрупкости) испытывают серию образцов при различных температурах, определяя верхний  $T_{\text{в}}$  и нижний  $T_{\text{н}}$  пороги хладноломкости (рис. 8.2, г).

*Порог хладноломкости* является одним из важнейших параметров конструкционной прочности материалов. Порог хладноломкости является качественной характеристикой, прогнозирующей поведение материала в процессе эксплуатации. Чем ниже порог хладноломкости, тем менее чувствителен металл к концентраторам напряжений (резкие переходы в сечении, отверстия, риски, царапины и т. д.), к скорости деформации.

Ударная вязкость является характеристикой, чувствительной к структурному состоянию, содержанию вредных примесей.

Вместе с тем  $a_{\text{н}}$  не позволяет достаточно надежно установить сопротивление металла хрупкому разрушению и является качественной характеристикой вязкого разрушения. Изделия могут разрушаться хрупко и при достаточно высоком значении  $a_{\text{н}}$ .

*Оценка вязкости по виду излома* основана на том, что для хрупкого разрушения характерным является кристалличе-

ский, а для вязкого — волокнистый излом. В технике за порог хладноломкости принимают  $T_{50}$ , то есть температуру, при которой в изломе 50 % вязкой составляющей. Для реальных материалов важно, что  $T_{50}$  должен быть ниже температуры эксплуатации изделий. Отсюда температурный запас вязкости  $T_{з.в} = T_{\text{экспл}} - T_{50}$ . Для надежной работы изделий нужно, чтобы  $T_{з.в}$  был не менее 40 °С.

### 8.3. Усталость металлов

*Усталостью* называется разрушение металлов под действием повторных или знакопеременных нагрузок. Усталостное разрушение происходит, например, у пружины автоматики, деталей кулачковых и других механизмов, работающих в режиме «нагружение—разгружение», «растяжение—сжатие», при многократном повторении ударных и плавно возрастающих нагрузок; у валов, передающих крутящий момент, материал которых испытывает изгиб с вращением, происходит многократное изменение знака напряжений («растяжение—сжатие») и т. д.

Усталостное разрушение имеет ряд характерных признаков. Оно происходит внезапно, без заметных внешних признаков пластической деформации. Как правило, в усталостном изломе наблюдаются две характерные зоны. Первая зона, имеющая гладкую поверхность, образуется в результате возникновения и постепенного развития усталостной трещины, вторая зона — зона окончательного излома оставшейся части сечения изделия.

Характерно и то, что усталостное разрушение развивается в деталях, работающих при напряжении, меньшем напряжения предела текучести металла. Образование усталостной трещины связано с реальным строением металлов — наличием различно ориентированных зерен и блоков, неметаллических включений, микропор, дислокаций и твердых дефектов кристаллической решетки.



Таким образом, усталость — процесс постепенного накопления повреждения металла под действием повторно-переменных напряжений, приводящих к образованию трещин и разрушению.

Свойство металла сопротивляться усталости называется *выносливостью*.

*Предел выносливости* (теоретический) — наибольшее напряжение цикла, которое выдерживает материал без разрушений при бесконечно большом числе циклов нагружения.

Обычно предел выносливости определяют на базе заданного числа циклов нагружения  $N$ . Для стали  $N = 10^7$ , для цветных металлов  $N = 10^8$  циклов нагружения. Наиболее часто предел выносливости определяют при испытании образца на изгиб с вращением со знакопеременным симметричным циклом напряжений.

Предел выносливости существенно зависит от качества обработки поверхности. Так, по сравнению с полированной поверхностью предел выносливости  $\sigma_{-1}$  образца снижается при обработке его грубым напильником на 20 %. При коррозионном воздействии  $\sigma_{-1}$  может понижаться в несколько раз.

#### 8.4. Изнашивание металлов

При трении сопряженных поверхностей имеет место изнашивание (износ), под которым понимают изменение размеров тела вследствие отделения с поверхности трения материала и (или) его остаточной деформации. Износ — это постепенное разрушение; износ — явление столь же частое, как и разрушение от усталости.

В реальных условиях эксплуатации машин основные причины разрушения микрообъемов связаны с образованием усталостных трещин и отделением микроскопических чешуек металла и его оксидов.

Существует трение без смазки (сухое трение) и трение со смазкой. По виду смазочного материала различают газовую, жидкостную и твердую смазку, обеспечивающую полное разделение поверхностей, находящихся в относительном движении.

Свойство материала оказывать сопротивление износу, оцениваемое величиной, обратной интенсивности изнашивания, называется *износостойкостью*.

Различают три вида изнашивания: механическое, коррозионно-механическое и изнашивание при действии электрического тока (электроэрозионное изнашивание).

К *механическому изнашиванию* относят: абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, эрозионное, кавитационное, усталостное изнашивание; износ при феттинге и при заедании.

*Абразивный износ* происходит в результате режущего или царапающего действия твердых тел и абразивных частиц. Абразивное изнашивание является типичным для многих деталей горных, буровых, строительных, дорожных, сельскохозяйственных и других машин, работающих в технологических средах, содержащих абразивные частицы грунта, разбуриваемых пород и т. д.

Изнашивание, происходящее в результате воздействия твердых тел или частиц, увлекаемых потоком жидкости, называют *гидроабразивным изнашиванием*. Оно имеет место, например, в мешалках и пропеллерах реакторов, в колесах и корпусах насосов и т. д.

Если абразивные частицы увлекаются потоком газа, то вызываемое ими разрушение называют *газоабразивным изнашиванием*.

*Эрозионное изнашивание* происходит в результате воздействия потока жидкости или газа на поверхность.

Под *кавитационным изнашиванием* понимают изнашивание поверхности при относительном движении твердого тела в жидкости. В условиях кавитации работают гребные винты, гидротурбины, детали машин, подвергающиеся принудительному водяному охлаждению, трубопроводы.

*Усталостное изнашивание* (контактная усталость) происходит в результате накопления повреждений и разрушений

поверхности под влиянием циклических контактных нагрузок. Такой износ появляется при трении, качении или качении с проскальзыванием, когда контакт деталей является сосредоточенным.

Так, контактную усталость можно наблюдать в тяжело нагруженных зубчатых и червячных передачах, подшипниках качения, рельсах и бандажах подвижного состава железнодорожного транспорта.

Изнашивание при *феттинг-коррозии* происходит в болтовых и заклепочных соединениях, на посадочных поверхностях подшипников качения, шестерен, муфт и других деталей, находящихся в подвижном контакте. Причиной разрушения является непрерывное разрушение защитной оксидной пленки в точках подвижного контакта.

*Износ при заедании* происходит в результате одновременного механического воздействия и воздействия молекулярных и атомных сил. Это результат схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность. Такие повреждения возникают там, где между поверхностями контакта исчезают разделяющие их смазочные слои, адсорбированные пленки жира, влаги, газов, пленки оксидов и др. При этом эти поверхности под действием нагрузки сближаются так, что происходит трение непосредственно металла о металл.

Износ при заедании наблюдается в зубчатых колесах, подшипниках скольжения.

**Коррозионно-механическое изнашивание** возникает при образовании продуктов химического взаимодействия металла со средой. Такое изнашивание наблюдается в подшипниках скольжения, валах, втулках, поршневых кольцах и т. д.

**Электроэрозионное изнашивание** происходит в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

За основу инженерной характеристики изнашивания принята интенсивность линейного износа  $J = \frac{dh}{dt}$ , где  $h$  — линейный

износ;  $l_T$  — путь трения. Интенсивность изнашивания  $J$  изменяется от  $10^{-3}$  до  $10^{-13}$ . В зависимости от величины интенсивности износа введено 10 классов износостойкости — от 0 до 9.

По виду контактного взаимодействия поверхностей трения классы 0–5 соответствуют упругому деформированию ( $J = 10^{-13}$ – $10^{-7}$ ); классы 6–7 — упругопластическому деформированию ( $J = 10^{-7}$ – $10^{-5}$ ); классы 8–9 — микрорезанию ( $J = 10^{-5}$ – $10^{-3}$ ).

Так, интенсивность износа гильз цилиндра, поршневых колец составляет  $10^{-11}$ – $10^{-12}$ ; режущего инструмента —  $10^{-6}$ – $10^{-8}$ ; зубьев ковшей экскаватора —  $10^{-3}$ – $10^{-4}$ .

Классы износостойкости позволяют применять расчетные методы определения срока службы трущейся пары.

## 8.5. Остаточные напряжения

*Остаточными (или собственными)* называют напряжения, остающиеся после прекращения причин, их вызывавших, и уравнивающиеся внутри тела, без воздействия внешних сил. В зависимости от объемов тела, в пределах которого уравниваются остаточные напряжения, различают:

— *напряжение I рода*, уравнивающееся в объеме всего тела;

— *напряжение II рода*, уравнивающееся в пределах нескольких блоков зерна, одного или нескольких зерен;

— *напряжение III рода*, уравнивающееся в объеме нескольких элементарных ячеек кристаллической решетки.

Напряженное состояние решетки возникает и локализуется в ультрамикроскопических объемах.

Возникновение остаточных напряжений связано с неоднородными деформациями в смежных объемах тела (изделия). Причинами могут быть неоднородность материала, напряженное состояние, неравномерность охлаждения и пр.

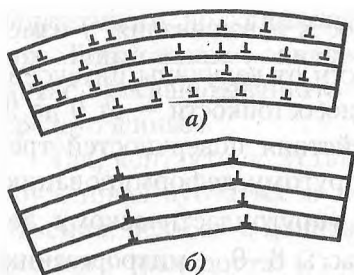


Рис. 8.3. Схема процесса полигонизации: а – хаотическое размещение дислокаций после деформации; б – стенки из дислокаций после полигонизации

Типичным случаем (рис. 8.3, а) является возникновение остаточных термических напряжений при неравномерном охлаждении изделия по сечению (например, при закалке). Поверхностный слой цилиндрического образца охлаждается и уменьшает свой объем быстрее, чем его внутренняя часть, которую он и сжимает, как обруч. В результате во внутренней части возникают напряжения сжатия, в поверхностном слое – напряжения растяжения; произойдет пластическая деформация – необратимое изменение размеров.

В центральной части образца возникнут остаточные напряжения растяжения, в периферийном слое – сжатия. Размеры остаточных напряжений тем больше, чем больше скорость охлаждения.

Структурные напряжения образуются в результате неоднородности фазовых превращений по сечению изделий и разного удельного объема различных фаз.

В зависимости от причин возникновения различают технологические и конструкционные остаточные напряжения.

К *технологическим* относятся литейные (усадочные), сварочные, закалочные и другие остаточные напряжения.

К *конструкционным* относятся напряжения, возникающие при сборке изделий. Как правило, остаточные напряжения являются вредными. Они могут вызвать коробление при обработке заготовок на металлорежущих станках, образование трещин в изделиях, способность к хрупкому разрушению. Остаточные напряжения, суммируясь с рабочими напряжениями, могут вызвать потерю устойчивости или разрушение конструкции.

В некоторых случаях остаточные напряжения могут играть и положительную роль. Так, в результате дробеструйной

обработки в поверхностных слоях пружин и других изделий создаются выгодные напряжения сжатия, уменьшающие напряжения растяжения, что способствует увеличению долговечности деталей.

### 8.6. Влияние нагрева на структуру и свойства холоднодеформированных металлов

Почти 95 % энергии, затрачиваемой на деформацию металла, превращается в тепловую, остальная часть энергии поглощается металлом, аккумулируется в нем в виде повышенной потенциальной энергии смещенных атомов, напряжений, в виде повышенной плотности несовершенств структуры (вакансий, дислокаций). О накоплении энергии свидетельствует также рост остаточных напряжений в результате деформации. В связи с этим состояние деформированного (наклепанного) металла термодинамически неустойчиво. Такая неравновесная структура у большинства металлов устойчива при комнатной температуре. Переход к более устойчивому состоянию связан с уменьшением искажений в кристаллической решетке, снятием напряжений, что определяется возможностью перемещения атомов. При повышении температуры увеличивается диффузия атомов, в связи с чем ускоряется перемещение точечных дефектов и создаются условия для перераспределения дислокаций и уменьшения их количества. Так начинают развиваться процессы, приводящие металл к более равновесному состоянию.

Процессы, происходящие при нагреве, подразделяют на две основные стадии: возврат и рекристаллизацию; обе стадии сопровождаются выделением теплоты и уменьшением свободной энергии. Возврат происходит при относительно низких температурах, рекристаллизация — при более высоких.

**Возвратом** называют все изменения тонкой структуры и свойств, которые не сопровождаются изменением микроструктуры деформированного металла, то есть размер и форма кри-

таллов при возврате не изменяются. Стадию возврата, в свою очередь, разделяют на две стадии: отдых и полигонизацию.

*Отдых* происходит при невысоком нагреве. При этом наблюдается уменьшение количества вакансий и плотности дислокаций, частичное снятие остаточных напряжений. Отдых вызывает значительное уменьшение электросопротивления и повышение плотности металлов. С уменьшением плотности дислокаций уменьшаются твердость и прочность металла (алюминий, железо). Если плотность дислокаций при отдыхе не меняется, то он не сопровождается изменением механических свойств (медь, латунь, никель).

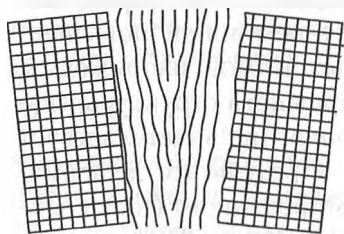


Рис. 8.4. Схема расположения двух полигонов

Вторая стадия возврата — *полигонизация*: деление зерен на части — полигоны (субзерна) размером  $10^{-6}$ — $10^{-4}$  см. В пределах каждого кристалла образуются малоугловые границы. Границы возникают путем скольжения и перемещения дислокаций; в результате кристалл разделяется на субзерна — полигоны, свободные от дислокаций, а дислокации скапливаются на границах полигонов, образуя стенки (см. рис. 8.3). Два полигона, разделенных стенкой (малоугловой границей), состоящей из нескольких краевых дислокаций, схематично показаны на рис. 8.4.

Полигонизация в металлах технической чистоты и в сплавах — твердых растворах — наблюдается только после небольших степеней деформаций и не у всех металлов. Так, этот процесс редко развивается в меди и ее сплавах, хорошо выражен в алюминии, железе, молибдене и их сплавах.

Полигонизация — энергетически выгодный процесс, приводит к уменьшению твердости и характеристик прочности металлов и сплавов.

Температура начала полигонизации не является постоянной. Скорость полигонизации зависит от природы металла, от степени предыдущей деформации, содержания примесей и т. д.

При возврате заметных изменений в микроструктуре не наблюдается, металл сохраняет волокнистое строение. При этом твердость и прочность несколько понижаются, а пластичность возрастает (рис. 8.5).

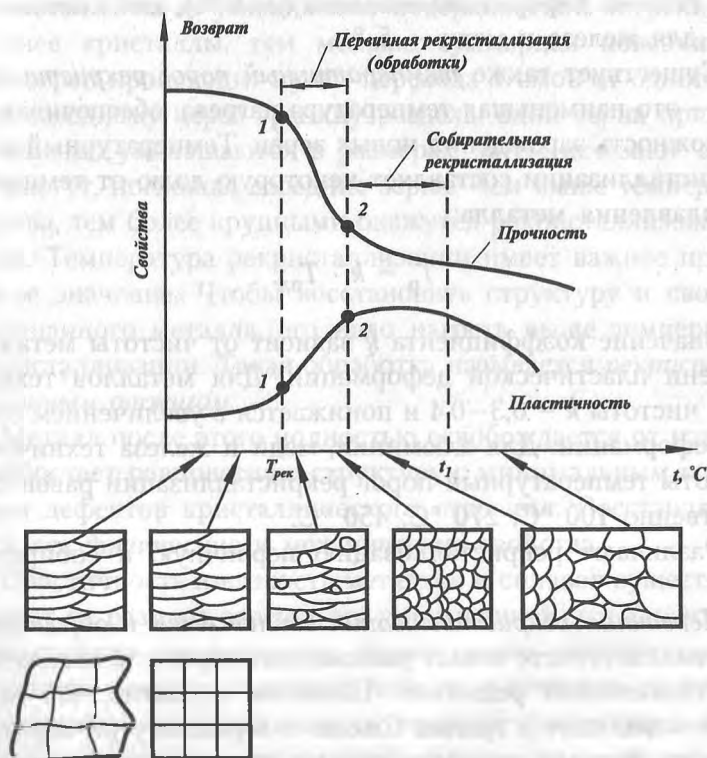


Рис. 8.5. Схема изменения структуры и свойств наклепанного металла при возврате (отдыхе) и рекристаллизации

**Рекристаллизация.** При нагреве до довольно высоких температур подвижность атомов возрастает и происходит процесс рекристаллизации. Рекристаллизацией называют процесс образования и роста новых зерен при нагреве деформированного металла до определенной температуры (рис. 8.5). Процесс рекристаллизации пластически деформированного металла может происходить лишь после деформа-



ции, степень которой превышает определенную минимальную величину, называемую *критической степенью деформации*. Если степень деформации ниже критической, то зарождения новых зерен при нагреве не происходит. Критическая степень деформации невелика (2—8 %); для алюминия — 2 %, для железа и меди — 5 %.

Существует также *температурный порог рекристаллизации* — это наименьшая температура нагрева, обеспечивающая возможность зарождения новых зерен. Температурный порог рекристаллизации составляет некоторую долю от температуры плавления металла:

$$T_p = k \cdot T_{пл}$$

Значение коэффициента  $k$  зависит от чистоты металла и степени пластической деформации. Для металлов технической чистоты  $k = 0,3$ — $0,4$  и понижается с увеличением степени деформации. Для алюминия, меди и железа технической чистоты температурный порог рекристаллизации равен соответственно 100 °С; 270 °С; 450 °С.

Различают рекристаллизацию первичную и собирательную.

*Первичная рекристаллизация* заключается в образовании зародышей и росте новых равновесных зерен с неискаженной кристаллической решеткой. Наиболее вероятно, что новые зерна возникают у границ блоков и зерен, внутри зерен, где решетка металла наиболее сильно искажена при пластической деформации. Чем больше степень пластической деформации, тем больше возникает центров рекристаллизации. Количество новых зерен постепенно увеличивается, и в конечном счете в структуре не остается старых деформированных зерен.

Движущей силой первичной рекристаллизации является энергия, аккумулированная в деформированном металле.

Первичная рекристаллизация заканчивается при полном поглощении новыми зернами старых деформированных зерен.

*Собирательная рекристаллизация* заключается в росте образовавшихся новых зерен. Движущей силой собирательной рекристаллизации является поверхностная энергия зерен. Укрупнение зерен приводит к уменьшению свободной энергии металла из-за уменьшения поверхностной энергии (чем крупнее кристаллы, тем меньше суммарная поверхность). Рост зерен происходит путем перехода атомов от одного зерна к соседнему через границу раздела; одни зерна при этом постепенно уменьшаются в размерах, затем исчезают, а другие растут, поглощая соседние зерна. Чем выше температура нагрева, тем более крупными окажутся рекристаллизованные зерна. Температура рекристаллизации имеет важное практическое значение. Чтобы восстановить структуру и свойства наклепанного металла, его надо нагреть выше температуры рекристаллизации. Такая обработка называется *рекристаллизационным отжигом*.

Металл после этого полностью освобождается от наклепа, приобретает равновесную структуру с минимальным количеством дефектов кристаллического строения. Восстанавливаются все физические и механические свойства.

Пластичность и вязкость металлов и сплавов существенно зависят от размера зерен: с их уменьшением эти характеристики свойств уменьшаются. Размер зерен, образующихся в результате рекристаллизации, зависит в основном от степени пластической деформации и от температуры рекристаллизации. С увеличением степени деформации выше критической размер зерна увеличивается вследствие увеличения числа центров рекристаллизации, а повышение температуры нагрева укрупняет зерна из-за ускорения собирательной рекристаллизации.

В рекристаллизованном металле при известных условиях возникает предпочтительная ориентировка зерен — текстура. Текстура рекристаллизации, так же как и текстура другого происхождения, вызывает значительную анизотропию физических и механических свойств. Характер текстуры рекристаллизации определяется условиями проведения

отжига, видом предшествующей обработки давлением (прокатка, волочение и др.), а также количеством и природой примесей.

Для конструкционных материалов общего назначения анизотропия свойств обычно нежелательна. Например, при глубокой штамповке листов во избежание образования складчатости, волнистой кромки и т. д. лист должен деформироваться во всех направлениях одинаково, поэтому здесь анизотропия нежелательна. Однако при использовании сплавов с особыми физическими свойствами (магнитными, с особыми упругими свойствами) анизотропию удастся использовать, улучшая то или иное свойство в определенном направлении изделия. Образование текстуры обеспечивает более легкую намагничиваемость в заданных направлениях листа. Применение текстурированного трансформаторного железа позволяет уменьшить потери на перемагничивание.

## 8.7. Холодная и горячая деформация

В зависимости от соотношения температуры деформации и температуры рекристаллизации различают холодную и горячую деформацию.

*Холодной* называют деформацию, которую проводят при температурах ниже температуры рекристаллизации. Поэтому холодная деформация сопровождается упрочнением (наклепом металла).

Деформацию называют *горячей*, если ее проводят при температуре выше температуры рекристаллизации для получения полностью рекристаллизованной структуры.

Горячую деформацию в зависимости от состава сплава и скорости деформации обычно проводят при температурах  $(0,7-0,75) T_{пл}$ .

Если металл после деформации имеет частично рекристаллизованную структуру, то такую обработку правильнее называть *неполной горячей* или *теплой деформацией*.

Если после деформации при температурах выше температуры рекристаллизации металл (сплав) все же находится в наклепанном состоянии или имеет полигонизованную структуру, то такую обработку следует отнести к холодной.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем различаются между собой вязкое и хрупкое разрушение? Какие факторы способствуют тому или другому виду разрушения?
2. Каким образом можно оценить вязкость металла?
3. В каких случаях может проявляться усталостное разрушение металлов?
4. В чем заключается природа износа металлов и каковы его разновидности?
5. Что такое первичная и собирательная рекристаллизация?
6. Какая деформация называется холодной, а какая — горячей?

---

## *Раздел III*

# ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ

## Глава 9

### ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ

#### 9.1. Введение

Сплавы железа с углеродом (стали и чугуны) являются наиболее распространенными металлическими материалами. По объему производства они более чем в десять раз превосходят производство всех других металлов, вместе взятых. Нет ни одной отрасли промышленности, где бы не использовали сплавы железа.

Методы массового производства стали были открыты в середине XIX в. До этого железо производилось различными полукустарными методами.

Первое представление о диаграмме «железо—углерод» дал Д.К. Чернов, который в 1868 г. выявил существование в стали критических точек и их зависимость от содержания в ней углерода. Д.К. Чернов, таким образом, впервые указал на полиморфизм железа.

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

Железо и углерод — элементы полиморфные.

**Железо** принадлежит к VIII группе периодической системы. Железо имеет атомный номер 26, атомный вес 55,85.

Чистое железо серебристо-белого цвета. Это вязкий и ковкий металл. Он так мягок и так хорошо прокатывается, что из него можно готовить, например, листы тоньше папиросной бумаги. Плавится железо при  $1539\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а кипит при температуре около  $3200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В природе существуют четыре стабильных изотопа железа. Больше всего изотопов с атомным весом 55,85 (91,68 %).

Чистое железо, подобно золоту, не окисляется на воздухе. Однако оно непрочно. Все изделия, которые называют обычно железными, на самом деле изготовлены из стали или чугуна, то есть из сплавов железа с углеродом. Технически чистое железо содержит 0,10–0,15 % всех примесей. Наиболее чистое железо, полученное в лабораторных условиях, содержало 99,9917 % Fe. Свойства железа зависят от степени его чистоты. Для технически чистого железа температура плавления равна  $1539\text{ }^{\circ}\text{C}$ , плотность составляет  $7,85\text{ г/см}^3$ . Железо обладает невысокой твердостью и прочностью ( $H_B = 80$ ;  $\sigma_B = 250\text{ МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 120\text{ МПа}$ ) и хорошей пластичностью:  $\delta = 50\text{ }%$ ;  $\psi = 80\text{ }%$ .

При нагреве железо испытывает аллотропическое превращение. До  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$  железо имеет ОЦК-решетку (K8) с периодом при комнатной температуре  $a = 0,286\text{ нм}$  ( $\text{Fe}_{\alpha}$ ). При  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит превращение ОЦК-решетки в ГЦК-решетку (K12); в температурном интервале  $911\text{--}1392\text{ }^{\circ}\text{C}$  железо обозначают  $\text{Fe}_{\gamma}$ ,  $a = 0,356\text{ нм}$ ). При  $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$  вновь происходит перестройка ГЦК-решетки в ОЦК, которая и сохраняется до температуры плавления. Эту модификацию обозначают  $\text{Fe}_{\delta}$ . При  $768\text{ }^{\circ}\text{C}$  на кривой нагрева железа появляется перегиб, отвечающий изменению его магнитных свойств (точка Кюри железа). До  $768\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\text{Fe}_{\alpha}$  ферромагнитно, выше этой температуры — парамагнитно. Немагнитную модификацию  $\text{Fe}_{\alpha}$ , существующую от  $768$  до  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ , обозначают  $\text{Fe}_{\beta}$ .

Углерод в природе встречается в виде двух модификаций: в форме алмаза, имеющего сложную кубическую решетку, и в форме графита, имеющего простую гексагональную решетку с периодами  $a = 0,14\text{ нм}$  и  $c = 0,34\text{ нм}$ . Для алмаза характерна ковалентная решетка; он не проводит электричества и обладает

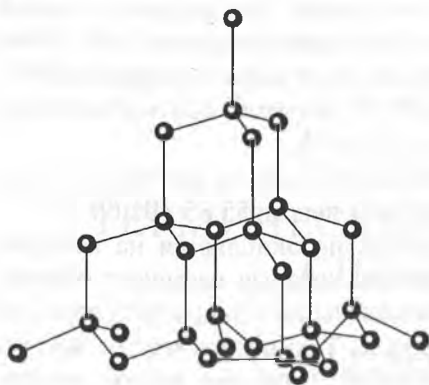


Рис. 9.1. Решетка алмаза

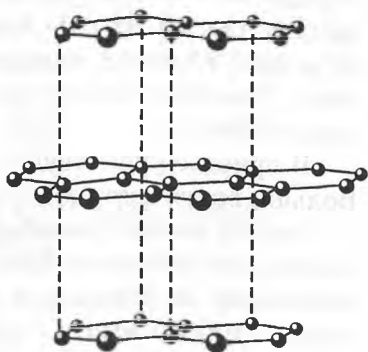


Рис. 9.2. Структура графита

исключительной твердостью (рис. 9.1). В *графите* каждый атом углерода находится в вершине плоского шестиугольника. Он образует три ковалентные связи, расположенные в одной плоскости, углы между которыми составляют  $120^\circ$ . Четвертый валентный электрон не локализован; он образует связь типа металлической. Его подвижность ограничена близким соседством с плоскостью шестиугольников. Параллельные плоскости объединяются между собой силами Ван-дер-Ваальса. Такой кристалл имеет пластинчатую структуру (рис. 9.2). Плотность графита —  $2,25 \text{ г/см}^3$ . В отличие от других материалов временное сопротивление графита увеличивается при повышении температуры: при  $20^\circ\text{C}$   $\sigma_B = 20 \text{ МПа}$ , при  $2500^\circ\text{C}$  временное сопротивление возрастает до  $40 \text{ МПа}$ , что выше прочности всех тугоплавких металлов при данной температуре. При нагреве до  $3650^\circ\text{C}$  начинается сублимация (испарение твердого графита).

**Фазы в системе «железо—углерод».** *Феррит* — твердый раствор внедрения углерода в  $\text{Fe}_\alpha$ , обозначается  $\text{Fe}_\alpha(\text{C})$ . Максимальная растворимость углерода достигает  $0,02 \%$  при  $727^\circ\text{C}$ . При комнатной температуре растворяется меньше  $0,006 \%$  углерода. Название фазы — феррит — связано с ее ферромагнитными свойствами. Выше  $1392^\circ\text{C}$  существует высокотемпературный  $\delta$ -феррит  $\text{Fe}_\delta(\text{C})$  с предельной растворимостью углерода  $0,1 \%$  при  $1499^\circ\text{C}$ . Твердость и механи-

ческие свойства феррита близки к свойствам технически чистого железа, они зависят от количества элементов, присутствующих в нем. Многие металлы и неметаллы образуют с ферритом твердые растворы замещения. Феррит имеет следующие механические свойства:

$$\sigma_B = 300 \text{ МПа}; \delta = 40 \%; \psi = 70 \%; \text{НВ} = 80\text{--}100.$$

*Аустенит* — твердый раствор углерода в  $\text{Fe}_\gamma$ . Его обозначают  $\text{Fe}_\gamma(\text{C})$ . Углерод занимает центр ГЦК-ячейки (рис. 9.3). При  $1147^\circ\text{C}$  аустенит содержит 2,14 % углерода, а при  $727^\circ\text{C}$  — всего лишь 0,8 %. Аустенит парамагнитен, пластичен, имеет низкие значения временного сопротивления и твердости ( $\text{НВ} = 170\text{--}220$ ). Элементы, растворяющиеся в нем, могут значительно изменять его свойства, а также температурные границы его существования.

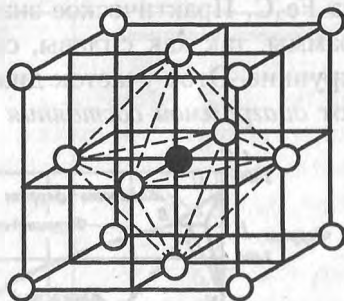


Рис. 9.3. Кристаллическая решетка аустенита. Светлые кружки — атомы железа, черный — атом углерода

*Цементит* — химическое соединение железа с углеродом: карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , образующийся при содержании углерода 6,67 %. Цементит имеет сложную решетку, в элементарной ячейке которой находятся 12 атомов железа и 4 атома углерода. Температура плавления цементита —  $1550^\circ\text{C}$ . Он имеет очень высокую твердость ( $\text{НВ} = 800$ ), хрупкий; до  $217^\circ\text{C}$  обладает слабыми ферромагнитными свойствами. При высоких температурах разлагается на графит и аустенит.

*Графит* — углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Графит электропроводен, химически стоек, малопрочен, мягок.

*Жидкая фаза сплава «железо—углерод»* существует выше ликвидуса. Железо хорошо растворяет углерод, образуя жидкую фазу.

В дальнейшем изложении будем обозначать фазы так: Ф — феррит; А — аустенит; Ц — цементит; Ж — жидкая фаза.



### 9.3. Диаграмма состояния «железо—цементит»

Железо, взаимодействуя с углеродом, образует ряд химических соединений:  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{Fe}_2\text{C}$ ,  $\text{FeC}$  и др. Поскольку устойчивое химическое соединение в диаграммах состояния может быть рассмотрено как компонент, обычно диаграмму «железо—углерод» изображают только до содержания углерода 6,67 %, когда образуется химическое соединение карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Практическое значение имеет только эта часть диаграммы, так как сплавы, содержащие больше углерода, очень хрупкие. Этот участок диаграммы «железо—углерод» называют *диаграммой состояния «железо—цементит»* (рис. 9.4).

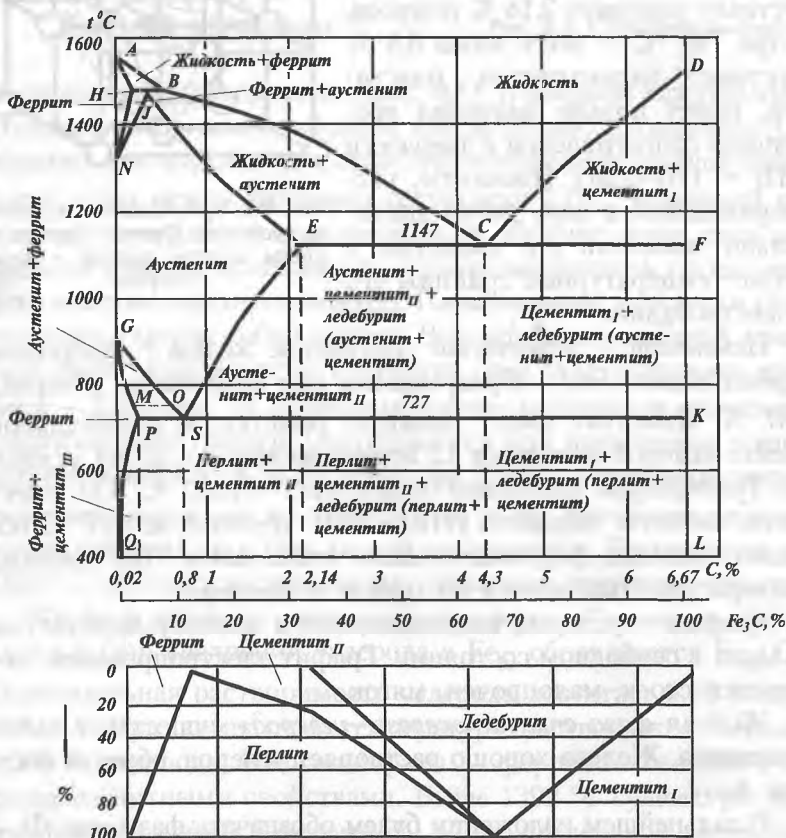


Рис. 9.4. Диаграмма состояния  $\text{Fe}_3\text{C}$

Диаграмма состояния  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  характеризует фазовый состав и превращения в сплавах с концентрацией от чистого железа до цементита. Положение точек диаграммы указано в табл. 9.1.

Таблица 9.1

### Характерные точки диаграммы состояния «железо—цементит»

Обозначение точки на диаграмме	Температура, °C	Концентрация углерода, %
<i>A</i>	1539	0
<i>H</i>	1499	0,1
<i>J</i>	1499	0,16
<i>B</i>	1499	0,51
<i>N</i>	1392	0
<i>D</i>	1600	6,67
<i>E</i>	1147	2,14
<i>C</i>	1147	4,3
<i>F</i>	1147	6,67
<i>G</i>	911	0
<i>P</i>	727	0,02
<i>S</i>	727	0,8
<i>K</i>	727	6,67
<i>Q</i>	600	0,006

Точка *A* определяет температуру плавления чистого железа, а точка *D* — температуру плавления цементита. Точки *N* и *G* соответствуют температурам аллотропических превращений железа. Точки *H* и *P* характеризуют предельную концентрацию углерода соответственно в высокотемпературном и низкотемпературном феррите. Точка *E* определяет наибольшую концентрацию углерода в аустените. Значения остальных точек ясны из диаграммы.

Превращения в сплавах происходят как при затвердевании жидкой фазы Ж, так и в твердом состоянии. Первичная кристаллизация происходит в интервале температур, определяемых на линиях ликвидус *AB*, *CD* и солидус *АНJRCF*. Вто-

ричная кристаллизация вызвана превращением железа одной аллотропической модификации в другую и переменной растворимостью углерода в аустените и феррите. При понижении температуры эта растворимость уменьшается. Избыток углерода из твердых растворов выделяется в виде цементита. Линия  $ES$  характеризует изменение концентрации углерода в аустените, а линия  $PQ$  — в феррите. Цементит имеет нормальный химический состав (вертикаль  $DFKL$ ), что отражается на свойствах сплавов.

Наиболее крупные кристаллы цементита образуются, когда он выделяется из жидкости при первичной кристаллизации. Цементит, выделяющийся из жидкости, называют *первичным*; цементит, выделяющийся из аустенита, — *вторичным*; цементит, выделяющийся из феррита, — *третичным*. Соответственно линию  $CD$  на диаграмме состояния называют линией первичного цементита, линию  $ES$  — линией вторичного цементита, линию  $PQ$  — линией третичного цементита.

В системе  $(Fe-Fe_3C)$  происходят три изотермических превращения:

— перитектическое превращение на линии  $HJB$  ( $1499\text{ }^{\circ}C$ ) (рис. 9.5):

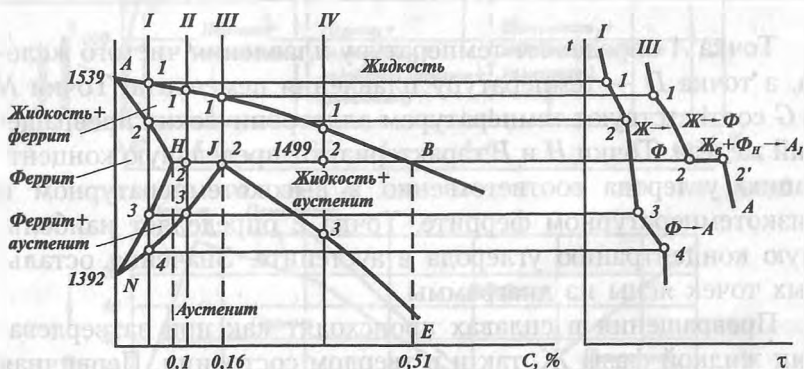
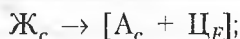
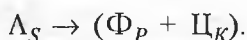


Рис. 9.5. Часть диаграммы состояния  $Fe-Fe_3C$  и кривые охлаждения для сталей, испытывающих перитектическое превращение

— эвтектическое превращение на линии  $ECF$  ( $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (см. рис. 9.6):



— эвтектоидное превращение на линии  $PSK$  ( $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):



Эвтектическая смесь аустенита и цементита называется *ледебуритом*, а эвтектоидная смесь феррита и цементита — *перлитом*.

Эвтектоид — перлит (0,8 % С) и эвтектика — ледебурит (4,3 % С) оказывают важное влияние на свойства сплавов. Перлит имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей:  $\sigma_{\text{B}} = 800\text{--}900\text{ МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 450\text{ МПа}$ ;  $\delta \leq 16\text{ \%}$ ;  $\text{HB} = 180\text{--}220$ . При охлаждении ледебурита ниже линии  $PSK$  входящий в него аустенит превращается в перлит, и при комнатной температуре ледебурит представляет уже смесь цементита и феррита. В этой структурной составляющей цементит образует сплошную матрицу, в которой размещены колонии перлита. Такое строение ледебурита служит причиной его большой твердости ( $\text{HB} > 600$ ) и хрупкости. Присутствие ледебурита в структуре сплавов делает их неспособными к обработке давлением, затрудняет обработку резанием.

Сплавы железа с углеродом разделяют на две группы: *стали*, содержащие до 2,14 % углерода, и *чугуны*, в которых углерода более 2,14 %.

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы ( $\text{Fe}\text{--}\text{Fe}_3\text{C}$ ), называются *критическими точками* и имеют условные обозначения. Все критические точки обозначают буквой  $A$  (табл. 9.2).

Таблица 9.2

Условные обозначения критических точек

Критическая точка	Характер превращения
1	2
$A_1$	Перлитное (эвтектоидное) превращение ( $A_{\text{C}1}$ — при нагреве, $A_{\text{F}1}$ — при охлаждении)

Критическая точка	Характер превращения
1	2
$A_3$	Начало выделения феррита из аустенита при охлаждении ( $Ar_3$ ) или конец растворения феррита при нагреве ( $Ac_3$ )
$A_4$	Переход $\gamma$ -железа в $\alpha$ -железо при нагреве ( $Ac_4$ ) и обратно при охлаждении ( $Ar_4$ )
$Ac_T$	Начало выделения цементита из аустенита при охлаждении или конец растворения цементита при нагреве

Первая критическая точка  $A_1$  лежит на линии  $PSK$  ( $727^\circ\text{C}$ ) и соответствует превращению  $P \rightarrow A$ . Точка  $A_2$  — линия  $MO$  ( $768^\circ\text{C}$ ); при этой температуре происходит магнитное превращение феррита. Точка  $A_3$  — линия  $GS$ ; по этой линии происходит превращение  $F \rightarrow A$ , температура которого зависит от содержания углерода в стали. Точка  $A_4$  — линия  $NJ$ ; превращение  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\delta$ ;  $A_{ст}$  — линия  $SE$ ; начало выделения  $C_{11}$  (иногда эту точку обозначают и как  $A_3$ ).

Поскольку превращения совершаются при нагреве и охлаждении при различных температурах (вследствие теплового гистерезиса), чтобы отличить эти процессы, ввели дополнительные обозначения. Для обозначения превращений при нагреве к букве «А» добавляют букву «с»:  $Ac_1$ ,  $Ac_2$ ; при охлаждении — латинскую букву «г»:  $Ar_1$ ,  $Ar_3$ .

#### 9.4. Диаграмма состояния «железо—графит»

В результате превращений, происходящих при охлаждении железоуглеродистых сплавов, углерод может не только химически взаимодействовать с железом, но и выделяться в

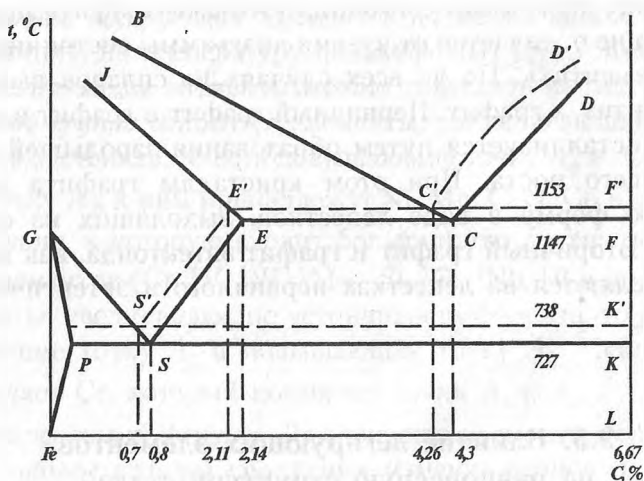


Рис. 9.6. Диаграмма состояния Fe—C

элементарном состоянии — в форме графита. По этой причине различают две диаграммы состояния: «железо—цементит» и «железо—графит».

Диаграмма состояния «железо—графит» нанесена на диаграмме состояния «железо—цементит» пунктирными линиями (рис. 9.6). Все линии этой системы лежат выше линии диаграммы состояния «железо—цементит».

В системе «железо—графит» эвтектика образуется при температуре 1153 °C. Она содержит 4,26 % углерода и состоит из аустенита и графита. Ее называют *графитной эвтектикой*.

Эвтектоидное превращение у сплавов системы «железо—графит» протекает при температуре 738 °C, причем эвтектоидная точка  $S'$  соответствует 0,7 % углерода. Структура эвтектоида состоит из феррита и графита. Его называют *графитовым эвтектоидом*. В интервале температур 1153—738 °C из аустенита выпадает вторичный графит. При этом аустенит изменяет свой состав по линии  $E'S'$ . Линия  $C'D'$  указывает изменение химического состава жидкой фазы во время кристаллизации первичного графита.

Чтение диаграммы состояния «железо—графит» принципиально не отличается от чтения диаграммы состояния «железо—цементит». Но во всех случаях из сплавов выпадает не цементит, а графит. Первичный графит и графит в эвтектике кристаллизуется путем образования зародышей и последующего роста. При этом кристаллы графита имеют сложную форму в виде лепестков, выходящих из одного центра. Вторичный графит и графит эвтектоида, как правило, выделяются на лепестках первичного и эвтектического графита.

### 9.5. Влияние легирующих элементов на равновесную структуру сталей

В современном машиностроении все большее применение находят стали, в которых, помимо железа, углерода и постоянных примесей, содержатся специальные добавки других элементов.

Эти добавки, вводимые в сталь в определенных концентрациях с целью изменения ее свойств, называются *легирующими элементами*, а стали, соответственно, — *легированными сталями*.

В качестве легирующих элементов наиболее часто используются Cr, Mn, Si, Mo, W, V, Ti, Nb, Co. Реже используются Al, Cu, В и некоторые другие элементы.

Почти все легирующие элементы изменяют температуры полиморфных превращений железа, температуру эвтектоидной и эвтектической реакции и влияют на растворимость углерода в аустените. Некоторые легирующие элементы способны, так же как и железо, взаимодействовать с углеродом, образуя карбиды, а также взаимодействовать друг с другом или с железом, образуя промежуточные фазы — интерметаллиды.

В результате изменения температуры фазовых превращений и химического взаимодействия элементов в структуре стали могут появиться новые равновесные фазы.

*Влияние легирующих элементов на полиморфизм железа.* По влиянию на температуру полиморфных превращений железа легирующие элементы можно разделить на две группы. К *первой группе* относятся элементы, увеличивающие устойчивость аустенита, то есть повышающие точку  $A_4$  и понижающие точку  $A_3$ ; к ним принадлежат Ni, Mn, C, N, Co и др. *Вторая группа*, в которую входит большинство других легирующих элементов (Cr,  $^1V$ ,  $^1W$ ,  $^1Mo$ ,  $^1Si$ ,  $^1Ti$ ,  $^1Nb$ ,  $^1B$  и др.), — это элементы, увеличивающие устойчивость феррита, то есть понижающие точку  $A_4$  и повышающие точку  $A_3$ . Исключение составляет Cr, который понижает точки  $A_3$  и  $A_4$ .

*Легированный феррит.* Легирующие элементы образуют с  $Fe_\alpha$  твердые растворы замещения, изменяя период его решетки. Практически все элементы при содержании больше 1 % снижают ударную вязкость феррита. Исключение составляет только никель. Искажение кристаллической решетки железа, возрастающее по мере увеличения разницы в атомных размерах, влияет на свойства феррита.

Влияние Cr, Mn, Ni на свойства феррита проявляется более значительно после термообработки, так как они влияют на скорость полиморфного  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$  превращения железа, уменьшая ее (понижают температуру точки  $A_3$ ). Поэтому при медленном охлаждении безуглеродистого легированного железа ( $C < 0,02\%$ ) образуется обычный феррит, имеющий равноосные зерна. При быстром охлаждении превращение  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$  происходит по мартенситному механизму: безуглеродистый аустенит превращается в безуглеродистый мартенсит с типичным игольчатым строением. При этом имеет место наклеп, растет и плотность дислокаций, измельчается блочная структура. В результате твердость увеличивается до 350 НВ.

*Легированный аустенит.* В легированных сталях, кроме углерода, в решетке аустенита находятся также легирующие элементы, образующие с  $Fe_\gamma$  твердые растворы замещения. Свойства такого легированного аустенита существенно отли-



чаются от свойств аустенита углеродистой стали. Легированный аустенит обладает высокой коррозионной стойкостью, химической прочностью при комнатных и высоких температурах, жаропрочностью.

Легированный марганцем ( $\approx 13\%$ ) аустенит хорошо сопротивляется износу трением. Изменяются и другие физико-механические свойства аустенита.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Какие фазы встречаются в железоуглеродистом сплаве?*
2. *Как образуется первичный, вторичный и третичный цементит?*
3. *Что называют сталью и чугуном?*
4. *Чем различаются диаграммы состояния «железо—графит» и «железо—цементит»?*
5. *Как легирующие элементы влияют на структуру сталей?*

## Глава 10

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, а следовательно, и свойства, является термическая обработка. *Термической обработкой* называют технологические процессы, включающие нагрев и охлаждение металлических изделий с целью изменения структуры и свойств.

Термической обработке подвергают слитки, отливки, полуфабрикаты после горячей и холодной обработки давлением, сварные соединения, детали машин, инструмент.

Основы термической обработки были разработаны великим русским ученым Д.К. Черновым. Дальнейшее развитие теории термической обработки получила в работах С.С. Штейнберга, А.А. Бочвара, Т.В. Курдюмова, А.П. Гуляева, Э. Бейна, Э. Давенпорта и других ученых.

## 10.1. Температура и время

Цель любого процесса термической обработки состоит в том, чтобы нагревом до определенной температуры и последующим охлаждением вызвать желаемое изменение строения металла. Основные факторы воздействия при термической обработке — температура и время, поэтому режим любой термической обработки можно представить графически в координатах  $t$  (температура) и  $\tau$  (время) (рис. 10.1). Режим термообработки характеризуется следующими параметрами: температура нагрева  $t_{\max}$ , то есть максимальная температура, до которой был нагрет сплав при термической обработке; время выдержки сплава при температуре нагрева  $\tau_{\text{в}}$ ; скорость нагрева и скорость охлаждения — соответственно  $V_{\text{нагр}}$ ,  $V_{\text{охл}}$ .

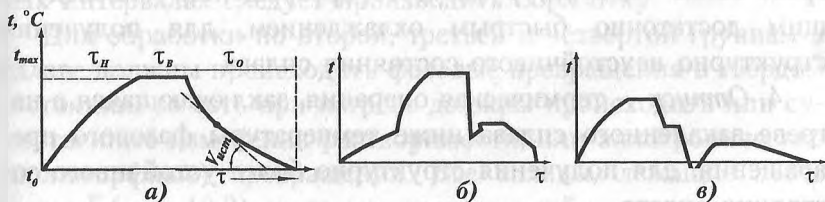


Рис. 10.1. График (режим) простой (а) и сложной (б, в) термической обработки

Нагрев или охлаждение с постоянной скоростью характеризуется в координатах  $(t - \tau)$  прямой линией с определенным постоянным углом наклона.

Термообработка может быть сложной, состоящей из многочисленных нагревов, прерывистого или ступенчатого нагрева (охлаждения), охлаждения в область отрицательных температур и т. д. (рис. 10.1).

## 10.2. Классификация видов термообработки

Для изменения свойств сплавов необходимо, чтобы в сплаве при нагреве, выдержке или охлаждении произошли остаточные изменения, обусловленные фазовыми превращениями. Если сплав находился в структурно неравновесном состоянии, то при нагреве, вследствие увеличения подвижности атомов, удастся приблизить сплав к равновесному состоянию. В этом случае термообработка возможна, хотя в сплаве не происходит фазовых превращений.

Все виды термической обработки можно разделить на четыре основные группы:

1. *Отжиг I рода* — термическая операция, заключающаяся в нагреве металла, имеющего неустойчивое состояние в результате предшествовавшей обработки, и приводящая металл в более устойчивое состояние.

2. *Отжиг II рода* — термическая операция, заключающаяся в нагреве выше температуры фазового превращения с последующим достаточно медленным охлаждением, для получения структурно устойчивого состояния сплава.

3. *Закалка* — термическая операция, заключающаяся в нагреве выше температур фазового превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением, для получения структурно неустойчивого состояния сплава.

4. *Отпуск* — термическая операция, заключающаяся в нагреве закаленного сплава ниже температуры фазового превращения, для получения структурно более устойчивого состояния сплава.

Имеется еще два принципиально отличных способа, представляющих сочетание термообработки с металлургией и механической технологией.

Так, способность металлов растворять различные элементы позволяет при повышенных температурах атомам вещества, окружающего поверхность металла, диффундировать внутрь него, создавая поверхностный слой измененного состава. При такой обработке изменяется не только состав, но и структура

поверхностных слоев, а часто и сердцевины. Такая обработка называется *химико-термической обработкой (ХТО)*.

В последнее время все большее применение получает обработка, в которой в едином технологическом процессе сочетаются деформация и структурные превращения. Деформация должна не только придать изделию внешнюю форму, но и создать наклеп; термообработке подвергается именно наклепанный материал. Такая обработка получила название *термомеханической обработки (ТМО)*. В данном случае объединяют механическую и термическую обработку в единый технологический процесс:

ХТО — нагрев сплава в соответствующих химических реагентах для изменения состава и структуры поверхностных слоев;

ТМО — деформация и последующая термообработка, сохраняющая в той или иной степени результаты наклепа.

### 10.3. Термообработка и диаграммы состояния

Диаграмма состояния показывает, каким видам термообработки может быть подвергнут сплав и в каких температурных интервалах следует производить обработку.

Для обработки по второй, третьей и четвертой группам в сплаве должны происходить фазовые превращения в твердом состоянии, то есть при нагреве должны происходить или существенные изменения растворимости, или аллотропические (полиморфные) превращения. Все сплавы, лежащие левее точки  $F$  (рис. 10.2), не имеют превращений в твердом состоянии, и для них неосуществима термообработка по второй, третьей или четвертой группам. В любом сплаве, лежащем правее  $F$ , при нагреве происходит растворение избыточной фазы (в данном случае — растворение  $\beta$ -фазы в  $\alpha$ -твердом растворе), и закалка может привести к фиксации пересыщенного твердого раствора (третья группа термообработки), а последующий нагрев может вызвать выделение избыточной фазы (четвертая группа термообработки).

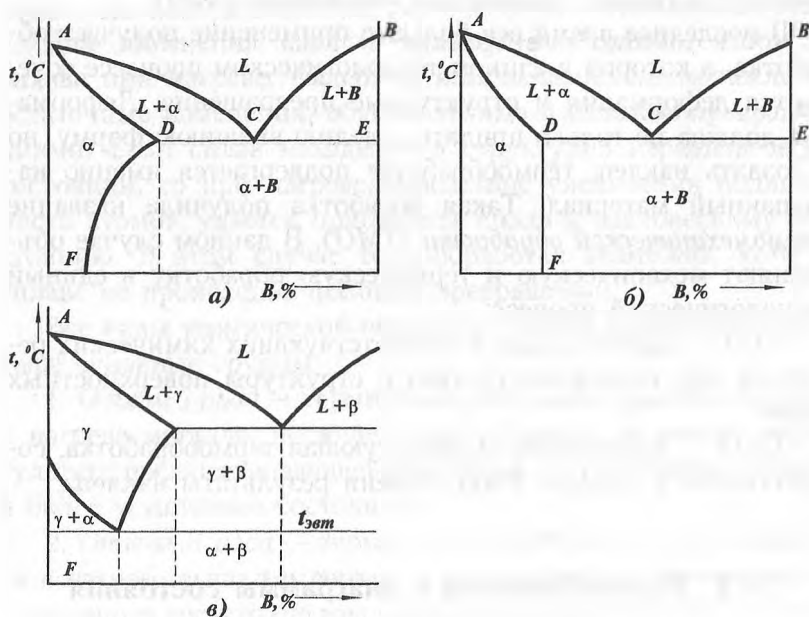


Рис. 10.2. Диаграммы состояния

Во всех сплавах, лежащих между  $F$  и  $D$ , нагрев может вызвать полное растворение избыточной  $\beta$ -фазы и получение при высоких температурах однородного  $\alpha$ -раствора. Для сплавов, расположенных на диаграмме правее точки  $D$ , часть  $\beta$ -фазы остается нерастворенной, и эта часть структуры не участвует в процессах термообработки. Наиболее эффективно термообработка повлияет на сплав, соответствующий точке  $D$ .

Несмотря на сходство по внешнему виду диаграмм, представленных на рис. 10.2, б) и а), ни один сплав из этой диаграммы не может быть подвергнут отжигу II рода, закалке или отпуску. Вертикальная линия  $DF$  показывает отсутствие изменения растворимости при изменении температуры, и поэтому фазовые превращения отсутствуют у всех сплавов.

Все сплавы, кристаллизующиеся по диаграмме состояния, изображенной на рис. 10.2, *в*, могут быть подвергнуты термической обработке по второй, третьей или четвертой группам.

При нормальной температуре все сплавы состоят из  $(\alpha + \beta)$ -фаз. При температуре эвтектоида  $t_{эвт}$  фазы  $\alpha$  и  $\beta$  превращаются в  $\gamma$ -фазу. Последующее охлаждение определяет вид термической обработки — отжиг (медленное охлаждение) или закалку (быстрое охлаждение).

Термическая обработка по второй и третьей группам возможна лишь при условии нагрева выше температуры фазовой перекристаллизации  $t_{эвт}$  и образования  $\gamma$ -твердого раствора.

Для ХТО необходимо наличие растворимости диффундирующего элемента в металле, то есть чтобы насыщающий компонент В мог образовывать с насыщаемым металлом А систему сплавов с областью растворимости  $B \rightarrow A$ . Сплавы с диаграммами состояния, представленными на рис. 10.2, *а*, *б*, имеют область твердого раствора вблизи компонента А, и поэтому возможна ХТО, состоящая в насыщении металла А компонентом В. Для сплавов, имеющих диаграмму состояния, представленную на рис. 10.2, *в*, диффузия В в А возможна лишь выше  $t_{эвт}$ , когда в данной системе существует компонент А в высокотемпературной модификации  $\gamma$ . Ниже  $t_{эвт}$  компонент А находится в форме  $\alpha$ , не растворяющей В, и при температурах ниже  $t_{эвт}$  насыщение поверхности путем диффузии В в А невозможно.

Термомеханическая обработка возможна, если сплав обладает необходимой технологической пластичностью.

#### 10.4. Основные виды термообработки стали

Основой для изучения термообработки стали является диаграмма состояния.

Поскольку рассматривается термообработка стали, то имеют значение только сплавы с концентрацией до 2,14 %.

Верхней границей при термообработке является линия солидуса, поэтому процессы первичной кристаллизации (и, сле-

довательно, верхняя часть диаграммы) в данном случае не имеют большого значения.

Необходимый участок диаграммы состояния Fe—Fe<sub>3</sub>C изображен на рис. 10.3.



Рис. 10.3. «Стальной» участок диаграммы состояния Fe—Fe<sub>3</sub>C

Ниже дана характеристика основных видов термообработки в соответствии с приведенной классификацией.

**Отжиг** — фазовая перекристаллизация, заключающаяся в нагреве выше  $A_{c3}$  с последующим медленным охлаждением. При нагреве выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$  полная перекристаллизация не произойдет; такая термообработка называется *неполным отжигом*. При отжиге состояние стали приближается к структурно равновесному; структура стали после отжига: перлит + феррит; перлит; перлит + цементит. Если после нагрева выше  $A_{c3}$  провести охлаждение на воздухе, то это будет первым шагом к отклонению от практически равновесного структурного состояния. Эта термическая операция называется *нормализацией*. Такая обработка (нормализация) является переходной ступенью от обработки по второй группе (отжиг) к обработке по третьей группе.

*Закалка* — нагрев выше  $A_{c3}$  с последующим быстрым охлаждением. При медленном охлаждении аустенит распадается на феррит + цементит при  $A_{r1}$ . С увеличением скорости охлаждения превращение происходит при более низких температурах. Ферритно-цементитная смесь по мере снижения  $A_{r1}$  становится все более мелкозернистой и твердой. Если же скорость охлаждения была так велика и переохлаждение было так значительно, что распада аустенита с выделением цемента и феррита не произошло, то распада твердого раствора не происходит, и аустенит ( $\gamma$ -твердый раствор) превращается в мартенсит (пересыщенный твердый раствор углерода в  $Fe_\alpha$ ).

*Неполная закалка* — термическая операция, при которой нагрев производится до температуры, лежащей выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$ , и в структуре стали сохраняется доэвтектоидный феррит (заэвтектоидный цементит).

*Отпуск* — нагрев закаленной стали ниже  $A_{c1}$ .

Для стали возможны различные виды ХТО в зависимости от элемента, диффундирующего в сталь.

Насыщение стали углеродом называется *цементацией*, азотом — *азотированием*, алюминием — *алитированием*, хромом — *хромированием*.

*Термомеханическая обработка стали* — нагрев до аустенитного состояния, деформация стали в аустенитном состоянии (в стабильном состоянии выше  $A_{c1}$  или в нестабильном переохлажденном состоянии) и окончательное охлаждение с протекающим при этом превращением наклепанного аустенита.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под режимами термической обработки?
2. Какие существуют виды термической обработки?
3. Каковы особенности химико-термической и термомеханической обработки?
4. Какие виды термообработки применяют для сталей?



## Глава 11

# ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ

### 11.1. Нагрев и охлаждение

Общее время нагрева складывается из времени нагрева до заданной температуры  $\tau_n$  и времени выдержки при этой температуре  $\tau_b$ . Время нагрева  $\tau_{\text{общ}} = \tau_n + \tau_b$  зависит от многих факторов:

- от способа нагрева — пламенная или электрическая печь, соляная, металлическая или масляная ванна, электролит, токи высокой частоты и т. д. Тип нагревательного устройства влияет на коэффициент теплоотдачи, который в основном определяет скорость нагрева. Этот коэффициент зависит от природы нагревающей среды, температуры и размеров деталей;

- от массы одновременно нагреваемого металла и расположения деталей в печи;

- от физических свойств нагреваемого металла: теплопроводности, теплоемкости, температуропроводности.

Скорость нагрева зависит от химического состава стали, структуры, конфигурации деталей и от интервала температур.

Скорость нагрева тем больше, чем меньше легирована сталь, чем однороднее микроструктура.

Для увеличения теплоотдачи, например, заменяют газовую нагревающую среду жидкой (электропечь заменяют ванной).

На практике встречаются следующие *режимы нагрева*:

- *медленный нагрев деталей с печью вместе*. Этот режим применяют при нагреве поковок сложной конфигурации из легированной стали. Продолжительность нагрева в этом случае велика;

— *нагрев деталей в печи с постоянной температурой, поддерживаемой на заданном уровне.* Время нагрева меньше, чем в первом случае, но увеличивается разность температур по сечению;

— *нагрев детали в печи, имеющей температуру, значительно превышающую ту, которая необходима для нагрева деталей.* Нагрев происходит быстро, но имеется большой перепад температур;

— *нагрев деталей с подогревом в другой печи.* В этом случае обе печи предварительно нагревают на заданную температуру и детали загружают в печь. Время нагрева меньше, чем в первом случае, и перепад температур по сечению небольшой.

Скорость охлаждения составляет 20–30 град/ч и обычно достигается при охлаждении металла вместе с печью.

## 11.2. Отжиг и нормализация

**Отжиг I рода.** Этот вид отжига в зависимости от температурных условий устраняет химическую или физическую неоднородность, созданную предшествующими обработками. Характерная особенность этого отжига — устранение неоднородности происходит независимо от того, протекают ли в сплавах при такой обработке фазовые превращения или нет. Поэтому отжиг I рода можно производить при температуре выше или ниже температур фазовых превращений.

**Диффузионный отжиг (гомогенизация)** (рис. 11.1) применяют для слитков легированной стали с целью уменьшения дендритной ликвации, которая повышает склонность стали, обрабатываемой давлением, к хрупкому разрушению, к анизотропии свойств и возникновению таких дефектов, как слоистый излом (шиферность) и тонкие внутренние трещины, наблюдаемые в изломе в виде белых овальных пятен (флокенов).

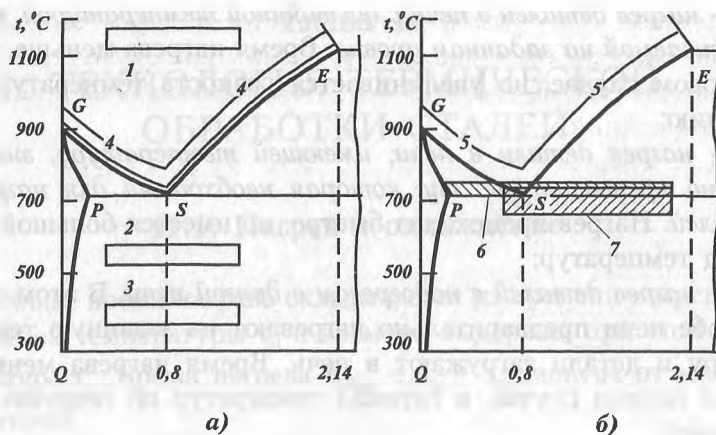


Рис. 11.1. Температура нагревов при различных видах термической обработки: а – отжиг I рода: 1 – диффузионный отжиг; 2 – рекристаллизационный отжиг; 3 – отжиг для снятия напряжений; 4 – нормализация; б – отжиг II рода: 5 – полный отжиг; 6 – неполный отжиг; 7 – циклический отжиг

Дендритная ликвация понижает пластичность и вязкость легированной стали, поэтому не только слитки, но и крупные отливки нередко подвергают гомогенизации.

Нагрев при диффузионном отжиге должен быть высоким (1100–1200 °C), так как в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания в объеме стали. Скорость нагрева – 100–150 град/ч, продолжительность выдержки достигает 8–20 ч, общая продолжительность операции – 50–100 ч в зависимости от массы слитка. Для удаления поверхностных дефектов слитки после отжига подвергают нагреву при 670–680 °C в течение 1–16 ч, что снижает твердость.

После гомогенизации сталь имеет крупное зерно, которое измельчается при последующей обработке давлением или нормализацией и полным отжигом.

**Рекристаллизационный отжиг.** Это нагрев холоднодеформированной стали выше температуры рекристаллизации, выдержка при этой температуре с последующим ох-

лаждением. Этот вид отжига применяют перед или после холодной обработки давлением и как промежуточную операцию для снятия наклепа между операциями холодного деформирования.

Для углеродистых сталей с 0,08 %—0,2 % С, чаще подвергаемых холодной деформации (прокатка, штамповка, волочение), температура отжига составляет 680—700 °С. Отжиг калиброванных прутков (холодная протяжка) из высокоуглеродистой легированной стали проводят при 730 °С. Продолжительность нагрева — 0,5—1,5 ч.

При отжиге стали кроме рекристаллизации феррита может протекать процесс коагуляции и сфероидизации цемента, в результате которого повышается пластичность и облегчается обработка давлением.

*Низкий отжиг (для снятия остаточных напряжений).* Если структура стали после горячей механической обработки хорошая и нет необходимости в перекристаллизации, а требуется снять внутренние напряжения, то нагревают сталь несколько ниже  $A_{c1}$ . Нагрев осуществляют со скоростью 100—150 град/ч до температуры 650—680 °С, а после выдержки — охлаждение на воздухе. Выдержка при температуре отжига составляет 0,5—1,0 ч на тонну слитка.

Отжиг стальных изделий для снятия напряжений проводят при 160—700 °С с медленным охлаждением. Например, многие детали прецизионных станков (ходовые винты, червяки, зубчатые колеса) нередко проходят отжиг (отпуск) после основной механической обработки при 570—600 °С в течение 2—3 ч и после окончательной механической обработки для снятия напряжений — при 160—180 °С в течение 2—2,5 ч. Отжиг для снятия сварочных напряжений проводят при 650—700 °С.

*Отжиг II рода (фазовая перекристаллизация).* Отжиг II рода основан на использовании диффузионных фазовых превращений при охлаждении металлов и сплавов. Это нагрев стали выше точек  $A_{c3}$  или  $A_{c1}$ , выдержка с последующим медленным охлаждением, в результате которого фазо-

вые превращения приводят к достижению практически равновесного структурного фазового состояния. После отжига для углеродистых сталей получается структура:

- феррит и перлит в доэвтектоидной стали;
- перлит в эвтектоидной стали;
- перлит и вторичный цементит в заэвтектоидной стали.

После отжига сталь обладает низкой твердостью и прочностью при высокой пластичности. Фазовая перекристаллизация, происходящая при отжиге, измельчает зерно и устраняет видманштеттову и другие неблагоприятные структуры стали.

Отжиг является подготовительной операцией, понижающей прочность и твердость перед обработкой резанием. Измельчая зерно, снимая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность, он способствует повышению пластичности и вязкости по сравнению с соответствующими характеристиками, полученными после литья,ковки и прокатки.

Существуют следующие виды отжига II рода: полный, изотермический и неполный.

*Полный отжиг* (см. рис. 11.1). Основные цели полного отжига: устранение пороков структуры, возникших при предыдущей обработке (литье, горячей деформации, сварке и термообработке), снижение твердости стали перед обработкой резанием и снятие внутренних напряжений.

Этот вид отжига заключается в нагреве доэвтектоидной стали на 30—50 °С выше  $A_{с3}$ , выдержке при этой температуре для полного прогрева и завершения фазовых переходов и последующем медленном охлаждении. В этом случае ферритно-перлитная структура переходит при нагреве в аустенит, а затем при медленном охлаждении превращается обратно в феррит и перлит. Происходит полная перекристаллизация. Образуется мелкозернистая структура, обеспечивающая высокую вязкость и пластичность, а также возможность достижения высоких свойств после окончательной термообработки.

На практике скорость нагрева близка к 100 град/ч, а продолжительность выдержки — (0,5–1)  $Q$  ( $Q$  — масса садки, т). Чрезмерное повышение температуры нагрева над точкой  $A_{c3}$  вызывает рост зерна аустенита, что ухудшает свойства стали.

Скорость охлаждения при отжиге зависит от устойчивости переохлажденного аустенита, а следовательно, от состава стали. Чем больше устойчивость аустенита в области перлитного превращения, тем медленнее должно быть охлаждение. Поэтому легированные стали охлаждают значительно медленнее (10–100 град/ч), чем углеродистые (250–200 град/ч).

**Изотермический отжиг** (рис. 11.2). В этом случае с целью экономии времени сталь нагревают как и для полного отжига и сравнительно быстро охлаждают (чаще — переносом в другую печь) ниже  $A_{c1}$  на 50–100 °C (обычно 650 °C) и назначают изотермическую выдержку, необходимую для полного распада аустенита. Затем — охлаждение на воздухе.

Для ускорения отжига температуру изотермической выдержки следует выбрать близкой к минимальной устойчивости переохлажденного аустенита в перлитной области.

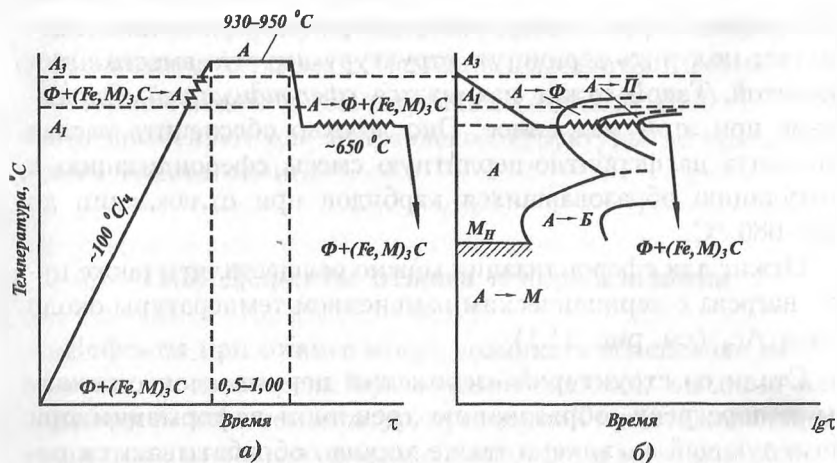


Рис. 11.2. Схема изотермического отжига стали ( $Q$  — масса садки, т)

Другое преимущество изотермического отжига — получение более однородной структуры, так как при этом температура по сечению при выдержке выравнивается и превращение по всему объему стали происходит при одинаковой степени охлаждения.

Изотермический отжиг улучшает обрабатываемость резанием, чистоту поверхности и уменьшает деформации при последующей термической и химико-термической обработке. Целесообразно подвергать изотермическому отжигу детали небольших размеров.

*Неполный отжиг.* Этот вид отжига отличается от полного тем, что сталь нагревают до более низких температур (выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$ ) и медленно охлаждают. При этом происходит частичная перекристаллизация перлитной составляющей.

Неполному отжигу подвергают доэвтектоидные стали с целью снятия внутренних напряжений и улучшения обрабатываемости резанием в том случае, если предварительная горячая механическая обработка не привела к образованию крупного зерна.

Для заэвтектоидных сталей применяют только неполный отжиг. В этих сталях нагрев несколько выше  $A_{c1}$  (на 10—30 °С). Он вызывает практически полную перекристаллизацию и позволяет получить зернистую структуру перлита вместо пластинчатой. Такой отжиг называется *сфероидизацией*. Охлаждение при этом медленное. Оно должно обеспечить распад аустенита на ферритно-перлитную смесь, сфероидизацию и коагуляцию образовавшихся карбидов при охлаждении до 620—680 °С.

Отжиг для сфероидизации можно осуществлять также путем нагрева с периодическим изменением температуры около точки  $A_{c1}$  (см. рис. 11.1).

Стали со структурой «зернистый перлит» менее склонны к перегреву, образованию трещин и деформации при последующей закалке, а также хорошо обрабатываются резанием.

**Нормализация** — это нагрев доэвтектоидной стали до температуры, превышающей  $A_{c3}$  на 50 °С, а в заэвтектоидной — выше  $A_{c1}$  на 50–60 °С, непродолжительная выдержка и охлаждение на воздухе (см. рис. 11.1). Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье, ковке, прокатке.

Ускоренное охлаждение на воздухе приводит к распаду аустенита при более низких температурах, что повышает дисперсность ферритно-цементитной структуры и увеличивает дисперсность сорбита и троостита. Это повышает на 10–15 % прочность и твердость нормализованной средне- и высокоуглеродистой стали по сравнению с отожженной.

Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. В результате твердость немного возрастает, но улучшается качество поверхности при резании.

Для среднеуглеродистых сталей нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки и высокого отпуска (улучшения). Механические свойства при этом понижаются, но уменьшается деформация изделий по сравнению с полученной при закалке. Исключается вероятность образования трещин.

Высокоуглеродистые (заэвтектоидные) стали подвергают нормализации с целью устранения цементитной сетки.

Нормализацию с последующим отпуском (600–650 °С) часто применяют для исправления структуры легированных сталей вместо отжига.

### 11.3. Дефекты отжига и нормализации

Дефекты при отжиге могут возникать вследствие неправильного хода нагрева, применения слишком высоких или слишком низких температур, чрезмерной продолжительности нагрева, из-за неподходящей атмосферы и неправильного режима охлаждения.



При слишком быстром нагреве, особенно изделий крупных размеров, в результате теплового расширения наружных слоев в середине изделия могут возникать большие растягивающие напряжения, вызывающие образование трещин. На опасность возникновения трещин необходимо обратить особое внимание при нагреве сталей с плохой теплопроводностью и высоким коэффициентом теплового расширения, например аустенитных.

По достижении температуры отжига необходимо обеспечить выравнивание температур, особенно для крупных изделий. Неравномерный нагрев приводит к неравномерной структуре и тем самым к получению различных механических свойств в разных сечениях изделия.

При слишком высоких температурах отжига и чрезмерно длительных выдержках происходит образование крупнозернистой структуры, называемой *структурой перегрева*. Перегрев характеризуется крупнокристаллическим блестящим изломом. Перегрев может быть устранен отжигом с фазовой перекристаллизацией, нормализацией или улучшением (закалка с высокотемпературным отпуском).

Очень большой перегрев из-за сильного роста зерна может вызвать повреждение границ зерен. Такой дефект называется *пережогом*. Пережог характеризуется оплавлением и (в связи с этим) окислением металла по границам зерен и не может быть исправлен термической обработкой. Пережог является неисправимым браком.

Большое значение имеет атмосфера печи. Избыток в атмосфере окислительных газов (кислорода, водяного пара, углекислоты и др.) приводит к образованию окалина и обезуглероживанию.

Наличие таких газов, как окись углерода, углеводороды и т. п., вызывает науглероживание поверхности. На практике всегда имеется более или менее окислительная печная атмосфера. Наблюдаемое в этих случаях обезуглероживание наружных слоев оказывается иногда более вредным, чем окалинаобразование.

Обезуглероживание поверхности металла обуславливает неравномерную и неполную восприимчивость к закалке, например, инструментальных сталей. Кроме того, обезуглероживание способствует снижению усталостной прочности, ухудшению химических свойств поверхности.

С целью защиты изделий от обезуглероживания и окалинообразования отжиг осуществляют в ящиках или трубах, замасленных глиной, а также в ящиках с засыпкой древесным углем или чугунной стружкой.

Широкое применение находит отжиг в защитной атмосфере.

#### 11.4. Закалка

*Закалкой* называется термическая обработка, заключающаяся в нагревании стали до температуры выше критической  $A_{c3}$  для доэвтектоидной и выше  $A_{c1}$  — для заэвтектоидной или до температуры растворения избыточных фаз, в выдержке и последующем охлаждении со скоростью, превышающей критическую.

Минимальная скорость охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит без структур перлитного типа, называется *критической скоростью закалки*.

В результате закалки из аустенита образуется неустойчивая метастабильная структура — мартенсит.

Мартенсит имеет высокую твердость:  $HV = 850$ . Твердость мартенсита тем выше, чем больше в нем углерода.

Кроме того, высокая твердость объясняется также наличием большого числа нарушений кристаллического строения, возникающих в процессе образования мартенсита.

Аустенит превращается в мартенсит в том случае, когда диффузионные процессы полностью подавляются, то есть становятся невозможными.

Превращение аустенита в мартенсит начинается при определенной температуре, называемой *температурой начала мартенситного превращения*  $M_n$ . Для того чтобы мартенсит-

ное превращение протекало, необходимо непрерывное охлаждение аустенита ниже точки  $M_H$ . Если охлаждение прекратить, то превращение аустенита в мартенсит остановится.

При достижении определенной температуры дальнейшее превращение аустенита в мартенсит прекращается. Эта температура называется *концом мартенситного превращения*  $M_K$ . Положение температур  $M_H$ ,  $M_K$  не зависит от скорости охлаждения и определяется химическим составом стали. Чем больше углерода в аустените, тем ниже располагаются эти температуры. Все легирующие элементы, за исключением Co и Al, понижают  $M_H$  и  $M_K$ . Мартенситное превращение характеризуется высокой скоростью роста зародышей (1000—7000 м/с).

### 11.5. Выбор температуры закали

Результаты закали во многом зависят от правильного выбора температуры нагрева под нее.

Дозэвтектоидные стали для закали следует нагревать на 30—50 °C выше  $A_{c3}$ . В этом случае сталь с исходной структуры (перлит + феррит) нагревается до аустенитного состояния и при охлаждении со скоростью больше критической получается мартенсит. Такая закали называется *полной*.

Если дозэвтектоидную сталь нагреть выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$ , то в ее структуре после закали наряду с мартенситом будут участки феррита. Присутствие феррита как мягкой составляющей снижает твердость стали после закали. Такая закали называется *неполной*. Поэтому все дозэвтектоидные стали подвергают полной заалке.

Заэвтектоидные стали нагревают для закали на 50—70 °C выше  $A_{c1}$ . При этих температурах в стали наряду с аустенитом имеется цементит. Поэтому после закали в структуре заэвтектоидных сталей будет мартенсит с цементитом и небольшое количество остаточного аустенита. Остаточный аустенит как структурная составляющая характерен для всех закаленных заэвтектоидных сталей.

Верхний предел температуры закалки для большинства заэвтектоидных сталей ограничивают, так как чрезмерное повышение температуры выше  $A_{c1}$  связано с ростом зерна, что приводит к снижению прочности и сопротивления хрупкому разрушению.

Если заэвтектоидную сталь нагреть для закалки выше  $A_{c1}$ , то в структуре будет крупноиглочатый мартенсит с повышенным количеством остаточного аустенита. Присутствие аустенита в структуре стали снижает ее твердость.

Все заэвтектоидные стали подвергают неполной закалке.

Продолжительность нагрева должна обеспечивать прогрев изделия по сечению и завершение фазовых превращений, но не должна быть слишком большой, чтобы не вызвать роста зерна и обезуглероживания поверхностных слоев стали.

Общая продолжительность нагрева

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{с.п}} + \tau_{\text{из}},$$

где  $\tau_{\text{с.п}}$  — продолжительность сквозного прогрева до заданной (конечной) температуры;  $\tau_{\text{из}}$  — изотермическая выдержка при данной температуре, определяемая только составом и исходным состоянием стали.

Величина  $\tau_{\text{из}}$  должна быть минимальной, но обеспечивать завершение фазовых превращений в стали и необходимую концентрацию углерода и легирующих элементов — в аустените. Время нагрева деталей зависит от конструкции нагревательного устройства. При нагреве в электрических печах скорость нагрева составляет 0,8—1 мин на 1 мм сечения. Скорость нагрева в соляной ванне в 2 раза выше, а в расплавленном металле (свинце) — в 3—4 раза выше, чем в электрической печи.

## 11.6. Закалочные среды

Охлаждающая (закалочная) среда должна обеспечивать высокую скорость охлаждения при температурах наименьшей устойчивости переохлажденного аустенита (650—550 °С), чтобы предупредить его распад на ферритно-цементитную смесь.

В интервале температур мартенситного превращения  $M_{II}-M_K$  целесообразно медленное охлаждение с целью уменьшения внутренних напряжений.

В качестве закалочных сред для углеродистых сталей, имеющих высокую критическую скорость охлаждения, используют масло и воздух.

*Вода* как закалочная среда имеет большую скорость охлаждения, но обладает рядом недостатков: охлаждающая способность воды резко снижается при повышении ее температуры; вода имеет высокую скорость охлаждения при температурах образования мартенсита. Это приводит к образованию закалочных дефектов.

Добавление к воде солей, соды, щелочей сильно изменяет ее закаливающую способность. В таких растворах расширяется интервал пузырькового кипения, ускоряется и делается более равномерным охлаждение. Охлаждающая способность водных растворов солей и щелочей менее чувствительна к колебаниям температур.

*Минеральное масло* охлаждает медленнее и более равномерно, чем вода и водные растворы. Применяется при охлаждении стали в интервале температур мартенситного превращения. Охлаждающая способность минерального масла не изменяется с повышением температуры от 20 до 150 °С.

К недостаткам масла относятся его огнеопасность и загущение с течением времени, что ухудшает его закаливающую способность. Кроме того, масло пригорает к поверхности детали и образует налет (пригар).

В последние годы вместо воды или масла начинают применять водные растворы моющих средств, содержащих поверхностно-активные вещества, жидкий силикат и особенно синтетические вещества, например аквапласт.

*Аквапласт* представляет собой раствор в воде высоковязкой прозрачной жидкости, содержащей растворимый в воде полимер и коррозионнозащитный ингибитор. Концентрация раствора — 0,5–0,7 %.

Закалка в водных растворах полимеров и моющих средств приводит к уменьшению скорости охлаждения при темпера-

турах ниже  $M_{II}$  и как следствие этого — исключается образование трещин и уменьшается коробление.

Дальнейшим усовершенствованием методов охлаждения является применение смесей воды с воздухом, подаваемых через форсунки. Водовоздушные среды используют для охлаждения крупных поковок, рельсов и т. д.

### 11.7. Закаливаемость и прокаливаемость стали

Под *закаливаемостью* понимают способность данной стали приобретать высокую твердость в результате закалки. Закаливаемость зависит в основном от содержания углерода в стали. Чем больше углерода в стали, тем выше ее твердость после закалки. Низкоуглеродистые стали (до 0,2 % С) практически не закаливаются. Легирующие элементы оказывают относительно небольшое влияние на закаливаемость.

Под *прокаливаемостью* понимают способность стали образовывать мартенситную или троостмартенситную структуру на определенную глубину. Прокаливаемость определяется критической скоростью охлаждения, зависящей от состава стали. Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия будет превышать критическую скорость закалки, то сталь будет иметь сквозную прокаливаемость, то есть по всему сечению образуется структура мартенсита.

Если действительная скорость охлаждения в сердцевине будет меньше критической  $V_k$ , то изделие прокалится только на некоторую глубину, и прокаливаемость будет неполной. В этом случае в сердцевине произойдет распад аустенита с образованием пластинчатой ферритно-карбидной структуры (троостита, сорбита и перлита).

За глубину закаленного слоя условно принимают расстояние от поверхности до полумартенситной зоны (50 % мартенсита + 50 % троостита). Диаметр заготовки, в центре которой

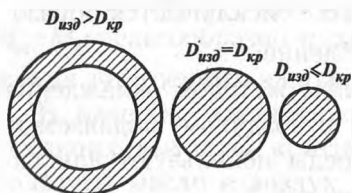


Рис. 11.3. Закаленный слой (заштрихован) в цилиндрических образцах различных сечений ( $D_{кр}$  — критический диаметр)

после закалки в данной охлаждающей среде образуется полумартенситная структура, называют *критическим диаметром*. Величина критического диаметра определяет размер сечения изделия, прокаливающегося насквозь, то есть получающего высокую твердость, а после отпуска — и высокие механические свойства по всему сечению (рис. 11.3).

Прокаливаемость тем выше, чем меньше критическая скорость закалки, то есть чем выше устойчивость переохлажденного аустенита.

При несквозной закалке изменение структуры стали по сечению влечет за собой изменение механических свойств, твердость после закалки уменьшается от поверхности к сердцевине.

## 11.8. Внутренние напряжения в закаленной стали

Внутренние напряжения возникают в результате неравномерного охлаждения поверхности и сердцевины изделия, увеличения объема и неоднородности мартенситного превращения по объему изделия. Напряжения, вызываемые этим превращением, называют *структурными* или *фазовыми*.

Неодинаковое распределение температуры по сечению изделия при быстром охлаждении сопровождается и неравномерным изменением объема. Поверхностные слои сжимаются быстрее, чем внутренние.

Различают внутренние напряжения I, II и III рода.

*Напряжения I рода* — это зональные внутренние напряжения, возникающие между отдельными зонами сечения и между различными частями детали. Чем больше скорость

и неравномерность охлаждения, размеры детали, тем большего значения достигают внутренние напряжения I рода.

*Напряжения II рода* возникают внутри зерна или между соседними зернами вследствие того, что у них различные коэффициенты линейного расширения, или вследствие образования новых фаз. Внутренние напряжения II рода (их называют *структурными*) не зависят от скорости охлаждения. Структурные напряжения возникают в результате превращения аустенита в мартенсит. Мартенсит в первую очередь образуется на поверхности, а не в сердцевине. Так как превращение «аустенит→мартенсит» сопровождается увеличением объема, это приводит к образованию на поверхности временных сжимающих напряжений, а во внутренних слоях — растягивающих.

*Напряжения III рода* образуются внутри объема нескольких элементарных ячеек кристаллической решетки.

Внутренние напряжения I рода, влияние которых наиболее сильно, вызывают коробление детали и трещины, особенно если металл обладает малой пластичностью и если внутренние напряжения превзойдут значение предела прочности.

Напряжения, которые возникли и сохранились в детали в результате охлаждения, называют *остаточными*.

Закаленная сталь всегда находится в структурно-напряженном состоянии. Отпуск является необходимым средством снятия остаточных напряжений.

### 11.9. Способы закалки

В зависимости от состава стали, формы, размеров и требуемых от термически обработанной детали свойств следует выбирать способ закалки.

Основными способами закалки являются:

1. *Закалка в одном охладителе*. Это наиболее простой способ. Нагретую до заданной температуры деталь погружают в закалочную жидкость, где она остается до полного охлажде-



ния. Применяют при закалке несложных деталей из углеродистых и легированных сталей. Для деталей из углеродистых сталей диаметром более 2—5 мм закалочной жидкостью служит вода, а для деталей меньших размеров и для многих легированных сталей — минеральное масло. Этот способ применяют и при механизированной закалке.

Для уменьшения внутренних напряжений деталь иногда не сразу погружают в жидкость, а некоторое время охлаждают на воздухе — подстуживают (закалка с подстуживанием).

2. *Прерывистая закалка, или закалка в двух средах.* Деталь сначала охлаждают в быстроохлаждающей среде (обычно в воде), а затем медленно охлаждают (деталь переносят в минеральное масло или охлаждают на воздухе). Мартенситный интервал происходит при сравнительно медленном охлаждении, что способствует уменьшению внутреннего напряжения. Этот способ применяют при закалке инструмента из высокоуглеродистых сталей. Практически трудно установить и отрегулировать время пребывания деталей в первой жидкости, так как оно исчисляется секундами.

3. *Струйчатая закалка.* Обрызгивание детали интенсивной струей воды обычно применяют тогда, когда требуется закалить части детали. При этом способе не образуется паровой рубашки, что обеспечивает более глубокую прокаливаемость, чем при простой закалке в воде.

4. *Закалка с самоотпуском.* В этом случае охлаждение изделия в закалочной среде прерывают, с тем чтобы в сердцевине изделия сохранилось еще некоторое количество теплоты. Под действием теплообмена температура в более сильных охлаждающихся поверхностных слоях повышается и сравнивается с температурой сердцевины. В результате происходит отпуск поверхности стали (самоотпуск). Эту закалку применяют, например, для таких инструментов, которые работают с ударными нагрузками и должны сочетать высокую твердость на поверхности с повышенной вязкостью в сердцевине (зубила, кувалды, молотки, керны и т.п.) .

5. *Ступенчатая закалка.* Сталь после нагрева до температуры закалики охлаждают в среде, имеющей температуру выше точки  $M_n$  (180—250 °C), и выдерживают сравнительно короткое время. Затем изделие охлаждают до комнатной температуры на воздухе. В результате выдержки в закалочной среде достигается выравнивание температуры по сечению изделия до температуры закалочной ванны. Затем следует обычное медленное охлаждение, во время которого происходит закалка, то есть превращение аустенита в мартенсит, но менее полное, чем при непрерывной закалке. Сталь сохраняет большое количество остаточного аустенита. При ступенчатой закалке уменьшаются объемные изменения и возможность образования трещин.

Однако применение ступенчатой закалики ограничено предельным размером сечения детали — не более 8—10 мм. Сравнительно медленное охлаждение среды не позволяет достигнуть критической скорости закалики для более крупных деталей, и аустенит распадется при высоких температурах.

6. *Изотермическая закалка.* В отличие от ступенчатой при изотермической закалике необходимо выдерживать сталь в закалочной среде столько времени, чтобы успело закончиться изотермическое превращение аустенита.

Обычно температура изотермического распада аустенита лежит в интервале 250—300 °C. В результате изотермической закалики с распадом аустенита в этом районе температур сталь обладает меньшей твердостью при любых способах закалики, но, как правило, — повышенной вязкостью. В результате получается структура бейнита.

### 11.10. Дефекты, возникающие при закалике

К основным дефектам, которые могут возникнуть при закалике стали, относятся трещины в изделии — внутренние или наружные, деформации, коробления.

*Трещины.* При закалке трещины возникают в тех случаях, когда внутренние напряжения I рода превышают сопротивление стали отрыву. Трещины образуются при температуре ниже точки  $M_{II}$ , чаще — после охлаждения. Склонность к образованию трещин возрастает с увеличением в стали процентного содержания С, повышением температуры закалки и увеличением скорости охлаждения в температурном интервале мартенситного превращения.

Другой причиной является наличие в изделии концентраторов напряжений (резкое изменение сечения изделия, местные вырезы, выступы, углубления).

Трещины — неисправимый дефект. Для их предупреждения необходимо при конструировании изделия избегать резких выступов, резких переходов; проводить закалку в интервале низких температур; осуществлять медленное охлаждение в мартенситном интервале; выполнять отпуск немедленно после закалки.

*Деформации и коробления.* Деформация, то есть изменение размеров и формы изделий, происходит при термообработке в результате термических и структурных изменений, вызванных неравномерным охлаждением.

Несимметричную деформацию изделий называют *короблением*. Оно наблюдается при неравномерном чрезмерно высоком нагреве под закалку, неправильном положении детали при погружении в закалочную среду и высокой скорости охлаждения.

Размеры изделий после закалки даже при отсутствии коробления не совпадают с исходными. Вызываемую этими изменениями деформацию можно уменьшить подбором соответствующего состава стали и условий термообработки (ступенчатая закалка).

## 11.11. Отпуск

Отпуск заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже  $A_{c1}$ , выдержке при данной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью. Отпуск

является окончательной операцией термообработки, после чего сталь получает требуемые свойства. Кроме того, отпуск полностью или частично устраняет внутреннее напряжение, возникшее при закалке. Эти напряжения снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска.

Основное влияние на свойства стали оказывают температуры отпуска. Различают три вида отпуска.

*Низкий отпуск* проводят с нагревом до 150–200 °С, реже — до 240–250 °С. При этом снижаются внутренние напряжения, мартенсит заковки переходит в отпущенный (кубический) мартенсит, повышается прочность и несколько улучшается вязкость без заметного снижения твердости. Закаленная сталь (0,5–1,3 % С) после низкого отпуска сохраняет высокую твердость, износостойкость, однако плохо выдерживает динамические нагрузки.

Поэтому низкотемпературному отпуску подвергают режущий инструмент, измерительный инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, а также детали, претерпевшие поверхностную закалку, цементацию, цианирование и нитроцементацию.

Продолжительность отпуска — 1–2,5 ч, а для изделий больших сечений и измерительных инструментов требуется более длительный отпуск.

*Средний отпуск* проводят при 350–500 °С. Такой отпуск обеспечивает сравнительно высокую твердость и прочность с хорошей упругостью и достаточной вязкостью. Поэтому его применяют главным образом при обработке стали, предназначенной для изготовления пружин, рессор, а также для штампов, так как он обеспечивает высокий предел упругости, выносливости и релаксационную стойкость. Структура стали после среднего отпуска: троостит отпуска или троостит + мартенсит. Охлаждение — с температуры 400–450 °С — следует проводить в воде, что способствует образованию на поверхности сжимающих остаточных напряжений, которые увеличивают предел выносливости пружин.

*Высокий отпуск* проводят при 500—680 °С. Структура стали после этого — сорбит отпуска. Высокий отпуск создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали.

Закалка с последующим высоким отпуском повышает пределы прочности и текучести, относительное сужение и особенно ударную вязкость. Термообработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют *улучшением*.

Улучшению подвергают среднеуглеродистые (0,3—0,5 % С) конструкционные стали, к которым предъявляются высокие требования к пределу текучести, выносливости и ударной вязкости. Однако износостойкость улучшенной стали вследствие ее пониженной твердости не является высокой. Улучшение значительно повышает конструктивную прочность, уменьшает чувствительность к концентрациям напряжений, снижает температуру верхнего и нижнего порога хладноломкости.

*Отпускная хрупкость*. Обычно ударная вязкость с температурой отпуска увеличивается, а скорость охлаждения после отпуска не влияет на свойства. Но у некоторых конструкционных сталей наблюдается уменьшение ударной вязкости. Этот дефект называют *отпускной хрупкостью*.

## 11.12. Старение

Термин *отпуск* принято применять только к тем сплавам, которые были подвергнуты закалке с полиморфным превращением, а термин *старение* — в случае закалки без полиморфного превращения (после такой закалки фиксируется пересыщенный твердый раствор).

Как отпуск, так и старение — это разновидности термической обработки, в результате которой происходит изменение свойств закаленных сплавов. В отличие от отпуска после старения увеличиваются прочность, твердость, уменьшается пластичность.

Главным процессом при старении является распад пересыщенного твердого раствора, полученного в результате

закалки. Таким образом, старение сплавов связано с переменной растворимостью избыточной фазы, а упрочнение при старении происходит в результате дисперсных выделений при распаде пересыщенного твердого раствора и возникающих при этом внутренних напряжений.

Основное назначение старения — повышение прочности и стабилизация свойств сплавов.

Различают старение естественное, искусственное и после пластической деформации.

*Естественным старением* называют самопроизвольное повышение прочности (и уменьшение пластичности) закаленного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре.

*Искусственное старение.* Нагрев ускоряет подвижность атомов, это интенсифицирует процесс диффузии. Повышение прочности, происходящее в процессе выдержки при повышенных температурах, называют *искусственным старением*.

*Деформационное старение.* Если закаленный сплав, имеющий структуру пересыщенного твердого раствора, подвергнуть пластической деформации, то это также ускоряет протекающие при старении процессы. Этот вид старения называют *деформационным*.

Старение охватывает все процессы, происходящие в пересыщенном твердом растворе, то есть процессы, подготавливающие выделение, и непосредственно процессы выделения. Для практики большое значение имеет инкубационный период — время, в течение которого в закаленном сплаве совершаются подготовительные процессы и он сохраняет высокую пластичность. Это позволяет проводить холодную деформацию непосредственно после закалки.

Если при старении происходят только процессы выделения, то такое явление называют *дисперсионным твердением*.

Практическое значение явления старения сплавов очень велико. Так, после старения увеличивается прочность и уменьшается пластичность низкоуглеродистой стали — в результате дисперсных выделений в феррите третичного це-

ментита и нитридов. Кроме того, в сталях возможно одновременное протекание термического и деформационного старения.

Деформационное старение ухудшает штампуемость листовой стали. Поэтому многие углеродистые стали подвергают испытаниям на склонность к деформационному старению. Старение является основным способом упрочнения алюминиевых сплавов, некоторых сплавов меди, а также многих жаропрочных и других сплавов. В настоящее время все более широко используют мартенситностареющие сплавы.

### 11.13. Обработка холодом

Сущность термообработки холодом заключается в том, что у многих марок промышленных сталей температура окончания мартенситного превращения  $M_k$  лежит ниже  $0^\circ$ , а следовательно, после закалки в структуре имеется остаточный аустенит. Чем ниже расположена точка  $M_k$ , тем больше остаточного аустенита в структуре закаленной стали.

С целью уменьшения количества остаточного аустенита сталь после закалки охлаждают до отрицательных температур. В результате происходит возобновление мартенситного превращения.

Температура охлаждения в области отрицательных температур зависит от положения  $M_k$ . Охлаждение до температур, лежащих значительно ниже точки  $M_k$ , не вызывает увеличения количества мартенсита.

Увеличение количества мартенсита за счет аустенита вызывает повышение твердости, стабилизацию размеров, увеличение объема, повышение ферромагнитных характеристик.

Эффект обработки холодом определяется количеством превращенного при отрицательных температурах аустенита. Чем ниже лежит  $M_k$ , тем больше аустенита превращается в мартенсит, тем больший эффект от обработки.

Так как превращение остаточного аустенита в мартенсит при обработке холодом заканчивается по достижении  $M_K$ , то выдержка при отрицательных температурах не приводит к увеличению количества мартенсита. Обработка холодом целесообразна для сталей, у которых  $M_K$  лежит ниже комнатной температуры. К ним относятся углеродистые стали, содержащие свыше 0,6 % С, и легированные стали.

Выдержка стали после закалки при комнатной температуре более 3–6 ч стабилизирует аустенит, и поэтому он в меньшем количестве превращается в мартенсит при дальнейшем охлаждении и, таким образом, уменьшает эффект обработки холодом. В данном случае обработку холодом выполняют сразу после закалки.

На практике обработку холодом применяют в следующих случаях: при обработке быстрорежущих сталей для сокращения продолжительности цикла термообработки и улучшения режущих свойств; при обработке высокохромистых сталей, в которых после закалки имеется большое количество остаточного аустенита; для повышения твердости и износостойкости цементованных деталей из углеродистых и легированных сталей; для стабилизации размеров калибров колец шарикоподшипников и других особо точных изделий; для повышения магнитных характеристик магнитов. Обработку холодом рекомендуется применять непосредственно после закалки.

Технологический режим термообработки складывается из закалки, обработки холодом и последующего отпуска (рис. 11.4).

При термической обработке быстрорежущей стали широко применяют обработку холодом. Закаленную сталь охлаждают до  $-80 \div -100$  °С, то есть до температур ниже точки  $M_H$  этой стали. Затем для снятия внутренних напряжений сталь подвергают однократному отпуску (560 °С).

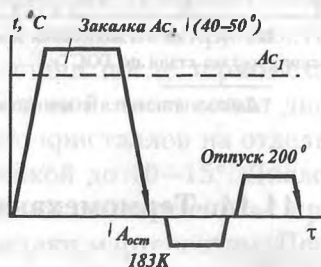


Рис. 11.4. Схема режима термической обработки стали холодом



В табл. 11.1 для некоторых марок сталей приведены интервалы температур мартенситного превращения, данные о количестве остаточного аустенита после закалки и обработки холодом и приросте твердости.

Таблица 11.1

**Интервал мартенситного превращения,  
количество остаточного аустенита после закалки и обработки  
холодом и прирост твердости некоторых марок сталей**

Марка стали	Интервал мартенситного превращения		Количество остаточного аустенита, %		Прирост твердости после обработки холодом HRC
	$M_{\text{ш}}, ^\circ\text{C}$	$M_{\text{ж}}, \text{K}$	После закалки	После охлаждения	
У7	300—255	218	<5	<1	0,5
У8	255—230	218	3—8	1—6	1,0
У9	230—210	218	5—12	3—10	1—1,5
У10	210—175	213	6—18	6—18	1,5—3
У12	175—160	203	10—23	4—12	3—4
Х05	150—140	178	15—30	2—14	3—7
7Х	280—230	218	3—10	1—8	1
Х	175—145	183	10—28	5—14	3—6
7Х3	240—185	213	4—17	2—14	2—5
9ХС	210—185	213	6—17	4—12	1,5—2,5
ШХ9	195—150	188	7—27	4—14	2—5
ШХ15	180—145	183	9—28	4—14	3—6
ХВГ	155—120	163	13—45	2—17	10
6ХГ	290—230	218	8	< 61	
15—20Х*	175—150	188	10—25	5—12	3—5

Примечание. Колебания в значениях  $M_{\text{ш}}$  определяются пределом отклонения химического состава стали по ГОСТу.

\* Данные относятся к цементованному слою.

## 11.14. Термомеханическая обработка (ТМО) стали

Этот метод обработки стали позволяет повысить ее механические свойства по сравнению с полученными при обычной закалке и отпуске. ТМО заключается в сочетании

пластической деформации стали в аустенитном состоянии с ее закалкой. Формирование структуры закаленной стали при ТМО происходит при повышенной плотности дислокаций, обусловленных наклепом. Различают два основных вида ТМО:

— *высокотемпературная* (ВТМО) (рис. 11.5, а) — сталь деформирует при температуре выше  $A_{с3}$ , при которой она имеет аустенитную структуру. Степень деформации составляет 20–30 %, после деформации следует немедленная закалка во избежание развития рекристаллизации;

— *низкотемпературная* (НТМО) (рис. 11.5, б) — сталь деформирует в температурной зоне существования переохлажденного аустенита в области его относительной устойчивости (400–600 °С); температура деформации должна быть выше точки  $M_n$ , но ниже температуры рекристаллизации. Степень деформации составляет 75–95 %. Закалку осуществляют сразу после деформации. После закалки в обоих случаях следует низкотемпературный отпуск (100–300 °С). Такая комбинированная ТМО позволяет получить очень высокую прочность.

Очень важно, что после ТМО возрастает пластичность. НТМО можно рассматривать как холодную обработку давлением, так как она проводится ниже температуры рекристаллизации. ВТМО обеспечивает большой запас пластичности и лучшую конструктивную прочность, повышает ударную вязкость при комнатных и низких температурах, понижает порог хладноломкости, чувствительность к отпускной хрупкости.

Высокие механические свойства стали после термомеханической обработки объясняются большой плотностью дислокаций в мартенсите, дроблением его кристаллов на отдельные части со взаимной дезориентировкой до 10–15°. Дислокационная структура, формирующаяся в аустените при деформации, «наследуется» после закалки мартенситом. После деформации аустенита последующая закалка приводит к образованию плотных скоплений дислокаций, сочленяющих сильно разориентированные фрагменты мартенсита.

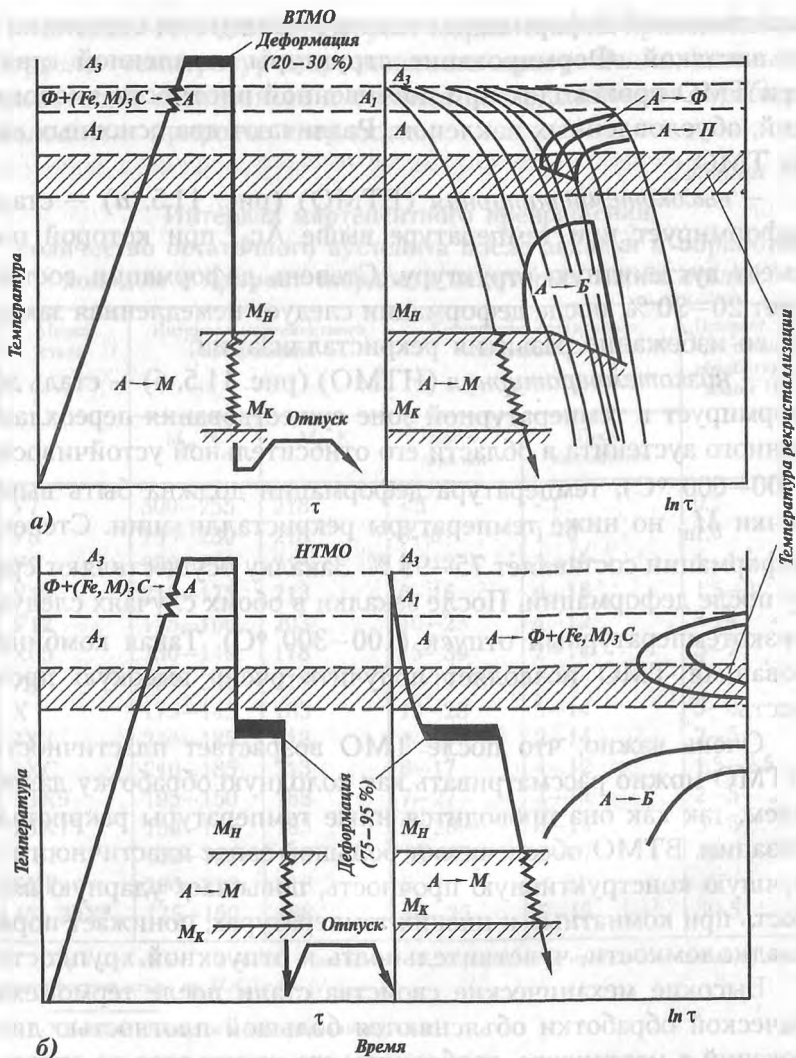


Рис. 11.5. Схема термомеханической обработки стали: а – ВТМО; б – НТМО

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы технологические параметры термической обработки сталей?

2. *Перечислите основные виды термообработки, их назначение и режимы.*
3. *Каковы дефекты отжига и нормализации и причины их возникновения?*
4. *Назовите особенности технологии отжига, закалки, нормализации.*
5. *Какие существуют разновидности закалки?*
6. *Каковы дефекты, возникающие при закалке, и в чем их причины?*
7. *С какой целью используют отпуск и его разновидности?*
8. *Объясните суть старения и его отличие от отпуска.*

## Глава 12

# ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

### 12.1. Определение химико-термической обработки

*Химико-термической обработкой (ХТО)* называется процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностных слоев деталей. Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой или газообразной), в которой осуществляется нагрев. По сравнению с поверхностной закалкой (например, высокочастотной), ХТО, уступая ей в производительности, имеет некоторые особенности и преимущества:

— независимость от внешней формы изделия. С одинаковым успехом можно обрабатывать и сложные, и простые формы изделия, получая по всей поверхности упрочненный слой одинаковой толщины, тогда как при поверхностной закалке внешняя форма изделия имеет большое значение: у многих деталей внешняя форма такова, что исключает возможность применения поверхностной закалки;

— большее, чем при поверхностной закалке, различие между свойствами сердцевины и поверхности. При ХТО разница в свойствах определяется различием в строении и составе, а при поверхностной закалке — только различием в строении;

— последствия перегрева поверхности могут быть устранены последующей термообработкой, тогда как при поверхностной закалке перегрев не может быть устранен, поскольку она является последней операцией.

Процесс ХТО включает три элементарные стадии:

— выделение диффундирующего элемента в атомарном состоянии (диссоциация):  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ ;  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$  и т. д.;

— контактирование атомов диффундирующего элемента с поверхностью стального изделия и проникновение их в решетку железа (адсорбция);

— диффузию перемещения атомов насыщающего элемента вглубь металла.

Скорость диффузии атомов насыщенного элемента в решетку неодинакова. При насыщении углеродом или азотом, образующим твердые растворы внедрения, диффузия протекает быстрее, чем при образовании твердых растворов замещения.

Границы зерен являются участками, в которых диффузионные процессы облегчены ввиду наличия в этих местах дефектов кристаллического строения.

Развитие процесса диффузии приводит к образованию в поверхностных слоях диффузионной зоны, состоящей из твердых растворов и химических соединений.

Слой материала детали у поверхности насыщения, отличающийся от исходного по химическому составу, называется *диффузионным слоем*. Зона материала, не тронутая воздействием окружающей активной среды, называется *сердцевиной*.

Под *общей толщиной диффузионного слоя* понимают кратчайшее расстояние от поверхности насыщения до сердцевины. *Эффективной толщиной диффузионного слоя* называют часть общей толщины диффузионного слоя, которая опреде-

ляется до участка, характеризующегося базовым параметром. В качестве базового параметра принимают или концентрацию диффундирующего элемента, или свойства (твердость), или структурный признак.

Толщина диффузионного слоя зависит от температуры и продолжительности насыщения (рис. 12.1).

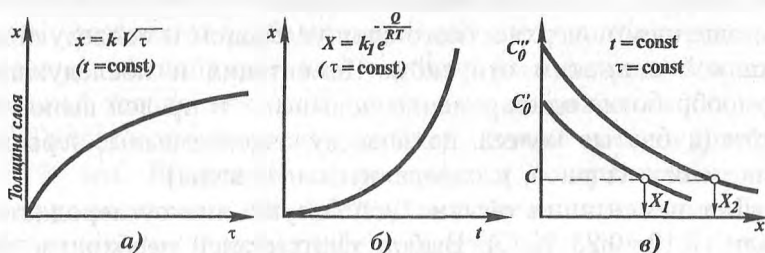


Рис. 12.1. Зависимость толщины диффузионного слоя от продолжительности насыщения (а), температуры (б) и изменение концентрации по толщине диффузионного слоя (в)

Продолжительность процесса ХТО определяется требуемой глубиной диффузионного слоя. При постоянных параметрах процесса (температура и др.) глубина диффузионного слоя подчиняется соотношению

$$x = k\sqrt{\tau},$$

где  $x$  — толщина слоя;  $\tau$  — продолжительность процесса;  $k$  — постоянная, зависящая от коэффициента диффузии.

Качественными и количественными характеристиками ХТО являются толщина диффузионного слоя, распределение концентрации диффундирующего элемента по толщине слоя, фазовый состав и свойства слоя (твердость, пластичность, сопротивление износу, коррозионная стойкость и др.).

При определении толщины диффузионного слоя, полученного при насыщении стали металлами и неметаллами, обычно указывают не полную толщину слоя, а толщину до определенной твердости — эффективную толщину диффузионного слоя.

## 12.2. Цементация

*Цементацией* называется процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом. Различают два основных вида цементации: *твердыми углеродсодержащими смесями (карбюризаторами)* и *газовую*. Целью цементации является получение твердой и износостойкой поверхности, что достигается обогащением поверхностного слоя углеродом и последующей закалкой с низким отпуском. Цементация и последующая термообработка одновременно повышают и предел выносливости (зубчатые колеса, пальцы, кулачковые валы, червяки, толкатели клапанов, распределительные валы).

Для цементации обычно используют низкоуглеродистые стали (0,12–0,23 % С). Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина изделия, не насыщенная углеродом, сохраняла высокую вязкость после закалки.

Цементация деталей осуществляется после механической обработки с припуском на шлифование 0,05–0,1 мм или после окончательной обработки. Во многих случаях цементации подвергают часть детали: тогда участки, не подлежащие упрочнению, защищают слоем меди (0,02–0,05 мм), который наносят электролитическим способом, или изолируют специальными обмазками, состоящими из огнеупорной глины, песка, асбеста или окиси алюминия.

Диффузия углерода в сталь возможна только в том случае, если углерод находится в атомарном состоянии, который получается диссоциацией газов, содержащих углерод (СО,  $\text{CH}_4$  и т. д.). Атомарный углерод адсорбируется на поверхности стали и диффундирует вглубь металла.

Как правило, цементацию проводят при температурах выше точки  $\text{Ac}_3$ , при которых устойчив аустенит. Аустенит растворяет большое количество углерода. Атомы углерода диффундируют в решетку  $\text{Fe}_\gamma$ .

При температуре цементации диффузионный слой состоит только из аустенита, а после медленного охлаждения — из продуктов его распада: феррита и цементита.

Цементованный слой имеет переменную концентрацию С по глубине. Поверхностная зона, в которой углерода больше 0,8—0,9 %, имеет структуру перлит + цементит (заэвтектоидная зона); затем следует зона с содержанием углерода 0,8 % — эвтектоидная зона; наконец — доэвтектоидная зона, содержащая углерода менее 0,7 %, плавно переходящая в сердцевину. За *эффективную толщину цементованного слоя* принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной (доэвтектоидной) зон или глубину распространения контрольной твердости свыше определенного значения.

Толщина цементованного слоя обычно составляет 0,5—1,8 % мм. Концентрация углерода в поверхностном слое должна составлять 0,8—1,0 %. Для получения максимального сопротивления контактной усталости количество углерода может быть повышено до 1,1—1,2 %. Более высокое содержание углерода ведет к образованию значительного количества вторичного цементита, повышающего хрупкость.

Легирующие элементы, присутствующие в стали, оказывают влияние на структуру цементуемого слоя, механизм его образования и скорость диффузии. Однако легирующие элементы присутствуют в цементуемых сталях в таком количестве, что практически не влияют на толщину слоя.

*Карбюризаторы.* Среда, поставляющая углерод к поверхности цементуемых деталей, называется *карбюризатором*. Применяются два основных способа цементации: в твердом и газовом карбюризаторах.

В качестве *твердого карбюризатора* используют смесь древесного угля с углекислыми солями, являющимися активизаторами (например,  $\text{BaCO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_2$ ) в количестве 10—40 % от массы угля. Промышленный карбюризатор имеет следующий состав: 20—25 %  $\text{BaCO}_3$ ; 3—5 %  $\text{CaCO}_3$ ; 0,06 % S; до 0,5 %  $\text{SiO}_2$ ; остальное — уголь.

Детали, подлежащие цементации, укладывают в сварные стальные или литые чугунные прямоугольные или цилиндрические ящики. Изделия в ящиках плотно укладывают попеременно с карбюризатором. Ящики закрываются крышками,

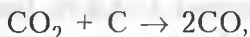
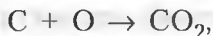


кромки которых обмазывают огнеупорной глиной, чтобы не было свободного выхода газов, образующихся при нагреве. После этого ящики помещают в печь.

Время нагрева до температуры цементации (910—930 °С) рассчитывают из соотношения 7—9 мин на каждый сантиметр размера ящика. Продолжительность выдержки для ящика размером 150 мм составляет 5,5—6,5 ч для слоя толщиной 0,7—0,9 мм и 9—11 ч — для слоя толщиной 1,2—1,5 мм.

После цементации ящики охлаждают на воздухе до 400—500 °С и затем раскрывают.

При нагреве внутри цементационного ящика образуется окись углерода в результате взаимодействия кислорода воздуха и разложения углекислого бария:

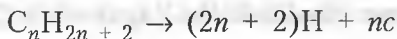
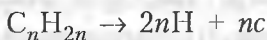


На поверхности стальных деталей окись углерода диссоциирует:



Происходит реакция обновления:  $\text{BaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{BaCO}_3$ .

В качестве *газового карбюризатора* чаще всего используют специально приготовленный газ, содержащий в определенном соотношении предельные углеводороды и некоторое количество окиси углерода. Разложение этих соединений приводит к образованию активного атомарного углерода:



Наибольшее распространение в качестве газовых карбюризаторов получили предельные углеводороды ( $\text{CH}_{2n+2}$ ) — метан, этан, пропан, бутан и др., из них метан — в виде естественного газа (92—96 %  $\text{CH}_4$ ). В цементующем газе коли-

чество тяжелых углеводородов и метана ограничивают, чтобы уменьшить выделение сажи и смолистых веществ, отложение которых на поверхности деталей затрудняет цементацию.

Кроме естественного газа применение получила цементация бензолом, который в виде капель подают непосредственно в муфель цементационной печи, где образуется газ, состоящий из метана, окиси углерода и свободного водорода. Если поверхность стали не поглощает весь выделяющийся углерод (адсорбция отстает от диссоциации), то свободный углерод, кристаллизуясь из газовой фазы, откладывается в виде пленки сажи на детали, затрудняя процесс цементации.

Практически цементацию проводят при 900—930 °С, но имеется тенденция повышать температуру цементации до 950—970 °С и выше.

Газовая цементация имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе, поэтому ее широко применяют на заводах, изготавливающих детали массовыми партиями. Этот способ позволяет полностью механизировать и автоматизировать весь процесс, начиная от загрузки и кончая термической обработкой после цементации. На газовую цементацию затрачивается меньше времени, чем на цементацию в твердом карбюризаторе, так как исключается время на прогрев и охлаждение массивных ящиков с малотеплопроводным карбюризатором.

### 12.3. Азотирование

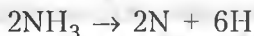
*Азотированием* называется ХТО, при которой поверхностный слой детали насыщается азотом. Азотирование чаще всего используют для повышения износостойкости и усталостной прочности деталей машин. Азотирование повышает и коррозионную стойкость в атмосферных условиях.

Азотированные слои могут иметь очень высокую твердость:  $HV = 1000\text{—}1200$ , что существенно превосходит твердость,

получаемую после цементации и закалки:  $HV = 750\text{--}950$ . Однако азотирование используют реже, чем цементацию, из-за большой длительности процесса и меньшей толщины получаемого упрочненного слоя. Размеры изделия после азотирования изменяются мало, поэтому, в отличие от цементации, азотирование проводят на готовых изделиях, прошедших окончательную термообработку (закалку с высоким отпуском) и доведенных шлифовкой до точного размера. Достоинством азотирования является также сохранение твердости при нагреве до  $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поэтому часто азотируют гильзы цилиндров и штоки клапанов. Твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до  $200\text{--}225\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Азотирование проводят в аммиаке при температуре  $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При нагреве аммиак диссоциирует с выделением атомарного азота; последний адсорбируется, а затем растворяется в стали.

При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак  $\text{NH}_3$  заданного расхода. При нагреве он диссоциирует по реакции



Атомарный азот, имеющий высокую активность, поглощается поверхностью и диффундирует вглубь детали.

*Технология обработки азотируемых деталей.* Процесс азотирования предусматривает несколько операций:

1. После механической обработки проводят предварительную термообработку — закалку и высокий отпуск (улучшение). Структура — сорбит; повышаются прочность и вязкость сердцевины изделия.

2. Механическая чистовая обработка, включая шлифование, которая придает окончательные размеры детали.

3. Защита участков, не подлежащих азотированию, нанесением тонкого слоя ( $0,01\text{--}0,015\text{ мм}$ ) олова (электролитическим методом) или жидкого стекла. Олово при температуре азотирования расплавляется на поверхности стали в виде тонкой непроницаемой для азота пленки.

4. Азотирование. Процесс происходит в печах, через рабочее пространство которых пропускается аммиак.

В зависимости от условий работы деталей различают *две разновидности азотирования*: для получения высокой твердости поверхности и износостойкости (твердостное азотирование) и для улучшения коррозионной стойкости (антикоррозионное азотирование).

В первом случае процесс продолжается от 24 до 90 ч (скорость азотирования составляет около 0,01 мм/ч). Содержание азота в поверхностном слое — до 10–12 %, толщина слоя — 0,3–0,6 мм, твердость  $HV = 1000–1200$ .

Для сокращения длительности процесса прибегают к двухступенчатому азотированию: сначала температуру поддерживают на уровне 500–520 °С, а заканчивают процесс при 550–600 °С. Охлаждение после азотирования проводят вместе с печью в потоке аммиака.

Азотированию подвергают цилиндры моторов и насосов, шестерни, пресс-формы для литья под давлением, штампы, пуансоны и т. д.

Во втором случае (если азотирование проводится только с целью увеличения коррозионной стойкости) длительность процесса существенно снижается.

5. Окончательное шлифование и доводка. Азотирование вызывает небольшое увеличение размеров деталей, в связи с чем после азотирования их окончательно шлифуют (например, шлифуют повторно шейки коленчатых валов) со снятием слоя в 0,02–0,03 мм.

В настоящее время для активизации процессов в газовой среде и адсорбции на насыщаемой поверхности используют ионизационное азотирование (азотирование в тлеющем разряде). Процесс происходит в замкнутом контейнере, заполненном азотом или аммиаком, при давлении 5–10 мм ртутного столба. Азотируемая деталь, служащая катодом, непрерывно бомбардируется ионами азота и при этом разогревается до температуры азотирования 500–520 °С. Анодом может служить контейнер. Рабочее напряжение между анодом и катодом поддерживается в пределах 600–800 В. Азотиرو-

ние в тлеющем разряде приводит к сокращению времени процесса и получению менее хрупкого слоя. Азотированные детали имеют серый цвет.

*Азотирование в жидкой среде.* Процесс проводят при 570 °С в течение 0,5—3,02 мин в расплавленных цианистых солях (85 % соли, содержащей 40 % KCNO и 60 % NaCN + + 15 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> или 55 % карбамида [(NH<sub>2</sub>)CO] + 45 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), через которые пропускают сухой воздух. Соли расплавляются в тигле из титана. Вследствие низкой температуры в сталь диффундирует в основном азот, образующийся при разложении цианистых солей. В результате обработки на поверхности стали возникает тонкий (7—15 мкм) карбонитридный слой, обладающий высоким сопротивлением износу и не склонный к хрупкому разрушению. Общая толщина слоя 0,15—0,5 мм. Как и после газового азотирования, твердость слоя на углеродистых сталях HV = 300—350, а на легированных HV = 600—1000. Жидкое азотирование повышает предел выносливости сталей. Достоинствами процесса являются незначительное изменение размеров и отсутствие коробления деталей, недостатком — токсичность и высокая стоимость цианистых солей. Азотирование применяют для обработки деталей автомобиля (коленчатых валов, шестерен и т. д.), штампов, пресс-форм и т. д.

## 12.4. Нитроцементация (цианирование)

*Нитроцементацией* называют совместное диффузионное насыщение поверхностного слоя стальных изделий углеродом и азотом. Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода.

Нитроцементованные поверхности обладают достоинствами как цементованных, так и азотированных слоев, высокой твердостью и коррозионной стойкостью в атмосферных условиях. Одновременно обеспечивается повышенный предел выносливости деталей, работающих при переменных нагрузках.

В зависимости от среды, в которой осуществляют процесс, различают жидкостную и газовую нитроцементацию.

*Жидкостная нитроцементация (цианирование).* Проводят в расплавленных цианистых солях. Наиболее широкое использование находят цианистые ванны, содержащие смеси солей: цианистый натрий  $\text{NaCN}$  — 20–25 %; хлористый натрий  $\text{NaCl}$  — 20–50 %; углекислый натрий  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  — 25–50 %.

При высоких температурах в ванне протекают реакции, в результате которых образуются атомарный углерод и атомарный азот, которые диффундируют в поверхностный слой стали. Цианированный слой обладает высокой твердостью ( $\text{HRC} = 58\text{--}62$ ) и хорошо сопротивляется износу. Относительно тонкий слой (0,2–0,5 мм) достаточен для повышения усталостной прочности и износостойкости деталей небольших размеров и работающих при невысоких удельных нагрузках.

*Газовая нитроцементация.* Проводят в смеси науглероживающих газов и аммиака. В качестве цементующих используют те же газы, что и для газовой цементации; аммиак добавляют в количестве 20–30 % при низкотемпературной нитроцементации и 3–7 % — при высокотемпературной.

Процесс осуществляется в печах, в рабочее пространство которых раздельно подаются цементующий газ и аммиак.

Нитроцементацию применяют для получения как тонких, так и толстых (до 1,5–2,0 мм) упрочненных слоев.

Газовая нитроцементация в условиях массового и крупносерийного производства, так же как и газовая цементация, может быть полностью механизирована и автоматизирована и поэтому является более совершенным процессом, чем цианирование в расплавленных цианистых солях.

При температурах процесса 530–560 °С содержание углерода в слое повышается незначительно; основное упрочнение связано с поглощением азота. Наиболее широко низкотемпературную нитроцементацию применяют для повышения стойкости режущих инструментов, изготовленных из красностойких сталей — быстрорежущих, высокохромистых.

Низкотемпературной газовой нитроцементации подвергают также трущиеся детали машин, работающие при небольших удельных нагрузках: штоки клапанов автомобильных двигателей, втулки, зубчатые колеса.

## 12.5. Борирование

*Борированием* называется ХТО, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагревании в соответствующей среде. Борирование чаще выполняют при электролизе расплавленной буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). Температура насыщения 930–950 °С при выдержке 2–6 ч. Процесс можно вести и без электролиза в ваннах с хлористыми солями ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$ ), в которые добавляют 20 % ферробора или 10 % карбида бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ). Хорошие результаты получаются при газовом борировании. В этом случае насыщение ведут при 850–900 °С в среде диборана ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) или треххлористого бора ( $\text{BCl}_3$ ) в смеси с водородом.

Диффузионный слой состоит из боридов  $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Толщина слоя — 0,1–0,2 мм. Борированный слой обладает высокими твердостью ( $\text{HV} = 1800\text{--}2000$ ), стойкостью, окалиностойкостью (до 800 °С) и теплостойкостью.

Борирование применяют для повышения износостойкости втулок грязевых нефтяных насосов; дисков пяты турбобура; вытяжных, гибочных и формовочных штампов; деталей пресс-форм и машин для литья под давлением. Износостойкость деталей после борирования возрастает в 2–10 раз.

## 12.6. Диффузионная металлизация (насыщение металлами)

*Диффузионная металлизация* — это процесс диффузионного насыщения поверхности слоев стали различными металлами. Изделие, поверхность которого обогащена эти-

ми элементами, приобретает ценные свойства, к числу которых относятся высокая жаростойкость, коррозионная стойкость, повышенная износостойкость и твердость. Как и при других видах ХТО, диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газообразных средах.

При *твердой диффузионной металлизации* металлизатором является ферросплав (феррохром, ферросилиций, ферроалюминий — сплавы железа с хромом, кремнием, алюминием и т. д. с высоким содержанием этих элементов) с добавлением хлористого аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). В результате реакции металлизатора с  $\text{HCl}$  и  $\text{Cl}_2$  образуются летучие соединения хлора с металлом ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CrCl}_2$ ,  $\text{SiCl}_4$ ), которые при контакте с металлической поверхностью диссоциируют с образованием свободных атомов.

*Жидкую диффузионную металлизацию* проводят погружением детали в расплавленный металл (например, алюминий).

*Газовую диффузионную металлизацию* проводят в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.

В зависимости от метода переноса диффузионного элемента на насыщенную поверхность различают следующие основные способы диффузионной металлизации:

- погружением в расплавленный металл, если диффундирующий элемент имеет низкую температуру плавления ( $\text{Al}$ ,  $\text{Zn}$ );
- из расплавленных солей, содержащих диффундирующий элемент (с электролизом и без него);
- из сублимированной фазы путем испарения диффундирующего элемента;
- из газовой фазы (контактным и неконтактным путем), состоящей из галогенных соединений диффундирующего элемента.

В последние годы насыщение металлами (например, хромом) проводят путем испарения диффундирующего элемента в вакууме. Ниже дана характеристика наиболее часто применяемых процессов диффузионной металлизации.



**Алитирование** — это насыщение поверхности стали алюминием. В результате алитирования сталь приобретает высокую окалинотойкость (до 850–900 °С) и коррозионную стойкость в атмосфере.

При алитировании в порошкообразных смесях чистые детали вместе со смесью упаковывают в металлический контейнер. В рабочую смесь входят: порошковый алюминий (25–50 %) или ферралюминий (50–75 %), окись алюминия (25–50 %) и хлористый алюминий (1,0 %). Процесс осуществляется при 900–1000 °С в течение 3–12 ч.

Реже применяют алитирование в ваннах с расплавленным алюминием. Алитируемые детали погружают в расплавленный алюминий (92–94 % Al; 6–8 % Fe). Железо добавляют для того, чтобы предотвратить растворение обрабатываемых деталей в алюминии. Процесс проводят при 700–800 °С в течение 45–90 мин.

Алитирование в расплавленном алюминии отличается от алитирования в порошкообразных смесях простотой метода, быстротой и более низкими температурами.

Основной недостаток процесса — налипание алюминия на поверхность деталей.

**Хромирование** — поверхностное насыщение хромом. Используют для повышения коррозионной стойкости, кислотостойкости, окалинотойкости (до 850 °С) и т. д.

Хромирование средне- и высокоуглеродистых сталей повышает их твердость и износостойкость. Его чаще всего проводят в порошкообразных смесях (50 % металлического хрома или феррохрома; 49 % окиси алюминия и 1 % хлористого алюминия) при температуре 1000–1050 °С.

Диффузионный слой, получаемый при хромировании углеродистых сталей, состоит из карбидов хрома  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  и  $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ . Карбидный слой имеет высокую твердость:  $\text{HV} = 1200\text{--}1300$ . Толщина хромированного слоя достигает 0,15–0,20 мм при 6–15 ч.

Иногда применяют хромирование в вакууме. Изделия засыпают кусочками (диаметром 1–3 мм) хрома в стальном или

керамическом тигле и помещают в вакуумную печь (разрешение 1,3—0,13 Па). При высоких температурах (960—1000 °C) хром испаряется и диффундирует в сталь.

Хромирование проводят для пароводяной арматуры, клапанов, вентиляей, а также для деталей, работающих в агрессивных средах.

*Силицирование* — это процесс насыщения поверхности стали кремнием. В результате силицирования сталь приобретает высокую коррозионную стойкость в морской воде и различных кислотах, повышенную износостойкость. Кроме того, силицирование резко повышает окалиностойкость молибдена и некоторых других металлов и сплавов.

Силицированный слой представляет собой твердый раствор Si в  $\alpha$ -железе и, несмотря на низкую твердость ( $HV = 200\text{--}300$ ) и значительную пористость, после пропитки маслом при 170—200 °C имеет повышенную износостойкость.

Силицирование можно проводить в порошкообразных смесях, состоящих из 60 % ферросилиция; 39 % окиси алюминия и 1 % хлористого аммония; но наиболее часто применяют газовое силицирование. В печи с вращающимися ретортами засыпают детали и куски ферросилиция или карбида кремния. Через реторты пропускают хлор, который взаимодействует с кремнием и образует  $SiCl_4$ .

В результате последующих химических реакций  $SiCl_4$  способствует образованию атомарного кремния, который адсорбируется на поверхности изделия и диффундирует вглубь металла.

При газовом силицировании при 1000 °C в течение 2—4 ч образуется слой толщиной 0,5—1,0 мм.

Силицированию подвергают детали, применяемые в оборудовании химической, бумажной и нефтяной промышленности.

В последние годы разработаны и получают промышленное внедрение новые процессы поверхностного насыщения металлов — титанирование (насыщение титаном) и цинкование (насыщение цинком).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите преимущества и недостатки химико-термической обработки сталей.
2. Какие стадии включает в себя технологический процесс химико-термической обработки?
3. В чем заключаются особенности цементации твердыми и газовыми карбюризаторами?
4. В каких случаях применяют цементацию? азотирование? нитроцементацию? борирование?
5. Какие свойства поверхности можно получить за счет диффузной металлизации?

---

## Раздел IV

# СТАЛИ И ЧУГУНЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

## Глава 13

### КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Сталь — основной металлический материал, широко применяемый для изготовления машин, приборов и инструментов. Ее широкое использование обусловлено сочетанием целого комплекса механических, физико-химических и технологических свойств. Кроме того, сталь сравнительно недорога, и ее можно производить в большом количестве.

Развитие техники ведет к повышению рабочих параметров машин и приборов, предъявляет все возрастающие требования к свойствам и качеству стали. В связи с этим разрабатываются новые марки стали, совершенствуются процессы ее получения.

#### 13.1. Общая классификация сталей

Стали классифицируют по химическому составу, назначению, качеству, степени раскисления и структуре.

По *химическому составу* стали классифицируют на углеродистые и легированные. По концентрации углерода и те и другие подразделяют на низкоуглеродистые (0,3 % C), среднеуглеродистые (0,3—0,7 % C) и высокоуглеродистые (выше 0,7 % C). Легированные стали в зависимости от количества введенных элементов подразделяют на низко-, средне- и высоколегированные (соответственно 5 %; 5—10 %; более 10 % количества легирующих элементов).

По **назначению** стали подразделяют на конструкционные, инструментальные и стали специального назначения с особыми свойствами.

По **качеству** стали классифицируют на стали *обыкновенного качества, качественные, высококачественные* и *особо высококачественные*. Под качеством стали понимают совокупность свойств, определяемых металлургическим процессом ее производства. Однородность химического состава, строения и свойств стали, а также ее технологичность во многом зависят от содержания газов ( $O_2$ , N, H) и вредных примесей серы и фосфора. Газы являются скрытыми примесями, которые трудно определить количественно, поэтому нормы содержания вредных примесей служат основным показателем для разделения сталей по качеству. Стали обыкновенного качества выплавляют только углеродистыми (до 0,5 % C), качественные и высококачественные — углеродистыми и легированными, особо высококачественные — легированными.

По **способу раскисления** и характеру затвердевания сталь классифицируют на *спокойную, полуспокойную* и *кипящую*.

**Раскисление** — процесс удаления из жидкого металла кислорода.

Легированные стали производят спокойными, углеродистые — спокойными, полуспокойными и кипящими.

По **структуре** стали классифицируют в отожженном и нормализованном состояниях. В зависимости от структуры в *отожженном* (равновесном) состоянии стали разделяют на шесть классов:

- 1) доэвтектоидные, имеющие в структуре избыточный феррит;
- 2) эвтектоидные, структура которых состоит из перлита;
- 3) заэвтектоидные, имеющие в структуре вторичные, выделяющиеся из аустенита, карбиды;
- 4) ледебуритные, содержащие в структуре первичные (эвтектические) карбиды;
- 5) аустенитные;
- 6) ферритные.

По структуре после *нормализации* стали подразделяют на следующие основные классы: перлитный, мартенситный, аустенитный, ферритный.

Стали *перлитного класса* имеют невысокую устойчивость переохлажденного аустенита. При охлаждении на воздухе они приобретают структуру перлита, сорбита или троостита, в которой могут присутствовать также избыточные феррит или карбиды. К сталям перлитного класса относят углеродистые и низколегированные стали. Это большая группа дешевых, широко применяемых сталей.

Стали *мартенситного класса* отличаются высокой устойчивостью переохлажденного аустенита. Для таких сталей скорость охлаждения на воздухе оказывается больше критической скорости закалки; при охлаждении на воздухе они закаливаются на мартенсит. К этому классу относят средне- и высоколегированные стали.

Стали *аустенитного класса* из-за повышенного количества никеля или марганца (обычно в сочетании с хромом) имеют интервал мартенситного превращения ниже  $0^{\circ}\text{C}$  и сохраняют аустенит при комнатной температуре. Распад аустенита в перлитной и промежуточной области отсутствует.

В сталях с высоким содержанием элементов, сужающих  $\gamma$ -область, при определенной их концентрации исчезает  $\gamma$ -превращение. Подобные стали относят к *ферритному классу*.

Рассмотренная классификация относится только к нормализованным сталям. Если условия охлаждения изменить, то структура стали тоже может измениться. Если сталь перлитного класса охладить с большей скоростью, то можно получить мартенсит; при охлаждении стали мартенситного класса с меньшей скоростью — перлит, после обработки стали аустенитного класса холодом — мартенсит.

Легированные стали доэвтектоидного, заэвтектоидного и перлитного классов наиболее широко применяют для изготовления деталей конструкций и инструмента. Стали мартенситного класса применяют ограниченно. Стали аустенитного и ферритного классов имеют особые физические и химиче-

ские свойства (коррозионностойкие, жаропрочные и др.). Стали ледебуритного класса применяют как инструментальные. Наиболее типичной сталью данного класса является быстро-режущая сталь.

### **13.2. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей**

Сталь промышленного производства — сложный по составу железоуглеродистый сплав. Кроме железа и углерода (основных компонентов), а также легирующих элементов (для легированных сталей), сталь содержит некоторое количество постоянных и случайных примесей.

Углерод оказывает основное влияние на свойства стали. После отжига ее структура представляет собой смесь феррита и цементита, причем количество последнего увеличивается пропорционально содержанию углерода.

Феррит малопрочен и пластичен. Цементит тверд и хрупок. В связи с этим по мере повышения концентрации углерода повышаются прочность и твердость, снижаются пластичность и вязкость стали.

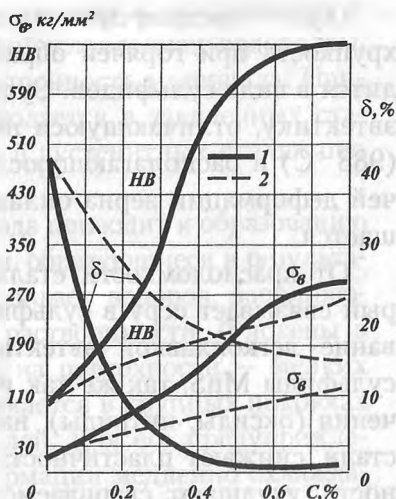
Влияние углерода еще более значительно при неравновесной структуре стали. После закалки прочность и твердость резко возрастают с увеличением содержания углерода. При низком отпуске эти свойства полностью определяются концентрацией углерода в твердом растворе (рис. 13.1).

Углерод изменяет технологические свойства стали: обрабатываемость резанием, давлением; свариваемость.

Увеличение содержания углерода вследствие ухудшения теплопроводности стали ведет к снижению ее обрабатываемости резанием. При отделении стружки от более прочной стали увеличивается количество выделяемой теплоты, что вызывает отпуск инструмента и снижение его стойкости.

Между тем вязкие низкоуглеродистые стали также плохо обрабатываются из-за образования некачественной поверхно-

Рис. 13.1. Диаграмма изменения механических свойств углеродистой стали в зависимости от содержания в ней углерода: 1 – в закаленном состоянии; 2 – в отожженном состоянии



сти и трудноудаляемой стружки. Лучшей обрабатываемостью резанием обладают стали, содержащие 0,3–0,4 % C.

С увеличением содержания углерода снижаются технологическая пластичность, способность деформироваться в горячем и холодном состояниях. Для сложной холодной штамповки содержание углерода ограничивается до 0,1 %.

Углерод также затрудняет свариваемость стали. Хорошей свариваемостью отличаются низкоуглеродистые стали. Сварка средне- и особенно высокоуглеродистых сталей требует применения подогрева, замедленного охлаждения и других технологических операций, предупреждающих образование трещин.

**Постоянные примеси** в стали: марганец, кремний, сера, фосфор, а также газы: кислород, азот, водород.

**Марганец** — полезная примесь; вводят в сталь для раскисления и остается в ней в количестве 0,3–0,8 %. Марганец уменьшает вредное влияние кислорода и серы.

**Кремний** — полезная примесь; вводят в качестве активного раскислителя и остается в стали в количестве 0,4 %.



*Сера* — вредная примесь, вызывающая красноломкость — хрупкость при горячей обработке давлением; в стали находится в виде сульфидов. Сульфиды  $\text{FeS}$  образуют с железом эвтектику, отличающуюся низкой температурой плавления ( $988\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и располагающуюся по границам зерен. При горячей деформации зерна оплавляются, и сталь хрупко разрушается.

От красноломкости сталь предохраняет марганец, который связывает серу в сульфиды  $\text{MnS}$ , исключая образование легкоплавкой эвтектики. Устраняя красноломкость, сульфиды  $\text{MnS}$ , так же как и другие неметаллические включения (оксиды, нитриды), нарушают однородность строения стали, снижают пластичность и вязкость, усталостную прочность, ухудшают свариваемость и коррозионную стойкость. Поэтому содержание серы в стали строго лимитируют. Положительное влияние серы в стали проявляется лишь в улучшении обрабатываемости резанием.

*Фосфор* — вредная примесь; растворяется в феррите, упрочняет его, но снижает вязкость при пониженных температурах, то есть вызывает хладноломкость. Фосфор повышает порог хладноломкости. Хрупкость стали, вызванная фосфором, тем выше, чем больше в ней углерода.

*Кислород, азот, водород* — вредные скрытые примеси. Их влияние наиболее сильно проявляется в снижении пластичности и повышении склонности стали к хрупкому разрушению. Кислородные включения вызывают красно- и хладноломкость, снижают прочность. Повышенное количество азота вызывает деформационное старение. Атомы азота в холоднодеформированной стали скапливаются на дислокациях. Сталь упрочняется, становится малопластичной. Старение медленно развивается при комнатной температуре и ускоряется при нагреве до  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Особенно оно нежелательно для листовой стали ( $\text{C} \leq 0,1\text{ } \%$ ), предназначенной для холодной штамповки. Последствия старения — разрывы при штамповке.

Водород находится в твердом растворе и скапливается в порах и дислокациях. Хрупкость, обусловленная водородом, проявляется тем резче, чем выше прочность материала. Наиболее сильное охрупчивание наблюдается в закаленных сталях с мартенситной структурой, а в аустенитных сталях оно отсутствует.

Повышенное содержание водорода приводит к образованию флокенов. Это внутренние надрывы, образующиеся в результате высоких давлений, которые развивает водород, заполняющий поры вследствие понижения растворимости. Флокены в изломе имеют вид белых пятен, а на поверхности — мелких трещин. Этот дефект обычно встречается в крупных поковках хромистых и хромоникелевых сталей. Для его предупреждения заготовки после горячей деформации медленно охлаждаются или длительно выдерживают при 250 °С. При этих условиях водород, имеющий большую скорость диффузии, не скапливается в порах, а удаляется из стали.

**Случайные примеси** — элементы, попадающие в сталь из вторичного сырья или руд. Из скрапа в сталь попадают хром, никель, олово и др. Сталь, выплавленная из уральских руд, содержит медь, из керченских — мышьяк. Случайные примеси оказывают незначительное влияние на свойства стали.

### 13.3. Маркировка сталей

Углеродистые стали, за исключением сталей обыкновенного качества, маркируются по содержанию углерода.

**Углеродистые качественные конструкционные стали** маркируют двузначным числом, указывающим среднее содержание углерода в стали в *сотых* долях процента. Например, сталь 15 содержит в среднем 0,15 % С; сталь 40 — в среднем 0,4 % С и т. д. Если сталь кипящая, добавляют индекс «кп», полуспокойная — индекс «пс» (например: 08кп, 20пс). Для спокойных сталей индекс не указывают.

**Углеродистые качественные инструментальные стали** маркируют буквой У и следующей за ней цифрой, указывающей среднее содержание углерода в *десятых* долях процента. Так, У8 означает, что сталь углеродистая инструментальная качественная, содержит в среднем 0,8 % С. Если сталь высококачественная, то справа от цифры ставится буква А, например: У8А.

В легированных сталях содержатся специально вводимые в различных количествах легирующие элементы. Марка легированной стали состоит из сочетания букв и цифр, обозначающих ее химический состав. Принято обозначать: хром — Х, никель — Н, марганец — Г, кремний — С, молибден — В, титан — Т, ванадий — Ф, алюминий — Ю, медь — Д, ниобий — Б, бор — Р, кобальт — К, редкоземельные металлы — Ч, фосфор — П, азот — А (если буква А находится в середине марки) (табл. 13.1).

Цифра, стоящая после буквы, указывает примерное содержание легирующего элемента в процентах. Если цифра отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1 %. Нестандартные стали обозначают самым различным образом: буквой И — исследовательские, П — пробные. Высоколегированные стали сложного состава иногда обозначают упрощенно: по порядковому номеру разработки и освоения стали на металлургическом заводе. Перед номером ставят индексы ЭИ (Э — завод «Электросталь», И — исследовательская) или ЭП (П — пробная). Например: стали ЭИ481 или 37Х12Н8Г8МФБ; стали ЭП388 или 40Х15Н7ГФ2МС.

В *конструкционных легированных сталях* две цифры в начале марки показывают содержание углерода в *сотых* долях процента. Например, сталь 20ХН3А в среднем содержит 0,2 % С; 1 % Cr; 3 % Ni. Буква А в конце марки означает, что сталь высококачественная. Особо высококачественные стали имеют в конце марки букву Ш (например, 30ХГС-Ш).

В *инструментальных сталях* одна цифра в начале марки указывает на содержание углерода в *десятых* долях процента. При содержании в них 1 % С или более начальную цифру опускают. Например, в стали ХВ4 содержится более 1 % С; 1 % Cr и 4 % W.

Таблица 13.1

**Условные обозначения основных элементов  
в марках металлов и сплавов**

Элемент	Символ	Принятое обозначение элементов в марках металлов и сплавов		Элемент	Символ	Принятое обозначение элементов в марках металлов и сплавов	
		чер-ных	цветных			чер-ных	цветных
Азот	N	A	—	Неодим	Nd	—	Нм
Алюминий	Al	Ю	A	Никель	Ni	И	Н
Барий	Ba	—	Бр	Ниобий	Nb	Б	Нп
Бериллий	Be	Л	—	Олово	Sn	—	О
Бор	B	Р	—	Осмий	Os	—	Ос
Ванадий	V	Ф	Вам	Палладий	Pd	—	Пд
Висмут	Bi	Ви	Ви	Платина	Pt	—	Рл
Вольфрам	W	—	—	Празеодим	Pr	—	Пр
Гадолиний	Gd	Гм	Гм	Рений	Re	—	Ре
Галлий	Ga	Гл	Гл	Родий	Rh	—	Рд
Гафний	Hf	—	Гф	Ртуть	Hg	—	Р
Германий	Ge	—	Г	Рутений	Ru	—	Ру
Гольмий	Ho	—	ГОМ	Самарий	Sm	—	Сам
Диспрозий	Dy	—	ДИМ	Свинец	Pb	—	С
Европий	Eu	—	Ев	Селен	Se	Е	СТ
Железо	Fe	—	Ж	Серебро	Ag	—	Ср
Золото	Au	—	Зл	Скандий	Sc	—	Скм
Индий	In	—	Ин	Сурьма	Sb	—	Су
Иридий	Ir	и	И	Таллий	Tl	—	Тл
Иттербий	Yb	—	ИТМ	Тантал	Ta	—	ТТ
Иттрий	Y	—	ИМ	Теллур	Te	—	Т
Кадмий	Cd	Кд	Кд	Тербий	Tb	—	Том
Кобальт	Co	К	К	Титан	Ti	Т	ТПД
Кремний	Si	С	Кр (К)	Тулий	Tu	—	ТУМ
Лантан	La	—	Ла	Углерод	C	У	—
Литий	Li	—	Лэ	Фосфор	P	П	Ф
Лютеций	Lu	—	Люм	Хром	Cr	Х	Х (Хр)
Магний	Mg	И	Мг	Церий	Ce	—	Се
Марганец	Mn	Г	Мц (Мр)	Цинк	Zn	—	Ц
Медь	Cu	Д	М	Цирконий	Zr	Ц	ЦЭВ
Молибден	Mo	М	—	Эрбий	Er	—	Эрм

Допускается не указывать в марках сложнолегированных сталей ряд цифр. Например, для удобочитаемости сталь 38Х2МЮА обозначают как 38ХМЮА.

Некоторые группы сталей содержат дополнительные обозначения: марки шарикоподшипниковых сталей начинаются с буквы Ш, быстрорежущих — с буквы Р, электротехнических — с буквы Э, магнитотвердых — с буквы Е, автоматных — с буквы А.

### **13.4. Конструкционные стали**

Конструкционные стали, применяемые для изготовления ответственных конструкций, деталей машин и приборов, должны удовлетворять следующим требованиям:

- обладать высокой конструкционной прочностью, то есть определенным комплексом механических свойств, обеспечивающих длительную и надежную работу материала в условиях службы;

- иметь хорошие технологические свойства — хорошую обрабатываемость давлением, резанием, свариваемость.

Для легированных сталей важно также, чтобы они содержали возможно меньше дорогих и дефицитных легирующих элементов.

Требование обеспечения конструктивной прочности является определяющим.

### **13.5. Углеродистые конструкционные стали**

Около 80 % объема производства стали составляют углеродистые. Большой объем производства углеродистых сталей, помимо экономических соображений, определяется тем, что они сочетают в себе удовлетворительные механические свойства с высокой технологичностью: при одинаковом содержании углерода их обрабатываемость резанием и давлением значительно превосходит легированные стали.

Однако углеродистым сталям свойственны существенные недостатки: высокая критическая скорость закалки и небольшая прокаливаемость. Их закаливают в воде, что вызывает значительные деформации и коробления.

Углеродистые конструкционные стали выпускают обыкновенного качества и качественные.

**Углеродистые стали обыкновенного качества.** В этих сталях допускаются наиболее высокое содержание вредных примесей, а также газонасыщенность и загрязненность неметаллическими включениями.

Стали обыкновенного качества выпускают в виде проката (листов, прутков, балок и т. д.), а в зависимости от назначения и гарантируемых свойств поставляют трех групп: А, Б, В.

Стали маркируют сочетанием букв «Ст» и цифрой (от 0 до 6), обозначающей номер марки. Стали группы Б и В имеют перед маркой буквы Б и В, указывающие на их принадлежность к этим группам. Группа А в обозначении марки стали не указывается. Степень раскисления обозначают добавлением индексов: в спокойных сталях — «сп», полуспокойных — «пс», кипящих — «кп».

**Стали группы А** поставляют с гарантированными механическими свойствами. Химический состав не регламентируется.

С увеличением номера марки повышается предел прочности и снижается пластичность стали.

**Стали группы Б** поставляют с гарантированным химическим составом. Механические свойства не гарантируются. Стали этой группы предназначаются для изделий, изготовляемых с применением горячей обработки (ковки, сварки и в некоторых случаях — термической обработки), при которой исходная структура и механические свойства не сохраняются. Для таких сталей важны сведения о химическом составе, необходимые для определения режимов горячей обработки.

**Стали группы В** поставляют с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Их широко применяют для производства сварных конструкций.

Марки сталей этой группы — от ВСт1 до ВСт5.

Углеродистые стали обыкновенного качества (всех трех групп) предназначаются для изготовления различных металлоконструкций, а также слабонагруженных деталей машин и приборов.

Низкоуглеродистые стали применяют для производства строительных конструкций (арматуры, фермы), изготавливаемых сваркой и холодной деформацией, а также крепежных деталей.

Среднеуглеродистые стали, обладающие большой прочностью, предназначаются для изготовления рельсов, железнодорожных колес, а также валов, шкивов и шестерен и других деталей грузоподъемных и сельскохозяйственных машин.

**Углеродистые качественные стали.** Эти стали характеризуются более низким, чем у сталей обыкновенного качества, содержанием вредных примесей и неметаллических включений. Их поставляют в виде проката, поковок и других полуфабрикатов с гарантированным химическим составом и механическими свойствами. Маркируют двузначными цифрами 05, 08, 10, 15, 20... 85, обозначающими среднее содержание углерода в **сотых** долях процента. Например, сталь 10 содержит в среднем 0,1 % С; сталь 45 — 0,45 % С и т. д.

**Спокойные** стали маркируют без индекса, полуспокойные и кипящие — с индексами, соответственно «пс» и «кп».

**Кипящие** стали производят марок: 05кп, 08кп, 10кп, 15кп, 20кп.

**Полуспокойные стали** — 08пс, 10пс, 15пс, 20пс.

Изделия из стали изготавливают без термической обработки, термически обработанными и нагартованными.

Качественные стали находят многообразное применение в машино- и приборостроении, так как в зависимости от содержания углерода и термообработки они обладают широким диапазоном механических и технологических свойств. В табл. 13.2 приведены примеры назначения этих сталей.

Таблица 13.2

**Примерное назначение углеродистых  
качественных конструкционных сталей**

Марка стали	Назначение
08кп, 10	Детали, изготавливаемые холодной штамповкой и холодной высадкой, трубки, прокладки, крепеж, колпачки. Цементируемые и цианируемые детали, не требующие высокой прочности сердцевины (штулки, валики, упоры, копиры, зубчатые колеса, фрикционные диски)
15, 20	Малонагруженные детали (валики, пальцы, упоры, копиры, оси, шестерни). Тонкие детали, работающие на истирание, рычаги, крюки, траверсы, вкладыши, болты, стяжки и др.
30, 35	Детали, испытывающие небольшие напряжения (оси, шпиндели, звездочки, тяги, траверсы, рычаги, диски, валы)
40, 45	Детали, от которых требуется повышенная прочность (коленчатые валы, шатуны, зубчатые венцы, распределительные валы, маховики, зубчатые колеса, шпильки, храповики, плунжеры, шпиндели, фрикционные диски, оси, муфты, зубчатые рейки, прокатные валки и др.)
50, 55	Зубчатые колеса, прокатные валки, штоки, бабдажи, валы, эксцентрики, малонагруженные пружины, рессоры и др. Применяют после закалки с высоким отпуском и в нормализованном состоянии
60	Детали с высокими прочностными и упругими свойствами (прокатные валки, эксцентрики, шпиндели, пружинные кольца, пружины и диски сцепления, пружины амортизаторов). Применяют после закалки или после нормализации (крупные детали)

**Автоматные стали.** Они отличаются хорошей обрабатываемостью резанием благодаря повышенному содержанию серы и фосфора и предназначены для изготовления деталей



массового производства на станках-автоматах. Маркируют буквой А (автоматная) и цифрами, показывающими среднее содержание углерода в *сотых* долях процента. Чтобы не проявилась красноломкость, в автоматных сталях увеличено количество марганца.

Сера образует большое количество вытянутых в направлении проката сульфидов марганца, нарушающих сплошность металла и способствующих образованию ломкой «сыпучей» стружки. Фосфор повышает хрупкость феррита, облегчая отделение и измельчение стружки. Он вместе с сульфидами устраняет налипание металла на инструмент и обеспечивает получение гладкой поверхности, что важно для деталей с мелкой резьбой (гаек, винтов) (стали марок А12, А20, А30, А40Г).

Образование мелкой стружки уменьшает нагрев инструмента, способствует увеличению его стойкости и скорости резания. Сера и фосфор, улучшая обрабатываемость резанием, ухудшают качество стали.

Автоматные стали имеют пониженные вязкость, пластичность в поперечном направлении, усталостную прочность и коррозионную стойкость. Их используют для изготовления крепёжных и мелких слабонагруженных деталей машин и приборов.

### 13.6. Углеродистые стали для фасонного литья

Стальное фасонное литье широко используется для изготовления деталей оборудования и аппаратов нефтехимических и нефтеперерабатывающих заводов, а также деталей газо- и нефтепромыслового оборудования и инструмента.

Стальные отливки являются основными полуфабрикатами для изготовления большой группы таких деталей нефтезаводского оборудования, как корпуса паровых и

центробежных насосов весьма сложной конфигурации. Из стали изготавливают печное оборудование термических крекингов, фитинги, задвижки, предохранительные редукционные клапаны, дроселирующую и запорную арматуру и др.

Наибольшее количество фасонного литья получают в песчаных формах. Однако ряд деталей отливают в металлические формы и получают методами точного литья.

По качественным показателям отливки из углеродистой стали делят на три группы: I — отливки нормального качества; II — отливки повышенного качества; III — отливки особого качества.

Разница между этими группами заключается в способах выплавки стали и содержании вредных примесей.

Для исправления литой структуры, устранения ликвационной неоднородности и уменьшения остаточных напряжений стальные отливки подвергают термообработке (отжигу, нормализации, закалке, отпуску).

Закалку с отпуском применяют при изготовлении ответственных деталей, это дает наилучшее сочетание механических свойств. Отливки из углеродистой стали несложной формы обычно закалывают в воде. Для предотвращения образования трещин отливки необходимо сразу после закалки подвергать отпуску при 600—650 °С.

Стальное фасонное литье из углеродистой стали широко используют также для изготовления деталей газо- и нефтепромышленного оборудования.

Из стали марок 15Л и 25Л изготавливают кулачковые и зубчатые муфты буровых установок.

Из стали марок 45Л и 55Л изготавливают звездочки буровых установок при больших нагрузках и скоростях передачи.

Сталь 35Л применяется для изготовления дисков статора турбины турбобура, тормозных шкивов, корпусов подшипников и ступиц лебедок, станин и клапанных коробок насосов и т. д.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как влияют примеси в сталях на их свойства?
2. Каковы принципы классификации сталей?
3. Что понимают под качеством сталей?
4. Какой элемент в наибольшей степени и как оказывает влияние на свойства сталей?
5. Назовите принципы маркировки углеродистых сталей.
6. Приведите примеры применения углеродистых сталей.

## Глава 14

# ЛЕГИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

### 14.1. Влияние легирующих элементов на свойства конструкционных сталей

Легированные стали (ЛС) обладают лучшими механическими свойствами после термообработки (закалки и отпуска). Особенно сильно повышаются предел текучести и ударная вязкость. Это объясняется тем, что легированные стали обладают меньшей критической скоростью закалки, а следовательно, лучшей прокаливаемостью. Кроме того, после термообработки они имеют более мелкое зерно и более дисперсные структуры. Замена углеродистой стали легированной из-за большей прокаливаемости последней позволяет проводить закалку деталей в менее резких охладителях (масло, воздух), что уменьшает деформацию изделий и опасность образования трещин. Поэтому ЛС применяют для изготовления не только крупных изделий, но и изделий небольшого сечения, имеющих сложную форму. Чем выше в стали концентрация легирующих элементов, тем выше ее прокаливаемость. Улучшение механических свойств обусловлено влиянием легирующих элементов на свойства феррита, дисперсность карбидной фазы, устойчивость мартенсита при отпуске, размер зерна.

К важнейшим факторам, способствующим повышению конструкционной прочности, относятся снижение при легировании критической скорости закали и увеличение прокаливаемости. Наиболее эффективно повышает прокаливаемость введение элементов (Cr + Mo), (Cr + Ni), (Cr + Ni + Mo).

Большинство легирующих элементов измельчают зерно, что способствует повышению работы развития трещины и снижению порога хладноломкости.

Для обеспечения высокой конструкционной прочности количество легирующих элементов в стали должно быть рациональным. После достижения необходимой прокаливаемости избыточное легирование снижает запас вязкости и облегчает хрупкое разрушение.

*Хром* — повышает твердость и прочность, сохраняет вязкость, увеличивает сопротивляемость стали коррозии. Вводят до 2 %. Он растворяется в феррите и цементите, оказывая благоприятное влияние на механические свойства стали. К тому же хром не дефицитный легирующий элемент, что определяет его широкое применение в конструкционных сталях.

*Никель* — повышает прочность, ударную вязкость, коррозионную стойкость, прокаливаемость стали. Наиболее ценный и в то же время дефицитный легирующий элемент. Вводят от 1 до 5 %.

*Марганец* — дешевый легирующий элемент; растворяясь в феррите, повышает прочностные свойства стали, уменьшает склонность к хладноломкости. Вводят до 1,5 %. Он заметно повышает предел текучести стали, однако такая сталь чувствительна к перегреву, поэтому для измельчения зерна вместе с ним вводят карбидообразующие элементы.

*Кремний* — дешевый некарбидообразующий элемент, количество которого ограничивают 2 %. Сильно повышает предел текучести, несколько затрудняет разупрочнение стали при отпуске, снижает вязкость и повышает порог хладноломкости при содержании свыше 1 %.

*Молибден* — повышает упругость, прочность, красностойкость, коррозионную стойкость, окалиностойкость стали. Дорогой дефицитный карбидообразующий элемент, который растворяется в цементите. Основная цель введения 0,2—0,4 % Мо — уменьшение вероятности к отпускной хрупкости II рода, улучшение свойств легированных сталей за счет измельчения зерна, повышение стойкости к отпуску, увеличение прокаливаемости.

*Вольфрам* — образует очень твердые карбиды, резко увеличивающие твердость и красностойкость стали. Вводят в количестве 0,8—1,2 %. Влияние — как у молибдена.

*Ванадий* — увеличивает плотность стали, измельчает зерно и повышает твердость и прочность. Сильный карбидообразователь. Вводят до 0,3 %. Повышение содержания недопустимо (так же как молибдена и вольфрама), так как приводит к образованию специальных трудно растворимых при нагреве карбидов. Избыточные карбиды снижают прокаливаемость и, располагаясь по зернам, способствуют хрупкому разрушению.

*Бор* — вводят в микродозах (0,002—0,005 %) для увеличения прокаливаемости. Микролегирование бором эквивалентно 1 % Ni; 0,5 % Cr; 0,2 % Mo.

*Кобальт* — увеличивает ударную вязкость, жаропрочность и магнитные свойства.

*Медь* — усиливает антикоррозионные свойства стали.

*Титан* — увеличивает прочность стали, повышает обрабатываемость и сопротивление коррозии (так же как ванадий).

*Ниобий* — повышает сопротивление коррозии.

*Алюминий* — повышает жаростойкость (совместно с кремнием улучшает коррозионную стойкость).

*Цирконий* — позволяет получать мелкозернистую сталь.

Легированные элементы сильно влияют на фазовые превращения в сталях при нагревании и охлаждении, поэтому воздействуют на структуру и свойства сталей после различной термической обработки. В сталях с небольшим и средним содержанием углерода (до 0,6 %) во многих структурных со-

стояниях имеется большое количество феррита. Поэтому свойства стали существенно зависят от свойств феррита. Прочность и твердость феррита повышаются в большей степени при увеличении содержания в нем марганца и кремния и в меньшей степени — никеля. Наиболее слабо на твердость феррита влияют Mo, W и Cr.

Хром в небольших количествах немного повышает ударную вязкость, а при дальнейшем увеличении содержания — снижает ее. Ударная вязкость феррита резко снижается под влиянием молибдена, вольфрама, марганца (более 1 %), кремния (более 0,5 %), но повышается при легировании никелем.

Легирующие элементы существенно влияют на температуру перехода феррита в хрупкое состояние (порог хладноломкости). Большинство легирующих элементов повышают порог хладноломкости. Никель, в отличие от других элементов, существенно понижает порог хладноломкости при всех концентрациях.

Феррит является основой сорбита — структуры, получаемой после закалки и высокого отпуска. Повышение прочностных свойств феррита вызывает повышение прочностных свойств сорбита легированных сталей.

Улучшение механических свойств связано также с благоприятным влиянием легирующих элементов на прокаливаемость, измельчение зерна, замедление процессов, вызывающих разупрочнение стали при отпуске. Путем легирования можно получить сталь, которая после соответствующей термической обработки будет иметь лучший комплекс механических свойств по сравнению с углеродистой сталью: более высокую прочность при одинаковой вязкости или более высокую вязкость при одинаковой прочности.

Легированием можно также изменить физико-химические свойства стали и получить сталь коррозионностойкую, жаропрочную, немагнитную, магнитную, с особыми тепловыми и электрическими свойствами. В табл. 14.1 приведен химический состав легированных конструкционных сталей.

Таблица 14.1

## Химический состав (%) легированных конструкционных сталей

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Прочие
Цементуемые							
15 X	0,12—0,18	—	—	0,7—1,0	—	—	—
25XГМ	0,23—0,29	0,9—1,2	—	0,9—1,2	—	0,2—0,3	—
30XГТ	0,24—0,32	0,8—1,1	—	1,0—1,3	—	—	0,03—0,09 Ti
20XH3A	0,17—0,24	—	—	0,6—0,9	2,75—3,15	—	—
12X2H4A	0,09—0,15	—	—	1,25—1,65	3,25—3,65	—	—
18X2H4MA	0,14—0,20	—	—	1,35—1,65	4,0—4,4	0,30—0,40	—
Улучшаемые							
40X	0,36—0,44	—	—	0,8—1,1	—	—	—
40XГТР	0,38—0,45	0,7—1,0	—	0,8—1,1	—	—	0,03—0,09 Ti 0,002—0,005 B
30XГСА	0,28—0,34	0,8—1,1	0,9—1,2	0,8—1,1	—	—	—
40XHMA	0,37—0,44	—	—	0,6—0,9	1,25—1,65	0,15—0,25	—
38XH3MΦA	0,33—0,40	—	—	1,2—1,5	3,0—3,5	0,35—0,45	0,10—0,18 V
38XMЮA	0,35—0,42	—	—	1,35—1,65	—	0,15—0,25	0,7—1,1 Al
Рессорно-пружинные							
60C2	0,57—0,65	—	1,5—2,0	—	—	—	—
60CГA	0,56—0,64	0,8—1,0	1,3—1,8	—	—	—	—
50XΦA	0,46—0,54	—	—	0,8—1,1	—	—	0,1—0,2 V
50XГΦA	0,48—0,55	0,8—1,0	—	0,95—1,2	—	—	0,15—0,25 V
60C2XA	0,56—0,64	—	1,4—1,8	0,7—1,0	—	—	—
60C2H2A	0,56—0,64	—	1,4—1,8	—	1,4—1,7	—	—
Пр и м е ч а н и я. 1. Концентрация марганца и кремния как постоянных примесей не указана. 2. Сера и фосфор находятся в пределах для качественных и высококачественных сталей.							

## 14.2. Улучшаемые легированные стали

Улучшению, закалке и высокому отпуску (500—600 °С) на структуру «сорбит» подвергают стали, содержащие 0,3—0,5 % С и не более 5 % легирующих элементов.

Улучшаемые стали предназначены для изготовления ответственных деталей машин (валов, штоков, шатунов), работающих в условиях циклических и ударных нагрузок, концентрации напряжений, а в некоторых случаях при пониженных температурах. Поэтому они должны иметь высокий предел текучести в сочетании с высокой пластичностью, вязкостью, малой чувствительностью к надрезу. Важное значение для этих сталей имеют порог хладноломкости, предел выносливости и другие параметры конструктивной прочности.

Высокий комплекс механических свойств возможен только при сквозной прокаливаемости, поэтому она служит важнейшей характеристикой этих сталей. Кроме прокаливаемости важно обеспечить в сталях мелкое зерно и не допустить развития отпускной хрупкости. В табл. 14.2 указано назначение легированных конструкционных сталей.

Таблица 14.2

### Примерное назначение легированных конструкционных сталей

Марка стали	Назначение
15X	Пальцы поршневые, валы распределительные, толкатели, крестовины карданов, клапаны, мелкие детали, работающие в условиях износа при трении. Хорошо цементируется
20X	Кулачковые муфты, втулки, шпиндели, направляющие планки, плунжеры, оправки, копиры, шлицевые валики и др.
40X	Для деталей, работающих на средних скоростях при средних давлениях (зубчатые колеса, шпиндели и валы в подшипниках качения, червячные валы)
45X, 50X	Для крупных деталей, работающих на средних скоростях при небольших давлениях (зубчатые колеса, шпиндели, валы в подшипниках качения, червячные и шлицевые валы). Обладают высокой прочностью и вязкостью



Окончание табл. 14.2

Марка стали	Назначение
38ХА	Для зубчатых колес, работающих на средних скоростях при средних давлениях
45Г2, 50Г2	Для крупных малонагруженных деталей (шпиндели, валы, зубчатые колеса тяжелых станков)
18ХГТ	Для деталей, работающих на больших скоростях при высоких давлениях и ударных нагрузках (зубчатые колеса, шпиндели, кулачковые муфты, втулки и др.)
20ХГР	Для тяжелонагруженных деталей, работающих при больших скоростях и ударных нагрузках
15ХФ	Для некрупных деталей, подвергаемых цементации и закалке с низким отпуском (зубчатые колеса, поршневые пальцы и др.)
40ХС	Для мелких деталей высокой прочности
40ХФА, 30ХГС	Для ответственных высокопрочных деталей, подвергаемых закалке и высокому отпуску; для средних и мелких деталей сложной конфигурации, работающих в условиях износа (рычаги, толкатели); для ответственных сварных конструкций, работающих при знакопеременных нагрузках
35ХМ	Для валов, деталей турбин и крепежа, работающих при повышенной температуре
45ХН, 50ХН	Аналогично применению стали 40Х, но для деталей больших размеров

### 14.3. Высокопрочные легированные стали

Стали с пределом прочности 140—200 кгс/мм<sup>2</sup> и более называют *высокопрочными*. Эти стали отличаются повышенной чувствительностью к нагрузкам и склонностью к хрупкому разрушению. Для обеспечения надежной работы и использования высокой прочности такие стали должны иметь достаточный запас пластичности и вязкости. Необходимо избегать конструктивных концентраторов напряжений.

Высокопрочное состояние в сочетании с высоким сопротивлением хрупкому разрушению может быть получено при использовании:

- среднеуглеродистых комплекснолегированных сталей после низкого отпуска при ТМО;
- мартенситностареющих сталей.

*Среднеуглеродистые комплекснолегированные низкоотпущенные стали.* После закалки и низкого отпуска уровень прочности стали определяется содержанием углерода и практически не зависит от присутствия легирующих элементов. Увеличение от 0,2 до 0,6 % С повышает предел прочности со 120 до 280 кгс/мм<sup>2</sup>, при этом сопротивление хрупкому разрушению уменьшается. В связи с этим содержание углерода ограничивают 0,35—0,4 %, а предел прочности — 180—200 кг/мм<sup>2</sup>.

Снижение чувствительности к подрезам достигается легированием никелем в сочетании с другими элементами.

К распространенным высокопрочным сталям относятся стали 30ХГСА, 40ХГСНЗВА, 30Х2ГСНЗВМ. Они применяются в самолетостроении: для изготовления силовых сварных конструкций деталей фюзеляжей, шасси. Для достижения предела прочности 165 кгс /мм<sup>2</sup> стали подвергают изотермической закалке, поскольку по сравнению с низкоотпущенным состоянием она обеспечивает меньшую чувствительность к надрезам и более высокое сопротивление разрушению.

Si, Mo, W, V вводят в связи с тем, что эти элементы затрудняют разупрочнение при отпуске, позволяют несколько снизить содержание углерода. Карбидообразующие элементы необходимы также для получения мелкого зерна, обязательного для высокопрочных сталей. Хром и марганец вводят для обеспечения нужной прокаливаемости.

ТМО применительно к среднеуглеродистым легированным сталям 30ХГСА, 40ХН, 40ХНМА, 38ХНЗМА и других марок обеспечивает высокую прочность ( $\sigma_B = 200\text{—}280$  кгс/мм<sup>2</sup>) при достаточном запасе пластичности и вязкости. Повышение прочности при ТМО связано с тем, что деформация вызывает в аустените измельчение блоков, создает высокую плотность дислокаций, образующих устойчивую ячеистую структуру, которая наследуется при мартенситной закалке.

*Мартенситностареющие стали.* Это класс высокопрочных материалов, превосходящих по конструктивной прочности и технологичности рассмотренные выше среднеуглеродистые стали.

Их основа — безуглеродистые ( $C = 0,03 \%$ ) сплавы железа с 8—25 % Ni, легированные Co, Mo, Ti, Al, Cr и другими элементами (табл. 14.3).

Таблица 14.3

**Химический состав и механические свойства  
мартенситностареющих сталей**

Марка стали	Содержание легирующих элементов, %	Механические свойства							
		$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\alpha_H$ , кгс · м/ /см <sup>2</sup>	$\alpha_T$ , кгс · м/ /см <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , кгс/ /мм <sup>2</sup>	$\sigma_{-1}$ , кгс/ /мм <sup>2</sup>
H18K9M5T	18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,9 Ti	210	190	8	50	5	2	230	65
H12K15M10	12 Ni; 15 Co; 10 Mo	250	240	6	30	3	—	—	—
H10X11M2T	10 Ni; 11 Cr; 2 Mo; 0,9 Ti; 0,2 Al	160	155	8	50	5	2,1	210	—

Высокая прочность таких сталей достигается совмещением двух механизмов упрочнения — мартенситного превращения и старения мартенсита. Небольшой вклад вносит также легирование твердого раствора.

Никель стабилизирует  $\gamma$ -твердый раствор, существенно снижая температуру  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, которое даже при невысоких скоростях охлаждения протекает по мартенситному механизму.

Мартенситностареющие стали закаливают при 800—860 °C на воздухе.

Основное упрочнение достигается при старении 450—500 °С, когда из мартенсита выделяются мелкодисперсные частицы вторичных фаз ( $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ,  $\text{NiAl}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Mo}$  и др.), связанные с матрицей.

Для мартенситностареющих сталей характерны высокий предел текучести и низкий порог хладноломкости. Другим важным свойством сталей этого класса является высокая технологичность. Они обладают неограниченной прокаливаемостью, хорошо свариваются, до старения легко деформируются и обрабатываются резанием. При термообработке практически не происходит коробления и исключено обезуглероживание. Стали мартенситностареющего класса, несмотря на высокую стоимость, находят все более широкое применение. Их используют для изготовления наиболее ответственных деталей в авиации, ракетной технике, судостроении, приборостроении.

#### 14.4. Рессорно-пружинные легированные стали

Рессорно-пружинные легированные стали предназначены для изготовления упругих элементов общего назначения. Особенности работы пружин, рессор и других деталей пружинного типа состоят в том, что при значительных нагрузках в них не допускается остаточная деформация. В связи с этим стали должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, а также высоким пределом выносливости. Этим требованиям удовлетворяют стали с повышенным содержанием углерода (0,5—0,7 % С), которые подвергают закалке и среднему отпуску (420—520 °С) на троостит.

Небольшие пружины простой формы изготавливают из стали, поставляемой в термически обработанном состоянии. Для крупных пружин, требующих больших усилий при навивке, сталь используют в отожженном состоянии. Термообработке подвергают готовые изделия, полученные горячей навивкой.

Все легированные рессорно-пружинные стали относятся к перлитному классу. Основными легирующими элементами в них являются Si и Mn, а в сталях более ответственного назначения — Cr, V, Ni. Легирование (кроме Si, Mn) мало влияет

на предел упругости — главное свойство этих сталей. Более существенно оно проявляется в повышении релаксационной стойкости, прокаливаемости, предела выносливости. Релаксация опасна тем, что в результате перехода части упругой деформации в пластическую упругие элементы после разгрузки изменяют размеры и форму. Например, долгое время сжатая пружина или лист рессоры при снятии нагрузки полностью не распрямляются и теряют упругие и эксплуатационные свойства. Легированные стали, имея повышенную релаксационную стойкость, обеспечивают более длительную и надежную работу машин и приборов. В табл. 14.4 приведена информация о назначении некоторых рессорно-пружинных сталей.

Таблица 14.4

**Примерное назначение рессорно-пружинных сталей**

Марка стали	Назначение
60С2, 60С2А	Для рессор из полосовой стали толщиной 3—16 мм и пружинной ленты толщиной 0,08—3 мм; для витых пружин из проволоки диаметром 3—16 мм. Обрабатываются резанием плохо. Максимальная температура эксплуатации 250 °С
70С3А	Для тяжелонагруженных пружин ответственного назначения. Сталь склонна к графитизации
50ХГ, 50ХГА	Для рессор из полосовой стали толщиной 3—18 мм. Обрабатывается резанием плохо
50ХФА, 50ХГФА	Для ответственных пружин и рессор, работающих при повышенной температуре (до 300 °С); для пружин, подвергаемых многократным переменным нагрузкам
60С2ХА	Для крупных высоконагруженных пружин и рессор ответственного назначения
60С2Н2А, 65С2ВА	Для ответственных высоконагруженных пружин и рессор, изготавливаемых из калиброванной стали и пружинной ленты

Примечания. 1. Хромоникелевые и кремнионикелевые стали менее склонны к обезуглероживанию. Наилучшее сочетание технологических и эксплуатационных свойств имеет сталь 60С2Н2А. 2. Коррозионная стойкость всех сталей низкая.

### 14.5. Конструкционные (строительные) низколегированные стали

*Низколегированными* называются стали, содержащие не более 0,22 % С и сравнительно небольшое количество недефицитных легирующих элементов: Mn (до 1,8 %), Si (до 1,2 %), Cr (до 0,8 %), а также Ni (до 0,8 %), Cu (до 0,5 %), V (до 0,15 %), Ti (до 0,3 %) и др. Эти стали в виде листов и сортового проката применяют в строительстве и машиностроении для сварных конструкций, в основном без дополнительной термообработки. В табл. 14.5 приведены сведения о назначении низколегированных сталей.

Таблица 14.5

#### Примерное назначение низколегированных тонколистовой и широкополосной универсальных сталей

Марка стали	Назначение
09Г2	Для деталей сварных конструкций, изготавливаемых из листов. Обработывается резанием удовлетворительно
09Г2С	Для паровых котлов, аппаратов и емкостей, работающих под давлением при температуре $-70...+450$ °С; для ответственных листовых сварных конструкций в химическом и нефтяном машиностроении, судостроении. Хорошо свариваются. Обработываются резанием удовлетворительно
10ХСНД	Для сварных конструкций химического машиностроения, фасонных профилей в судостроении, вагоностроении
15ХСНД	Для деталей вагонов, строительных свай, сложных профилей в судостроении. Обладает повышенной коррозионной стойкостью
15ГФ	Для листовых сварных конструкций в вагоностроении. Обеспечивает высокое качество сварного шва. Штампуемость удовлетворительная

Низколегированные стали с малым содержанием углерода хорошо свариваются. Эти стали по сравнению с углеродистыми сталями обыкновенного качества (Ст2, Ст3, Ст4) имеют более высокие значения пределов прочности и текучести при сохранении хорошей пластичности, меньшей склонности к старению и хладноломкости. Применение низколегированных сталей, имеющих  $\sigma_{0,2} = 35 \text{ кгс/мм}^2$ , взамен углеродистых, позволяет экономить до 15 % металла, а при  $\sigma_{0,2} = 40 \text{ кгс/мм}^2$  экономия достигает 25—30 %.

Никель понижает порог хладноломкости. Это важно учитывать для строительных сталей, для которых при температуре 40 °С ударная вязкость должна быть 3—5 кгс · м/см<sup>2</sup>.

Введение меди, никеля или одновременно меди и фосфора увеличивает коррозионную стойкость сталей в атмосферных условиях (стали 10ХСНД, 15ХСНД).

Низколегированные стали нередко поставляют после нормализации или нормализации и высокого отпуска. Нормализация несколько повышает предел прочности и текучести, измельчая зерно, улучшает пластичность и вязкость, уменьшая склонность к хрупкому разрушению. Некоторые стали (14Г2, 17ГС, 15ХСНД) поступают после закалки и отпуска, что значительно повышает их прочность, понижает порог хладноломкости и склонность к старению. Применение в строительстве термически обработанных профилей и листов из низколегированной стали, имеющей  $\sigma_{0,2} = 40\text{—}50 \text{ кгс/мм}^2$ , дает экономию металла до 50 %.

Выбор стали для строительных конструкций осуществляется исходя из вида сооружения, условий эксплуатации, расчетных температур, характера и величины действующих нагрузок.

*Арматурные стали.* Низколегированные горячекатаные стали применяют и для армирования обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций (стержневая арматурная сталь).

## 14.6. Шарикоподшипниковые стали

Рабочие поверхности деталей подшипников качения (кольца, ролики, шарики) испытывают большое количество

циклов высоких контактных напряжений, а вследствие проскальзывания происходит значительное местное истирание. Поэтому к сталям для подшипников качения предъявляются требования максимального сопротивления контактной усталости и истиранию.

Шарикоподшипниковая сталь прежде всего должна обладать высокой твердостью, поэтому используют высокоуглеродистые стали типа инструментальной (иногда — низкоуглеродистые в цементованном состоянии). Они содержат около 1 % углерода. Для увеличения прокаливаемости их легируют хромом — 0,6—1,5 % Cr (ШХ6, ШХ9, ШХ15), а иногда дополнительно — кремнием и марганцем (ШХ20ГС). Количество легирующих элементов определяется размером детали. Так, сталь ШХ6 применяют для деталей диаметром не более 10 мм, а ШХ20ГС — выше 30 мм. К таким сталям предъявляют высокие требования по содержанию неметаллических включений, так как они вызывают преждевременное усталостное разрушение. Недопустима также карбидная неоднородность. Электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав, уменьшая количество неметаллических включений (сульфидов, оксидов и др.), повышает долговечность подшипников. В этом случае к марке стали добавляют букву Ш, а вакуумно-дуговой переплав обозначают добавлением к марке букв ВД, например: ШХ15Ш, ШХ15ВД.

Термическая обработка шарикоподшипниковых сталей с небольшим количеством хрома состоит из закалки и низкого отпуска (до 200 °С), после чего получается твердость HRC = 60—66. Структура должна представлять собой отпущенный очень мелкий игольчатый мартенсит.

## 14.7. Износостойкие стали

Износ деталей машин и аппаратов является сложным процессом. Типичными случаями являются обычное трение скольжения и абразивный износ. В первом случае металл наклепывают с поверхности. Во втором случае, когда частицы



металла вырываются с поверхности, износостойкость определяется твердостью и сопротивлением отрыву. Износостойкость может быть повышена химико-термической обработкой.

*Графитизированная сталь.* Для получения графитизированной стали используют высокоуглеродистую сталь (1,5–2 % С) с повышенным содержанием кремния (1–2 %). Последний способствует графитизации цементита. Часть углерода в этих сталях после графитизирующего отжига выделяется в виде графита. После термообработки структура стали состоит из зернистого перлита с некоторым количеством мелких округлых включений графита. При неабразивном износе графит играет роль смазки, предотвращая сухое трение и схватывание. Кроме того, эти стали обладают антивибрационными свойствами.

Графитизирующую сталь с высокой твердостью HRC = 63 после закалки применяют для изготовления штампов, матриц, коленчатых валов, шаров, лопастей дробеструйных аппаратов.

*Аустенитная высокомарганцовистая сталь.* Наклеп металла значительно увеличивает твердость, но не повышает износостойкость стали. Исключением служит высокомарганцовистая сталь с содержанием углерода порядка 1,2 % (Г13Л), которая после наклепа обладает высокой износостойкостью. Буква Л означает, что сталь литая. Характерной особенностью марганцовистого аустенита является его повышенная склонность к наклепу.

## 14.8. Легированные стали для фасонного литья

Для изготовления ответственных деталей, работающих при больших нагрузках и повышенных температурах, а также в серосодержащих, нефтяных и других агрессивных средах, применяют фасонное литье из легированной и высоколегированной стали.

При выборе марки среднехромистой стали для изготовления литых деталей аппаратуры и оборудования нефтеперера-

батывающих заводов при переработке неагрессивных нефтепродуктов при температуре до 500 °С и слабоагрессивных сернистых нефтепродуктов при температуре до 400 °С может быть рекомендована сталь марок 30ХМЛ и 35ХМЛ.

Фасонное литье из стали этих марок применяют для изготовления корпусов задвижек, вентиляей, редукционных клапанов, фитингов и т. д. Отливку чаще всего подвергают двойной термообработке — закалке при 880 °С в воде и отпуску при 650—670 °С с охлаждением на воздухе.

Для изготовления литых элементов оборудования для переработки сернистых нефтепродуктов средней агрессивности при температуре до 425 °С рекомендуется сталь Х5ТЛ, при температуре до 550 °С — сталь марок Х5МЛ и Х5ВЛ.

Отливки из стали этих марок предназначаются для высокотемпературных элементов оборудования процесса крекинга, перерабатывающего агрессивные высокосернистые нефти.

Фасонное литье из легированной стали применяют также для изготовления деталей газо- и нефтепромыслового оборудования и инструмента. В табл. 14.6 приведены сведения о назначении литых высоколегированных сталей.

Таблица 14.6

### Примерное назначение отливок из высоколегированных сталей

Марка стали	Основные свойства	Примерное назначение
1Х13Л	Высокая стойкость против атмосферной коррозии	Детали с повышенной пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам (турбинные лопатки, клапаны гидравлических прессов); арматура крекинг-установок, а также изделия, подвергающиеся воздействию относительно слабых агрессивных сред (атмосферные осадки, водные растворы солей, органических кислот при комнатной температуре и др.)

Продолжение табл. 14.6

Марка стали	Основные свойства	Примерное назначение
2Х13Л	Стойкость против атмосферной коррозии несколько меньшая, чем стали марки 1Х13Л	Те же детали, но с повышенной твердостью
Х25ТЛ	Кислотостойкая, окалиностойкая при температуре до 1100 °С	Детали, не подвергающиеся действию постоянных и переменных нагрузок (аппаратура для дымящейся азотной или фосфорной кислоты; многие детали аппаратуры для химического машиностроения; печная арматура; плиты и др.)
Х18Н9ТЛ	Кислотостойкая, жаропрочная при температуре до 600 °С, обладает высокой стойкостью против газовой и межкристаллитной коррозии	Арматура химической промышленности; выхлопные коллекторы газопроводов; арматура для нефтеперерабатывающих и других установок
Х18Н12МЗТЛ	Кислотостойкая, жаропрочная при температуре до 800 °С, не подвержена межкристаллитной коррозии	Детали, устойчивые против действия сернистой, кипящей фосфорной, муравьиной, уксусной и других кислот
Х9С2Л	Окалиностойкая при температуре до 800 °С, жаропрочная при температуре до 700 °С	Детали, работающие длительное время при температуре до 700 °С
Х24Н12СЛ	Кислотостойкая, окалиностойкая при температуре до 1000 °С, жаропрочная	Детали, работающие при высоких температурах и давлении

Окончание табл. 14.6

Марка стали	Основные свойства	Примерное назначение
X18H24C2Л	Кислотостойкая, окалипостойкая при температуре до 1100 °С, жаропрочная	Детали, работающие при высоких температурах в сильнонагруженном состоянии (печные конвейеры, шнеки, крепежные детали)
X25H19C2Л	То же	То же
X6C2МЛ	Окалипостойкая при температуре до 750 °С, жаропрочная	Детали, работающие под нагрузкой при температуре до 750 °С
X21H11B2Л	Жаропрочная при температуре до 870 °С, окалипостойкая при температуре до 970 °С	Детали, работающие под нагрузкой в интервале температур 650–870 °С
4X14H14B2МЛ	Жаропрочная при температуре до 800 °С	Детали пароперегревателей, работающие в условиях высоких температур и давлений
X15H60Л	Окалипостойкая, жаропрочная при температуре до 1000 °С	Нагревательные элементы электрических печей, детали гидрогенизационных установок

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие легирующие элементы способствуют повышению прокаливаемости сталей?
2. Назовите основные легирующие элементы в сталях. Каков характер влияния каждого из них на свойства сталей?
3. За счет каких мер получают высокопрочные легированные стали?
4. Какими эксплуатационными свойствами должны обладать пружинные и шарикоподшипниковые стали?
5. Какова особенность структуры износостойких сталей?

## Глава 15

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ  
И СПЛАВЫ

Инструментальные стали предназначены для изготовления режущего инструмента и штампов холодного и горячего деформирования. Для обеспечения износостойкости инструментальным сталям должны быть присущи высокая твердость и высокая прочность при удовлетворительной вязкости.

К важному свойству инструментальных сталей, подвергающихся при резании или деформировании существенному нагреву, относится теплоустойчивость (красностойкость).

Кроме служебных свойств, для инструментальных сталей большое значение имеют технологические свойства: прокаливаемость; малые объемные изменения при закалке; обрабатываемость резанием, давлением; шлифуемость.

В промышленности применяют большое число инструментальных углеродистых и легированных сталей. Особую группу образуют твердые сплавы, обладающие высокой износостойкостью.

## 15.1. Углеродистые инструментальные стали

Углеродистые инструментальные стали поставляют после отжига на зернистый перлит с гарантией на химический состав и твердость. Их производят качественными (У7, У8, У9...У13) и высококачественными (У7А, У8А, У9А...У13А). Буква У в марке показывает, что сталь углеродистая, а цифра — среднее содержание углерода в *десятых* долях процента. Благодаря невысокой твердости в состоянии поставки (НВ = 187—217) углеродистые стали хорошо обрабатываются резанием и деформируются, что позволяет применять накатку, насечку и другие методы изготовления инструмента.

Из-за низкой прокаливаемости (10–12 мм) углеродистые стали применяют для изготовления мелкого инструмента и инструмента сечением до 25 мм с незакаленной серединой (метчики, развертки, напильники и др.). Несквозная закалка уменьшает деформацию инструмента и повышает (за счет вязкой сердцевины) его устойчивость к ударам и вибрациям.

Высококачественные стали имеют те же значения, что и качественные, но из-за несколько лучшей вязкости их чаще используют для изготовления инструментов с более тонкой режущей кромкой.

Недостатки углеродистых сталей — чувствительность к перегреву и отсутствие теплостойкости. Наиболее склонны к перегреву стали марок У8, У9, что существенно ограничивает их применение.

Инструмент из углеродистых сталей отпускается и теряет твердость при нагреве свыше 200 °С. В связи с этим он пригоден для обработки сравнительно мягких материалов и при небольших скоростях резания. В табл. 15.1 приведены сведения о назначении углеродистых инструментальных сталей.

Таблица 15.1

### Примерное назначение углеродистых инструментальных сталей

Марка стали	Назначение
У7, У7А	Инструменты для обработки дерева — топоры, колупы, стамески, долота; пневматические инструменты небольших размеров — зубила, обжимки, бойки. Слесарно-монтажные инструменты — кусачки, плоскогубцы, острогубцы, молотки, кувалды, отвертки, бородки и др.
У8, У8А	Инструменты для обработки дерева — фрезы, зенковки, цековки, топоры, стамески, долота, продольные и дисковые пилы. Накатные ролики. Плиты и стержни для форм литья под давлением оловянно-свинцовых сплавов. Обжимки, кернеры, бородки, отвертки, плоскогубцы, острогубцы, боковые кусачки

Сталь	Назначение
У9, У9А	Инструменты для обработки дерева, слесарно-монтажные инструменты, калибры простой формы и пониженных классов точности
У10, У10А	Столярные пилы ручные и машинные, ручные ножовки, спиральные сверла; слесарные шаберы, напильники, накатные ролики; штампы для холодной штамповки деталей небольших размеров и простой формы; калибры простой формы и пониженных классов точности
У11, У11А	То же, а также ручные метчики, холодновысадочные пуансоны и штампы мелких размеров, калибры простой формы и пониженных классов точности
У12, У12А	То же, а также небольшие пресс-формы для пластмасс
У13, У13А	Инструменты повышенной износостойкости, работающие при умеренных и значительных давлениях без разогрева режущей кромки (напильники, бритвенные ножи, лезвия, острые хирургические инструменты, шаберы, гравировальные инструменты)

## 15.2. Легированные инструментальные стали

**Влияние легирующих элементов на свойства инструментальных сталей.** Легирующие элементы добавляют в стали в количестве до 5 % для увеличения закаливаемости, прокаливаемости, уменьшения деформирования и опасности растрескивания инструмента.

**Хром** — постоянный легирующий элемент низколегированных сталей.

**Марганец** (1–2 %) — добавляют для обеспечения минимального изменения размеров при закалке.

*Кремний* (1—1,5 %) — добавляют для повышения сопротивления отпуску и образования легко отделяющейся окарины.

*Вольфрам* (1—1,5 %) — добавляют для повышения износостойкости.

*Никель* (до 1,5 %) — добавляют в штамповые стали для увеличения вязкости.

Для обеспечения теплостойкости вводят хром, вольфрам, молибден в большом количестве, с тем чтобы связать углерод в карбиды.

*Кобальт* — увеличивает теплостойкость, снижает количество карбидов в стали и увеличивает их дисперсность.

*Основные требования к режущим инструментам — износостойкость и теплостойкость.* Условия работы инструмента зависят от режимов резания и свойств обрабатываемого материала. Чем больше скорость резания, сечение стружки, а также прочность и вязкость обрабатываемого материала, тем выше температура инструмента. При этих условиях работоспособность инструмента определяется способностью материала сохранять ее при длительном нагреве.

По *теплостойкости* материалы подразделяют на следующие группы:

— низколегированные стали, не обладающие теплостойкостью;

— высоколегированные быстрорежущие стали с теплостойкостью до 600—640 °С;

— твердые сплавы с теплостойкостью до 800—1000 °С.

*Низколегированные стали* содержат повышенное количество углерода (0,9—1,4 %) и до 5 % легирующих элементов и обладают повышенной прокаливаемостью. Это заэвтектоидные стали перлитного класса. Их подвергают неполной закалке и низкому отпуску ( $HRC = 62-69$ ). Характеризуются высокой износостойкостью, однако не обладают теплостойкостью. Их применяют для изготовления инструмента, рабо-



тающего при небольших скоростях резания и допустимой температуре нагрева 200–260 °С.

В марках инструментальных легированных сталей содержание С указывается в *десятих* долях процента (например, марка 9ХС означает: 0,9 % С; 1 % Cr; 1,4 % Si). Если  $C > 1\%$ , то цифры не указывают: ХВГ, ХГ. В отличие от углеродистых они менее склонны к перегреву и позволяют изготавливать инструмент больших размеров и более сложной формы.

*Сталь ХВ4* — отличается особо высокой твердостью и износостойкостью (HRC = 67–69) вследствие образования карбида вольфрама. Ее называют алмазной; применяют для чистовой обработки твердых материалов.

*Стали марок 9ХС, ХВГ, ХВСГ* — закаливают в масле; относятся к сталям с глубокой прокаливаемостью. Сталь 9ХС благодаря присутствию кремния имеет более высокую устойчивость против отпуска (до 260 °С), повышенные режущие свойства; применяют для изготовления фрез, сверл, резьбонарезного и другого инструмента сечением до 35 мм. Недостаток стали 9ХС — склонность к обезуглероживанию.

*Сталь ХВГ* — из-за присутствия марганца характеризуется мягкой деформацией при закалке; применяют для изготовления длинного стержневого инструмента (сверл, разверток, протяжек и др.) сечением до 45 мм.

*Сталь ХВСГ* — сложнолегированная сталь, сочетает в себе лучшие свойства сталей ХВГ, 9ХС; используют для изготовления инструмента большого сечения (до 100 мм).

### 15.3. Быстрорежущие стали

*Быстрорежущие стали* — группа высоколегированных сталей, предназначенных для изготовления высокопроизводительного инструмента.

Основное свойство этих сталей — высокая теплостойкость, которая обеспечивается введением большого количества вольфрама совместно с другими карбидообразующими (Mo, V), а также кобальтом.

Эта сталь сохраняет твердость до 600—640 °С и допускает в 3—5 раз более производительные режимы резания, чем стали, не обладающие теплостойкостью.

В маркировке быстрорежущие стали обозначают буквой Р, цифра после которой указывает содержание вольфрама — основного легирующего элемента — в процентах. Содержание ванадия до 2 % и хрома до 4 % во всех сталях в марках не указывают. Стали, содержащие дополнительно молибден, кобальт и повышенный процент ванадия, имеют в марке соответственно буквы М, К, Ф и цифры, показывающие их количество (Р6М5, Р10К5Ф5).

Высокие свойства инструмент из быстрорежущей стали приобретает после закалки и трехкратного отпуска. Из-за низкой теплопроводности быстрорежущие стали при закалке нагревают медленно с прогревами при 450—850 °С, при этом применяют соляные ванны для уменьшения окисления и обезуглероживания. Особенность закалки быстрорежущих сталей — высокая температура нагрева. Она необходима для обеспечения теплостойкости, получения после закалки высоколегированного мартенсита. Быстрорежущие стали по структуре нормализации относят к мартенситному классу. С температуры закалки мелкий инструмент охлаждают на воздухе, крупный — в масле. Сложный инструмент для уменьшения деформаций подвергают ступенчатой закалке с выдержкой в горячих средах при 500—550 °С.

После закалки стали не обладают максимальной твердостью (HRC = 60—62), так как в структуре кроме мартенсита и первичных карбидов содержится 30—40 % остаточного аустенита, присутствие которого вызвано снижением  $M_s$  ниже 0 °С. Остаточный аустенит превращают в мартенсит при отпуске или обработке холодом.

Быстрорежущие стали — «вторично твердеющие». Наибольшая твердость достигается после отпуска при 550—570 °С. В процессе выдержки при отпуске из мартенсита и остаточного аустенита выделяются дисперсные карбиды  $M_6C$ , которые при последующем охлаждении превращаются в мартенсит. Для быстрорежущих сталей применяют три, а для некоторых марок — четыре отпуска, например для сталей марок P14Ф4, P9Ф5.

В термообработанном состоянии быстрорежущие стали имеют и структуру мартенсита отпуска с наличием карбидов.

По режущим свойствам быстрорежущие стали делят на две группы: нормальной и повышенной производительности.

*Группу нормальной производительности* образуют вольфрамовые (P18, P12, P9, P9Ф5) и вольфрамо-молибденовые (P6МЗ, P6М5) стали, сохраняющие твердость не ниже  $HRC = 58$  до 650 °С. Из-за одинаковой теплостойкости эти стали имеют близкие режущие свойства и отличаются главным образом механическими и технологическими свойствами.

К *группе сталей повышенной производительности* относятся стали, содержащие кобальт или повышенное количество ванадия: P18Ф2, P14Ф4, P6М5К5, P9М4К8, P9К5, P9К10, P10К5Ф5, P18К5Ф2. Они превосходят стали первой группы по теплостойкости (630—640 °С), твердости ( $HRC > 64$ ) и износостойкости, но уступают им по прочности и пластичности. Стали повышенной производительности применяют для обработки высокопрочных сталей, коррозиестойких и жаропрочных сталей с аустенитной структурой.

В структуре закаленной стали имеется некоторое количество сравнительно мягкого остаточного аустенита, что обусловлено ее химическим составом и режимом термообработки. В результате этого понижаются твердость и прочность, ухудшаются теплопроводность и магнитные свойства, изменяются размеры, ухудшается качество поверхности изделия. Для уменьшения количества остаточного аустенита используют криогенный метод обработки (глубокое охлаждение). В результате улучшаются механические свойства, повышаются твердость и износостойкость.

### 15.4. Твердые сплавы

**Спеченные твердые сплавы** — материалы, состоящие из высокотвердых и тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала, цементованных металлической связкой.

Твердые сплавы изготавливают методом порошковой металлургии. Порошки карбидов смешивают с порошком кобальта, выполняющего роль связки, прессуют и спекают при 1400—1550 °С. При спекании кобальт растворяет часть карбидов и плавится. В результате получается плотный материал, структура которого на 80—95 % состоит из карбидных частиц, соединенных связкой. Увеличение количества связующего вызывает снижение твердости, но повышение прочности и вязкости.

Твердые сплавы производят в виде пластин, которые наплавляют на державку из углеродистых сталей. Применяют для изготовления резцов, сверл, фрез. Инструмент сочетает высокую твердость ( $HRC = 74-76$ ), износостойкость с наиболее высокой теплостойкостью (800—1000 °С). По своим режущим свойствам он превосходит быстрорежущие стали и применяется для наиболее тяжелых условий резания и для резания с наиболее высокими скоростями.

Твердые сплавы характеризуются также высоким модулем упругости и пределом прочности на сжатие.

Недостатки — сложность изготовления фасонных изделий, высокая хрупкость.

В зависимости от состава карбидной основы спеченные твердые сплавы выпускают трех групп.

**Первую группу (вольфрамовую)** составляют сплавы системы WC—Co. Они маркируются буквами ВК и цифрой, показывающей содержание кобальта. Карбидная фаза состоит из зерен WC. При повышенном содержании кобальта сплавы этой группы отличаются наибольшей прочностью, но более низкой твердостью. Теплостойки до 800 °С.

**Сплавы ВКЗ—ВК8** применяют для режущего инструмента; при обработке чугуна, цветных сплавов, фарфора, керамики.

*Сплавы ВК10, ВК15*, обладающие из-за повышенного содержания кобальта более высокой вязкостью, используют для изготовления волоочильного и бурового инструмента, стойкость которого в десятки раз превышает стойкость стального инструмента.

*Сплавы ВК20, ВК25* (с высоким содержанием кобальта) используют для штампового инструмента. Их применяют также как конструкционный материал для деталей машин и приборов, от которых требуется высокое сопротивление пластической деформации и износу.

**Вторую группу (титано-вольфрамовую)** образуют сплавы системы  $\text{TiC}-\text{WC}-\text{Co}$ . Они маркируются буквами Т, К и цифрами, показывающими содержание карбидов титана и кобальта. При температуре спекания карбид титана растворяет до 70 % WC и образует твердый раствор  $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}$ , обладающий более высокой твердостью, чем WC. Здесь карбиды вольфрама присутствуют в виде избыточных кристаллов.

Сплавы второй группы характеризуются более высокой теплостойкостью (900—1000 °C), которая повышается по мере увеличения количества карбида титана. Их наиболее широко применяют для высокоскоростного резания сталей (например: Т15К6, Т5К12, Т30У4).

**Третью группу (титано-тантало-вольфрамовую)** образуют сплавы системы  $\text{TiC}-\text{TaC}-\text{WC}-\text{Co}$ . Цифра в марке после букв ТТ обозначает суммарное содержание карбидов  $(\text{TiC} + \text{TaC})$ , а после буквы К — количество кобальта. Структура карбидной основы представляет собой твердый раствор  $(\text{Ti}, \text{Ta}, \text{W})\text{C}$  и избыток WC. От предыдущей группы эти сплавы отличаются большей прочностью и лучшей сопротивляемостью вибрациям и выкрашиванию. Они применяются для наиболее тяжелых условий резания (черновая обработка стальных слитков, отливок, поковок). Примером подобных сплавов могут служить сплавы ТТ17К2, ТТ10К8, ТТ20К9.

## 15.5. Стали для измерительного инструмента

Основные свойства, которыми должны обладать эти стали, — высокая износостойкость и постоянство размеров и формы в течение длительного срока службы. К дополнительным требованиям относятся возможность получения высокой чистоты поверхности (до 14-го класса) и мелкая деформация при термообработке. Наиболее широко применяются низколегированные стали X, XГ, XBG, 9XC, обрабатываемые на высокую твердость (HRC = 60—64). В отличие от режущего инструмента, термообработка проводится таким образом, чтобы затруднить процесс старения, который происходит в закаленной стали и вызывает объемные изменения, недопустимые для инструментов высоких классов точности.

Причинами старения служат частичный распад мартенсита, превращение остаточного аустенита и релаксация внутренних напряжений, вызывающая пластическую деформацию. Для уменьшения остаточного аустенита закалку проводят с возможно более низкой температуры. Кроме того, инструмент повышенной точности подвергают обработке холодом при  $-50\ldots -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отпуск проводят в течение 24—48 ч при 120—140  $^{\circ}\text{C}$ . Более высокий нагрев не применяют из-за снижения износостойкости. Инструмент высокого класса точности подвергают неоднократному чередованию обработки холодом и кратковременного (2—3 ч) отпуска.

Плоские инструменты (скобы, линейки, шаблоны) изготавливают из листовых цементуемых сталей 15, 20, 15X, 20X, 12XНЗА или из сталей 50, 55, закаливаемых с поверхности токами высокой частоты. Поскольку неравновесная структура в этих сталях образуется только в поверхностном слое, то происходящие в нем объемные изменения мало отражаются на размерах всего инструмента.

Для инструментов большого размера и сложной формы применяют азотируемую сталь 38ХМЮА.

## 15.6. Штамповые стали

Для обработки металлов давлением применяют инструменты — штампы, пуансоны, ролики, валики и т. д., деформирующие металл. Стали, применяемые для изготовления такого рода инструмента, называют *штамповыми сталями*.

Штамповые стали делятся на две группы: *деформирующие металл в холодном и горячем состояниях*. Условия работы стали при различных видах штамповки сильно различаются между собой.

**Стали для штампов холодного деформирования.** Стали для штампов и другого разнообразного инструмента холодной обработки давлением должны обладать высокой динамической прочностью, твердостью, износостойкостью. Для больших скоростей деформирования, вызывающих разогрев рабочей кромки инструмента до  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , сталям должна быть присуща достаточная теплостойкость. Для штампов со сложной конфигурацией важно обеспечить минимальные объемные изменения при закалке.

В связи с разнообразием условий деформирования, форм и размеров штампов применяют различные стали.

*Низколегированные стали* повышенной износостойкости, так же как и углеродистые У10, У11, У12, используют преимущественно для вытяжных и высадочных штампов, которые из-за несквозной прокаливаемости имеют твердый износостойкий слой и вязкую сердцевину, позволяющую работать при небольших ударных нагрузках.

Вытяжные штампы, подвергающиеся интенсивному износу без динамических нагрузок, после неполной закалки отпускают при  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  на твердость  $\text{HRC} = 58\text{--}61$ . Высадочные штампы и пуансоны, работающие с ударными нагрузками, подвергают отпуску при  $275\text{--}325\text{ }^{\circ}\text{C}$  на твердость рабочей части  $\text{HRC} = 54\text{--}56$ .

*Высокохромистые стали X12, X12M, X12Ф1* обладают высокой износостойкостью, глубокой прокаливаемостью (150–200 мм и более). Они относятся к ледебуритному классу и содержат 16–17 % карбидов  $(Cr, Fe)_7C_3$ . Стали обладают высокой износостойкостью и при закалке в масле мало деформируются, что важно для штампов сложной формы. Молибден и ванадий способствуют сохранению мелкого зерна. Недостаток высокохромистых сталей заключается в трудности обработки резанием в отожженном состоянии ( $HВ = 207–270$ ) и снижении механических свойств в случае резко выраженной карбидной неоднородности, вызывающей снижение прочности и вязкости. Наиболее заметно этот недостаток выражен у стали X12. По этой причине чаще применяют стали X12M и X12Ф1. Эти стали обрабатывают как на первичную, так и на вторичную твердость. На первичную твердость их закалывают с более низких температур (1020–1075 °С) и подвергают низкому отпуску (150–170 °С), сохраняющему высокую твердость ( $HRC = 61–63$ ). Такой режим обеспечивает наибольшую прочность ( $\sigma_{изб} = 240–280$  кгс/мм) при низкой теплостойкости и применяется для большинства штампов и накатных роликов.

Закалку на вторичную твердость применяют для обеспечения теплостойких производств с более высоких температур (1100–1700 °С). Она приводит к пониженной твердости ( $HRC = 48–54$ ) вследствие сохранения большого количества остаточного аустенита (50–80 %). Твердость до  $HRC = 60–62$  повышают 4–6-кратным отпуском при 500–800 °С в результате превращения остаточного аустенита и выделения дисперсных карбидов хрома. При обработке сталей на вторичную твердость теплостойкость увеличивается до 500 °С. Однако вследствие укрупнения зерна при закалке снижаются прочность и вязкость. В связи с этим применение такой обработки ограничено. В основном ее применяют для штампов, работающих при повышенном нагреве больших нагрузок.



Меньшей карбидной неоднородностью обладает *сталь Х6ВФ*, которую используют для инструментов с высокой механической прочностью и сопротивлением изнашиванию: накатные площадки, накатники для холодного накатывания зубчатых колес. При закалке она более склонна к росту зерна, поэтому обрабатывается только на первичную твердость.

*Хромокремнистые стали 4ХС, 6ХС* и стали, дополнительно легированные вольфрамом, — *4ХВ2С, 5ХВ2С, 6ХВ2С*, образуют группу сталей повышенной вязкости для ударного инструмента (зубила, гибочные штампы, обжимные матрицы). Повышение вязкости сталей достигается снижением содержания углерода (до 0,4–0,6 %) и увеличением температуры отпуска. Стали 4ХС и 6ХС отпускают ниже температуры проявления отпускной хрупкости I рода при 240–270 °С на твердость HRC = 52–55. Стали с вольфрамом, которые не чувствительны к отпускной хрупкости II рода, подвергают отпуску в более широком интервале температур: при 200–250 °С (HRC = 53–58) или при 430–470 °С (HRC = 45–50). Эти стали в результате сохранения более мелкого зерна имеют несколько большую вязкость и предназначены для инструментов, работающих с повышенными нагрузками.

***Стали для штампов горячего деформирования.*** К инструменту, деформирующему металл в горячем состоянии, относятся штампы кузнечного производства, которые деформируют металл, предварительно нагретый до высоких температур (1000–1500 °С). В процессе работы штампы подвергаются воздействию сложных напряжений (сжатию, растяжению, изгибу) и истирающему действию горячего металла. Кроме того, при пластической деформации рабочая часть штампа значительно нагревается. При достаточной прочности, износостойкости, вязкости и прокаливаемости эти стали должны обладать также теплостойкостью, окалиностойкостью и разгаростойкостью. Под *разгаростойкостью* понимают ус-

тойчивость к образованию сетки поверхностных трещин, вызываемых объемными изменениями в поверхностном слое при резкой смене температур. Это свойство обеспечивается снижением содержания углерода в стали для повышения пластичности, вязкости, а также теплопроводности, уменьшающей разогрев поверхностного слоя и термические напряжения в нем.

В соответствии с особыми требованиями для штампов горячей обработки давлением применяют легированные стали с содержанием углерода 0,3—0,6 %, которые после закалки подвергают отпуску при 550—680 °С на троостит или троостосорбит.

**Стали для молотовых штампов.** Молотовые штампы имеют большие размеры и работают с ударными нагрузками при относительно невысоком нагреве поверхности (400—500 °С). Для изготовления этих штампов применяют низколегированные стали высокой прокаливаемости с повышенной ударной вязкостью и окалиностойкостью. Из легирующих элементов они содержат молибден и вольфрам, необходимые, как и в конструкционных сталях, для предупреждения развития отпускной хрупкости, которую в больших сечениях нельзя устранить быстрым охлаждением.

**Сталь 5ХНМ** — лучшая в этой группе. Из-за высокой прокаливаемости (400 мм) ее применяют для изготовления крупных штампов. После закалки и отпуска сталь сохраняет высокие механические свойства до 500 °С.

**Стали 5ХГМ и 5ХНСВ** при одинаковой со сталью 5ХНМ прокаливаемостью уступают ей в вязкости из-за замены никеля марганцем или увеличения содержания хрома и кремния. Они предназначены для изготовления средних штампов со стороной 300—400 мм и для крупных (сталь 5ХИСВ) простой формы.

**Стали для штампов горизонтально-ковочных машин и прессов.** Штампы горячей высадки, протяжки и прессования испытывают в работе высокие давления без больших

ударных нагрузок, имеют меньшие размеры, чем молотовые штампы, но нагреваются до более высоких температур. Для сталей этого назначения наиболее важные свойства — теплостойкость и размеростойкость. В случае особо тяжелых условий работы применяют комплексно-легированные стали, которые по составу и структурным превращениям при термообработке сходны с быстрорежущими сталями. Для обеспечения теплостойкости их закаливают с высоких температур и подвергают отпуску, как и в быстрорежущих сталях, что вызывает дисперсионное твердение и вторичную твердость. Для повышения вязкости ее проводят при более высоких температурах на троостит, обеспечивая твердость  $HRC = 45-50$ .

К сталям подобного назначения относятся следующие.

*Стали 3X2B8Ф, 3X2B8* с высоким содержанием вольфрама. Они характеризуются повышенной теплостойкостью, сохраняя твердость  $HRC \geq 45$  и предел текучести  $\sigma_{0,2} = 100 \text{ кгс/мм}^2$  до температур  $650-670^\circ\text{C}$ . Эти стали предназначены для изготовления тяжелонагруженного инструмента, работающего с разогревом поверхности до  $700^\circ\text{C}$ .

*Стали 4X5B2ФС, 4X5B4ФСН, 4X3B2ФМ2* и другие с небольшими добавками вольфрама (молибдена) отличаются повышенной теплостойкостью благодаря более высокой вязкости. Они теплостойки до  $600^\circ\text{C}$ . Присутствие 4–5 % хрома придает им хорошую окалиностойкость и повышенную износостойкость при нагреве. Эти стали предназначены для изготовления инструмента с высокой устойчивостью к резкой смене температур, в частности инструмента высокоскоростной штамповки.

*Нетеплостойкие стали 7X3 и 8X3* повышенной вязкости применяют для изготовления инструмента (пуансонов, матриц) из углеродистых и низколегированных сталей на горизонтально-ковочных машинах. Стали прокаливают в сечениях до 70–80 мм. Повышенную вязкость и твердость

(HRC = 40–50) получают благодаря проведению отпуска при 480–520 °С, что выше температур развития хрупкости.

Кроме изготовления штампов рассмотренные стали используют для производства пресс-форм литья под давлением, работающих в тяжелых условиях, связанных с периодическим нагревом и охлаждением поверхности и воздействием расплавленного металла. Для отливки медных сплавов ( $T_{пл} = 1000$  °С) применяют стали повышенной теплостойкости; алюминиевые и магниевые сплавы ( $T_{пл} = 500–650$  °С); стали повышенной размеростойкости. В последнее время для этой цели применяют также мартенситностареющие стали.

Для пресс-форм, менее нагруженных в тепловом отношении, используют стали 4XB2C, X12, 7X3, 8X3, коррозионностойкую сталь 30X13, конструкционные стали 40X, 30XГС. Для повышения стойкости пресс-формы, так же как и штампы, подвергают азотированию, цианированию, борированию и хромированию.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Перечислите требования к свойствам инструментальных сталей и сплавов.*
2. *Сопоставьте свойства углеродистых и легированных инструментальных сталей.*
3. *Какие элементы являются легирующими для быстрорежущей стали?*
4. *На какие группы подразделяются твердые сплавы?*
5. *Сформулируйте требования к сталям для изготовления измерительного инструмента и штампов.*

## Глава 16

КОНСТРУКЦИОННЫЕ  
ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ  
С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

К сталям и сплавам с особыми физическими свойствами относятся стали, обладающие каким-нибудь резко выраженным свойством: нержавеющие, жаропрочные, теплоустойчивые, износоустойчивые, с особыми магнитными и электрическими свойствами и т. д.

В ряде случаев эти стали содержат такое большое количество легирующих элементов, что их нужно причислять не к сплавам железа, то есть не к сталям, а к сложным многокомпонентным сплавам. Однако четкой границы между такими сплавами и сталями нет. Поэтому их рассматривают вместе со сталями. Более того, некоторые из таких сплавов могут вовсе не содержать железа, хотя по свойствам и назначению они близки к сплавам, в которых основной элемент — железо.

## 16.1. Коррозиестойкие стали

*Коррозией* называют разрушение металлов под воздействием окружающей среды. При этом металлы часто покрываются продуктами коррозии. В результате воздействия внешней среды механические свойства металлов резко ухудшаются.

Различают *химическую* и *электрохимическую коррозию*, вызываемую действием электролитов (кислот, щелочей и солей). К электрохимической коррозии относятся также атмосферные и почвенные коррозии.

Электрохимическая коррозия развивается в результате работы большого числа короткозамкнутых гальванических элементов, образующихся вследствие неоднородности металла (наличие различных фаз, ликвации, границ зерен), или внеш-

ней среды (различная концентрация ионов в электролите, разные температуры и т. д.).

Различают коррозию под напряжением, которая возникает при одновременном воздействии коррозионной среды и напряжения растяжения. Она является причиной коррозионного растрескивания.

Стали, устойчивые против электрохимической коррозии, называются *нержавеющими*.

Скорость протекания процесса электрохимической коррозии определяется величиной электрического тока, возникающего в коррозионном элементе. Коррозионный ток можно уменьшить путем легирования.

Хром имеет отрицательный электрохимический потенциал, но в окислительных средах (влажная атмосфера, азотная кислота) переходит в пассивное состояние, то есть приобретает высокую коррозионную стойкость за счет возникающих на поверхности тонких оксидных пленок или пленок адсорбированного кислорода. При легировании хромом сталь становится пассивной, приобретая на воздухе и в окислительных средах положительное значение электрохимического потенциала.

**Хромистые нержавеющие стали.** Хромистые стали (1X13, 2X13, 3X13, 4X13, X17, X28) коррозиестойки во влажной атмосфере и водяном паре, в водопроводной и речной воде. Все хромистые стали, в которых хрома более 12,5 %, можно считать коррозиестойкими. При содержании хрома 13, 17 и 25 % стали являются не только коррозиестойкими, но и жаростойкими. Стали с 13 % хрома содержат углерода меньше 0,4 %. Первая цифра в марке указывает содержание углерода в *сотых* долях процента.

Хром существенно изменяет критические точки стали, смещая эвтектоидную точку в области низких температур.

Хром образует с углеродом карбиды.

Наличие карбидов в стали увеличивает ее химическую неоднородность, а следовательно, способствует понижению коррозионной стойкости. Поэтому содержание углерода в коррозиестойких сталях невелико и обычно не превышает

0,4 %. В зависимости от содержания углерода и хрома хромистые коррозионностойкие стали имеют разную структуру. По структуре их обычно классифицируют в нормализованное состояние.

Химический состав и структурный класс в нормализованном состоянии некоторых коррозионностойких хромистых сталей приведены в табл. 16.1.

Таблица 16.1

**Состав и назначение распространенных марок высокохромистых коррозионностойких (нержавеющих) сталей**

Марка стали	Класс	Тип стали (Cr, %)	C, %	Cr, %	Примерное назначение
08X13	Ф	13	≤0,08	12–14	Изделия, устойчивые к слабоагрессивным средам (атмосфера, растворы солей и т. п.)
12X13	М–Ф		0,09–0,15	12–14	
20X13	Ф		0,16–0,25	12–14	
30X13	М	13	0,26–0,35	12–14	Хирургический, мерительный инструмент, пружины, иглы
40X13	М		0,36–0,45	12–14	
12X17	Ф	17	≤0,12	16–18	Оборудование химической, пищевой, легкой промышленности
08X17T	Ф		≤0,08	16–18	То же для сварных конструкций
15X25T	Ф	25–28	≤0,15	24–27	То же для сильно агрессивных сред, 15X25T — для сварных конструкций
15X28	Ф	25–28	≤0,15	27–30	

Примечания: 1. Классы сталей: Ф — ферритный, М–Ф — мартенситно-ферритный, М — мартенситный. 2. Большинство сталей содержит ≤0,08 % Mn, ≤0,08 % Si. Во всех сталях ≤0,025 % S; ≤0,030–0,035 % P. В стали 08X17T содержится 0,4–0,8 % Ti, в стали 15X25T — 0,75–0,9 % Ti. 3. Стали 08X13, 12X13, 20X13 используются и как жаропрочные; стали 12X13, 12X17 — как жаростойкие; стали 08X17T, 15X25T, 15X28 — преимущественно как жаростойкие.

**Хромоникелевые нержавеющие стали.** Роль никеля в коррозионноустойчивых сталях чрезвычайно велика. Никель расширяет область аустенита. Низкоуглеродистые стали, содержащие более 24 % Ni, при комнатной температуре имеют полностью аустенитную структуру. Дополнительное легирование никелем высокохромистых сталей также позволяет при определенном соотношении хрома и никеля получить стали с полностью аустенитной структурой.

**Стали аустенитного класса.** Такие стали обладают более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с хромистыми сталями. Особенно хорошо они сопротивляются коррозии в атмосферных условиях, в том числе и в загрязненной атмосфере промышленных районов, содержащей сульфидные газы. Никель повышает коррозионную стойкость сталей во многих органических средах и в  $H_2SO_4$ .

Существенным преимуществом аустенитных сталей по сравнению с ферритными является их технологичность; эти стали обладают высокой пластичностью и вязкостью, хорошо свариваются. Из них можно изготавливать листовые детали методом холодной штамповки с глубокой вытяжкой, применяют особые способы сварки. Однако аустенитные стали имеют невысокую прочность.

Аустенитные хромоникелевые стали широко используют в конструкциях, изготавливаемых из листовой стали штамповкой и сваркой (обшивки, оболочки, емкости, трубопроводы); в самолето-, машино-, приборо- и судостроении; химической промышленности; архитектуре; быту.

Аустенитные хромоникелевые стали содержат большое количество дефицитного никеля, поэтому дороги. Их по возможности стремятся заменить безникелевыми или малоникелевыми сталями. Для замены никеля используют аустенитобразующие элементы — марганец и азот. Примером экономного легирования аустенитных сталей могут служить стали 10X14AGH15 (0,15—0,25 % Ni) и 10X14Г14Н4Т, применяемые в слабоагрессивных средах для оборудования пищевой промышленности.

**Стали 15X17AG14, 12X17Г9АН4** устойчивы против коррозии в органических кислотах, серной кислоте и морской воде.



Эти свойства повышает также молибден. Для использования в аналогичных условиях применяют и стали 10X17H13M2T, 10X17H13M3T, которые сочетают в себе высокую коррозионную стойкость с хорошей технологичностью, начиная от выплавки и кончая изготовлением сварных конструкций и аппаратов.

**Хромоникелевые стали аустенитно-ферритного класса.** Используются как заменители аустенитных сталей, так как, обладая теми же механическими и достаточно высокими коррозионностойкими свойствами в окислительных средах, они более технологичны и содержат меньше дефицитного никеля. Эти стали характеризуются повышенным содержанием хрома по сравнению с аустенитными сталями типа 18 % Cr; 9–10 % Ni.

*Аустенитно-ферритными* являются стали 12X21H5T, 08X22H6T, 08X20H14C2 и др.

Преимуществами аустенитно-ферритных сталей по сравнению с аустенитными являются меньшее содержание никеля, повышенная прочность, меньшая склонность к межкристаллической коррозии, хорошая свариваемость. Как и аустенитные стали, они не упрочняются при закалке. После закалки (проводят для устранения наклепа, уменьшения склонности к межкристаллитной коррозии) эти стали имеют двухфазную аустенитно-ферритную структуру.

Аустенитно-ферритные стали используют в качестве заменителей аустенитных сталей в различных областях современной техники, особенно в машиностроении, судостроении, самолетостроении и др.

Недостатком этих сталей, ограничивающим их применение, можно считать нестабильность свойств при колебании химического состава в пределах марки, что вызывает изменения количественного соотношения аустенита и феррита, а также охрупчивание при нагреве (например, сталь 12X21H5T).

**Стали аустенитно-мартенситного класса.** Эти стали используются в тех случаях, когда наряду с высокой коррозионной стойкостью требуется повышенная прочность. Обладая достаточно высокими коррозионностойкими свойствами в окислительных средах, они значительно прочнее коррозионностойких сталей аустенитного класса.

Недостатком сталей мартенситно-аустенитного класса, например стали 09X15H8, следует считать сложность термообработки. После закалки с 975 °С сталь обрабатывают холодом (от -50 до -75 °С) и подвергают отпуску при 450–500 °С для снятия внутренних напряжений.

## 16.2. Кислотостойкие стали и сплавы

*Кислотостойкими* называются стали и сплавы, обладающие высоким сопротивлением коррозии в агрессивных кислотных средах: азотной, серной, соляной, фосфорных кислотах разной концентрации и при разных температурах.

В качестве кислотостойких применяют хромоникелевые аустенитные стали, дополнительно легированные молибденом и медью при одновременном увеличении содержания в них никеля.

Содержание углерода в таких сталях не превышает 0,1 %. Для уменьшения склонности к межкристаллитной коррозии в них вводят дополнительно титан, количество которого зависит от содержания углерода.

Наиболее высокой коррозионной стойкостью в агрессивных кислотных средах обладают никелевые сплавы: Ni-Mo; Ni-Cr; Ni-Cr-Mo. Примером никелемолибденового сплава является Н70МФ (0,02 % С; 25–27 % Мо; 1,4–1,7 % V), который применяют для изготовления сварных емкостей, работающих в солянокислых средах и в растворах серной и фосфорной кислот. Никелевые сплавы, легированные хромом (до 50–60 %), имеют высокое сопротивление коррозии в растворах азотной кислоты, в том числе и с добавлением ионов фтора.

Сплавы никеля с хромом и молибденом (например, ХН65МВ: 0,03 % С; 14–16,5 % Cr; 15–17 % Мо; 3–4,5 % W) могут быть использованы для работ в смесях никеля, в растворах очищающих солей и других средах.

Для особо агрессивных сред применяют сплавы на никелевой основе типа «хастеллой» (80 % Ni + 20 % Мо) с дополнительным легированием.

Эти сплавы обладают очень высокой коррозионной стойкостью в тех средах, где, кроме них, устойчивы лишь немногие металлы (например, в кипящей фосфорной кислоте концентрации до 50 %, в кипящей соляной кислоте концентрации до 20 % и др.).

Сплавы типа «хастеллой» обладают высокими механическими свойствами, которые могут быть улучшены термообработкой (закалка + старение) при 800 °С. При этом  $\sigma_B = 1200$  МПа и твердость HB ~ 360.

Недостатком сплавов является их склонность к межкристаллитной коррозии, поэтому содержание углерода в них должно быть минимальным.

В кипящей кислоте концентрации до 20 % может работать сплав «хастеллой», до любой концентрации — тугоплавкие металлы.

### 16.3. Коррозионностойкие чугуны

Такие чугуны стойки во многих агрессивных средах.

*Кремнистые чугуны.* Относятся к кислотостойким сплавам. Кремний, как и хром, расширяет область применения феррита. И сплавы, содержащие до 14,5 % Si, имеют структуру однородного (водного) раствора. В кремнистых чугунах содержится всего лишь 0,3—0,8 % углерода, при большем его содержании возможно выделение углерода в виде графита. В окислительных средах на поверхности образуется прочная пленка  $\text{SiO}_2$ , которая восстанавливается при незначительных повреждениях. Сплав Ф15, называемый также антихлором, содержит 3,5—4,5 % Мо. В результате добавления молибдена сплав устойчив в 10—30%-ных растворах соляной кислоты при температуре до 90 °С. Все кремнистые чугуны обладают высокой окалиностойкостью. Из кремнистых чугунов изготавливают центробежные насосы, распылители кислот, кра- ны, котлы и т. д.

*Никелевые чугуны.* Содержат около 1 % Ni. Эти чугуны стойки в расплавах солей и концентрированных растворах щелочей. С увеличением содержания никеля коррозионная стойкость чугунов увеличивается. Состав никелевых чугунов может быть и более сложным — никелекремнистый аустенитный чугун содержит, %: 1,7–2 C; 1,8–3 Cr; 5–7 Si; 16–20 Ni.

*Хромистые чугуны.* Содержат 26–30 % Cr. Структура хромистых чугунов — твердый раствор хромистого феррита и эвтектические карбиды. Хромистые чугуны ХЗ4 имеют высокую твердость (HB = 325–400), хорошо сопротивляются износу, но плохо обрабатываются резанием.

Хромистые чугуны стойки в окислительных средах: в азотной кислоте любой концентрации при 20 °С и 40%-ной кипящей; в концентрированной серной кислоте и других средах. Окалиностойкость сохраняется до 1000–1100 °С.

Из хромистых чугунов изготавливают детали и аппаратуру для азотной промышленности искусственных удобрений. Используют их и как жаростойкие материалы — для изготовления мелкого оборудования.

## 16.4. Жаропрочные стали

*Жаропрочность* — способность металлов сопротивляться пластической деформации и разрушению при высоких температурах.

Стали, предназначенные для работы при высоких температурах, разделяют на теплостойкие, работающие в нагруженном состоянии при температурах до 600 °С; жаропрочные, работающие в нагруженном состоянии при более высоких температурах (до 850 °С) и обладающие при этом достаточной жаростойкостью; окалиностойкие (жаростойкие), работающие в слабонагруженном состоянии при температурах выше 550 °С.

В группу *теплостойких сталей* входят углеродистые, низколегированные и хромистые стали с различным допол-

нительным легированием. По структуре в нормализованном состоянии эти стали относятся к перлитному или мартенситному классам.

К **жаропрочным сталям** относятся высоколегированные стали аустенитного класса на хромоникелевой или хромоникельмарганцовистой основе, дополнительно легированные другими элементами.

Критериями оценки жаропрочности являются кратковременная и длительная прочность, ползучесть.

Рабочие температуры современных жаропрочных сплавов составляют примерно  $(0,45-0,8)T_{пл}$ . Требуемые сроки службы жаропрочных сплавов изменяются от одного-двух часов до сотен (авиационные газовые турбины) и многих тысяч часов (стационарные газовые и паровые турбины).

При температурах ниже  $(0,45-0,5)T_{пл}$  прочность сплавов определяется стабильностью их структуры. При более высоких температурах стабильность дислокационной структуры нарушается.

Жаропрочные сплавы, предназначенные для работы при высоких температурах (до  $700-950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), создают на основе железа, никеля, кобальта, а для работы при очень высоких температурах (до  $1200-1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) — на основе молибдена и других тугоплавких металлов. При температурах до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  чаще используют стали на основе  $\alpha$ -твердого раствора, а при более высоких температурах — стали на основе аустенитной структуры.

**Перлитные жаропрочные стали.** К этой группе относятся котельные стали и силххромы.

**Котельные стали.** Содержат небольшое количество углерода (около  $0,15-0,20\%$ ). Это обусловлено тем, что детали котлов соединяют главным образом сваркой. Для котлов низких параметров применяют обычные низкоуглеродистые стали (сталь 20). Для котлов высоких параметров используют низкоуглеродистые и низколегированные стали.

После нормализации низкоуглеродистые стали имеют структуры: легированный феррит и перлит (стали 16М, 12МХ)

или феррит и бейнит, а после закалки — мартенсит или мартенсит с бейнитом. Перлитные стали чаще подвергают нормализации и отпуску при 600–750 °С. После такой обработки сталь имеет структуру тонкопластинчатого перлита (сорбита) и обладает более высокой длительной жаропрочностью, чем после закалки и высокого отпуска, когда структура — зернистый сорбит.

Главным преимуществом легированных котельных сталей перед углеродистыми является их хорошее сопротивление ползучести. Предел ползучести является главной характеристикой котельных сталей.

**Сильхромы.** Стали, легированные Cr и Si, называют сильхромами. Эти стали содержат хром, кремний и молибден: 15X5, 15X5M, 40X9C2, 40X10C2M. Содержание углерода в них колеблется от 0,15 до 0,45 %. Высокое содержание хрома и кремния делает эти стали не только жаропрочными, но и жаростойкими. Недостатком сильхромов является их склонность к отпускной хрупкости II рода.

Из сильхромов изготавливают клапаны двигателей внутреннего сгорания, регуляторы, теплообменники и другие подобные изделия, работающие при температурах до 700–800 °С. Сильхромовые стали закалывают на воздухе.

**Аустенитные жаропрочные стали.** Высоколегированные аустенитные коррозионностойкие стали могут быть использованы и как жаропрочные, применяемые для работы до 700–800 °С. В жаропрочных аустенитных сталях содержится 10–20 % Ni и 15–20 % Cr.

По структуре такие стали подразделяются на две группы:

- аустенитные стали, имеющие гомогенную структуру и поэтому не упрочняемые термообработкой (содержание углерода в них минимально);

- аустенитные стали с гетерогенной структурой. Их прочность можно повышать термообработкой — закалкой и старением.

К *первой* из названных групп относят стали 17X18H9, 09X14H19B2BP1, 12X18H12T, 20X25H20C2 и т. д. При нагреве эти стали не испытывают фазовых превращений. Леги-

рование ниобием увеличивает длительную прочность и сопротивление ползучести. Для создания большей однородности аустенитные стали подвергают закалке при 1050–1100 °С в воде, а затем для стабилизации структуры проводят отпуск при 750 °С.

Ко второй группе относят стали типа 37X12H8Г8МФБ, 45X14H14B2M, 10X11H20T3P и др. Эти стали также закаливают с 1050–1100 °С, затем проводят отпуск-старение при 600–750 °С. В процессе выдержки при этих температурах в дисперсном виде выделяются карбиды, карбонитриды и интерметаллидные фазы, вследствие чего прочность стали растет.

Жаропрочность гетерогенных аустенитных сталей выше, чем гомогенных, но свойства гетерогенных сталей нестабильны во времени. Аустенитные жаропрочные стали пластичны и вязки. Они плохо обрабатываются резанием. Эти стали используют для изготовления паровых котлов высоких параметров, сопловых аппаратов реактивных двигателей и др.

**Мартенситные жаропрочные стали.** В состав этих сталей входят хром и вольфрам, которые повышают температуру рекристаллизации и, образуя карбиды, улучшают жаропрочность. Рабочие температуры этих сталей могут достигать 580–600 °С.

Для получения оптимальной жаропрочности высокохромистые стали закаливают на мартенсит. После отпуска структура сталей — сорбит и троостит.

Сильхромы относят также к классу мартенситных сталей.

## **16.5. Жаропрочные сплавы на основе никеля и тугоплавких металлов**

Детали и установки, работающие при температурах выше 700 °С, изготавливают из сплавов на основе никеля, кобальта и тугоплавких металлов.

Сплавы на основе никеля (содержащие более 55 % Ni) по жаропрочным свойствам превосходят жаропрочные стали. Их рабочие температуры составляют 800–1000 °С. Примерно такими же, а иногда и более высокими свойствами обладают сплавы на кобальтовой основе. Никелевые и кобальтовые сплавы имеют не только высокую жаропрочность, но и высокую жаростойкость.

**Сплавы на основе никеля.** Никелевые сплавы используют в деформированном и литом состоянии. По структуре они разделяются на гомогенные (нихромы, инконели) и гетерогенные (нимоники). Общим для всех сплавов на основе никеля является минимальное содержание углерода (0,06–0,12 %).

**Нихромы.** Основой этих сплавов является никель, а основным легирующим элементом — хром (ХН60Ю, ХН78Т).

Нихромы не обладают высокой жаропрочностью, они очень жаростойки. Поэтому их применяют для ненагруженных деталей, работающих в окислительных средах, в том числе и для нагревательных элементов.

**Нимоники.** В состав этих сплавов кроме хрома добавляют титан, алюминий, молибден, вольфрам и т. д. При термобработке они образуют с никелем (кобальтом, хромом) дисперсные интерметаллидные фазы, упрочняя нимоники. Типичная термообработка — закалка при 1050–1100 °С на воздухе, отпуск-старение при 600–800 °С в течение 12–16 ч.

**Кобальтовые сплавы.** Применяют редко вследствие дороговизны кобальта, хотя они по своим свойствам превосходят сплавы на основе никеля. Кобальтовые сплавы имеют высокую коррозионную стойкость и хорошее сопротивление истиранию. Из этих сплавов изготавливают детали методом литья. Их применяют также для изготовления лопаток сопловых аппаратов реактивных двигателей.

**Жаропрочные сплавы на основе тугоплавких металлов.** Сплавы на основе тугоплавких металлов обладают максимальной жаропрочностью — до 2500 °С.

**Молибден и его сплавы.** Сплавы на основе молибдена применяют более часто по сравнению с другими тугоплавки-



ми сплавами. В качестве легирующих добавок для повышения температур рекристаллизации в них вводят титан, цирконий, ниобий.

Обладая высокой жаропрочностью, молибден и его сплавы заметно окисляются начиная с 450 °С. Поэтому необходимо защищать их от окисления. Основной способ защиты — силицирование. На поверхности образуется слой  $\text{MoSi}_2$  толщиной 0,03—0,04 мм. Этот слой полностью защищает сплав от окисления при 1100—1200 °С. При 1700 °С силицированные детали могут работать до 30 ч.

**Вольфрам и его сплавы.** Вольфрам — наиболее тугоплавкий металл. Его используют в качестве легирующего элемента в сталях и сплавах, в композиционных материалах (медь + волокно вольфрама), в электротехнике и электронике (эмиттеры, нагреватели в вакуумных приборах и т. п.). Из вольфрама изготавливают эрозионные вставки в критические сечения сопел двигателей.

В качестве легирующих элементов к вольфраму добавляют 0,25—0,4 % Mo; 1,5—1,2 % Ta; 3—3,5 % Re. Сплавы вольфрама с рением сохраняют пластичность до -196 °С.

Наибольшую жаропрочность вольфрамовые сплавы приобретают при добавлении 1—2 %  $\text{ThO}_2$ . Как и сплавы молибдена, сплавы вольфрама не обладают жаростойкостью при температурах выше 500 °С.

## 16.6. Жаростойкие стали

В результате взаимодействия с окружающей газовой или парообразующей средой большинство металлов и сплавов подвергаются газовой коррозии. Этот процесс зависит от температуры, состава газовой среды и состава металла. В большинстве случаев газовая коррозия происходит в результате взаимодействия металла с кислородом.

Способность металла сопротивляться окислению в газовой среде при высоких температурах называется *жаростойкостью* или *окалиностойкостью*.

Жаростойкие сплавы — преимущественно сплавы железа с хромом. Для увеличения жаростойкости добавляют алюминий и кремний.

Кроме силхромов используют еще стали, легированные Cr и Al. Кремний придает стали жаростойкость в основном в окислительной атмосфере. В присутствии газов, содержащих большое количество паров воды, и при высоких температурах эти сплавы менее жаростойки, чем хромистые и хромоникелевые.

Молибден в сталь X16M вводится для устранения тепловой хрупкости. Эта сталь способна к самозакаливанию на воздухе. Поэтому после каждой операции горячей обработки необходим обжиг при  $T = 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Стали 4X9C2 и 10X13C10* обладают высокой жаростойкостью; их применяют для изготовления клапанов двигателей внутреннего сгорания и печного оборудования. Закаливают их с  $975\text{ }^{\circ}\text{C}$  в масле с последующим отпуском при  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  с быстрым охлаждением на воздухе.

*Сталь 08X17T* относится к ферритному классу; ее применяют в теплообменниках. При добавках кремния становится стойкой даже в среде, содержащей серу и ее соединения.

*Стали 12XH9T, 36X18H25C2* относятся к аустенитному классу, обладают хорошими технологическими свойствами и повышенной механической прочностью при высоких температурах. Из-за добавок кремния обладают высокой жаростойкостью, особенно в средах с повышенным соединением серы. Применяют эти стали для изготовления печных конвейеров и других нагруженных деталей, а также сопловых аппаратов и паровых турбин в газотурбинных установках.

Широкое применение в промышленности находит жаростойкий чугун как наиболее дешевый и доступный материал. Для деталей, работающих до  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , могут использоваться простые серые чугуны при условии получения мелкого графита; до  $450\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$  удовлетворительными характеристиками обладают модифицированный и ковкий чугуны. Незначительное легирование хромом (иногда совместно с никелем) позволяет повышать температуру ис-

пользования чугунов до 700 °С. При выборе чугуна помимо жаростойкости необходимо принимать во внимание изменение механических свойств в зависимости от рабочей температуры, а также исходить из экономической целесообразности его применения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие стали относят к сталям с особыми свойствами?
2. Какие стали называют нержавеющейими?
3. Назовите основные легирующие элементы, обеспечивающие сталям высокие антикоррозионные свойства.
4. Какой легирующий элемент расширяет область аустенита и какой элемент является его заменителем в нержавеющейих сталях?
5. Перечислите виды сталей специального назначения.
6. Какие стали называют жаропрочными, а какие — жаростойкими? Чем они отличаются по своему составу?

## Глава 17

# СТАЛИ И СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

## 17.1. Магнитные стали и сплавы

Из всех металлов железо, никель, кобальт (также гадолиний при температурах ниже 0 °С) обладают ферромагнетизмом. Во внешнем магнитном поле эти металлы сильно намагничиваются. Способность металлов намагничиваться широко используют в технике.

Важнейшими характеристиками, определяющими магнитные свойства, являются остаточная индукция  $B_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$ .



Магнитные стали и сплавы по назначению подразделяются на *магнитомягкие* и *магнитотвердые*, различающиеся значениями основных магнитных характеристик, а также формой петли гистерезиса. Среди них немало сплавов, относящихся к сплавам с повышенной чистотой.

**Магнитомягкие материалы.** Для сплавов этой группы характерны малая коэрцитивная сила  $H_c$ , высокая магнитная проницаемость  $\mu$  и узкая петля гистерезиса (рис. 17.2). Эти сплавы должны иметь высокое удельное сопротивление, с увеличением которого уменьшаются потери на паразитные вихревые токи.

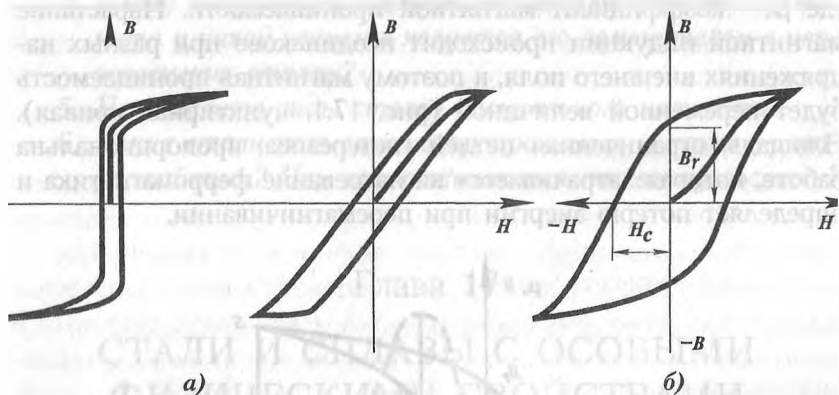


Рис. 17.2. Гистерезисные кривые для магнитомягкого (а) и магнитотвердого (б) сплавов

В зависимости от показателей ферромагнитных свойств и областей применения магнитомягкие материалы подразделяются на *низкочастотные*, *высокочастотные* и *материалы с особыми магнитными свойствами*.

**Техническое железо.** Наиболее простым по составу магнитомягким материалом является чистое железо. Чем меньшее количество примесей в нем содержится, тем выше магнитная проницаемость. Недостатком является низкое

электросопротивление. Наклеп, увеличивая коэрцитивную силу, снижает магнитную проницаемость. Поэтому железо и кремнистые стали всех марок используют в отожженном состоянии.

*Электротехническую сталь* в зависимости от применения делят на динамную и трансформаторную. Эти стали содержат менее 0,1 % углерода и 0,8 % кремния. Трансформаторная сталь более пластичная и менее магнитомягкая. Кремний образует с железом твердый раствор, тем самым увеличивая электросопротивление (кремнистые электротехнические стали относятся к ферритному классу), и уменьшает склонность стали к росту зерна, что, в свою очередь, увеличивает магнитную проницаемость.

Особо чистые сорта железа после специальной обработки также имеют высокую магнитную проницаемость и малую коэрцитивную силу, но обладают низким электросопротивлением и имеют большие потери на вихревые токи. Такое железо можно применять в качестве магнитомягкого материала для изготовления сердечников, полюсных наконечников электромагнитов и др.

Магнитомягкое железо и кремнистые стали маркируют буквой Э. Для железа далее следуют буквы А, характеризующие степень чистоты по примесям: Э, ЭА, ЭАА. Электротехническую кремнистую сталь маркируют так: Э11, Э12 и т. д., где первая цифра показывает содержание кремния в процентах, вторая — гарантированные электрические и магнитные свойства.

*Железоникелевые сплавы (пермаллоу)*. В ряде случаев требуются сплавы с высокой начальной магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. Такие сплавы называются *пермаллоями*. Это сплавы железа с никелем (38—85 % Ni), часто с добавкой молибдена (3,2—3,8 %). Магнитная проницаемость этих сплавов существенно зависит от состава и термической обработки. Наиболее высокую начальную магнитную проницаемость сплав получает при высокотемпературном нагреве в атмосфере водорода (для укрупнения зерна,

удаления примеси углерода, устранения остаточных напряжений). Охлаждение в магнитном поле повышает магнитные характеристики.

Состав пермаллоев техническими условиями не оговаривается. Марка указывает лишь примерный состав сплава, но магнитная характеристика должна быть обеспечена.

Первые две цифры в маркировке показывают содержание никеля в процентах; буква, следующая после буквы П, — дополнительное легирование (Х — хром, С — кремний, М — молибден). В зависимости от фактических магнитных свойств сплав может быть высшего качества (с буквой А) или обычного качества (без буквы А).

**Прочие магнитомягкие сплавы.** *Алсифер* — сплав системы «железо—алюминий—кремний». Он обладает высокой магнитной проницаемостью в слабых полях и имеет небольшую коэрцитивную силу. Алсифер по сравнению с пермаллоем является дешевым материалом, так как не содержит дефицитных элементов. Однако алсифер хрупок, из него нельзя изготавливать листы. Поэтому его применяют в виде порошков. Детали из алсифера можно изготавливать только фасонным литьем.

*Пермендюр* — сплав железа с кобальтом и ванадием (50 % Со; 1,8 % V; остальное — железо). Характеризуется высокой индукцией насыщения и повышенной стабильностью во времени, обратимой магнитной проницаемостью. Применяют для изготовления приборов при необходимости сконцентрировать в небольшом пространстве мощный поток силовых линий.

*Термаллой* — сплав, магнитная индукция которого весьма резко изменяется в интервале температур от  $-60$  до  $+50$  °С. Применяют для автоматической корректировки погрешностей магнитоэлектрических приборов. Практическое значение получили сплавы с 30 % Ni, остальное — железо (термаллой) и с 30 % Cu, остальное — железо (кальмаллой).

**Ферриты.** Другим существенным фактором, позволяющим резко сократить электрические потери, является по-

вышение удельного электросопротивления самого ферромагнетика. Высокое электрическое сопротивление имеют магнитные материалы, называемые *ферритами*, которые играют исключительно важную роль в современной электронике.

Ферриты представляют собой магнитные материалы, получаемые из оксидов методом порошковой металлургии. Они обладают ценными свойствами. К ним в первую очередь следует отнести совмещение в одном материале свойств ферромагнетика и диэлектрика. Удельное электросопротивление у некоторых ферритов очень высоко и достигает  $10^{12}$  Ом/см (у металлов оно порядка  $10^{-5}$  Ом/см). Это определяет возможность их применения в устройствах, работающих в области высоких и сверхвысоких частот.

Технология производства ферритов проста и может быть легко автоматизирована, поэтому себестоимость ферритных сердечников значительно ниже наборных металлических сердечников.

Ферриты представляют собой двойные оксиды металлов. Особенно большое значение имеют ферриты, выражаемые химической формулой  $MeOFe_2O_3$ , где  $Me$  — двухвалентный ион металла (Fe, Ni, Co, Mg, Zn и др.). Эти ферриты имеют кубическую решетку типа шпинели ( $MgOAl_2O_3$ ) и поэтому называются *шпинелидами*. Применяют и ферриты другого типа:  $MeO_6Fe_2O_3$  (гексаферриты) или  $3Me_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$  (гранаты) и др.

**Магнитотвердые сплавы.** Магнитотвердые материалы используют для изготовления постоянных магнитов различного назначения. Они имеют большую остаточную индукцию, высокую коэрцитивную силу и небольшую магнитную проницаемость. Для них характерна широкая петля гистерезиса (см. рис. 17.2). Важнейшей характеристикой этих сплавов является максимальная удельная магнитная энергия (отнесенная к  $1\text{ м}^3$  объема магнита)  $W_{\max}$ , Дж/м<sup>3</sup>. Большие значения  $W_{\max}$  соответствуют высоким значениям



остаточной индукции, коэрцитивной силе и большей выпуклости кривой размагничивания.

Сплавы для постоянных магнитов удобно классифицировать по технологии производства: деформируемые, литые, спеченные и прессмагниты.

*Деформируемые сплавы.* Стали, используемые для постоянных магнитов, должны содержать большое количество углерода, который обязательно должен находиться в твердом растворе; сталь должна быть закалена в мартенсит.

Для достижения необходимых свойств, присущих магнитотвердым материалам, технологию производства этих материалов рассчитывают так, чтобы в максимальной степени зафиксировать неравновесное структурное состояние ферромагнетика с высокими внутренними напряжениями. Для этого проводят такие виды обработки, как закалка и старение, искажение кристаллической решетки, выделение дисперсных фаз и измельчение зерна.

Наиболее простыми по составу и дешевыми являются высокоуглеродистые стали У8–У10, применяющиеся для изготовления мелких неответственных магнитов. Более качественными являются хромистые стали ЕХ3, ЕХ5К5, ЕХ9К15М2. (Буква Е в маркировке обозначает магнитотвердую сталь.) Добавка кобальта значительно повышает магнитные свойства стали.

Другая группа деформируемых сплавов практически не содержит углерода и принадлежат в основном к системам Fe–Co–Mo (комоль), Cu–Ni–Co (кунико), Fe–V–Co (викаллой) и др. Эти сплавы обладают высокой пластичностью, и из них легко получают проволоки, ленты, полосы. В основном их применяют для изготовления активной части роторов гистерезисных двигателей, лент и проволок для магнитной записи, магнитов сложной формы и тонких стрелок.

*Литые сплавы.* К этой группе относятся наиболее распространенные сплавы для постоянных магнитов на основе системы Fe–Ni–Al (15–25 % Ni; 8–15 % Al) с дополнительным введением Co, Cu и других компонентов. Эти сплавы отно-

сятся к дисперсно-твердеющим. Более 80 % общего количества постоянных магнитов изготавливают из сплава данной системы. Наилучшие сплавы этой группы имеют очень большую величину магнитной мощности. Их достоинством является также высокая коэрцитивная сила, которая на порядок выше, чем у углеродистой и хромистой сталей.

Магниты из этих сплавов получают методом точного литья. Недостатком литых сплавов является большая твердость и хрупкость, что делает практически невозможным применение всех видов обработки этих сплавов, кроме шлифования.

*Спеченные материалы.* Мелкие магниты изготавливают методом спекания. В этом случае используют порошки железа, никеля, алюминия и других легирующих элементов высокой чистоты. Спеченные магнитотвердые сплавы имеют ряд преимуществ перед литыми сплавами: они обладают повышенной прочностью, что объясняется малой величиной зерна; не образуют усадочных раковин, обеспечивают более точные размеры, а также лучшее качество поверхности.

Порошковые сплавы системы Fe—Ni—Al можно изготовить из порошка измельченного литого сплава или из порошков элементов, входящих в эти сплавы, путем прессования и спекания порошков при высокой температуре (1300 °С для спекания порошков металлов) в атмосфере водорода или высоком вакууме во избежание окисления. При спекании происходит уменьшение размеров на 10–15 %.

Успешное развитие металлокерамических магнитов привело к тому, что в настоящее время они по своим магнитным свойствам мало уступают литым магнитам того же состава. Маркируются такие сплавы буквами ММК (магнит металло-керамический) и цифрами, обозначающими порядковый номер сплава (ММК1, ММК7, ММК11).

Методом спекания получают магниты и из магнитотвердых ферритов. По своей природе они обладают магнитной индукцией, но чрезвычайно большой коэрцитивной силой,

что позволяет использовать их в качестве магнитотвердых материалов. Из-за дешевизны и высоких магнитных свойств наиболее широкое применение получили бариевые ферриты ( $\text{BaO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

В последние годы привлекают внимание новые магнитные материалы, представляющие собой соединения редкоземельных элементов с Co, Fe, Cu. Лучшими свойствами обладают магниты  $\text{Sm}(\text{CoC}_4)_5$ . Магниты из этих сплавов чаще всего изготавливают прессованием измельченного сплава в магнитном поле.

**Прессмагниты.** Существуют и способы изготовления магнитов прессованием смеси порошка магнитотвердого материала с термореактивной смолой. В этом случае не требуется спекания и получается очень высокая точность магнитов. Магниты, изготовленные таким способом, называют *магнитопластиками*. Магнитопласты используют только в некоторых специальных областях. Это связано с тем, что по сравнению с литыми и спеченными магнитами они обладают более низкой магнитной мощностью из-за меньшего коэффициента заполнения ферромагнитным материалом.

**Немагнитные стали.** В электрическом машиностроении от материала иногда требуются немагнитность ( $\mu < 1,05$ ) и механическая прочность одновременно. Для этой цели применяют немагнитные аустенитные стали. Аустенитные нержавеющие стали или износоустойчивые стали пригодны как немагнитные, если по прочностным свойствам они удовлетворяют поставленным требованиям.

В качестве немагнитных сталей раньше использовали стали с высоким содержанием никеля (ЭИ269). В настоящее время найдены составы с меньшим содержанием никеля (55Г9Н9Х3) или даже совершенно без никеля (45Г17103), где в качестве аустенитообразователя выступает марганец.

В ряде случаев применяют немагнитный чугун, что достигается глубоким легированием чугуна никелем и медью. Такие чугуны обладают и более высокими механическими свойствами по сравнению с обычными серыми чугунами.

## 17.2. Стали и сплавы с высоким электрическим сопротивлением

Такие материалы необходимы для производства прецизионных элементов сопротивления (обмоток потенциометров, шунтов, катушек сопротивления, резисторов терморпар, тензометрических датчиков) и нагревательных элементов электрических приборов и печей.

Высокое электрическое сопротивление сплавов может быть достигнуто в том случае, если их структура — твердый раствор. Кроме того, эти сплавы должны обладать малым температурным коэффициентом электросопротивления, а также высокой окалинотой, что особенно важно для нагревательных элементов, и достаточной прочностью для сохранения формы нагревателей. Все сплавы с повышенным электросопротивлением делят на две группы: реостатные сплавы, рабочая температура которых не выше 500 °С, и сплавы для нагревательных элементов, рабочая температура которых значительно выше и доходит до 1100 °С.

*Реостатные сплавы* — это сплавы на медной основе с никелем и марганцем. Сплавы меди с никелем и марганцем образуют непрерывный ряд твердых растворов. Сплавы с 40—50 % Ni обладают максимальным электросопротивлением и отрицательным коэффициентом электросопротивления. Наименьший температурный коэффициент электро-сопротивления имеет манганин. Сплавы константан и копель в паре с медью обладают большой ТЭДС, поэтому в измерительных схемах и для прецизионных сопротивлений используют манганин. Константан и копель используют для изготовления терморпар.

Для получения стабильных значений электросопротивления и коэффициента электросопротивления проволоку из манганина подвергают рекристаллизационному отжигу в вакууме при 400 °С, а после достижения сопротивления подвергают повторному невысокому нагреву (250 °С) для устранения остаточных напряжений.

*Сплавы для нагревательных элементов* — это сплавы на железной и никелевой основе, что обеспечивает высокое электросопротивление вследствие образования твердых растворов. Для повышения жаростойкости сплавы должны содержать много хрома и алюминия. Однако последний ухудшает пластичность сплава и тем самым затрудняет получение проволоки. Количество углерода строго ограничено (0,06–0,12 %), так как появление карбидов снижает пластичность и сокращает срок службы нагревателей.

Твердые сплавы на основе никеля обладают высоким электросопротивлением. Наиболее простыми сплавами являются нихромы (Ni, Cr). Лучший из них — сплав X20H80 — работает при температурах до 1050–1100 °С. Для удешевления нихромов и улучшения их технологических свойств часть никеля заменяют железом. Нихромы с железом называют *ферронихромами*. Широкой известностью пользуется ферронихром X15H60, содержащий 25% Fe, который рекомендуется для работы при 950–1100 °С. Удельное электросопротивление нихрома составляет 1,0–1,2 Ом·мм<sup>2</sup>/м, и окислостойкость — до 1000–1100 °С.

Нихромы применяют для изготовления бытовых приборов и нагревательных элементов электропечей и деталей высокого омического сопротивления. Нихромы и ферронихромы более пластичны и жаропрочны, чем сплавы Fe–Cr–Al, но значительно дороже их.

При температурах выше 1200 °С используют сплавы на основе тугоплавких металлов (W, Ta, Mo), а также керамические материалы (силит). Силитовые стержни спекают из карбида кремния и используют в качестве нагревателей в электрических печах до 1500 °С. Силит является полупроводниковым материалом и имеет высокое электросопротивление.

### **17.3. Сплавы с заданным значением коэффициента теплового расширения**

В приборостроении в ряде случаев требуются сплавы с самыми разнообразными свойствами, например сплавы с задан-

ными коэффициентами линейного расширения. Чтобы удовлетворить этим требованиям, для каждого конкретного случая применения изготавливают сплавы строго определенного состава. Их, как и магнитные и электротехнические сплавы, часто называют *прецизионными сплавами*. Такое название обусловлено повышенной стабильностью количества легирующих элементов в сплавах, что обеспечивает постоянство их свойств.

Зависимость расширения металла от температуры нагрева носит нелинейный характер.

Сплав с 36 % Ni, называемый *инваром*, — основной представитель сплавов с минимальным коэффициентом расширения  $\alpha$ . Низкое значение коэффициента  $\alpha$  в области комнатных температур, а также хорошие механические, технологические и антикоррозионные свойства позволили использовать инвар как конструкционный материал для изготовления деталей приборов, от которых требуется постоянство размеров при изменении температуры в условиях эксплуатации. Малый коэффициент теплового расширения инвара сохраняется лишь в интервале от  $-80$  до  $+100$  °C; выше и ниже этого интервала коэффициент расширения инвара резко возрастает.

Сплав с 42 % Ni отличается тем, что имеет постоянный коэффициент расширения в интервале от 20 до 200 °C; вне этого интервала температур его коэффициент возрастает, то есть сплав расширяется более интенсивно. Другими словами, для сплавов системы Fe–Ni существует интервал температур, в пределах которого коэффициент линейного расширения не изменяется. Верхняя температура этого интервала тем выше, чем больше в сплаве содержание никеля.

Для различных инварных сплавов значения коэффициента теплового расширения в значительной степени зависят от содержания примесей (особенно углерода) и технологии термической обработки сплава. Углерод в процессе термообработки образует с железом и никелем пересыщенные твердые растворы внедрения. В процессе эксплуатации углерод, выделяясь, вызывает изменение значения коэффициента  $\alpha$ .

Инвар дополнительно улучшают легированием кобальтом, который частично заменяет в сплаве никель. Сплав та-

кого типа, называемый *суперинваром*, имеет еще более низкое значение коэффициента  $\alpha$ , чем простой инвар.

Особую группу составляют сплавы для пайки и сварки со стеклом. Составы этих сплавов подобраны таким образом, чтобы коэффициент  $\alpha_c$  сплава соответствовал коэффициенту  $\alpha_m$  материала, с которым производится соединение, во всем интервале температур, вплоть до размягчения стекла.

Помимо этого выдвигается ряд дополнительных требований к сплаву: пластичность, обеспечивающая хорошую обрабатываемость давлением; способность сварки или спайки со стеклами, что позволяет получить вакуумно-плотное соединение. Одинаковый коэффициент  $\alpha$  у материалов обеспечивает сохранение такого соединения при нагреве и охлаждении в процессе изготовления и при изменении температуры в условиях эксплуатации.

Основной представитель этой группы — сплав 29НК, называемый *коваром*. Этот сплав имеет такой же коэффициент  $\alpha$ , как термостойкое стекло, вольфрам и молибден, пластичен и хорошо обрабатывается давлением, а поэтому заменяет в электровакуумном производстве менее пластичный вольфрам и нежаростойкий молибден.

Сплав 47НД относится к группе сплавов, имеющих такой же коэффициент  $\alpha$ , как платина и нетермостойкие — «мягкие» — стекла. Этот сплав называют *платинитом* и используют для сварки и пайки с такими стеклами в электровакуумной промышленности.

Для пайки с керамикой используют сплав 33НК, являющийся аналогом коvara, но имеющий повышенное содержание никеля.

#### 17.4. Сплавы с малым температурным коэффициентом модуля упругости

В приборостроении для изготовления упругих элементов требуется материал, обладающий высокими значениями упругих свойств, достаточной пластичностью, прямолинейным

ходом изменения модуля упругости в широком интервале температур, а также немагнитностью, коррозионной стойкостью и т. д. Для этой цели используют цветные металлы (латуни, бронзы и др.), а также аустенитные железохромоникелевые и кобальтхромоникелевые сплавы.

Сплавы Fe—Ni, помимо низких значений коэффициента линейного расширения при некоторых концентрациях никеля, обладают еще одним замечательным свойством — малым температурным коэффициентом модуля упругости.

Во всех твердых телах, в том числе и металлах, модуль упругости при нагреве уменьшается в связи с уменьшением энергии межатомных связей.

В некоторых сплавах Fe—Ni, называемых *элинварами*, наблюдается аномалия изменения модуля упругости при нагреве, который либо растет, либо изменяется очень незначительно.

Элинварные сплавы широко применяют для изготовления упругих элементов и пружин точных приборов и механизмов (пружин, камертонов, резонаторов и т. д.). Постоянство модуля упругости обеспечивает малую температурную погрешность прибора в условиях эксплуатации.

Температурный коэффициент модуля упругости  $\gamma$ , называемый для краткости *термоупругим коэффициентом*, определяет характер изменения модуля упругости при нагреве:

$$E = E_{20}(1 + \gamma t),$$

где  $E_{20}$  — модуль упругости при 20 °С.

В элинварных сплавах термоупругий коэффициент всегда положителен и может быть равным нулю. Например, сплавы с содержанием 29 и 45 % Ni имеют нулевые значения коэффициента  $\gamma$ . Однако незначительные отклонения содержания никеля могут резко менять значение  $\gamma$ . Поэтому сплавы Fe—Ni дополнительно легируют хромом, который делает это изменение более плавным (например, сплав 36НХ содержит 36 % Ni; 12 % Cr). Однако этот сплав имеет низкие механические характеристики, которые нельзя улучшить термической обработкой, так как у него устойчивая аустенитная структура.



Впоследствии сплав начали легировать титаном и алюминием (36НХТЮ), что позволило упрочнять его термообработкой.

Дальнейшее развитие элинварные сплавы получили в виде сплавов с содержанием 5–6 % Cr и 42–44% Ti. Термоупругий коэффициент таких сплавов близок к нулю.

Сплавы 42НХТЮ, 44НХТЮ для получения минимального значения коэффициента  $\gamma$  подвергают термообработке: закалке с температуры 950 °С и последующему отпуску-старению при 700 °С в течение 4 ч. В процессе старения выделяется в мелкодисперсном виде промежуточная метастабильная фаза.

Основной недостаток этих сплавов — нестабильность значения  $\gamma$  при возможных колебаниях химического состава в пределах марки сплава.

### 17.5. Сплавы с особыми упругими свойствами

Сплавы этой группы относятся к важным конструкционным материалам, применяемым в машино- и приборостроении. В машиностроении материалы с особыми упругими свойствами используют для изготовления силовых пружин и рессор общего назначения. От этих материалов требуются высокий предел упругости (близкий к значению предела прочности) и высокий предел выносливости. Этим требованиям отвечают среднеуглеродистые простые и легированные стали после термообработки, обеспечивающей получение структуры троостита (закалка с последующим средним отпуском). Указанные стали обладают хорошей технологичностью в отношении обработки давлением.

В приборостроении материалы с особыми упругими свойствами используют для изготовления упругих элементов приборов, мембран, различных пружин, подвесок, растяжек и др. Чем выше предел упругости и ниже модуль упругости, тем лучше материал.

Рабочее напряжение упругого элемента должно быть ниже предела упругости материала, так как при нагрузках, близ-

ких к пределу упругости, в сплавах возникают неупругие эффекты, ухудшающие работу элемента и всего прибора. Чем выше предел упругости материала относительно рабочих нагрузок, тем меньше неупругие эффекты и выше класс точности прибора.

*Бериллиевые бронзы* используют для изготовления упругих элементов ответственного назначения. Это сплав на медной основе с высоким пределом упругости и низким модулем упругости. Такое сочетание обеспечивает малые неупругие эффекты при больших упругих деформациях. Кроме этого сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, электропроводностью, немагнитностью, хорошей технологичностью, а также способностью упрочняться термообработкой.

Чаще всего применяют сплав БрБ2, в котором содержание бериллия составляет 2 %. Бериллий растворяется в меди, образуя твердый раствор. Закалка с температуры 770—790 °С фиксирует однофазный раствор с очень низкими пределом упругости и модулем упругости. При искусственном старении при 350 °С в течение 1 ч происходит выделение мелкодисперсной фазы, что сопровождается резким повышением предела упругости и увеличением модуля упругости.

Увеличение содержания бериллия до 25 % дает возможность повысить предел упругости. Однако высокая стоимость бериллия ограничивает применение такого сплава. Более эффективно легирование титаном и никелем. В сплаве БрБНТ1,9 (с содержанием 1,9 % Be; 0,19 % Ti и 0,4 % Ni) после термообработки удается получить  $\sigma_{0,002} = 87 \text{ кгс/мм}^2$ .

Дальнейшее повышение предела упругости можно получить путем микролегирования бором (0,01 %) или магнием (до 0,1 %). При этом повышается предел упругости и снижаются неупругие эффекты.

*Железоникелевые сплавы* менее дефицитны и дешевле бериллиевых бронз. Они имеют примерно то же значение предела упругости, что снижает допустимые упругие дефор-

мации элемента. Сплав 36НХТЮ, применяемый в таких случаях, является сплавом на железной основе. Аустенитная структура придает сплавам хорошие технологические свойства. Дополнительное легирование молибденом в количестве 8 % (36НХТЮМ8) после термообработки позволяет получить предел упругости  $\sigma_{0,002} = 95 \text{ кгс/мм}^2$ .

Применение термомеханической обработки для сплава 36НХТЮ повышает предел упругости до  $111 \text{ кгс/мм}^2$ .

### 17.6. Сплавы с эффектом памяти формы

В теории мартенситного превращения считается, что бездиффузионность и кооперативный характер смещения атомов при превращении ответственны за когерентность решеток аустенита и мартенсита на первых стадиях процесса и приводят к огромной скорости движения такой межфазной границы, то есть к росту мартенситного кристалла. Однако этот рост, в свою очередь, приводит к накоплению упругой деформации на когерентной границе и к последующему нарушению когерентности. Рост кристалла мартенсита прекращается, и превращение развивается за счет образования новых кристаллов.

Представление о когерентном росте кристаллов мартенсита лежит в основе термоупругого мартенситного превращения: понижение температуры ведет к постепенному росту мартенситных кристаллов, а повышение — к их исчезновению.

При нагреве выше температуры метастабильного равновесия  $T_0$  свободная энергия мартенсита становится больше свободной энергии аустенита и возможно обратное превращение мартенсита в аустенит. Превращение начинается после определенного перегрева ( $A_H - T_0$ ) (рис. 17.3) и заканчивается при температуре  $A_K$ . Как и в прямом превращении, температурный гистерезис при обратном превращении обусловлен наличием упругой и поверхностной энергии, препятствующей об-

разованию новой фазы (в данном случае — аустенита). Обратное превращение протекает по такому же сдвиговому механизму, как и прямое, и имеет такие же характерные черты: бездиффузионность, образование рельефа и т. д.

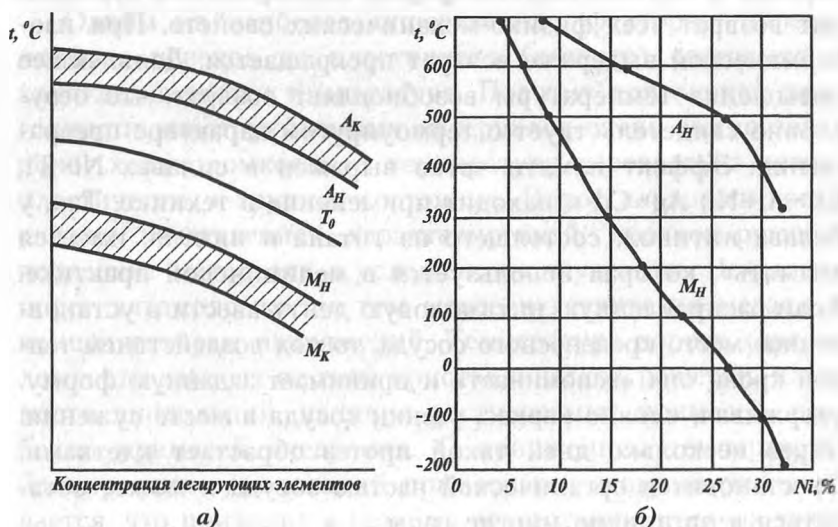


Рис. 17.3. Температуры прямого ( $M_H$ — $M_K$ ) и обратного ( $A_H$ — $A_K$ ) превращений: а — схема; б — температуры  $M_H$ — $A_H$  в системе Fe—Ni

В сталях обратное превращение не имеет места, так как из-за высокой подвижности атомов углерода в твердом растворе внедрения еще до достижения температуры  $A_H$  успевают произойти процессы диффузионного распада мартенсита с образованием равновесных фаз — карбида и феррита (перлита). Превращение перлита в мартенсит невозможно, так как при всех температурах мартенсит обладает большей свободной энергией, чем перлит. Поэтому обратное превращение наблюдается только в безуглеродистых высоколегированных сплавах, например в системе Fe—Ni; оно также типично для мартенситных превращений в цветных сплавах.

Сказанное лежит в основе эффекта запоминания формы, который заключается в том, что образцу, имеющему характерную форму при повышенной температуре, придают с

помощью деформации при более низкой температуре (ниже или в районе  $M_{II}$ ) другую форму, а при последующем нагреве выше температуры  $A_{II}$  происходит полный возврат образца к первоначальной форме; одновременно происходит возврат всех физико-механических свойств. При изотермической выдержке возврат прекращается. Дальнейшее повышение температуры возобновляет возврат, что бесспорно свидетельствует о термоупругом характере превращения. Эффект памяти четко выражен в сплавах Ni-Ti; Cu-Al-Ni; Ag-Cd и находит применение в технике. Так, у сплава нитинол, состоящего из титана и никеля, имеется «память», которая используется в медицинской практике. Если расправленную нитиноловую ленту ввести в установленное место кровеносного сосуда, то под воздействием теплой крови она «вспоминает» и принимает заданную форму, удерживая, словно каркас, стенки сосуда в месте сужения. Через несколько дней такой протез обрастает клетками. Он становится органической частью сосуда и может оставаться в организме многие годы.

### 17.7. Сплавы для криогенной техники

Широкое применение низкотемпературных установок в различных областях современной техники сделало необходимым изучение свойств материалов при низких температурах. Это прежде всего изучение прочности, пластичности и вязкости при низких температурах. Известно, что при низких температурах действуют иные закономерности изменения механических свойств, пластичности и вязкости, чем при повышенных температурах. Так, были обнаружены большая ползучесть, аномальное изменение предела текучести при понижении температуры и ряд других особенностей механического поведения материалов.

Характер изменения свойств металлов с понижением температуры зависит от строения кристаллической решетки, чистоты по примесям, величины зерна, а также от эксплуатационного режима данного сплава.

Одним из наиболее существенных факторов, определяющих переход из пластичного (вязкого) состояния в хрупкое, является температура. Поэтому для оценки пригодности конструкционных материалов очень важно знать порог хладноломкости — температуру перехода из вязко-пластичного в хрупкое состояние. Порог хладноломкости служит качественной характеристикой, прогнозирующей поведение материала в условиях эксплуатации. Чем ниже порог хладноломкости, тем менее чувствителен металл к концентраторам напряжений. Температура порога хладноломкости зависит от типа кристаллической решетки, плотности дислокаций, наличия растворенных примесей, особенно примесей внедрения. С понижением температуры блокирование дислокаций примесными атомами увеличивается, что приводит к резкому возрастанию предела текучести.

По характеру температурной зависимости свойств металлы принято делить на хладноломкие и нехладноломкие.

У металлов с ОЦК-решеткой выше чувствительность к примесям внедрения, их присутствие резко увеличивает упругую энергию кристаллической решетки, уменьшает подвижность дислокаций. В результате с понижением температуры в области ниже  $0,1 T_{пл}$  наблюдается резкое повышение предела текучести, что является одной из основных причин перехода из вязкого состояния в хрупкое. Это резко ограничивает возможность использования таких металлов и сплавов при низких температурах.

В металлах с ГЦК-решеткой атомы примесей внедрения, располагаясь в центре куба, практически не искажают решетку, поэтому их влияние на хладноломкость незначительно. Кроме того, для металлов с ГЦК-решеткой предел текучести почти не зависит от температуры.

Металлы с ГПУ-решеткой и сплавы на их основе ведут себя неоднозначно. Обычно они обладают средними свойствами между характеристиками металлов с ГЦК- и ОЦК-решетками.

Для всех металлов и сплавов имеет место влияние на хладноломкость размера зерна — чем мельче зерно, тем больше сопротивление распространению трещины. Из всех механических свойств особенно чувствительна к размеру зерна при низких температурах ударная вязкость. Чем крупнее зерно, чем больше загрязнение стали примесями, тем ниже ударная вязкость, тем больше склонность стали к разрушению при низких температурах.

Материалы для работы при низких температурах должны иметь достаточный запас вязкости. Кроме того, они должны обладать хорошей свариваемостью и коррозионной стойкостью.

*Стали.* Для производства конструкций, работающих до  $-50^{\circ} \div -60^{\circ} \text{C}$  (так называемых климатических температур), используют качественные углеродистые и легированные стали.

В криогенной технике применяют стали 10X14Г14Н4Т, 12X17Г9АН4, 15X17АГ14, а также мартенситностареющие стали различного состава, например Н18К8М5ТЮ, 000X13Н9Д2ТМ (ЭП699) и др. Эти стали обладают хорошими технологическими свойствами, хорошо свариваются.

*Сплавы алюминия.* Для этих сплавов характерно незначительное изменение свойств с понижением температуры. Сплавы алюминия обладают хорошей теплопроводностью, поэтому их часто используют в теплообменниках. До  $-200^{\circ} \text{C}$  находят применение сплавы алюминия с марганцем (Al–Mg–Mn). Сплавы алюминия с магнием пластичны и вязки вплоть до  $-253^{\circ} \text{C}$  (АМг2, АМг3, АМг4, АМг5В). Применяются также дюралюминии различных марок (Д16, Д16Т, Д1Т и др.), сплавы АК6 и АК8, сплавы повышенной прочности (В92, В95, В96) и некоторые силумины (АЛ4, АЛ8, АЛ9-Т5, АЛ24 и др.).

*Сплавы меди* обладают высокой теплопроводностью и хорошей коррозионной стойкостью. В низкотемпературной технике находят применение как латуни (Л59, Л68, ЛС59-1), так и бронзы различного состава (БрКМЗ-1, БрБ2, БрБ1К и др.).

*Титановые сплавы* в зависимости от состава используют для изготовления конструкций и деталей, работающих при разных отрицательных температурах. Лучшими свойствами обладают однофазные  $\alpha$ -сплавы, не подверженные старению (BT1, BT5, BT5-1, AT2). Для повышения прочности титановых сплавов их легируют цирконием, ванадием, ниобием.

*Никелевые сплавы* (XH77TЮ, XH35TЮ) применяют для изготовления особо ответственных деталей криогенного машиностроения. Так, сплав инвар ( $\text{Fe} + 36 \% \text{Ni}$ ) обладает высокой пластичностью и вязкостью вплоть до  $-269^\circ\text{C}$ , а также малым коэффициентом линейного расширения в значительном интервале температур. Для увеличения прочности в результате дисперсионного твердения инвар легируют Ti, Cr и Al. Такой сплав получил название *ниспан*.

*Монель-металл* (68 % Ni; 3% Fe; 1 % Mn; остальное — Cu) обладает пластичностью и коррозионной стойкостью. *Инконель* (72–80 % Ni; 14–17 % Cr; 5–10 % Fe) используют до  $-253^\circ\text{C}$ . Этот сплав обладает низкой теплопроводностью.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие характеристики присущи магнитным сталям и сплавам?
2. Что такое магнитомягкие и магнитотвердые сплавы, в чем их основное отличие?
3. Какие структуры стали обеспечивают ее немагнитные свойства?
4. Назовите сплавы с высоким электрическим сопротивлением и с заданным значением коэффициента теплового расширения.
5. Перечислите области применения сплавов с эффектом памяти формы.
6. Каким требованиям должны удовлетворять стали для криогенной техники?



## Глава 18

### ЧУГУНЫ

Сплав железа с углеродом ( $> 2,14 \% \text{ C}$ ) называется *чугуном*. Присутствие эвтектики в структуре чугуна обуславливает его использование исключительно в качестве литейного сплава. Углерод в чугуне может находиться в виде цементита или графита или одновременно в виде цементита и графита. Цементит придает излому специфический *белый* светлый блеск, поэтому чугун называется *белым*. Графит придает излому чугуна *серый* цвет. В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый, высокопрочный с шаровидным графитом и ковкий.

#### 18.1. Структура и свойства чугунов

В микроструктуре чугуна следует различать металлическую основу и графитные включения.

В зависимости от содержания углерода, связанного в цементит, различают несколько видов чугунов:

**Белый чугун** — весь углерод находится в виде  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Структура чугуна — перлит и ледебурит (рис. 18.1, область I).

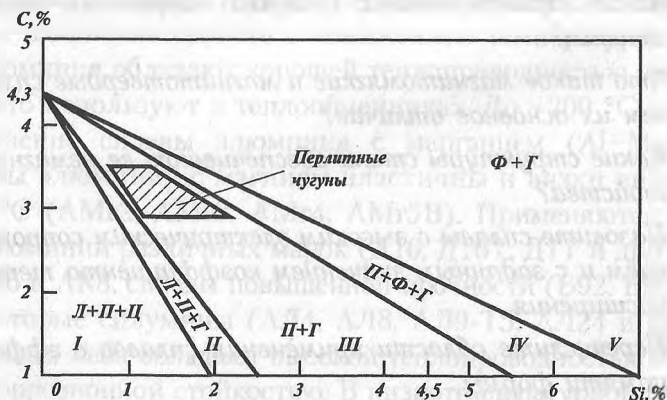


Рис. 18.1. Влияние углерода и кремния на структуру чугуна (заштрихованная область — наиболее распространенные чугуны)

**Половинчатый чугун** — большая часть углерода (свыше 0,8 %) находится в виде  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

Структура чугуна — перлит, ледебурит и пластинчатый графит (рис. 18.1, область II).

**Перлитный серый чугун.** Структура — перлит и пластинчатый графит (рис. 18.1, область III).

В этом чугуне 0,7—0,8 % углерода, и он находится в виде  $\text{Fe}_3\text{C}$ , входящего в состав перлита.

**Ферритно-перлитный серый чугун.** Структура — перлит, феррит и пластинчатый графит (рис. 18.1, область IV). В этом чугуне в зависимости от степени распада эвтектоидного цементита в связанном состоянии находится от 0,7 до 0,1 % C.

**Ферритный серый чугун.** Структура — феррит и пластинчатый графит (рис. 18.1, область V). В этом случае весь углерод находится в виде графита.

Из структуры серых чугунов видно, что их металлическая основа похожа на структуру эвтектоидной стали, доэвтектоидной стали и железа. Следовательно, по структуре чугуны отличаются от стали тем, что в чугунах имеются графитовые включения, что предопределяет их специфические свойства.

Металлическая основа в серых чугунах обеспечивает наибольшую прочность и износостойкость, если она имеет перлитную структуру. Присутствие в структуре феррита, не увеличивая пластичности и вязкости чугуна, снижает его прочность и износостойкость. Наименьшей прочностью обладает ферритный серый чугун.

Графит в чугунах может быть следующих основных форм.

**Пластинчатый графит.** В обычном сером чугуне графит образуется в виде прожилок лепестков; такой графит называется *пластинчатым*.

**Шаровидный графит.** В высокопрочных чугунах, выплавленных с присадкой небольшого количества магния, графит преобразуется в шаровидную форму.

*Вермикулярный графит.* Пластинчатая форма графита ухудшает свойства чугуна, поэтому разработаны методы плавки или последующей обработки, при которых изменяется форма графита и улучшаются свойства чугуна. В настоящее время получают серый чугун с волокнистой (червеобразной) формой графита. Такой графит получил название *вермикулярного*.

*Хлопьевидный графит.* Если при отливке получить белый чугун, а затем, используя неустойчивость цементита, путем отжига его разложить, то образующийся графит приобретает равноосную форму. Такой графит называется *хлопьевидным* или *углеродом отжига*. На практике чугуны с хлопьевидным графитом называют ковким чугуном.

Таким образом, чугун с пластинчатым графитом называют обычным *серым чугуном*, чугун с шаровидным и вермикулярным графитом — *высокопрочным чугуном*, чугун с хлопьевидным графитом — *ковким чугуном*.

## 18.2. Влияние примесей

Обычный промышленный чугун не является двойным железоуглеродистым сплавом, а содержит те же примеси, что и углеродистые стали. Эти примеси существенно влияют главным образом на условия графитизации и, следовательно, на структуру и свойства чугуна.

Количество *марганца* в чугуне не превышает 1,25–1,4 %. Марганец препятствует процессу графитизации, то есть затрудняет выделение графита и повышает способность чугуна к отбеливанию.

*Сера* — вредная примесь, ухудшающая механические и литейные свойства чугуна, поэтому ее содержание ограничивают до 0,1–0,12 %. В сером чугуне сера образует сульфиды (FeS, MnS) или их твердые растворы (Fe, Mn)S.

Содержание *фосфора* в сером чугуне — около 0,2 %, допускается иногда — до 0,5 %. При повышенном содержании

фосфора в структуре чугуна образуются твердые включения фосфидной эвтектики. Образование эвтектики улучшает литейные свойства чугуна (повышает жидкотекучесть), повышает общую твердость и износостойкость, однако увеличивает хрупкость чугуна.

*Кремний* особенно сильно влияет на структуру чугуна, усиливая графитизацию. Содержание кремния в чугунах колеблется в широких пределах — от 0,3—0,5 до 3—5 %. Изменяя содержание кремния, можно получать чугуны, совершенно различные по свойствам и структуре: от белого до ферритного (серого с пластинчатым графитом или высокопрочного с шаровидным графитом).

Кроме этих постоянных примесей в чугун часто вводят и другие элементы. Такие чугуны называются *легированными*. Преимущественно чугун легируют хромом, никелем, медью, алюминием, титаном. Хром препятствует графитизации чугуна, а медь и никель способствуют ей.

### 18.3. Серые чугуны

В структуре серых чугунов большая часть или весь углерод находится в виде графита. Наибольшее применение нашли доэвтектические группы, содержащие 2,4—3,8 % С. Чем выше содержание С, тем больше образуется графита и тем ниже его механические свойства. В связи с этим количество углерода в чугуне обычно не превышает 3,8 %. В то же время для обеспечения высоких литейных свойств (хорошей жидкотекучести) углерода должно быть не меньше 2,4 %.

Поскольку структура чугуна состоит из металлической основы и графита, то и свойства чугуна будут зависеть от свойств металлической основы и количества и характера графитных включений.

Графит по сравнению со сталью обладает ничтожно низкими механическими свойствами, и поэтому графитные включения можно считать в первом приближении просто за пустоты, трещины. Отсюда следует, что чугун можно

рассматривать как сталь, но испещренную большим количеством пустот и трещин.

Чем больше объема занимают эти пустоты, тем ниже будут свойства чугуна. При одинаковом объеме пустот, то есть количестве графита, свойства чугуна будут зависеть от его формы и расположения.

Чем меньше графитовых включений, чем они мельче и больше степень изолированности их друг от друга, тем выше прочность чугуна. Чугун с мелкими и завихренными графитными включениями обладает более высокими свойствами.

Разрушающая нагрузка при сжатии в зависимости от структуры чугуна в 3—5 раз больше, чем при растяжении, поэтому чугун нужно использовать для изделий, работающих на сжатие.

Пластинки графита менее значительно, чем при растяжении, снижают прочность при изгибе, так как часть изделия при этом испытывает сжимающие напряжения. Предел прочности при изгибе имеет промежуточное значение между пределом прочности на растяжение и пределом прочности на сжатие.

Твердость чугуна в зависимости от металлической основы равна 143—255 НВ.

Сказанное относится главным образом к серому чугуно с пластинчатыми включениями графита. По мере округления графитных включений их данное отрицательное влияние уменьшается.

Округлые включения шаровидного графита не создают резкой концентрации напряжений; такие включения не являются трещинами, и чугун с шаровидным графитом показывает значительно более высокую прочность при растяжении и изгибе, чем чугун с пластинчатым графитом. Отсюда и название чугуна с шаровидным графитом — *высокопрочный чугун*. Ковкий чугун с хлопьевидным графитом занимает промежуточное положение по прочности между обычным серым и высокопрочным чугуном.

Таким образом, прочность чугуна (в отношении нормальных напряжений) определяется строением металлической основы и формой графитных включений.

Благодаря наличию графита чугун имеет некоторые преимущества перед сталью:

- наличие графита облегчает обрабатываемость резанием, делает стружку ломкой;

- графит повышает износостойкость и антифрикционные свойства чугуна вследствие собственного «смазывающего» действия и повышения прочности пленки смазки;

- наличие графитных включений быстро гасит вибрации и резонансные колебания;

- чугун почти не чувствителен к дефектам поверхности, надрезам и т. д. Графит, нарушая сплошность металлической основы, делает чугун малочувствительным ко всевозможным внешним концентраторам напряжений (дефектам поверхности, надрезам, выточкам и т. д.). Вследствие этого серый чугун имеет примерно одинаковую конструктивную прочность и в отливках простой формы или с ровной поверхностью, и в отливках сложной формы с надрезом или плохо обработанной поверхностью;

- следует также указать на превосходство чугуна перед сталью по литейным свойствам. Более низкая температура плавления и окончание кристаллизации при постоянной температуре (образование эвтектики) обеспечивают лучшую жидкотекучесть и заполняемость формы.

Указанные достоинства чугуна делают его ценным конструкционным материалом, широко применяемым для изготовления деталей машин, главным образом тогда, когда детали не испытывают значительных растягивающих и ударных нагрузок.

Серый чугун маркируется буквами С (серый) и Ч (чугун). После букв следуют цифры, указывающие среднее значение временного сопротивления при растяжении.

Серые чугуны по свойствам и применению можно разделить на следующие группы.

*Ферритные и ферритно-перлитные чугуны* (СЧ10, СЧ15) имеют при растяжении  $\sigma_B$  10—15 кгс/мм<sup>2</sup> (100—150 МПа),

при изгибе — 28—32 кгс/мм<sup>2</sup> (280—320 МПа). Их примерный состав: 3,5—3,7 % С; 2,0—2,6 % Si; 0,5—0,8 % Mn; ≤0,3 % P; ≤0,15 % S. Структура чугуна — перлит, феррит и графит грубый и средних размеров. Эти чугуны применяют для изготовления малоответственных деталей, испытывающих небольшие нагрузки в работе с толщиной стенки отливки 10—30 мм. Так, чугун СЧ10 используют для изготовления строительных колонн, фундаментных плит, а чугуны СЧ15 и СЧ18 — для литых малонагруженных деталей станков, автомобилей и тракторов, арматуры.

*Перлитные чугуны* (СЧ21, СЧ32, СЧ36, СЧ40) применяют для отливки станин мощных станков и механизмов, поршней цилиндров, деталей, работающих на износ в условиях больших давлений (компрессорное, турбинное литье, дизельные цилиндры, блоки двигателей, детали металлургического оборудования). Структура этих чугунов — мелкопластинчатый перлит (сорбит) с мелкими завыхренными графитными включениями. К перлитным чугунам относятся так называемые сталистые и модифицированные чугуны.

*Сталистые чугуны* (СЧ24, СЧ28) получают выплавкой с добавлением в шихту 20—30 % стального лома; чугуны имеют пониженное содержание углерода, что обеспечивает получение более дисперсной перлитной основы с меньшим количеством графитных включений. Содержание кремния в этих чугунах должно быть достаточным для предотвращения возможности отбеливания чугуна.

*Модифицированные чугуны* (СЧ30, СЧ36, СЧ40, СЧ45) получают добавлением в жидкий чугун перед разливкой специальных модификаторов. Модифицирование применяют для получения в крупных отливках с различной толщиной стенок перлитной основы с вкраплением небольшого количества изолированных пластинок графита средней величины.

Модифицированию подвергают низкоуглеродистый чугун, содержащий небольшое количество кремния и повышенное количество марганца. Примерный состав чугуна до модификаций: половинчатый чугун, то есть ледебурит, перлит и

графит (2,8—3,3 % C; 1,0—1,5 % Si; 0,8—1,2 % Mn; не более 0,3 % P и 0,12 % S).

Для снятия литейных напряжений и стабилизации размеров чугунные отливки отжигают при 500—570 °C. В зависимости от формы и размеров отливки выдержка при температуре отжига составляет 3—10 ч.

Охлаждение после отжига медленное, вместе с печью. После такой обработки механические свойства изменяются мало, а внутренние нагрузки снижаются на 80—90 %. Иногда для снятия напряжений в чугунных отливках применяют естественное старение чугуна — выдержка их на складе в течение 6—10 месяцев. Такая выдержка снижает напряжения на 40—50 %.

#### 18.4. Антифрикционные чугуны

Антифрикционные чугуны применяют для изготовления подшипников скольжения, втулок и других деталей, работающих при трении о металл, чаще в присутствии смазки. Эти чугуны должны обеспечивать низкое трение, то есть антифрикционность. Антифрикционность определяется формой графита и соотношением перлита и феррита в основе.

Антифрикционные чугуны с глобулярным графитом изготавливают двух марок: АЧВ-1 — с перлитной структурой и АЧВ-2 — с повышенным содержанием кремния и ферритно-перлитной структурой.

АЧВ-1 предназначен для работы в узлах трения с повышенными окружными скоростями в паре с закаленным или нормализованным валом. Чугун АЧВ-2 применяют в паре с нетермообработанным валом.

Перлитный чугун, содержащий повышенное количество фосфора (0,3—0,5 %), используют для изготовления поршневых колец. Высокая износостойкость колец обеспечивается металлической основой, состоящей из тонкого перлита и фосфидной эвтектики при наличии пластинчатого графита.



## 18.5. Белый и отбеленные чугуны

Белый чугун вследствие присутствия в нем цементита обладает высокой твердостью, хрупок и не поддается обработке резанием, поэтому имеет ограниченное применение.

*Отбеленными* называются чугуны, в которых поверхностные слои имеют структуру белого (или половинчатого) чугуна, а сердцевина — структуру серого чугуна.

Отбел на некоторую глубину (10—30 мм) является следствием быстрого охлаждения поверхности, возникающего в результате отливки чугуна в металлические формы (кокиль) или в песчаную форму.

Высокая твердость поверхности ( $HB = 400\text{--}500$ ) обуславливает хорошую сопротивляемость износу. Поэтому из отбеленного чугуна изготавливают прокатные валки листовых станков, колеса, шары для мельниц.

Вследствие различной скорости охлаждения и получения разных структур отливка имеет большие внутренние напряжения, для снятия которых отливки подвергают термообработке, то есть их нагревают при  $500\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 18.6. Высокопрочные чугуны

Выше говорилось о том, какое большое значение для качества чугунов имеют форма и размер графитных включений.

Степень графитизации зависит от содержания графитизирующих примесей и скорости охлаждения.

Размер и форма графитных включений зависят от этих факторов, а также от наличия в жидком чугуне центров кристаллизации. Наличие большого числа центров кристаллизации в виде различных частичек способствует образованию структуры мелкого графита.

Для этого в жидкий чугун перед разливкой его по формам вводят небольшую добавку модификаторов. Чаще для этой цели применяют Mg (0,03—0,07 %). В результате процесса кристаллизации графит принимает шаровидную форму. Ша-

ровидный графит, имеющий минимальную поверхность, значительно меньше ослабляет металлическую основу чугуна, чем пластинчатый. Шаровидный графит не является активным центром концентрации напряжений.

Чугуны с шаровидным графитом имеют более высокие механические свойства, не уступающие литой углеродистой стали, сохраняя при этом хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость.

Маркируют высокопрочные чугуны буквами ВЧ, затем следуют цифры. Цифры показывают среднее значение временного сопротивления при растяжении ( $\text{кгс/мм}^2$ ): чугуны марок ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100, ВЧ120 имеют перлитную металлическую основу, ВЧ45 — перлитно-ферритную, ВЧ38, ВЧ42 — ферритную.

Для указания формы графита иногда в маркировке ставят буквы ШГ (шаровидный графит) или ВГ (вермикулярный графит). Например: ВЧШГ — высокопрочный чугун с шаровидным графитом, ВЧВГ — высокопрочный чугун с вермикулярным графитом.

Для снятия внутренних напряжений, повышения механических свойств чугуны подвергают термообработке.

Отливки из высокопрочных чугунов широко используют в различных отраслях: в автопромышленности и дизелестроении — для изготовления коленчатых валов, крышек цилиндров; в тяжелом машиностроении — для изготовления многих деталей прокатных станов, кузнечно-прессового оборудования (например, для шабот-молотов, траверс-прессов, прокатных валов); в химической и нефтехимической промышленности — для изготовления корпусов насосов, вентиляей и т. д.

## 18.7. Ковкие чугуны

*Ковким* называют чугун с хлопьевидным графитом, который получается из белого чугуна путем специального графитизирующего отжига — томления. Металлическая основа ковкого

чугуна — феррит, реже — перлит. Наибольшей пластичностью обладает ферритный ковкий чугун, который применяют в машиностроении.

Химический состав белого чугуна, отжигаемого на ковкий чугун, выбирают в следующих пределах: 2,2—2,8 % С; 0,6—1,4 % Si;  $Mn \leq 0,4$  %;  $S \leq 0,1$  %;  $P \leq 0,2$ .

Для ускорения отжига применяют различные меры: чугун модифицируют алюминием (реже — бором, висмутом и другими элементами), повышают температуру нагрева чугуна перед разливкой, применяют перед отжигом старение, чаще в процессе нагрева до температуры отжига при 350—400 °С повышают температуру стадии графитизации, но не выше 1080 °С.

Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и цифрами. Первые две цифры указывают предел прочности при растяжении, вторые — относительное удлинение. Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

*Ферритные чугуны* КЧ37-12, КЧ35-10 используют для изготовления деталей, испытывающих высокие статические и динамические нагрузки (картеры, ступицы, крюки, скобы), КЧ30-6, КЧ33-8 — для изготовления менее ответственных деталей (головки, хомуты, гайки, фланцы, муфты).

Твердость ферритного чугуна  $HB = 163$ .

*Перлитные чугуны* КЧ50-4, КЧ56-4, КЧ60-3, КЧ63-2 обладают высокой прочностью, умеренной пластичностью и хорошими антифрикционными свойствами;  $HB = 240-270$ .

Из перлитного ковкого чугуна изготавливают вилки карданных валов, втулки, муфты, тормозные колодки. Ковкий чугун применяют главным образом для изготовления тонкостенных деталей — в отличие от ВЧ, который используют для деталей большого сечения.

## 18.8. Легированные чугуны

При легировании чугунов применяются те же элементы, что и при легировании стали (хром, никель, медь, титан, молибден и др.). Чугун с повышенным содержанием кремния

(свыше 4 %) и марганца (свыше 2 %) относится к легированным чугунам. В зависимости от степени легирования различают низколегированные (с содержанием легирующих элементов до 1—3 %), среднелегированные (3—10 %) и высоколегированные чугуны (свыше 10 %).

Маркировка легированных чугунов начинается с буквы Ч. Последующие буквы показывают наличие легирующих элементов. Цифры обозначают последовательно среднее содержание легирующих элементов в процентах. Буква III означает, что графит в чугуне имеет шаровидную форму.

Все легирующие элементы изменяют как процесс графитизации при эвтектическом превращении, так и процесс формирования металлической основы при эвтектоидном превращении. Они увеличивают устойчивость жидкой фазы и аустенита, способствуя большей степени переохлаждения. Вследствие этого кристаллизация и формирование структуры металлической основы происходят в более благоприятных условиях для получения мелкого и среднего графита и более дисперсной основы. Правильно подбирая содержание основных и легирующих элементов, можно получить ферритную, перлитную, сорбитную, трооститную, мартенситную и аустенитную структуры металлической основы при определенных размерах, форме и распределении графита.

По химическому составу различают несколько групп легированных чугунов: хромистые, кремнистые, алюминиевые, марганцевые и никелевые, а по условиям эксплуатации — жаростойкие, жаропрочные износостойкие, коррозионностойкие и немагнитные. При этом один и тот же легирующий элемент придает чугуну одновременно несколько специальных свойств.

*Хромистые чугуны* применяют главным образом как жаростойкие, коррозионностойкие и износостойкие материалы. Износостойкость чугуна определяется его структурой и твердостью, большая часть высокохромистых чугунов успешно работает в условиях ударного абразивного изнашивания и истирания.

*Кремнистые чугуны* применяют главным образом как окалино- и коррозиестойкие материалы. Механические свойства кремнистых чугунов относительно низкие как при нормальных, так и при повышенных температурах и понижаются с увеличением содержания кремния. С целью повышения механических свойств кремнистые чугуны иногда легируют медью.

Литейные свойства низкокремнистых чугунов мало отличаются от свойств СЧ и ВЧШГ.

*Алюминиевые чугуны* применяют как жаростойкие и износостойкие материалы. Увеличение содержания Al до 12 % приводит к непрерывному снижению прочности, которая в дальнейшем стабилизируется. Максимальную твердость имеют чугуны, содержащие 10–17 % Al и свыше 26 % Al. Наиболее технологичным является чугун, содержащий 19–25 % Al (ЧЮ22), причем чугун с шаровидным графитом обладает повышенной прочностью и жаропрочностью.

*Марганцевые чугуны* применяют как немагнитные и износостойкие материалы. В марганцевых антифрикционных чугунах, как и в высоконикелевых, медленное охлаждение и отпуск способствуют выпадению большого количества карбидов и снижению легированности аустенита. В структуре антифрикционных марганцевых чугунов содержится 45–55 % аустенита и 10–30 % карбидов — в литом состоянии; 80–90 % аустенита и 5–8 % карбидов — после закалки. Именно поэтому твердость чугуна в незакаленном состоянии бывает выше, чем в закаленном (1800–2900 и 1400–1800 МПа соответственно). Эти чугуны имеют повышенную склонность к образованию усадочных раковин.

*Никелевые чугуны* — немагнитные, коррозиестойкие, жаропрочные и хладостойкие материалы. Прочность и твердость никелевых чугунов возрастает с увеличением содержания Ni, Cr. Аустенитный чугун с ШГ обладает высокой жаропрочностью. Дополнительное легирование повышает жаропрочность. Чугун ЧН20ДГ является жаропрочным и хладостойким материалом.

## 18.9. Термообработка чугунов

Термическую обработку чугунов проводят с целью снятия внутренних напряжений, возникающих при литье и вызывающих с течением времени изменение размеров и формы отливки, снижение твердости и улучшение обрабатываемости резанием, повышение механических свойств.

Различают несколько видов отжига чугунов.

1. *Отжиг для снятия внутренних напряжений.* Этому виду отжига подвергают чугуны при следующих температурах: серый чугун с пластинчатым графитом — при 500–570 °С; высокопрочный чугун с шаровидным графитом — при 550–650 °С; высоколегированный чугун (типа «кирезист») — при 620–650 °С. Скорость нагрева составляет примерно 70–100 град/ч, выдержка при температуре нагрева зависит от массы и конструкции отливки и составляет от 1 до 8 ч.

Охлаждение до 200 °С медленное, со скоростью 20–50 град/ч, что достигается охлаждением отливки вместе с печью. Далее отливки охлаждаются на воздухе.

При этом отжиге не происходит фазовых превращений, снимаются внутренние напряжения, повышается вязкость, исключается коробление и образование трещин в процессе эксплуатации.

2. *Смягчающий отжиг (отжиг графитизирующий низкотемпературный)* проводят для улучшения обрабатываемости резанием и повышения пластичности. Его осуществляют продолжительной выдержкой при 680–700 °С (ниже точки  $A_{с1}$ ) или медленным охлаждением отливок при 760–700 °С. Время выдержки должно быть достаточным для полного и требуемого частичного распада эвтектоидного цементита (для серых чугунов время выдержки 1–4 ч, для ковких — до 60 ч). Охлаждение медленное для деталей сложной конфигурации.

В результате этого отжига в структуре чугунов увеличивается количество феррита.

3. *Отжиг графитизирующий*, в результате которого из белого чугуна получают ковкий чугун.

4. *Нормализация* (серого и ковкого чугуна) при температуре 850—950 °С.

Время выдержки должно быть достаточным для насыщения аустенита углеродом и в зависимости от конфигурации изделий составляет от 1 до 3 ч.

Охлаждение ускоренное, чтобы аустенит смог превратиться в перлит, и чаще всего осуществляется на воздухе. Для деталей сложной формы охлаждение с температуры 600—550 °С должно быть замедленное, чтобы уменьшить величину термических напряжений.

В результате нормализации получается структура: перлит + графит — и повышается прочность и износостойкость.

После нормализации для снятия внутренних напряжений применяется высокий отпуск при 650—680 °С с выдержкой 1—1,5 ч.

**Закалка и отпуск чугунов.** Для закалки чугун нагревают до 850—950 °С. Скорость нагрева изделий сложной формы меньше, чем изделий простой формы. Время выдержки обычно составляет от 1 до 3 ч. Охлаждение осуществляют в воде или масле. При закалке аустенит превращается в неравновесные структуры: мартенсит или троостит + графит.

После закалки проводят отпуск при температуре 200—600 °С. В результате повышаются твердость, прочность и износостойкость чугуна.

При изотермической закалке чугун нагревают так же, как и при обычной закалке, выдерживают от 10 до 90 мин и охлаждают в расплавленной соли при 200—400 °С. При этом происходит изотермический распад аустенита с образованием структуры: игольчатый троостит + графит.

В результате изотермической закалки повышаются твердость и прочность, но сохраняется пластичность.

Возможна поверхностная закалка кислородно-ацетиленовым пламенем, токами высокой частоты или в электролите. Температура нагрева — 900—1000 °С. Охлаждение — в воде, масле или масляной эмульсии. При поверхностной закалке в поверхностном слое образуются структуры: мартенсит + графит или троостмартенсит + графит. После отпуска при

200—600 °С и охлаждения на воздухе повышаются твердость, прочность и износостойкость поверхностного слоя при наличии мягкой сердцевины.

**Старение чугунов.** Старение применяют для стабилизации размеров отливок, предотвращения коробления и снятия внутренних напряжений.

*Естественное старение* осуществляют на открытом воздухе или в помещении. Изделия после литья выдерживают в течение 6—15 месяцев. При естественном старении снижение напряжений в отливках составляет 3—10 %.

При вибрационном старении снижение напряжений достигает 10—15 %. Во время вибрации в отливке возникают дополнительные временные напряжения, вызывающие локальные пластические деформации чугуна и таким образом повышающие стойкость к короблению.

Старение методом статической перегрузки отличается тем, что для создания дополнительных временных напряжений детали подвергают воздействию статических внешних нагрузок. При этом методе снижение напряжений достигает 10—30 %.

Старение методом термоударов (термоциклическое старение) осуществляют путем быстрого нагрева и охлаждения всей детали или отдельных ее участков. Стойкость против коробления повышается за счет пластических деформаций, вызываемых временными температурными напряжениями. Общий уровень напряжений снижается на 10—20 %. Термоциклическое старение осуществляют по следующему режиму: загрузка в печь и нагрев за 3—3,5 ч до 350 °С, выдержка 2—2,5 ч, затем резкое охлаждение (на воздухе), снова поверхностный нагрев (за 1—1,5 ч) до 320 °С, выдержка 4—5 ч, охлаждение вместе с печью до 150—100 °С.

*Искусственное старение* осуществляют при повышенных температурах; длительность — несколько часов.

При искусственном старении отливки чугуна загружают в печь, нагретую до 100—200 °С, нагревают до температуры 550—570 °С со скоростью 30—60 °С/ч, выдерживают 3—5 ч и охлаждают вместе с печью со скоростью 20—40 °С/ч до температуры 150—200 °С, а затем охлаждают на воздухе. Обычно старение проводят после грубой механической обработки.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные виды чугунов и их свойства.
2. Какое влияние на свойства чугунов оказывают примеси?
3. В каком виде может присутствовать графит в чугунах?
4. Какие специфические свойства придает графит серому чугуну?
5. Каким образом получают модифицированный чугун?
6. Чем определяется наличие малого коэффициента трения в антифрикционных чугунах?
7. Что такое белый и отбеленный чугуны? какова область их применения?
8. Как получают высокопрочный и ковкий чугуны?
9. Какие свойства можно получить за счет легирования и термообработки чугунов?

## Раздел V

# ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

## Глава 19

### АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Металлы с плотностью менее  $3 \text{ г/см}^3$  принадлежат к группе легких металлов. К ним относятся алюминий, магний, бериллий.

Из трех легких металлов алюминий имеет наибольшее значение, так как по объему производства занимает второе место после железа.

#### 19.1. Характеристика алюминия

Алюминий является химическим элементом III группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Основные физические свойства алюминия приведены в табл. 19.1.

Таблица 19.1

#### Основные физические свойства алюминия

Атомный номер	13
Атомная масса	27,0
Плотность при $20^\circ\text{C}$ , $\text{г/см}^3$	2,7
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	660
Атомный диаметр, нм	0,28
Скрытая теплота плавления, Дж/г	405
Удельная теплопроводность при $20^\circ\text{C}$ , $\text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	225
Температурный коэффициент линейного расширения $\times 10^6$ при $25^\circ\text{C}$	24,3
Удельное электросопротивление при $20^\circ\text{C}$ , $\text{Ом} \cdot \text{см} \times 10^6$	2,7
Модуль нормальной упругости E, МПа	71 000

Алюминий имеет ГЦК-решетку (мономорфен). Характерные особенности алюминия — его малая плотность, большая пластичность, высокая электропроводность (составляет 65 % от электропроводности меди) и теплопроводность.

В зависимости от чистоты различают алюминий особой чистоты: А999 (99,999 % Al); высокой чистоты: А95 (99,995 % Al); А99 (99,99 % Al); А97 (99,97 % Al) и технической чистоты: А85, А8, А7, А6, А5, А0 (99,0 % Al).

Технический алюминий изготавливают в виде листов, прутков, проволок и других полуфабрикатов и маркируют АД и АД1. В качестве примесей в алюминии присутствуют Fe, Si, Mn, Zn. Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой прочной пленки  $Al_2O_3$ . Чем чище алюминий, тем выше коррозионная стойкость.

Алюминий легко обрабатывается давлением, удовлетворительно — резанием, сваривается всеми видами сварки. Технический алюминий (АД и АД1) применяют для изготовления элементов конструкций и деталей, не несущих нагрузки, когда требуются высокая пластичность и хорошая свариваемость, сопротивление коррозии и высокие тепло- и электропроводность. Например, из технического алюминия изготавливают различные трубопроводы, палубные надстройки морских и речных судов, кабели, электропроводы, шины, конденсаторы, фольгу, витрины, рамы.

Более широко используют сплавы алюминия.

## 19.2. Классификация сплавов алюминия

Наибольшее распространение получили следующие сплавы: Al—Cu; Al—Si; Al—Mg; Al—Cu—Mg; Al—Cu—Mg—Si; Al—Mg—Si; Al—Zn—Mg—Cu. Все алюминиевые сплавы можно разделить на три группы:

— деформируемые, предназначенные для получения полуфабрикатов (листов, плит, прутков, труб), а также поковок и штамповок путем прокатки, прессования и штамповки. Маркируются буквами (Д, АК, АМ, ВД, В), после которых указывается номер сплава (Д16);

— литейные, предназначенные для фасонного литья. Маркируются буквами АЛ, после которых указывается номер сплава (АЛ2);

— получаемые методом порошковой металлургии (спеченные алюминиевые порошки — САП, спеченные алюминиевые сплавы — САС). Их иногда называют дисперсно-упрочненными композиционными сплавами на основе алюминия.

Деформируемые сплавы, в свою очередь, делятся на упрочняемые термообработкой и не упрочняемые термообработкой.

К *упрочняемым термообработкой* относятся сплавы, обладающие ограниченной растворимостью в твердом состоянии. К этой группе относятся сплавы алюминия с магнием и кремнием; алюминия с медью и магнием.

К *не упрочняемым термообработкой* относятся однофазные сплавы, состоящие из однородного твердого раствора. Эти сплавы характеризуются невысокой прочностью и высокой пластичностью. Упрочнение таких сплавов может быть достигнуто нагартовкой. Из этой группы сплавов наибольшее распространение нашли сплавы алюминия с магнием и алюминия с марганцем.

Отличительной особенностью литейных сплавов алюминия является наличие в их структуре эвтектики, которая способствует улучшению литейных свойств. Однако количество эвтектики в структуре сплава должно быть ограничено (не более 15–20 % по объему) из-за ухудшения механических и некоторых технологических свойств.

Среди литейных сплавов наибольший интерес представляют сплавы алюминия с кремнием — *силумины*. Улучшение этих сплавов достигается за счет их термообработки.

В настоящее время применяют два вида маркировки алюминиевых сплавов:

- буквенно-цифровая (табл. 19.2);
- цифровая.

Таблица 19.2

### Буквенно-цифровая маркировка алюминиевых сплавов

Принцип классификации	Сплав	
	Название	Обозначение
По химическому составу	—	АМг, АМц
По названию сплава	Дюралюминий	Д1, Д6
По технологическому назначению	Ковочный	АК6, АК8
По свойствам	Высокопрочный	В95, В96
По методу получения	Спеченный литейный	САП, САС,
По виду полуфабрикатов и изделий		АЛ2
По виду полуфабрикатов	Проволочный	АМг5П

## 19.3. Термообработка алюминиевых сплавов

Для улучшения алюминиевых сплавов применяют закалку и старение, а для устранения неравномерных структур и деформационных дефектов строения, снижающих пластичность сплавов, — отжиг.

**Закалка.** Закалка заключается в нагреве сплавов до температуры, при которой избыточные интерметаллидные фазы полностью или большей частью растворяются в алюминии, выдержке при этой температуре и быстром охлаждении до нормальной температуры для получения пересыщенного твердого раствора. Основной особенностью алюминиевых сплавов является малый интервал температур нагрева под закалку. Температуры для сплавов: Al—Cu—Mg (D16) — 485–505 °C; Al—Zn—Mg—Cu (B95) — 465–475 °C; Al—Cu—Mg—Si (AK6) — 515–525 °C.

Более высокие температуры вызывают пережог (оплавление по границам зерен), что приводит к образованию трещин, пузырению поверхности полуфабрикатов, снижению сопротивления коррозии, механических свойств и сопротивления хрупкому разрушению. Выдержка должна быть минимальной, обеспечивающей растворение избыточных фаз в твердом растворе.

Охлаждение при закалке следует проводить со скоростью выше критической. Под критической скоростью понимают минимальную скорость охлаждения, которая предотвращает распад пересыщенного твердого раствора. Частичный распад твердого раствора снижает механические свойства и коррозионную стойкость после старения. Чаще для закалки применяют воду ( $T = 10\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Прокаливаемость алюминиевых сплавов составляет 120—150 мм.

После закалки сплавы имеют сравнительно невысокую прочность и высокую пластичность.

**Старение закаленных сплавов.** После закалки следует старение, при котором сплав выдерживают при нормальной температуре несколько суток (естественное старение). В процессе старения происходит распад пересыщенного твердого раствора, что сопровождается упрочнением сплавов.

*Структурное упрочнение.* Температура рекристаллизации некоторых сплавов алюминия с марганцем, хромом, никелем, цирконием, титаном и другими переходными металлами превышает температуру закалки или деформации, поэтому после закалки и старения таких сплавов в них сохраняется нерекристаллизованная (полиганизованная) структура с высокой плотностью дислокаций, что повышает ее прочность по сравнению с рекристаллизованной структурой. Это явление получило название *структурного упрочнения*. Структурное упрочнение наиболее существенно проявляется в прессованных полуфабрикатах.

**Отжиг.** *Диффузионный отжиг (гомогенизация).* Этому виду отжига подвергают слитки перед обработкой давлением

для устранения дендритной ликвации, которая приводит к получению неоднородного твердого раствора и выделению по границам зерен и между ветвями дендритов хрупких неравновесных эвтектических включений  $\text{CuAl}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  (S-фаза);  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и др. В процессе гомогенизации состав кристаллитов твердого раствора выравнивается, а интерметаллиды растворяются.

При охлаждении они выделяются в виде равномерно распределенных включений. Гомогенизация способствует получению мелкозернистой структуры в отожженных местах и уменьшает склонность к коррозии под напряжением. В результате пластичность литого сплава повышается, что позволяет уменьшить технологические отходы.

Температура гомогенизации лежит в пределах 450–520 °С, выдержка составляет 4–40 ч. Охлаждение проводят на воздухе или вместе с печью.

*Рекристаллизационный отжиг.* Такой отжиг заключается в нагреве деформированного сплава до температур выше температуры окончания первичной рекристаллизации. Применяют для снятия наклепа и получения мелкого зерна. Температура рекристаллизованного отжига в зависимости от состава сплава колеблется от 350 до 500 °С, выдержка — 0,5–2 ч. После рекристаллизационного отжига сплавов, не упрочняемых термообработкой, скорость охлаждения выбирают произвольно. Для сплавов, упрочняемых термообработкой, скорость охлаждения до 200–250 °С должна составлять 30 °С/ч. Отжиг в качестве промежуточной операции применяют при холодной деформации или между горячей и холодной деформациями.

*Отжиг для разупрочнения после закалки и старения.* Его проводят при температуре 360–450 °С с выдержкой 1–2 ч. При этих температурах происходят полный распад перенасыщенного твердого раствора и коагуляция упрочняющих фаз. Скорость охлаждения не должна превышать 30 °С/ч.

После отжига сплав имеет низкий предел прочности, удовлетворительную пластичность и высокую сопротивляемость коррозии под напряжением.

#### 19.4. Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой

*Дюралюминий* (дюралюмин) — первый промышленный сплав на основе алюминия.

*Дюралюминием* называют сплавы системы Al–Cu–Mg, в которые дополнительно вводят марганец. Кремний и железо являются постоянными примесями.

Дюралюминий, изготавливаемый в листах, для защиты от коррозии подвергают плакированию, то есть покрытию тонким слоем алюминия высокой чистоты (не ниже 99,5 %). Толщина этого слоя составляет 3–5 % от толщины листа. Плакирование снижает прочность дюралюмина.

Упрочнение дюралюмина достигается закалкой и старением. Структура закаленного дюралюмина состоит из пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора и нерастворимых соединений железа, которые не участвуют в термическом упрочнении и отрицательно влияют на технологическую пластичность и коррозионную стойкость. Дюралюмины после закалки подвергают естественному старению, так как оно обеспечивает получение более высокой коррозионной стойкости. Понижение температуры тормозит старение, а повышение, наоборот, увеличивает скорость процесса, но понижает пластичность и сопротивление коррозии.

Марки дюралюминов обозначают буквой Д и цифрами, которые являются условными номерами сплавов, например: Д1, Д6, Д16 и т. д. Дюралюмин повышенного качества обозначают буквой А, например: Д16А.

Буква А в начале маркировки обозначает технический алюминий (АД, АД1); после условного номера дюралюмина часто следует обозначение, характеризующее состояние сплава:



М — мягкий (отожженный); Т — термически обработанный (закалка и естественное старение); Н — нагартованный; П — полунагартованный. Например: Д16М — дюралюмин отожженный, Д16Н — дюралюмин закаленный, естественно состаренный и дополнительно нагартованный.

Для повышения коррозионной стойкости дюралюмин подвергают электрохимическому оксидированию (анодированию). Дюралюмин Д16 имеет наиболее высокую прочность по сравнению с другими дюралюминами. Дюралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состоянии, хорошо свариваются точечной сваркой и не свариваются сваркой плавлением вследствие склонности к образованию трещин.

*Авиали (АВ)* — сплавы повышенной пластичности. По прочности они уступают дюралюминам. Авиаль удовлетворительно обрабатывается резанием (после закалки и старения) и сваривается контактной и аргонодуговой сваркой. Обладает высокой общей коррозионной стойкостью. Склонен к межкристаллической коррозии.

Авиаль закаливают от 515—525 °С с охлаждением в воде с последующим естественным старением или искусственным (при 160 °С в течение 12 ч) старением. Искусственное старение выполняется сразу же после закалки. При увеличении перерыва между временем закалки и началом искусственного старения прочность сплава после старения уменьшается. Упрочняемой фазой в авиале является  $Mg_2Si$ .

*Высокопрочные сплавы.* Представителями этих сплавов являются сплавы В95, В96. Наряду с медью и магнием они содержат значительное количество цинка. При увеличении содержания цинка и магния прочность сплавов повышается, а их пластичность и коррозионная стойкость понижается. Добавки марганца и хрома улучшают коррозионную стойкость. Сплавы В95, В96 закаливают с 460—470 °С в холодной или подогретой до 80—100 °С воде. Нагрев необходим для того, чтобы избежать растрескивания и коробления крупногабаритных полуфабрикатов.

Последующее искусственное старение проводят при 120—140 °С в течение 24—26 ч соответственно.

По сравнению с дюралюмином эти сплавы обладают большей чувствительностью к концентраторам напряжений и пониженной коррозионной стойкостью под напряжением. У них меньше предел выносливости и вязкость разрушения. Профили из сплава В95 значительно прочнее листов. Это результат пресс-эффекта, который обусловлен присутствием в сплаве марганца и хрома.

Сплавы обладают хорошей пластичностью в горячем состоянии и легко деформируются в холодном состоянии после отжига. Для повышения коррозионной стойкости листы из сплава В95 плакируют сплавом алюминия с 0,9—1,3 % Zn. Сплав В95 хорошо обрабатывается резанием и сваривается точечной сваркой.

Сплавы В95 и В96 применяют для нагруженных конструкций, работающих длительное время при температуре меньше 100—120 °С.

*Ковочные сплавы (АК).* В эту группу входят сплавы, из которых изготавливают детали методами горячей обработки давлением — ковкой, штамповкой и др. Сплавы обозначают буквами АК и цифрой, обозначающей номер сплава: АК1...АК5 и т. д. Сплавы АК относятся к сплавам системы Al—Cu—Mg—Si. Они обладают хорошей пластичностью и стойки к образованию трещин при горячей пластической деформации.

Для изготовления деталей, эксплуатация которых осуществляется при температуре до 100 °С, используют сплавы АК1, АК5, АК8; примерно до 300 °С — сплавы АК3 и АК4 (их называют жаропрочными).

Сплавы АК5 используют для изготовления деталей сложной формы и средней прочности в горячем состоянии (подмоторные рамы, фитинги, крепежные детали и др.); сплав АК8 — для тяжелонагруженных штамповочных деталей (лопасти винтов вертолетов). Сплав АК8 менее технологичен, чем сплав АК6.

Сплавы АК6 и АК8 хорошо обрабатываются резанием, удовлетворительно свариваются контактной и аргонодуговой

сваркой. Они склонны к коррозии под напряжением и межкристаллитной коррозии.

**Жаропрочные сплавы.** Из этих сплавов изготавливают детали, работающие при температуре до 300 °С (головки цилиндров, крыльчатки, лопасти и диски осевых компрессоров турбореактивных двигателей, обшивки сверхзвуковых самолетов и др.).

Сплавы АК4-1 (системы Al-Cu-Mg-Si с добавками Fe и Ni) и Д20 (системы Al-Cu-Mn с добавками Ti и Zr) имеют более сложный состав, чем другие алюминиевые сплавы, и сохраняют высокие механические свойства при 200–300 °С.

Высокая жаропрочность сплава Д20 достигается благодаря повышенному содержанию меди, а также марганца и титана, замедляющих диффузионные процессы. Кроме того, титан задерживает процесс рекристаллизации.

Сплав Д20 закаляют с  $(535 \pm 5)$  °С в воде и подвергают искусственному старению при 170–190 °С в течение 12–18 ч.

Сплав АК4-1 подвергают закалке с  $(570 \pm 5)$  °С и искусственному старению при 190–200 °С в течение 12–24 ч. При температурах эксплуатации от 20 до 200 °С сплав АК4-1 не имеет преимуществ перед дюралюмином Д16. Однако при 250–300 °С наряду со сплавом Д20 он является одним из наиболее прочных алюминиевых сплавов.

### **19.5. Деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой**

К ним относятся сплавы алюминия с марганцем или магнием, а также технический алюминий (АД, АД1), основная особенность которых — пластичность, коррозионная стойкость и хорошая свариваемость. Прочность указанных сплавов невысокая. Холодная деформация (нагартовка) позволяет увеличить ее в 1,5–2 раза.

Магний значительно повышает прочность сплава. Сплавы системы Al-Mg легируют марганцем, который, образуя дис-

персные частицы, упрочняет сплав и способствует измельчению зерен.

Рассматриваемые сплавы хорошо обрабатываются давлением (штамповкой, гибкой), хорошо свариваются и обладают высокой коррозионной стойкостью. Обработка резанием затруднена.

Сплавы алюминия с марганцем маркируют как АМц, а с магнием — АМг.

Если сплав поставляют в отожженном состоянии, то в конце обозначения марки сплава ставят букву М — мягкие (АМгМ); если степень наклепа небольшая — букву П: полунагартованные (АМгП); если наклеп значительный — букву Н (АМгН).

Алюминиевые сплавы, не подвергающиеся термообработке, применяют в сварных и крепежных соединениях, испытывающих небольшие нагрузки и требующих высокого сопротивления коррозии.

Для средненагруженных деталей и конструкций используют сплавы АМг5, АМг6 (рамы, кузова вагонов, перегородки и переборки судов, узлы подъемных кранов, изделия авиационно-космической техники).

## 19.6. Литейные алюминиевые сплавы

Литейные сплавы используют для изготовления изделий различными методами литья: в изложницах из разных материалов по выплавляемым моделям, под давлением, а также способами прецизионного литья.

Эти сплавы должны обладать высокой жидкотекучестью, небольшой усадкой, малой склонностью к образованию горячих трещин и пористостью, сопротивлением коррозии.

Высокими литейными свойствами обладают сплавы, содержащие в своей структуре эвтектику. Эвтектика образуется во многих сплавах, в которых содержание легирующих элементов больше предельной растворимости в алюминии. В связи с этим содержание легирующих элементов в литейных сплавах выше, чем в деформируемых. Чаще применяют сплавы Al—Si; Al—Cu; Al—Mg, которые дополнительно леги-

руют небольшим количеством меди и магния (Al—Si), марганца, никеля, хрома (Al—Cu). Для измельчения зерна, а следовательно улучшения механических свойств, в сплав вводят модифицирующие добавки: Ti, Zr, B, V и др.

Маркировка алюминиевых литейных сплавов, содержит буквы АЛ: А — сплав алюминиевый, Л — литейный; затем следует цифра — порядковый номер сплава.

**Сплавы Al—Si.** Эти сплавы, получившие название *силуминов*, близки по составу к эвтектическому сплаву и поэтому отличаются высокими литейными свойствами, а отливки — большой площадью.

Наиболее распространен сплав, содержащий 10—13 % Si (АЛ2), обладающий высокой коррозионной стойкостью.

Силумин АЛ2 не упрочняется термообработкой, имеет невысокие механические свойства, но из-за малого интервала кристаллизации не образует усадочной пористости. Поэтому из сплава АЛ2 изготавливают герметические отливки сложной конфигурации.

Силумин АЛ4 дополнительно легирован магнием (0,2—0,3 % Mg). При этом в сплаве образуется  $Mg_2Si$ , который является эффективным упрочнителем при термообработке. Поэтому силумины АЛ4 и АЛ9 — термически упрочненные сплавы.

Средненагруженные детали из сплава АЛ4 подвергают только искусственному старению, а крупные нагруженные детали (корпуса компрессоров, блоки цилиндров двигателей) — закалке и искусственному старению. Отливки из сплава АЛ9, требующие повышенной пластичности, подвергают закалке, а для повышения прочности — закалке и старению.

Сплавы Al—Si сравнительно легко обрабатываются резанием. Их можно сваривать, используя газовую и аргонодуговую сварку.

**Сплавы Al—Cu.** Эти сплавы (АЛ7, АЛ19) после термообработки имеют высокие механические свойства при нормальных и повышенных температурах и хорошо обрабатываются резанием. Литейные свойства сплавов невысоки из-за большой усадки, они склонны к образованию горячих

трещин. Сплав АЛ7 используется для небольших отливок простой формы, склонен к хрупкому разрушению вследствие выделения по границам зерен грубых частиц  $\text{Al}_2\text{Cu}$  и  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ , поэтому его применяют в закаленном состоянии. Если отливок требуется повышенная прочность, то их после закалки подвергают искусственному старению при  $150^\circ\text{C}$  в течение 2—4 ч.

В сплаве АЛ19 кроме  $\text{CuAl}_2$  образуются фазы  $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$  и  $\text{Al}_3\text{Ti}$ . Титан измельчает зерно. Интерметаллиды повышают жаропрочность сплава. Упрочнение сплава достигается закалкой и старением при  $175^\circ\text{C}$  в течение 3—5 ч. Сплавы  $\text{Al}-\text{Cu}$  неустойчивы против коррозии, поэтому отливки обычно анодируют.

**Сплавы  $\text{Al}-\text{Mg}$  (магналии).** К ним относятся, например, АЛ8 и АЛ27. Они имеют низкие литейные свойства, стойки против коррозии, имеют повышенные механические свойства и хорошо обрабатываются резанием. Добавление к сплавам АЛ8, АЛ27, которые содержат 0,5—11,5 %  $\text{Mg}$ , модифицирующих присадок  $\text{Ti}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Be}$  улучшает их механические свойства, а добавление бериллия к тому же уменьшает окисляемость расплава этих сплавов.

Сплавы АЛ8 и АЛ27 предназначены для отливок, работающих во влажной атмосфере (судостроение). Эти сплавы применяют после закалки от  $430^\circ\text{C}$  с охлаждением в масле ( $40-50^\circ\text{C}$ ) и выдержки при температуре закалки в течение 12—20 ч. Добавление к сплавам  $\text{Al}-\text{Mg}$  до 1,5 %  $\text{Si}$  (сплавы АЛ13, АЛ22) улучшает литейные свойства в результате образования тройной эвтектики.

**Жаропрочные сплавы.** Наиболее широко применяется сплав АЛ1, из которого изготавливают поршни, головки цилиндров и другие детали, работающие при температуре  $275-300^\circ\text{C}$ . Это сплавы системы  $\text{Al}-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{Mg}$ . Структура литого сплава АЛ1 состоит из  $\alpha$ -твердого раствора, содержащего  $\text{Cu}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ni}$ , и избыточных фаз  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ;  $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ . Отливки применяют после закалки и кратковременного старения при  $175^\circ\text{C}$ .

Более жаропрочны сплавы АЛ33, АЛ19. Высокая жаропрочность обусловлена добавками  $\text{Mn}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Ce}$ ,  $\text{Zr}$ , образующими нерастворимые интерметаллидные фазы.

Для изготовления крупногабаритных деталей, работающих при 300—350 °С, применяют сплав АЛ21. Отливки закаляют от 525 °С в горячей воде и стабилизируют отпуском при 300 °С.

## 19.7. Спеченные алюминиевые сплавы

Широкое применение в промышленности нашел дисперсно-упрочненный композиционный материал на алюминиевой основе — *спеченная алюминиевая пудра (САП)*.

Для САП характерны высокая прочность, жаропрочность, коррозионная стойкость и термическая стабильность свойств.

САП состоят из Al и  $Al_2O_3$ . Эти сплавы получают путем холодного брикетирования алюминиевого порошка, вакуумной дегазации брикетов и их последующего спекания под давлением. Оксид алюминия не растворяется в алюминии, а, равномерно распределившись в алюминиевой матрице, тормозит движение дислокаций, в результате чего предотвращается ползучесть, уменьшается пластичность и повышается прочность сплавов.

Используют САП с содержанием от 6 до 22 %  $Al_2O_3$ .

По жаропрочности САП превосходит все алюминиевые сплавы, его используют для изготовления деталей, работающих при температурах до 500 °С, когда требуются также высокая прочность и коррозионная стойкость.

САП хорошо обрабатывается давлением, резанием, удовлетворительно сваривается. Благодаря своим свойствам САП нашел широкое применение в самолето- и судостроении, в атомных реакторах, в электрохимической и химической промышленности. Из САП изготавливают поршневые штоки, лопатки компрессоров, обмотки электродвигателей, теплообменники, вентили управляющей системы реактивных двигателей и др.

Некоторое применение нашли *спеченные алюминиевые сплавы (САС)*. Чаще САС применяют, когда путем литья и

обработки давлением трудно получить соответствующий сплав. Изготавливают САС с особыми физическими свойствами. Они содержат большое количество легирующих элементов, например САС1 содержит 25—30 % Si; 5—7 % Ni; остальное — Al; применяют для деталей приборов, работающих в паре со сталью при температуре 20—200 °С и требующих низкого коэффициента линейного расширения и малой теплопроводности.

В настоящее время используют *гранулированные алюминиевые сплавы* с высоким содержанием переходных металлов (Fe, Ni, Co, Mn, Cr, Zr, Ti, V и др.), в малой степени растворимые алюминием. Гранулы — литые частицы диаметром 1—4 мм. Капли жидкого металла охлаждают в воде ( $10^3$ — $10^6$  °С/с), что позволяет получить сильно пересыщенные твердые растворы. В процессе нагрева (400—450 °С) при изготовлении из гранул деформированных полуфабрикатов твердый раствор распадается с выделением дисперсных частиц интерметаллидов, которые упрочняют сплав.

## 19.8. Алюминиевые подшипниковые сплавы

Основными компонентами сплавов являются Sn, Cu, Ni, Si, образующие с алюминием гетерогенные структуры.

Чем больше олова в сплаве, тем выше его антифрикционные свойства. Однако в литых сплавах содержание олова не должно превышать 10—12%, так как образующаяся грубая сетка оловянистой составляющей снижает износостойкость и сопротивление усталости при повышении температуры. В деформированных сплавах оловянистая составляющая разлагается в виде отдельных включений внутри зерен, это дает возможность увеличить содержание олова и значительно улучшить антифрикционные свойства сплава.

Сплавы АОЗ-1 и АО9-2 применяют для отливки монометаллических вкладышей и втулок толщиной более 10 мм. Сплавы АО20-1 и АН-2,5 предназначены для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки с после-



дующей штамповкой вкладышей. Подшипники из сплава АН-2,5 можно изготавливать и отливкой.

В тяжелонагруженных скоростных подшипниках на рабочую поверхность сплавов АОЗ-1, АО9-2 и АН-2,5 наносится слой (0,02—0,03 мм) олова или другого мягкого металла.

Подшипники работают при нагрузке не более 200—300 кгс/мм<sup>2</sup> и окружной скорости 15—20 м/с.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. По каким признакам классифицируются алюминиевые сплавы?
2. Назовите виды термической обработки алюминиевых сплавов.
3. Перечислите основные деформируемые и литейные алюминиевые сплавы.
4. Какие легирующие элементы обеспечивают литейные свойства алюминиевых сплавов?
5. Каким образом достигаются высокие антифрикционные свойства у алюминиевых подшипниковых сплавов?

## Глава 20

### СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ

Медь — один из первых металлов, которые человек стал применять для технических целей. Периоды использования меди и бронзы ознаменовали целые эпохи развития человеческой цивилизации — медный век и бронзовый век.

#### 20.1. Свойства меди

Медь относится к группе цветных металлов, наиболее широко применяемых в промышленности. Медь имеет ГЦК-решетку. Свойства меди приведены в табл. 20.1.

Таблица 20.1

## Свойства меди

Атомный номер	29
Атомная масса	63,5
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	8,9
Температура плавления, °С	1083
Атомный диаметр, нм	0,256
Скрытая теплота плавления, Дж/г	205
Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м · К)	387
Температурный коэффициент линейного расширения × 10 <sup>6</sup> при 25 °С	16,8
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом · см × 10 <sup>6</sup>	1,72
Модуль нормальной упругости E, МПа	125 000

Чистая медь обладает высокой тепло- и электропроводностью, пластичностью и коррозионной стойкостью. Хорошо обрабатывается давлением, удовлетворительно — резанием. Выпускается в виде катодов, слитков, полос, лент, труб, проволоки, поковок, листов.

Марки технической меди в зависимости от чистоты приведены в табл. 20.2.

Таблица 20.2

## Марки меди

Марка	Содержание меди, %, не менее	Марка	Содержание меди, %, не менее	Марка	Содержание меди, %, не менее
M00к	99,99	M0б	99,97	M2р	99,7
M0ку	99,97	M1б	99,95	M3р	99,5
M0к	99,95	M1	99,9	M2	99,7
M1к	99,9	M1р	99,9	M3	99,5
M00б	99,99	M1ф	99,85	M4	99,0

**Примечание.** В обозначениях марки меди буквы обозначают: к — катодная медь; у — катодная переплавленная; б — бескислородная; р и ф — раскисленная.

По тепло- и электропроводности медь занимает второе место после серебра, но ввиду ее большого практического значения эти свойства меди принято считать эталоном (100 %), по

отношению к которому оцениваются другие металлы. Медь широко применяют для изготовления проводников электрического тока, анодов, кабелей, шин в электровакуумной и электронной технике, а также различных теплообменников, нагревателей, холодильников, радиаторов.

Медь имеет высокую коррозионную стойкость в пресной и морской воде, в атмосферных условиях и различных химических средах: органических кислотах, едких щелочах, сухих газах (галогенах) и др. Медь реагирует с аммиаком, растворяется в азотной, соляной, горячей концентрированной серной кислоте, в кислых растворах хромовых солей.

Механические свойства меди зависят от ее состояния.

Холодная пластическая деформация увеличивает прочность, твердость и упругость меди, но снижает пластичность и электропроводность. Отжиг для снятия наклепа проводят при температуре 550—650 °С в восстановительной атмосфере, так как медь при нагреве легко окисляется.

В зависимости от способа получения медь может содержать различные примеси.

По характеру взаимодействия с медью примеси можно разделить на три группы:

— *примеси, образующие с медью твердые растворы*, — Na, Zn, Sb, Sn, Al, As, Fe, P и др. Эти примеси резко снижают электро- и теплопроводность меди, поэтому для проводников тока применяют медь марок М0 и М1, содержащую  $\leq 0,002\%$  Sb и As;

— *примеси, не растворимые в меди, образующие в ней легкоплавкие эвтектики*, которые, выделяясь по границам зерен, затрудняют обработку давлением (Pb, Bi). На электропроводность эти примеси оказывают небольшое влияние;

— *примеси кислорода и серы, образующие с медью хрупкие химические соединения*  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ , входящие в состав эвтектики.

Значительное количество изделий из меди изготавливают обработкой давлением (прессованием, волочением, прокаткой). Обработка давлением при нормальных температурах вызывает наклеп меди. Наклепанная (нагартованная)

медь обладает повышенной прочностью. Для снятия наклепа медь подвергают термообработке — отжигу при температуре 600—700 °С. При более высоких (выше 900 °С) температурах происходит бурный рост зерен меди и ухудшаются ее механические свойства.

## 20.2. Медные сплавы

Сохраняя положительные качества меди (высокую тепло- и электропроводность, коррозионную стойкость), медные сплавы обладают хорошими механическими, технологическими и антифрикционными свойствами.

Для легирования медных сплавов в основном используют элементы, растворимые в меди: Zn, Sn, Ae, Be, Si, Mn, Ni. Повышая прочность медных сплавов, легирующие элементы практически не снижают пластичность, а некоторые из них до определенных концентраций увеличивают ее. Высокая пластичность является отличительной особенностью медных сплавов.

По технологическим свойствам медные сплавы подразделяют на *деформируемые* и *литейные*; по способности упрочняться с помощью термообработки — на *упрочняемые* и *не упрочняемые* термообработкой.

По химическому составу медные сплавы подразделяются на две основные группы: *латуни* и *бронзы*.

## 20.3 Латуни

*Латунями* называются сплавы меди с цинком.

Предельная растворимость цинка в меди составляет 39 %. При большем содержании цинка образуется электронное соединение CuZn ( $\beta$ -фаза) с ОЦК-решеткой. При температурах 454—468 °С наступает упорядочение электронного соединения, сопровождающееся значительным повышением его твердости и хрупкости. Эту фазу обозначают  $\beta'$ .

В области  $\alpha$ -твердого раствора прочность и пластичность растут. При появлении в структуре  $\beta'$ -фазы происходит резкое снижение пластичности, прочность продолжает повышаться при увеличении цинка до 45 %. При большем содержании цинка структура сплава состоит только из  $\beta'$ -фазы и прочность сильно уменьшается из-за высокой хрупкости. Практическое значение имеют латуни, содержащие до 45 % Zn.

При содержании цинка до 39 % латуни однофазны ( $\alpha$ -латуни), до 46 % — двухфазны ( $(\alpha + \beta')$ -латуни).

Лучшей пластичностью обладают однофазные латуни, содержащие около 30 % Zn. Однофазные латуни хорошо поддаются холодной пластической деформации, которая значительно повышает их прочность и твердость.

Двойные латуни маркируют буквой Л и числом, указывающим среднее содержание меди. Например: Л80 — латунь, содержащая 80% Cu и 20 % Zn.

Двухфазные латуни нередко легируют Al, Fe, Ni, Sn, Mn, Pb и другими элементами. Такие латуни называют *многокомпонентными* или *специальными*. *Легирующие элементы и их концентрацию в составе латуни указывают в маркировке*. Например, ЛАЖ60-1-1 — это латунь с 60 % Cu, легированная алюминием (А) в количестве 1 % и железом (Ж) в количестве 1%; остальное — цинк. Для обозначения вида легирующих элементов используют буквы русского алфавита. Например: О — олово, Ц — цинк, Мц — марганец, Ж — железо, Ф — фосфор, Б — бериллий, Х — хром, К — кремний и т. д.

*Деформируемые латуни* маркируют буквой Л и цифрой, указывающей массовое содержание меди в сплаве в процентах (например: Л96, Л63). Если латунь легирована наряду с цинком другими элементами, то после буквы Л ставят условные обозначения этих элементов. Цифры после букв показывают содержание меди и последующих (согласно буквенным обозначениям) легирующих элементов, кроме цинка (например, латунь ЛАН59-3-2 содержит  $\approx 59$  % Cu; 3 % Al; 2 % Ni; остальное — Zn).

*Литейные латуни* также маркируют буквой Л. Здесь после буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего (как в сталях) ставят цифру, указывающую на его среднее содержание в сплаве (например, латунь ЛЦ 23А6ЖЗМц2 содержит 23 % Zn; 6 % Al; 3 % Fe; 2 % Mn).

Введение легирующих элементов (кроме никеля) уменьшает растворимость цинка в меди и способствует образованию  $\beta'$ -фазы, поэтому специальные латуни ( $\alpha + \beta'$ ) чаще двухфазные.

*Никель* — увеличивает растворимость цинка в меди. При добавлении его в ( $\alpha + \beta'$ )-латуни количество  $\beta'$ -фазы уменьшается, и при достаточном его содержании латунь из двухфазной становится однофазной ( $\alpha$ -латунь). Легирующие элементы увеличивают прочность (твердость), но уменьшают пластичность латуни.

*Свинец* — облегчает обрабатываемость резанием и улучшает антифрикционные свойства.

*Алюминий* — повышает прочность, твердость и коррозионную стойкость латуней. Практическое применение находят высокомедистые латуни с добавлением алюминия до 4 % (ЛА77-2), которые благодаря однофазной структуре хорошо обрабатываются давлением. Латунь ЛА77-2 обладает высокой коррозионной стойкостью в морской воде, ее используют для изготовления конденсаторных трубок в морском судостроении.

*Олово* — повышает коррозионную стойкость латуней в морской воде, поэтому оловянные латуни (ЛО70-1, ЛО62-1) называются *морскими*; их применяют в основном в судостроении.

*Кремний* — повышает коррозионную стойкость и технологические свойства латуней. Улучшаются жидкотекучесть, свариваемость и способность к горячей и холодной пластической деформации. Кремнистые латуни характеризуются высокой прочностью, пластичностью, вязкостью не только при комнатных, но и при низких температурах (до  $-183^\circ\text{C}$ ). При

легировании латуни для получения однофазной структуры используют небольшие добавки кремния (ЛК80-3). Латуны ЛК80-3 применяют в виде холоднокатаных прутков, поковок, штамповок, а также для изготовления сложных фасонных отливок (арматура, детали приборов, в судостроении и общем машиностроении).

*Никель* — улучшает механические свойства и повышает коррозионную стойкость латуней. Никелевые латуни (ЛН65-5) хорошо обрабатываются давлением в холодном и горячем состояниях. Ввиду высокой коррозионной стойкости их применяют в морском судостроении (например, конденсаторные и монометрические трубы).

Латуни в наклепанном состоянии или с высокими остаточными напряжениями и содержащие свыше 20 % Zn с течением времени склонны к коррозионному растрескиванию («сезонное растрескивание») и обесцинкованию в присутствии влаги, кислорода и аммиака. Кратковременный отжиг при 250—300 °С способствует снятию внутренних напряжений и предотвращению коррозионного растрескивания. Для устранения склонности к обесцинкованию в латуни добавляют фосфор (0,2 %), мышьяк (0,02—0,06 %).

Все латуни по технологическому признаку подразделяют на две группы: *деформируемые*, из которых изготавливают листы, ленты, трубы, проволоку и другие полуфабрикаты, и *литейные* — для фасонного литья. Литейные латуни, как правило, содержат большое количество цинка и легирующих элементов, обладают хорошей жидкотекучестью, мало склонны к ликвации и имеют антифрикционные свойства.

Когда требуются высокая пластичность и повышенная теплопроводность и важно отсутствие склонности к коррозионному растрескиванию, применяют  $\alpha$ -латуни с высоким содержанием меди. Латуни, содержащие 90 % меди и более, называются *томпаком* (Л96), 80—90 % Cu — *полутомпаком* (Л90, Л80). Латуны, содержащая 70—68 % Cu, называется

*патронной* или *гильзовой*, так как в артиллерийском производстве ее с давних пор применяют для изготовления гильз.

Для уменьшения твердости перед обработкой давлением и получения в полуфабрикатах требуемых свойств латуни подвергают рекристаллизационному отжигу при 600—700 °С. Для получения мелкого зерна перед глубокой вытяжкой полосы и ленты отжигают при более низкой температуре (450—500 °С).

Структура и свойства ( $\alpha + \beta'$ )-латуней зависят от скорости охлаждения. При быстром охлаждении возрастает количество  $\beta'$ -фазы, что повышает твердость латуни и улучшает обрабатываемость резанием. Когда нужна высокая пластичность, например для холодной обработки давлением, охлаждение должно быть медленным, чтобы получить возможно большее количество  $\alpha$ -фазы.

Литейные латуни содержат большее количество специальных присадок, улучшающих их литейные свойства. Эти латуни отличаются и лучшей коррозионной стойкостью.

## 20.4. Бронзы

*Бронзами* называют сплавы меди со всеми элементами, кроме цинка. Цинк не является основной добавкой, но может присутствовать в составе бронзы только наряду с другими элементами.

Название бронзам дают по основным легирующим элементам: оловянные, алюминиевые, бериллиевые, кремнистые и другие бронзы.

Бронзы обладают хорошими литейными свойствами, их усадка в три раза меньше, чем у других сплавов. Некоторые бронзы имеют достаточно высокую пластичность и хорошо обрабатываются давлением и резанием. Большинство из бронз имеют хорошую коррозионную стойкость. Бронзы широко используют как антифрикционные сплавы.



*Деформируемые бронзы* маркируют буквосочетанием «Бр», далее последовательно указывают легирующие элементы и в конце — их содержание в сплаве. Например, БрОФ6-0,4 содержит 6 % олова; 0,4 % фосфора; остальное — Cu.

Деформируемые бронзы изготавливают в виде прутков, лент и проволоки в нагартованном (твердом) и отожженном (мягком) состояниях. Эти бронзы чаще предназначаются для изготовления пружин и пружинных деталей, применяемых в различных отраслях промышленности. Структура деформируемых оловянных бронз —  $\alpha$ -твердый раптор.

*Литейные бронзы* также маркируются буквами «Бр», а после этих букв маркировка производится аналогично литейным латуням. Например, БрОЗЦ12С5 содержит 3 % Sn; 12 % Zn; 5 % Pb; остальное — Cu.

Литейные бронзы содержат более 6 % Sn и большое количество легирующих добавок по сравнению с деформируемыми: цинка, фосфора, свинца. Они имеют двухфазную структуру ( $\alpha + \delta$ ).

*Оловянные бронзы* обладают высокой коррозионной и химической стойкостью. Они не корродируют в атмосферных условиях, пресной и морской воде. Широко применяются для пароводяной арматуры, работающей под давлением; хорошо обрабатываются резанием, паяются, но хуже свариваются.

Оловянные бронзы обладают хорошими литейными свойствами; их применяют для литья деталей сложной формы. Недостатком отливок из оловянистых бронз является большая микропористость. Наличие твердых включений эвтектичной  $\delta$ -фазы в сравнительно мягкой основе твердого раствора обеспечивает высокие антифрикционные свойства литейных бронз. Они имеют низкий коэффициент трения, хорошую притираемость и износостойкость при работе в паре со сталью в сочетании с высокой теплопроводностью и хорошими механическими свойствами. Это позволяет использовать их для изготовления подшипников скольжения ответст-

венного назначения, работающих при больших давлениях и высоких скоростях.

В целях удешевления оловянных бронз содержание олова в литейных бронзах не превышает 3—6 %.

Для облегчения обработки давлением бронзы подвергают гомогенизации при 700—750 °С с последующим быстрым охлаждением.

*Алюминиевые бронзы.* Алюминиевые бронзы отличаются высокими механическими, антикоррозионными и антифрикционными свойствами. Эти бронзы кристаллизуются в узком интервале температур, поэтому обладают высокой жидкотекучестью, обеспечивают хорошую герметичность и концентрированную усадочную раковину. Вместе с тем из-за большой усадки иногда трудно получить сложную фасонную отливку.

Алюминиевые бронзы хорошо сопротивляются коррозии в морской воде и тропической атмосфере, имеют высокие механические и технологические свойства. Однофазные бронзы, обладающие высокой пластичностью, применяют для глубокой штамповки. Двухфазные бронзы подвергают горячей деформации или применяют в виде фасонного литья. Из них изготавливают детали, работающие в тяжелых условиях износа при повышенных температурах (400—500 °С). Литейные свойства алюминиевых бронз ниже, чем литейные свойства оловянных бронз, но они обеспечивают высокую плотность отливок.

Высокими механическими, антикоррозионными и технологическими свойствами обладают алюминиевые бронзы, легированные вместо никеля более дешевым марганцем (БрАМцЖ 10-3-1).

*Бериллиевые бронзы.* Бериллиевые бронзы отличаются чрезвычайно высокими пределами упругости и прочности, твердостью и коррозионной стойкостью в сочетании с повышенным сопротивлением усталости, ползучести, износу. Эти бронзы относятся к сплавам, упрочняемым термообработкой.

Бериллиевые бронзы относятся к теплостойким материалам. Они устойчиво работают при температурах до 310–340 °С. При 500 °С они имеют приблизительно такую же прочность, как оловянные и алюминиевые бронзы, обладают высокой тепло- и электропроводностью. Бериллиевые бронзы хорошо обрабатываются резанием и свариваются точечной и шовной сваркой. Широкий температурный интервал кристаллизации затрудняет сварку плавлением.

Бериллиевые бронзы выпускают в виде полос, лент, проволоки и других деформированных полуфабрикатов. Вместе с тем из них можно получить качественные фасонные отливки. Из бериллиевых бронз изготавливают детали особо ответственного назначения: упругие элементы точных приборов (мембраны, пружины, пружинящие контакты и др.); подшипники, работающие при высоких скоростях и давлениях и повышенных температурах; детали, работающие на износ (шестерни, червячные передачи).

Основным недостатком бериллиевых бронз является их высокая стоимость. Легирование Mn, Ti, Ni, Co позволяет уменьшить содержание бериллия до 1,7–1,9 % без заметного снижения механических свойств (БрБНТ-1,7; БрБНТ-1,9).

*Кремнистые бронзы.* Кремнистые бронзы характеризуются хорошими механическими, пружинящими и антифрикционными свойствами, а также высокой коррозионной стойкостью. Они являются заменителями дорогостоящих оловянных и бериллиевых бронз. Однофазная структура твердого раствора обеспечивает кремнистым бронзам хорошую пластичность и обрабатываемость давлением. Они свариваются, паяются, удовлетворительно обрабатываются резанием. Литейные свойства кремнистых бронз ниже, чем оловянных и алюминиевых бронз, латуней. Для улучшения свойств вводят легирующие элементы.

Из кремнистых бронз изготавливают главным образом ленты, полосы, прутки, проволоку. Для фасонных отливок они применяются редко. Их используют при производстве пружин, мембран, пружинящих деталей приборов и радиообору-

дования, работающих при температурах до 250 °С, а также в агрессивных средах (пресной и морской воде).

*Свинцовые бронзы.* Свинцовые бронзы выгодно сочетают в себе хорошие антифрикционные свойства с высокой теплопроводностью. Кроме того, они хорошо воспринимают ударные и усталостные нагрузки. В связи с этим их применяют для ответственных высоконагруженных подшипников, работающих на больших скоростях (подшипники авиационных двигателей, машинных турбин).

Наибольшее применение имеют бронзы, содержащие 25—30 % Pb. Медь и свинец в твердом состоянии нерастворимы друг в друге и образуют эвтектику, которая практически состоит из чистого свинца и меди. Эвтектика с температурой плавления 326 °С располагается по границам зерен первичной меди. Такая структура бронзы обеспечивает высокие антифрикционные свойства. Это предопределяет широкое применение бронзы БрС30 для изготовления вкладышей подшипников скольжения, работающих при усиленных режимах. По сравнению с оловянными подшипниковыми бронзами теплопроводность бронзы БрС30 в 4 раза больше, поэтому она хорошо отводит теплоту, возникающую при трении. Двойные свинцовые бронзы обладают низкими механическими свойствами. Поэтому бронзу БрС30 применяют в виде тонкого слоя на более прочной, например стальной, подложке, из которой затем изготавливают подшипники. Легирование свинцовых бронз Sn, Ni, Mn, образующими с медью твердые растворы, повышает их прочность и твердость. Легированные бронзы используют в виде монометаллических подшипников и втулок. Для улучшения прирабатываемости иногда на рабочую поверхность подшипника наносят микрослой свинца или индия. Свинцовые бронзы склонны к ликвации свинца при кристаллизации, что ухудшает их антифрикционные свойства. Этот недостаток устраняют благодаря ускоренной кристаллизации, которая обеспечивает мелкозернистую структуру с равномерным распределением свинца.

*Марганцевые бронзы.* Марганцевые бронзы отличаются высокой коррозионной стойкостью и повышенной жаропрочностью. Эти сплавы содержат от 5 до 12 % Мп. По диаграмме состояния Cu—Мп они имеют однофазную структуру  $\gamma$ -твёрдого раствора марганца в меди, что обеспечивает им хорошую обрабатываемость давлением. Повышенная жаропрочность этих бронз объясняется тем, что марганец увеличивает температуру рекристаллизации меди.

Из двойных марганцевых бронз наибольшее промышленное применение имеет бронза БрМц5. Ее прочность мало меняется при нагреве до 400 °С. Бронзу БрМц5 выпускают в виде деформированных полуфабрикатов (поковок, листов, лент), которые применяют для изготовления деталей, работающих при повышенных температурах. Небольшой температурный интервал кристаллизации обеспечивает бронзе БрМц5 хорошую жидкотекучесть, что позволяет изготавливать из нее фасонные отливки (арматуру паровых котлов).

Для придания антифрикционных свойств в марганцевые бронзы вводят свинец, для повышения прочности и твердости — никель, для улучшения литейных свойств — кремний и алюминий.

## 20.5. Медно-никелевые сплавы

К медно-никелевым сплавам относятся сплавы на основе меди, в которых основным легирующим элементом является никель. Легирование меди с никелем значительно повышает ее механические свойства, коррозионную стойкость, термоэлектрические характеристики. Промышленные медно-никелевые сплавы можно условно разделить на две группы: **конструкционные** и **электротехнические**. К первой группе относятся коррозионностойкие и высокопрочные сплавы — мельхиоры, нейзильберы и куниали. В качестве дополнительных легирующих элементов в них добавляют марганец, алюми-

ний, цинк, железо, кобальт, свинец, а также хром, церий, магний, литий.

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

Мельхиоры, например марки МН19(19Ni), отличаются высокой коррозионной стойкостью в морской воде, органических кислотах, растворах солей и т. д.; имеют высокую пластичность. Применяются в морском судостроении, для изготовления монет, медицинского инструмента.

*Нейзильберы* — сплавы на основе меди, в которых основными легирующими элементами являются никель и цинк. Они представляют собой твердые растворы на основе меди. Легирование цинком приводит к повышению механических свойств медно-никелевых сплавов, приданию им красивого серебристого цвета и их удешевлению. Нейзильберы отличаются высокой коррозионной стойкостью, не окисляются на воздухе, сравнительно устойчивы в органических кислотах и растворах солей; обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях. Небольшое количество свинца вводят для улучшения обработки резанием.

Нейзильберы, например марки МНЦ15-20 (15 % Ni; 20 % Zn), имеют более высокую, чем мельхиоры, прочность, коррозионную стойкость, красивый серебристый цвет. Из них изготавливают изделия широкого потребления, приборы точной механики.

Сплавы на основе тройной системы Cu—Ni—Al называют *куниалями*. Они отличаются высокими механическими и упругими свойствами, коррозионной стойкостью, устойчивостью при низких температурах. Обрабатываются давлением в горячем состоянии. Поскольку предел растворимости  $\alpha$ -твердого раствора на основе меди резко уменьшается с

понижением температуры, куниали относятся к дисперсионно-твердеющим сплавам. Их упрочняют после термообработки, заключающейся в закалке с 900—1000 °С в воде и старении при 500—600 °С. При старении происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием двух- или трехфазной структуры с мелкодисперсными выделениями  $\theta$ -фазы, представляющей собой соединение  $\text{NiAl}$ , или одновременно  $\theta$ - и  $\beta$ -фаз, представляющих собой соединение  $\text{NiAl}_2$ .

Разработана принципиально новая группа сплавов типа «нейзильбер» с двухфазной ( $\alpha + \beta$ )-структурой, например сплав  $\text{Cu} - 15\%$ ;  $\text{Ni} - 37,5\%$ ; остальное —  $\text{Zn}$ . К этим сплавам применяют обработку «микродуплекс», заключающуюся в закалке с последующей холодной деформацией с заданной степенью обжатия, определяющей возможность прохождения рекристаллизации при старении с одновременным выделением  $\beta$ -фазы. Выделение  $\beta$ -фазы облегчает зарождение рекристаллизованных зерен вследствие объединения пересыщенного твердого раствора и тормозит их рост благодаря снижению энергии их границ. В результате такой обработки образуются сверхмелкие зерна и мельчайшие выделения второй фазы, что приводит к росту механических свойств, особенно предела усталости, и приобретению сверхпластичности при старении.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как называют основные группы сплавов меди?
2. Какие основные легирующие элементы используют в латунях? Как они влияют на свойства сплавов?
3. Что такое бронзы? Каковы их разновидности?
4. Перечислите медно-никелевые сплавы и укажите их назначение.
5. Как маркируются сплавы меди?

## Глава 21

## СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

## 21.1. Свойства титана

Титан — металл серебристо-белого цвета — является одним из наиболее распространенных элементов земной коры: занимает четвертое место, уступая только алюминию, железу и магнию.

Титан существует в двух полиморфных модификациях:  $\alpha$ -титан, имеющий ГПУ-решетку при температурах ниже 885 °С, и  $\beta$ -титан с ОЦК-решеткой, устойчивый при температурах выше 885 °С (табл. 21.1).

Таблица 21.1

## Свойства титана

Атомный номер .....	22
Атомная масса .....	47,0
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup> .....	4,5
Температура плавления, °С .....	1668
Атомный диаметр, нм .....	$d_{\alpha} = 0,289$ $d_{\beta} = 0,286$
Скрытая теплота плавления, Дж/г .....	358
Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м · К) .....	18,85
Температурный коэффициент линейного расширения $\times 10^6$ при 25 °С .....	8,15
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом · см $\times 10^6$ .....	45
Модуль нормальной упругости E, МПа .....	112 000

Отличительные особенности титана — высокие механические свойства, малая плотность, высокая удельная прочность и хорошая коррозионная стойкость.

Низкий модуль упругости титана, почти в 2 раза меньший, чем у железа и никеля, затрудняет изготовление жестких конструкций.



Механические свойства титана характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности.

Титан обладает высокой прочностью не только при комнатной температуре, но и в условиях глубокого холода. При этом, если содержание водорода мало, он сохраняет высокую пластичность.

Пластическая деформация значительно повышает прочность титана. При степени деформации 60–70 % прочность увеличивается в 2 раза. Для снятия наклепа проводят рекристаллизационный отжиг при температуре 650–750 °С.

Титан обладает высокой коррозионной и химической стойкостью благодаря защитной оксидной пленке на его поверхности. Он не корродирует в пресной и морской воде, не растворяется во многих органических и минеральных кислотах, в царской водке и других агрессивных средах. При повышении температуры, особенно под напряжением, коррозионная стойкость титана ухудшается.

При повышении температуры титан активно поглощает газы: начиная с 50–70 °С — водород, свыше 400–500 °С — кислород и с 600–700 °С — азот, оксид углерода и углекислый газ. Титан имеет низкую жаростойкость. Высокая химическая активность расплавленного титана требует применения при плавке и дуговой сварке вакуума или атмосферы инертных газов.

Технический титан хорошо обрабатывается давлением при комнатной и повышенной температурах. Из него изготавливают все виды прессованного и катаного полуфабриката: листы, трубы, проволоки, поковки и др. Титан хорошо сваривается аргонодуговой и точечной сваркой. Сварной шов обладает хорошим сочетанием прочности.

Слитки титана можно обрабатывать давлением всеми известными способами: ковать, прокатывать, штамповать и т. д. Слитки титана перед обработкой давлением рекомендуется нагревать ступенчато: сначала — длительный нагрев при температуре 700–750 °С, затем — кратковременный нагрев при

850—1000 °С. Время выдержки при высокой температуре должно составлять не более 30 сек на 1 мм сечения. Из-за опасности загрязнения титана газами нагрев под горячую обработку и сам процесс обработки следует производить в возможно минимальное время.

Титан после холодного деформирования отжигают при температуре 650—700 °С с выдержкой от 15 мин до 1 ч — в зависимости от толщины полуфабриката.

Механические свойства титана сильно зависят от наличия примесей.

Азот, кислород, водород, углерод являются вредными примесями титана.

Титан плохо обрабатывается резанием, налипает на инструмент и быстро его изнашивает. Для обработки титана требуются инструменты из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, малые скорости резания при большой подаче и глубине резания, интенсивное охлаждение.

## 21.2. Промышленные титановые сплавы

Преимуществом титановых сплавов по сравнению с техническим титаном являются более высокая прочность, жаропрочность, жаростойкость при достаточно хорошей пластичности, высокой коррозионной стойкости и малой плотности. Поэтому титановые сплавы получили широкое применение в авиации, ракетной технике, судостроении, химической и других отраслях промышленности. Их применяют для изготовления обшивки сверхзвуковых самолетов, деталей конструкций реактивных авиационных двигателей (дисков и лопаток компрессоров, деталей воздухозаборников и др.), корпусов ракетных двигателей второй и третьей ступеней, баллонов и шаробаллонов для сжатых и сжиженных газов, обшивки морских судов, подводных лодок и торпед и др.

По характеру обработки металла сплавы титана делятся на *деформируемые* и *литейные*. По механическим свойствам

вам — на сплавы *нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности*. По способности упрочняться с помощью термообработки титановые сплавы делятся на упрочняемые и не упрочняемые термообработкой.

**Деформируемые сплавы.** Сплавы с  $\alpha$ -структурой (BT5, BT5-1) характеризуются средней прочностью при комнатной температуре, высокими механическими свойствами при криогенных температурах, хорошей жаропрочностью, сопротивлением ползучести и жаростойкостью. Сплавы имеют высокую термическую стабильность и обладают отличной свариваемостью и коррозионной стойкостью. Обрабатываемость резанием удовлетворительная.

Недостатки этих сплавов: отсутствие способности упрочняться термообработкой и низкая технологическая пластичность. Сплавы с оловом более технологичны и жаростойки, обладают высоким сопротивлением ползучести. Это самые дорогие из  $\alpha$ -сплавов. В горячем состоянии сплавы куят, прокатывают и штампуют. Их поставляют в виде прутков, сортового проката, поковок, труб и проволоки.

*Сплав BT5* предназначен для изготовления деталей, работающих при температурах до 400 °С.

*Сплав BT5-1* имеет рабочую температуру до 500 °С.

К группе  $\alpha$ -сплавов относятся чистый титан, а также псевдо- $\alpha$ -сплавы, имеющие небольшое количество  $\beta$ -фазы (1—5 %) вследствие дополнительного легирования марганцем (OT4, BT4 и др.). Сохраняя достоинства  $\alpha$ -сплавов, последние благодаря наличию  $\beta$ -фазы обладают высокой технологической пластичностью.

*Сплавы OT4-1, OT4*, содержащие меньше алюминия (соответственно 2—3 %), обрабатывают давлением в холодном состоянии и только при изготовлении сложных деталей подогревают до 500—700 °С. Сплавы с большим содержанием алюминия (BT4 и OT4-2) при обработке давлением требуют подогрева до 600—800 °С.

Недостатком сплавов этой группы является склонность к водородной хрупкости, поэтому допустимое содержание водорода колеблется в пределах 0,02–0,05 %.

*Двухфазные ( $\alpha + \beta$ )-сплавы* (BT3-1, BT6, BT8, BT14 и др.) обладают лучшим сочетанием технологических и механических свойств. Их упрочняют термообработкой — закалкой и старением. В отожженном и закаленном состояниях они имеют хорошую пластичность, а после закалки и старения — высокую прочность при комнатной и повышенной температурах. При этом чем больше  $\beta$ -фазы содержится в структуре сплава, тем он сильнее упрочняется при термообработке.

*Сплавы BT14, BT15, BT16* являются особо высокопрочными. Большое количество  $\beta$ -фазы в этих сплавах объясняется высоким содержанием ванадия, молибдена, хрома.

*Сплавы BT3-1, BT8 и BT9* являются жаропрочными.

В этих сплавах присутствует алюминий. Алюминий значительно упрочняет  $\alpha$ -фазу при комнатных и повышенных температурах и повышает термическую стабильность  $\beta$ -фазы. Алюминий снижает плотность ( $\alpha + \beta$ )-сплавов, несмотря на присутствие в этих сплавах более тяжелых  $\beta$ -стабилизаторов.

Двухфазные сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием и свариваются. После сварки требуется отжиг для повышения пластичности сварного шва. Сплавы ( $\alpha + \beta$ ) куются, штамуются и прокатываются легче, чем сплавы с  $\alpha$ -или  $\beta$ -структурой. Их поставляют в виде поковок, штамповок, прутков, листов, лент.

*Однофазные  $\beta$ -сплавы* не имеют промышленного применения. Они дороги, обладают пониженной удельной прочностью.

В настоящее время применяются так называемые псевдо- $\beta$ -сплавы (BT15). В равновесном состоянии сплав BT15 имеет преимущественно  $\beta$ -структуру с небольшим количеством  $\alpha$ -фазы. Этот сплав имеет небольшую плотность (4,8 г/см<sup>3</sup>) и высокую удельную прочность, удовлетворительно обрабатывается резанием.

Недостатки сплава ВТ15 — пониженная пластичность сварных швов и низкая термостабильность. Поставляют в виде листов, полос, прутков, поковок. Рекомендуются для длительной работы при температуре до 350 °С.

**Литейные сплавы.** Титановые сплавы имеют хорошие литейные свойства. Небольшой температурный интервал кристаллизации обеспечивает им высокую жидкотекучесть и хорошую плотность отливки. Они обладают малой склонностью к образованию горячих трещин и небольшой линейной усадкой (1 %). Объемная усадка составляет около 3 %.

Недостатками литейных титановых сплавов являются большая склонность к поглощению газов и высокая активность при взаимодействии со всеми формовочными материалами. Поэтому их плавку и разливку ведут в вакууме или в среде нейтральных газов. Для получения крупных фасонных отливок (до 300—500 кг) используют чугунные и стальные формы, мелкие детали отливают в оболочковые формы, изготовленные из специальных смесей.

Для фасонного литья применяют сплавы, аналогичные по химическому составу некоторым деформируемым (ВТ5Л, ВТ6Л, ВТ9Л, ВТ14Л), а также специальные литейные сплавы (ВТ20Л, ВТ21Л, ВТ35).

Литейные сплавы обладают более низкими механическими свойствами, чем соответствующие деформируемые. Упрочняющая термообработка резко снижает пластичность литейных сплавов и поэтому не применяется.

**Сплав ВТ5Л** — самый дешевый и распространенный, обладает хорошими литейными свойствами, достаточно вязок и пластичен, но прочность его невысока.

**Сплав ВТ35Л** — наиболее прочный из промышленных сплавов. Литейные титановые сплавы применяют для изготовления трубных заготовок и различных фасонных отливок.

**Порошковые титановые сплавы.** Высокая стоимость изготовления и трудность механической обработки сплавов на основе титана являются серьезным препятствием на пу-

ти их широкого применения. Методы порошковой технологии позволяют повысить коэффициент использования металла путем уменьшения отходов при механической обработке.

Получение порошков из сплавов на основе титана представляется сложной проблемой вследствие вредного влияния различных примесей. Высокая химическая активность расплавленного титана делает невозможным применение большинства огнеупоров в качестве материалов для тиглей. Поэтому используют методы дуговой плавки с вращающимся анодом и неподвижным вольфрамовым катодом, электроплазменной плавки, плавки в вакууме и т. п.

### **21.3. Термическая обработка титановых сплавов**

Титановые сплавы в зависимости от их состава и назначения можно подвергать отжигу, закалке, старению и химико-термической обработке. Чаще титановые сплавы подвергают отжигу. Отжиг проводят главным образом после холодной деформации для снятия наклепа. Температура отжига должна быть выше температуры рекристаллизации (700—800 °C). Температура рекристаллизации титана в зависимости от его чистоты и степени предшествующей деформации лежит в интервале температур от 400 до 600 °C. Легирующие элементы повышают температуру рекристаллизации титана. Тонколистовой прокат рекомендуется отжигать в вакууме, чтобы предотвратить насыщение газами и охрупчивание.

Для повышения износостойкости титановые сплавы подвергают азотированию. Лучшие результаты дает азотирование в среде сухого азота. Оно повышает поверхностную твердость, износостойкость, жаропрочность, жаростойкость, тогда как азотирование в аммиаке способствует охрупчиванию титановых сплавов вследствие насыщения водородом. Азотиرو-

вание проводят при 850—890 °С в течение 10—50 ч. При этом на поверхности образуются тонкий нитридный слой и обогащенный  $\alpha$ -твердый раствор. Толщина нитридного слоя составляет 0,06—0,2 мм, HV = 1200—1500. Глубина обогащенного азотом слоя в твердом растворе равна 0,1—0,15 мм, HV = 700—900. Для уменьшения хрупкости азотированного слоя рекомендуется проводить вакуумный отжиг (при 800—900 °С).

Для повышения жаростойкости титановые сплавы подвергают силицированию и другим видам диффузионной металлизации.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите отличительные свойства титановых сплавов и области их применения в технике.
2. Перечислите деформируемые титановые сплавы и их основные характеристики.
3. Какие титановые сплавы обладают хорошими литейными свойствами?
4. Какие проблемы возникают при получении порошковых титановых сплавов?
5. Какие существуют виды термической обработки титановых сплавов?

## Глава 22

# СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ

## 22.1. Свойства магния

Магний — металл серебристо-белого цвета, мономорфен. Кристаллизуется в плотноупакованной гексагональной решетке. Свойства магния приведены в табл. 22.1.

## Основные физические свойств магния

Атомный номер .....	12
Атомная масса .....	24,3
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup> .....	1,74
Температура плавления, °С .....	651
Атомный диаметр, нм .....	0,32
Скрытая теплота плавления, Дж/г .....	293
Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м · К) .....	1391
Температурный коэффициент линейного расширения × 10 <sup>6</sup> при 25 °С .....	26,0
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом · см × 10 <sup>6</sup> ....	4,5
Модуль нормальной упругости E, МПа .....	45 000

Магний и его сплавы отличаются низкой плотностью, хорошей обрабатываемостью резанием и способностью воспринимать ударные нагрузки. В зависимости от химического состава магний выпускается трех марок: Mg96 (99,96 % Mg); Mg95 (99,95 % Mg), Mg90 (99,90 % Mg).

В производстве выпускаются магний повышенной (99,99 % Mg) и высокой (99,9999 % Mg) чистоты, а также гранулированный магний.

Магний обладает низкой коррозионной и химической стойкостью. Он относительно устойчив против коррозии лишь в сухой атмосфере. Он усиленно корродирует в пресной и морской воде, разрушается многими кислотами и растворами солей. Примеси Si, Fe, Ni, Cu понижают коррозионную стойкость магния. При повышении температуры он интенсивно окисляется и легко самовоспламеняется, особенно в виде порошка или мелкой стружки. Поэтому при использовании магния и его сплавов, особенно при разливке, следует применять меры против его окисления и воспламенения.

Низкая пластичность магния является результатом малого числа плоскостей скольжения в гексагональной решетке. Повышение температуры приводит к появлению новых плоскостей скольжения и двойникования и к увеличению пластичности.



тичности. Обработку магния давлением проводят при температурах 350–450 °С в состоянии наибольшей пластичности.

Низкие свойства исключают возможность применения чистого магния как конструкционного материала. Технический чистый магний применим для пиротехнических целей, в химической промышленности — для синтеза органических препаратов, в металлургии — при производстве различных металлов и сплавов — как раскислитель и модификатор, восстановитель и легирующий элемент.

## **22.2. Общая характеристика и классификация магниевых сплавов**

Малая плотность магниевых сплавов в сочетании с довольно высокой удельной плотностью и целым рядом физико-химических свойств делает их ценными для применения в различных областях народного хозяйства — в машиностроении (в том числе сельскохозяйственном, автомобильном), приборо- и самолетостроении, космической и радиотехнике, полиграфической и текстильной промышленности и т. д.

Преимуществом магниевых сплавов является высокая удельная прочность. Предел прочности отдельных сплавов достигает 350–450 МПа при плотности менее 1,8 г/см<sup>3</sup>.

Магниевые сплавы хорошо поглощают вибрации, что важно для авиационного транспорта и машиностроения. Удельная вибрационная прочность магниевых сплавов с учетом демпфирующей способности почти в 100 раз больше, чем у дюралюмина, и в 20 раз больше, чем у легированной стали.

Магниевые стали обладают хорошей обрабатываемостью резанием. При механической обработке этих сплавов допускается скорость резания в 7 раз выше, чем для сталей, и в 2 раза выше, чем для алюминиевых сплавов. Магниевые сплавы немагнитны и не дают искры при ударах и трении. Большую вы-

году дает применение магниевых сплавов в деталях, работающих на продольный или поперечный изгиб. По удельной жесткости при изгибе и кручении магниевые сплавы превышают алюминиевые на 20 % и стали — на 50 %.

Магниевые сплавы в горячем состоянии хорошо прессуются, куются и прокатываются. Их широко применяют в виде поковок, штамповок, листов, профилей, прутков и т. д.

Методы защиты магниевых сплавов оксидными пленками и лакокрасочными покрытиями обеспечивают нормальную работу изделий из них в различных условиях.

К основным легирующим элементам магниевых сплавов относятся Mn, Al, Zn, Zr, Ce, Nd. Алюминий и цинк, цирконий и церий повышают механические свойства магниевых сплавов, цирконий и марганец улучшают коррозионную стойкость, ниодим и церий обеспечивают жаропрочность.

Наилучшей жаропрочностью обладают сплавы, легированные торием. Увеличение растворимости легирующих элементов в магнии с повышением температуры дает возможность упрочнять магниевые сплавы с помощью закалки и искусственного старения. Однако термообработка магниевых сплавов затруднена вследствие замедленных диффузионных процессов в магниевом твердом растворе.

К недостаткам магниевых сплавов наряду с низкой коррозионной стойкостью и малым модулем упругости следует отнести плохие литейные свойства, склонность к газонасыщению, окислению и воспламенению при их приготовлении. Небольшие добавки бериллия (0,02—0,05 %) уменьшают склонность к окисляемости, добавки кальция (до 0,2 %) — к образованию микрорыхлостей в отливках. Плавка и разливка магниевых сплавов ведутся под специальными флюсами.

### 22.3. Промышленные магниевые сплавы

Промышленные магниевые сплавы принято делить на *деформируемые* — для получения полуфабрикатов и изделий путем пластической деформации — и *литейные* — для

получения деталей методом фасонного литья. Первые маркируются буквами МА, вторые — МЛ. По применению их классифицируют на конструкционные и со специальными свойствами. По механическим свойствам — на *сплавы невысокой и средней прочности, высокопрочные и жаропрочные*. По склонности к упрочнению с помощью термообработки — на сплавы *упрочняемые и не упрочняемые термообработкой*.

**Деформируемые сплавы.** Сплав повышенной прочности марки МА1 имеет структуру твердого раствора и небольшое количество малых включений  $\beta$ -фазы. Сплав отличается относительно высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью, имеет удовлетворительную пластичность при комнатной и хорошую — при повышенных температурах. В горячем состоянии из него изготавливают все виды полужаготовок: листы, профили, штампованные заготовки. Сплав МА1 применяют для изготовления малонагруженных деталей: сварных масло- и бензобаков, арматуры топливных и масляных систем.

*Сплавы МА2, МА8* — сплавы средней прочности. Сплав МА8 отличается от сплава МА1 наличием 0,15–0,35 % церия, который улучшает его механические свойства за счет дополнительного легирования твердого раствора и образования тонкодисперсной фазы  $Mg_9Cl$ . При этом сохраняются основные преимущества сплава МА1: высокая коррозионная стойкость и хорошая свариваемость. Сплав МА8 применяют в отожженном состоянии для изготовления средненагруженных деталей. Наличие цинка и алюминия в сплаве МА2 обеспечивает ему хорошую пластичность, что позволяет изготавливать из него кованые и штампованные детали сложной формы. Ввиду низкого содержания алюминия в сплаве (и поэтому небольшого количества фазы  $Mg_4Al_3$  в его структуре) сплав МА2 мало упрочняется при закалке и старении. Сплав применяется в горячепрессованном или отожженном состояниях.

*Высокопрочные сплавы МА5, МА14, МА19* подвергают упрочняющей термообработке. Сплав МА5 с повышенным со-

держанием алюминия упрочняется при старении благодаря фазе  $Mg_4Al_3$ , а сплавы МА14 и МА19 с повышенным содержанием цинка упрочняются при старении за счет фазы  $MgZn$ . Более высокий предел прочности и особенно предел текучести при хорошей пластичности сплавов МА14 и МА19 объясняются модифицирующим действием циркония, который также благоприятно влияет и на коррозионную стойкость.

К жаропрочным относятся сплавы, содержащие церий, неодим, торий, — МА11, МА12, МА19. Высокие механические свойства при повышенных температурах эти сплавы имеют благодаря наличию дисперсных включений фаз  $Mg_9Nd$ ,  $Mg_9Ce$  и  $Mg_5Th$ , не склонных к коагуляции при высоких температурах. Эти сплавы характеризуются высоким пределом ползучести, длительной прочностью и твердостью при повышенных температурах, хорошо деформируются, не склонны к коррозии под напряжением, удовлетворительно свариваются. Наибольшей прочностью обладают сплавы, содержащие торий, — МА13 и ВМД-1. Их применяют в ракетной технике для изготовления деталей, работающих длительно при температурах до 350 °С и кратковременно — при температурах до 400 °С (корпуса ракет, обтекатели, корпуса насосов, стабилизаторы и др.).

**Литейные сплавы.** Сплав средней прочности МЛЗ обладает хорошей герметичностью. По химическому составу он близок к деформируемому сплаву МА2, имеет аналогичную структуру твердого раствора. Упрочнение при термообработке очень незначительно из-за малого количества  $\gamma$ -фазы. Сплав применяют для изготовления средненагруженных деталей простой формы повышенной герметичности.

**Высокопрочный сплав МЛ5** отличается от сплава МЛЗ повышенным содержанием алюминия, а следовательно, и большим количеством упрочняющей  $\gamma$ -фазы. При неравновесной кристаллизации в структуре сплава появляется эвтектика.

Среди магниевых сплавов МЛ5 обладает лучшими литейными свойствами. Большое количество выделенной  $\gamma$ -фазы по границам зерен твердого раствора делает сплав хрупким, поэтому он подвергается гомогенизации при 420 °С. Старение мало повышает предел прочности, но значительно увеличивает предел текучести сплава МЛ5.

*Сплав МЛ12* имеет более высокие механические свойства при комнатной и повышенных температурах, а также хорошие литейные свойства; высокая коррозионная стойкость обеспечивается цирконием.

Сплавы МЛ5 и МЛ12 применяют для изготовления высоконагруженных деталей самолетов и авиадвигателей.

Цирконий значительно измельчает крупнозернистую структуру отливок, а также благоприятно влияет на свойства твердого раствора. С этой целью цирконий вводят и в жаропрочные литейные магниевые сплавы. Для повышения предела ползучести, длительной прочности и твердости при повышенных температурах жаропрочные сплавы легируют неодимом, церием, торием. Лучшей жаропрочностью среди литейных сплавов обладают сплавы с торием. Они имеют хорошие литейные свойства, небольшую склонность к образованию микрорыхлостей в отливках и повышенную коррозионную стойкость, хорошо свариваются. Эти сплавы применяют после закалки и старения. Из них изготавливают высоконагруженные детали, работающие при температурах 300–400 °С.

Для защиты от коррозии изделия из магниевых сплавов подвергают оксидированию с последующим нанесением лакокрасочных покрытий.

***Сверхлегкие сплавы (магний-литиевые сплавы).*** Особенности сверхлегких сплавов являются низкая плотность (1,35–1,6 г/см<sup>3</sup>); повышенная пластичность и обрабатываемость давлением при температурах, значительно более низких по сравнению с обычными магниевыми сплавами; высокая удельная прочность и высокий предел текучести при

сжатию; отсутствие чувствительности к надрезу; высокая теплоемкость; хорошие механические свойства при криогенных температурах.

Магний-литиевые сплавы могут быть также использованы для создания легких композиционных материалов. Например, магний-литиевый сплав, армированный проволокой из стали У8А, имеет  $\sigma_{\text{в}} = 600$  МПа, модуль упругости 64 ГПа при плотности 2,4 г/см<sup>3</sup>.

**Сплавы с особыми физическими и химическими свойствами.** Сплав МА18 применяют для изготовления малонагруженных деталей, работающих при температурах  $-250... +60$  °С, когда требуются высокая жесткость и малая масса. Сплав МА21 применяют для изготовления средненагруженных деталей, работающих при температуре до 125 °С и при криогенных температурах, когда требуются высокая жесткость и повышенная прочность при сжатии. Сплав МА17 находит применение в радиотехнической промышленности для изготовления звукопроводов ультразвуковых линий задержки.

Сплав МЦИ предназначен для литья деталей, работающих в условиях воздействия вибрационных нагрузок. Демпфирующая способность сплава МЦИ в несколько десятков раз выше, чем магниевых сплавов, используемых в качестве конструкционных материалов. Использование сплава МЦИ в конструкциях, подвергающихся вибрациям, позволяет уменьшить массу, увеличить надежность и срок службы изделий, а также существенно снизить шум. Сплав хорошо сваривается аргонодуговой сваркой, хорошо обрабатывается резанием и обладает хорошей коррозионной стойкостью.

**Термомеханическая обработка магниевых сплавов** является одним из методов повышения прочности стареющих деформируемых магниевых сплавов. В практике используют три вида ТМО: низкотемпературную (НТМО), высокотемпературную (ВТМО) и комбинированную (КТМО).

При НТМО деформацию осуществляют в температурной области ниже порога рекристаллизации. Она заключается в закалке с температуры твердого раствора, холодной (или теплой) деформации (до 10—15 %) с последующим старением. ВТМО — нагрев до температуры образования пересыщенного твердого раствора, горячая пластическая деформация и старение. КТМО — нагрев при температуре 490—530 °С (для сплава МА11) в течение 2 ч, подсушивание на воздухе до 300—350 °С, деформирование при этой температуре (50—90 %), деформация без нагрева (5—10%), последующее искусственное старение при 175 °С в течение 2,5 ч. Полученное упрочнение сохраняется до 300 °С.

**Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДКМ) на основе магния.** Незначительная растворимость кислорода в магнии позволяет упрочнять его оксидами. Наибольший эффект достигается при введении оксида магния MgO в количестве до 1%. Дальнейшее повышение содержания оксида практически не меняет временное сопротивление, но существенно снижает пластичность ДКМ. ДКМ Mg—MgO обладает низкой плотностью, высокой длительной прочностью и высоким сопротивлением ползучести при нагреве. Применение этих материалов ограничено низкой коррозионной стойкостью в морской воде, а также на воздухе при температурах выше 400 °С. Наиболее перспективно применение ДКМ на основе магния в авиации, ракетной и ядерной технике в качестве конструкционного материала деталей корпусных изделий минимальной массы и повышенной прочности.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите область применения магниевых сплавов. Какими их свойствами это обусловлено?
2. Какие существуют деформируемые магниевые сплавы?
3. Благодаря каким фазам подвергаются термической обработке высокопрочные магниевые сплавы?
4. Как повышают прочность магниевых сплавов?

## Глава 23

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ,  
БЕРИЛЛИЯ И СВИНЦА

## 23.1. Никель и его сплавы

Никель — металл серебристо-белого цвета с желтоватым оттенком, мономорфен. Кристаллическая решетка — ГЦК. При температуре порядка 360 °С никель ферромагнитен. Магнитное превращение сопровождается изменением некоторых свойств никеля. Свойства никеля приведены в табл. 23.1.

Таблица 23.1

## Основные физические свойства никеля

Атомный номер .....	28
Относительная атомная масса .....	58,69
Плотность, г/см <sup>3</sup> .....	8,9
Температура плавления, °С .....	1455
Теплопроводность, кал/(см · °С/с): при 20 °С .....	0,14
при 100 °С .....	0,20
при 300 °С .....	0,15
при 500 °С .....	0,15
Коэффициент линейного расширения, 1/°С:	
от 0 до 300 °С .....	$16,6 \cdot 10^{-6}$
от 0 до 600 °С .....	$17,8 \cdot 10^{-6}$
Удельное электросопротивление, Ом · см .....	$7,3 \cdot 10^6$
Модуль упругости E, МПа .....	$230 \cdot 10^3$

**Механические свойства никеля.** Механические свойства никеля изменяются с температурой.

При деформации никель испытывает наклеп, и его прочность может быть доведена до 900—850 МПа.



Рекристаллизация холоднодеформируемого никеля начинается с температуры около 500 °С. Поэтому при повышенных температурах происходит его значительное разупрочнение.

Многие элементы образуют с никелем сплавы — твердые растворы, характеризующиеся хорошим комплексом механических и физических свойств.

Никель обладает весьма высокой коррозионной стойкостью. В атмосфере воздуха скорость коррозии никеля составляет 0,0025—0,025 мм/год.

Вода (речная и морская) слабо действует на никель. Растворы нейтральных и щелочных солей в воде могут разъедать поверхностный слой никеля до глубины 0,1 мм/год. Соли, содержащие свободный хлор, могут сильно разрушить никель. Щелочные растворы, содержащие перекись водорода, не действуют на него. Никель относительно устойчив к холодным растворам серной кислоты. В 80%-ной серной кислоте он разрушается со скоростью 0,1 мм/год. Горячая серная кислота при концентрации более 15 % вызывает коррозию никеля со скоростью 0,8—1,2 мм/год.

Соляная кислота при комнатных температурах разъедает (в зависимости от концентрации) поверхностный слой никеля со скоростью до 6,0 мм/год. Соляная кислота при повышенных температурах действует на никель более интенсивно. Уже при концентрациях 2 % и выше происходит заметное разрушение никеля. Сернистая кислота также сильно действует на никель, но еще сильнее действует азотная кислота. Органические соединения (кислые, щелочные) практически не разрушают никель. Он стоек также против воздействия холодных и горячих щелочей.

**Сплавы никеля.** Чистый никель имеет низкую длительную прочность. Повышения свойств достигают путем комплексного легирования, в результате которого образуются многофазные сплавы, отвечающие современным требованиям машиностроения.

Никелевые сплавы используют в деформированном и литом состояниях. По структуре эти сплавы разделяют на гомогенные (нихромы, инконели) и гетерогенные (нимоники). Общим для всех сплавов на основе никеля является минимальное содержание углерода (0,06—0,12 %).

Широко применяются сплавы никеля с медью, которые образуют между собой непрерывный ряд твердых растворов. В качестве такого сплава можно назвать сплав, содержащий 67—69 % Ni; 28 % Cu; 1,5—2,5 % Fe и 1—2 % Mn. Этот сплав, известный под названием *монельметалла*, характеризуется очень высокой прочностью и пластичностью, обладает хорошими антикоррозионными свойствами. Монельметалл широко используют в нефтехимическом аппаратостроении. Однако высокую коррозионную стойкость этот сплав имеет лишь тогда, когда монельметалл работает без контакта с другими металлами или сплавами.

**Жаропрочные сплавы на никелевой основе.** Большую группу сплавов на никелевой основе применяют для изготовления деталей, работающих при температурах 700—980 °С. При более высоких температурах прочность никелевых сплавов снижается настолько, что использование их в условиях значительных напряжений становится неэффективным.

Жаропрочные сплавы на основе никеля нередко называют *нимониками*. В состав этих сплавов кроме хрома добавляют титан, алюминий, молибден, вольфрам и т. д. Жаропрочные сплавы находят широкое применение в различных областях техники (авиационные двигатели, стационарные газовые турбины, химическое аппаратостроение и др.). Они предназначены для изготовления рабочих лопаток, турбинных дисков, колец, крепежа с длительным сроком службы, сопловых лопаток и других деталей газовых турбин, работающих при температуре до 850 °С.

Для получения высокой окалиностойкости никель легируют хромом (20 %), а для повышения жаропрочности — титаном (1,0—2,8 %) и алюминием (0,55—5,5 %). При термической обработке они образуют с никелем (кобальтом, хромом)

дисперсные интерметаллидные фазы типа  $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Cr})_3\text{Ti}$ ;  $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Cr})_3\text{Al}$ , упрочняа нимоники. Образуются также карбиды  $\text{TiC}$  и нитриды  $\text{TiN}$ , увеличивающие прочность при высоких температурах. Дальнейшего увеличения жаропрочности достигают легированием сплавов молибденом и вольфрамом: они повышают температуру рекристаллизации и затрудняют процесс диффузии в твердом растворе, который необходим для коагуляции избыточных фаз и рекристаллизации. Добавление к сложнолегированным сплавам кобальта еще больше увеличивает их жаропрочность и технологическую пластичность. Помимо упрочнения границ зерен бор и цирконий устраняют вредное влияние примесей, связывая их с тугоплавкими соединениями. Примеси серы, сурьмы, свинца и олова понижают жаропрочность сплавов и затрудняют их обработку давлением.

Самым простым по составу из дисперсно-твердеющих никелевых сплавов является сплав ХН77ТЮ. Более жаропрочный сплав ХН77ТЮР отличается от него присадкой бора в количествах 0,005–0,008 %. После закалки от 1080–1120 °С сплав имеет структуру, состоящую из перенасыщенного  $\gamma$ -раствора с ГЦК-решеткой и поэтому обладает невысокой прочностью и высокой пластичностью, допускающей штамповку, гибку и профилирование. Сплав удовлетворительно сваривается. После закалки и старения при 700 °С он получает высокую жаропрочность.

Последующие разновидности сплавов отличаются от сплава ХН77ТЮР более высоким содержанием титана, алюминия и дополнительным введением ниобия, что повышает количество  $\gamma$ -фазы, выделяющейся при старении. Чтобы сохранить удовлетворительную пластичность сплавов, в них снижают содержание хрома. Однако уменьшение содержания хрома ниже 15 % влечет за собой снижение сопротивления окислению. Поэтому сплавы с низким содержанием хрома требуют защиты от газовой коррозии.

Наилучшее сочетание длительной прочности и пластичности имеет сплав ХН65МПТЮ. Он получил широкое применение как материал для изготовления лопаток стационарных газовых турбин и крепежных деталей.

После двойной закалки от 1220 и 1050 °С на воздухе и старения при 850 °С сплав имеет высокую жаропрочность. Объясняется это большим количеством упрочняющей  $\gamma$ -фазы, выделяющейся из твердого раствора в процессе старения.

Никелевые сплавы широко применяют в литом виде. Литые сплавы получают при литье с обычной равноосной кристаллизацией и с направленной кристаллизацией, позволяющей уменьшить роль границ зерен в разрушении. Направленная кристаллизация и особенно монокристаллическая структура повышают жаропрочность.

Литейные сплавы иногда подвергают закалке от высоких температур и старению. Применяют сплавы и без термообработки, тогда старение протекает в процессе эксплуатации при высоких температурах.

Никелевые сплавы для повышения их жаростойкости подвергают алитированию.

Отметим следующие особенности высоколегированных жаропрочных сплавов при горячей деформации: 1) малую пластичность при всех температурах; 2) высокое сопротивление деформации, включая и однофазную область твердого раствора; 3) узкий температурный интервал деформации (до 80—100 °С); 4) высокую чувствительность к перегреву (нагрев выше определенной температуры приводит к катастрофическому снижению пластичности).

**Жаростойкие сплавы на никелевой основе.** Никель обладает более высокой жаростойкостью в окислительных средах, чем железо, так как его единственный оксид NiO менее дефектный, чем оксид FeO. Высокая жаростойкость сплавов никеля с хромом (нихромы) объясняется прежде всего образованием шпинели NiO  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Жаростойкие сплавы на никелевой основе имеют в основном структуру твердых раство-

ров, мало упрочняются термической обработкой и обладают невысокой прочностью и жаропрочностью, но хорошей технологичностью.

*Нихромы* имеют высокое удельное электрическое сопротивление, поэтому их используют как материал для нагревателей электропечей, а также для изготовления камер сгорания, газопроводов и деталей газотурбинных установок.

Сплав, содержащий никель и 20 % Cr, — основа большинства жаростойких никелевых сплавов. Содержание углерода ограничено 0,1 %. Марганец снижает жаростойкость этих сплавов, кремний с этой целью не используется, так как снижает технологичность сплава. Для создания высокожаростойких никелевых сплавов используют алюминий. Лучший жаростойкий никелевый сплав — X20H80Ю3.

Жаростойкие сплавы на основе никеля в окислительных средах (парах воды, кислороде, синтетическом аммиаке) более стойки, чем сплавы на основе железа. Однако в серосодержащих средах никель нестойк к газовой коррозии. Присутствие серы в окислительных средах снижает температуру применения никелевых сплавов до 550 °С, а в восстановительных — до 260 °С.

Жаростойкие сплавы на основе никеля не претерпевают фазовых превращений, и поэтому их термообработка состоит в высокотемпературном нагреве для выращивания зерна или снятия напряжений.

Хром, кобальт, молибден, вольфрам, ванадий, гафний существенно упрочняют твердый раствор, составляющий основу никелевого сплава.

**Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе никеля.** В качестве упрочняющей фазы в ДКМ на основе никеля и его сплавов используют оксиды  $\text{ThO}_2$  и  $\text{HfO}_2$ . Оксид тория в количестве до 2 % наиболее эффективен для упрочнения никеля и хрома (ВДУ-1, ТД-никель, DS-никель, ТД-нихром). Из-за токсичности оксида тория его часто заменяют оксидом гафния  $\text{HfO}_2$  при производстве ДКМ ВДУ-2 (98 % Ni; 2 %  $\text{HfO}_2$ ), что приводит к существенному снижению жаропрочности.

ДКМ на основе никеля предназначены в основном для работы при температурах выше 1000 °С. При температурах до 800 °С более высоким временным сопротивлением обладают ДКМ на основе никелевых сплавов типа ТД-нихром (80 % Ni; 20 % Cr), упрочненных 2 % ThO<sub>2</sub>.

ДКМ на основе никеля и его сплавов применяют главным образом в авиационной и космической технике для изготовления лопаток газовых турбин, камер сгорания, теплозащитных панелей, а также сосудов и трубопроводов, работающих при высоких температурах в агрессивных средах.

## 23.2. Бериллий и его сплавы

**Свойства бериллия.** Бериллий относится к группе легких металлов, с малой плотностью (менее 3 г/см<sup>3</sup>) (табл. 23.2).

Бериллий — светло-серый металл, полиморфен, имеет ГПУ-решетку до 1250 °С и ГЦК-решетку — при более высоких температурах.

Таблица 23.2

### Основные физические свойства бериллия

Атомный номер .....	4
Атомная масса .....	9,0
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup> .....	1,8
Температура плавления, °С .....	1284
Температура кипения, °С .....	2450
Атомный диаметр, нм .....	0,23
Скрытая теплота плавления, Дж/°С .....	275
Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м · К) .....	188
Коэффициент линейного расширения при 25 °С, 1/°С .....	11 · 10 <sup>-6</sup>
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом · см .....	3,6 · 10 <sup>-6</sup>
Модуль нормальной упругости E, МПа .....	3 · 10 <sup>5</sup>

Бериллий и (особенно) его сплавы обладают малой плотностью, высокими модулем упругости и прочностью, размерной стабильностью, хорошей коррозионной стойкостью в ряде сред.

Чистый бериллий — твердый и прочный металл ( $\sigma_B = 300$  МПа;  $\delta = 1-2\%$ ), устойчив на воздухе вследствие образования на его поверхности пленки  $\text{BeO}$ , но при высоких температурах легко соединяется с кислородом и азотом.

Соединения бериллия — аэрозоли, мелкодисперсные частицы — обладают резко выраженными токсическими свойствами. Наиболее токсичными являются хлористые и фтористые соединения. В компактном виде бериллий безвреден. Сочетание высокого модуля упругости, теплопроводности и теплоемкости, малой плотности и других характеристик обусловило применение бериллия и его сплавов в ряде изделий авиаракетной техники, в том числе тормозов самолетов и теплозащитных экранов при вхождении возвращаемых аппаратов в плотные слои атмосферы, в зеркалах, замедлителях и отражателях тепловых нейтронов, материалах оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов.

Бериллий широко используют в качестве присадок в алюминиевых сплавах для создания защитной пленки на жидком металле, в стали — для образования твердого диффузионного слоя.

Бериллий получают электролизом хлорида бериллия и  $\text{NaCl}$  (электролитный бериллий) или восстановлением фторида бериллия магнием (фторидный, или магниевое-термический, бериллий).

Электролитный бериллий имеет меньше примесей и большую пластичность, чем магниевое-термический. Для дальнейшего повышения чистоты бериллия проводят дистилляцию в вакууме, зонную плавку или электролиз с растворимым анодом.

Примеси, в частности алюминий, понижают пластичность бериллия. Его механические свойства меняются в зависимости от типа заготовки, величины зерна и чистоты металла. Самые высокие свойства — у заготовок, выдавленных из мелкозернистых порошков высокой чистоты; еще более высокие прочностные свойства имеет проволока.

На свойства бериллия сильно влияют концентраторы напряжений и общее состояние поверхности. Уменьшения влияния концентраторов достигают травлением и отжигом. При повышении температуры происходят заметное снижение прочности и увеличение пластичности. Бериллий обладает сравнительно невысоким сопротивлением ползучести. В качестве жаропрочного материала бериллий практически не применяют.

**Бериллиевые сплавы.** Улучшения свойств бериллия достигают не за счет легирования, а за счет чистоты. Достаточно иметь в бериллии 0,001 % Si, как он становится совершенно хрупким.

Наличие кислорода улучшает свойства бериллия, а для всех других металлов кислород — вреднейшая примесь. Тем не менее существуют сплавы на основе бериллия.

Перспективным является сплав бериллия с 4—5 % Cu. Введение меди уменьшает анизотропию, резко выраженную у бериллия.

*Сплавы меди с бериллием (бериллиевые бронзы)* обладают эффектами термической обработки. Немагнитны, не искрят при ударе, имеют хорошую коррозионную стойкость, достаточно высокую прочность, а в закаленном состоянии — высокую пластичность.

Значительное распространение получили алюминиево-бериллиевые сплавы с магнием, сочетающие высокую прочность, пластичность, высокий модуль упругости, теплоемкость и теплопроводность. Добавка 0,5 % Ni повышает длительную прочность бериллия при 900 °C. Лучшими технологическими свойствами отличаются сплавы бериллия, содержащие 2—4 % Si; 0,1—1,0 % Ag; 2—4 % Al, или сплавы с 0,5 % Ti и 0,1 % Ag.

Более высокой пластичностью, чем бериллий, обладают двойные и тройные сплавы типа Al—Be и Al—Mg—Be (сплав АБМ). Высокая пластичность фазы (Al), упрочненный Mg, вводимый в сплавы в концентрациях, не превышающих его предельную растворимость, благоприятно влияют на свойства сплавов. Растворимость магния с повышением содержания бериллия уменьшается, поэтому в сплавы системы Al—Be—Mg



при самом низком содержании бериллия необходимо вводить наиболее высокое количество магния. В сплавах с наиболее высоким содержанием бериллия должно быть низкое содержание магния.

С увеличением содержания бериллия в сплавах систем Al—Be; Al—Be—Mg происходит значительно более интенсивный рост модуля упругости, который при содержании 70—80 % Be достигает  $245 \cdot 10^3$  МПа; плотность такого сплава равна 2 г/см<sup>3</sup>.

В результате этого сплавы на алюминиево-бериллиевой основе высокомодульные, и по модулю упругости в зависимости от состава превосходят высокопрочные сплавы на алюминиевой основе более чем в 2—3 раза.

Сплавы системы Al—Be—Mg имеют более высокий модуль упругости (на 14 700—39 200 МПа), чем сплавы системы Al—Be, при одинаковом содержании бериллия, хотя магний и твердый раствор магния в алюминии имеют модуль упругости ниже, чем алюминий. В сплавы вводят сравнительно немного магния.

Тройные сплавы системы Al—Be—Mg при содержании бериллия до 70 % превосходят двойные сплавы системы Al—Be не только по прочности, но и по относительному удлинению. Это обеспечивает и более однородный и равномерный характер деформации при растяжении, и, как результат этого, одновременное повышение прочности и относительного удлинения.

При содержании Be около 70 % достигается максимум прочности тройных сплавов. При дальнейшем повышении содержания Be прочность понижается при одновременном резком снижении пластичности. Поэтому сплавы системы Al—Be—Mg при содержании бериллия более 70—75 % практически не применяют.

Резкое снижение относительного удлинения в сплавах данной концентрации объясняется тем, что количество (Al)-фазы уже недостаточно и она перестает оказывать пластифицирующее действие, как это происходит в сплавах, более бога-

тых этой фазой. Сплавы с малым количеством (Al)-фазы можно рассматривать как бериллий, содержащий некоторое количество легкоплавкой составляющей, ухудшающей его свойства.

Благодаря наличию в сплавах типа Al—Be, Al—Be—Mg, содержащих до 70—75 % Be, достаточного количества высокопластичной алюминиевой составляющей, эти сплавы по сравнению с бериллием обладают хорошей общей и технологической пластичностью и удовлетворительно деформируются при 380—420 °С.

В процессе обработки давлением происходит деформация алюминиевой матрицы и бериллиевой фазы, поскольку бериллий при температурах около 400 °С имеет достаточно высокую пластичность.

*Структура прессованных полуфабрикатов* представляет собой смесь алюминиевой матрицы и вытянутых в направлении течения металла частиц бериллиевой фазы (Be) размером 10—50 мкм в поперечнике. Эта структура является характерной для композиционного материала, армированного сравнительно короткими волокнами или чешуйками бериллия. Поскольку модуль упругости бериллиевой составляющей выше, чем алюминиевой матрицы, она воспринимает основную долю приложенных напряжений.

Наличие ориентированной структуры в прессованных и волоченых полуфабрикатах резко повышает механические свойства в направлении деформации и приводит к анизотропии механических свойств.

Сплав типа АБМ (Al—Be—Mg) с 70 % Be имеет плотность 2,01—2,06 г/см<sup>3</sup>, модуль упругости  $E = (196—225) \cdot 10^3$  МПа. Длительные нагревы до 500 °С слабо влияют на прочность сплавов АБМ при комнатной температуре. При повышении температуры одновременно снижаются прочность и относительное удлинение.

*Композиты бериллий—титан* обладают высокой прочностью, но очень низким пределом текучести при растяжении. При работе на сжатие предел прочности и особенно предел текучести растут.

**Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе бериллия.** Материалы данного типа относятся к классу порошковых, в которых матрица из металла или сплава упрочняется искусственно введенными мелкодисперсными частицами размером менее 0,1 мкм в количестве 0,1–0,15 %.

В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других тугоплавких соединений.

Смеси порошков получают механическим или химическим смешиванием, поверхностным или внутренним окислением, разложением смеси солей, водородным восстановлением или химическим осаждением из растворов.

После формования и спекания проводят горячую пластическую деформацию с целью получения беспористого полуфабриката.

Наиболее эффективными упрочнителями бериллия являются оксид  $\text{BeO}$  и карбид  $\text{Be}_2\text{C}$ . Временное сопротивление ДКМ  $\text{Be}-\text{BeO}$  повышается с увеличением содержания оксида; при этом эффективность упрочнения растет с увеличением температуры. Сопротивление ползучести и длительная прочность  $\text{Be}-\text{BeO}$  при повышенных температурах сравнительно невелики. Применение карбида  $\text{Be}_2\text{C}$  в качестве упрочняющей фазы позволяет повысить 100-часовую прочность бериллия при 650 °С в 3 раза, а при 730 °С — в более чем 5 раз.

Благодаря высокому коэффициенту рассеяния нейтронов, высокому модулю упругости и низкой плотности, ДКМ на основе бериллия является перспективным материалом в реакторостроении, а также в качестве армирующих элементов в композиционных материалах с повышенным удельным модулем упругости.

### 23.3. Антифрикционные сплавы на свинцовой основе

Антифрикционными сплавами на основе свинца являются **бabbиты**. Их применяют для заливки подшипников скольжения.

Металл вкладыша должен обладать следующими свойствами:

- небольшим коэффициентом трения со стальной поверхностью;
- малой изнашиваемостью обеих трущихся поверхностей;
- способностью выдерживать достаточные удельные давления.

Первое и второе требования удовлетворяются, если поверхность вала и вкладыша разделена пленкой смазки.

Если структура вкладыша неоднородна и состоит из твердых включений и мягкой основы, то после непродолжительной работы («приработки») на поверхности вкладыша образуется микрорельеф — выступают твердые включения и между валом и вкладышем образуется пространство, в котором удерживается смазка (так называемый принцип Шарпи).

Кроме того, подшипниковые сплавы должны быть недорогими, иметь высокую коррозионную стойкость в среде масел и хорошие технологические свойства: невысокую температуру плавления (для удобства заливки), хорошую адгезию (сцепляемость) со стальной основой (вкладышем). Желательно, чтобы они обладали высокой теплопроводностью для быстрого отвода теплоты от трущихся поверхностей, достаточно хорошими механическими свойствами, особенно пределом выносливости, — для предотвращения выкрашивания из-за появления усталостных трещин. Чтобы подшипник надежно работал в условиях ударных нагрузок, его материал должен обладать достаточно высокой ударной вязкостью.

Чтобы передавать нагрузку на более прочную стальную основу, сплавы должны иметь невысокий модуль упругости.

*Свинцовые баббиты.* Самыми дешевыми являются свинцовые баббиты с кальцием и натрием: БКМ, БК2. Кальций и натрий образуют со свинцом твердые растворы переменной

растворимости, что вызывает у этих баббитов склонность к естественному старению с повышением твердости. Растворимость кальция в свинце очень мала (при комнатной температуре — около 0,01 %), и он присутствует в основном в виде химического соединения  $Pb_3Ca$ . В литом состоянии структура представляет собой  $\alpha$ -твердый раствор натрия и кальция в свинце (мягкая основа) и дендриты химического соединения  $Pb_3Ca$  (твердые включения).

Баббит БК обладает плохой адгезией к стальному вкладышу и крепится в нем механическим путем. Баббит БК2 заливают на вкладыши тонким слоем. Их применяют для изготовления подшипников городского и железнодорожного транспорта, горнорудных машин.

*Оловянно-свинцовые баббиты* отличаются низким содержанием олова. В качестве мягкой основы они имеют эвтектику, состоящую из кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора и  $\beta$ -фазы. Твердыми включениями служат крупные избыточные кристаллы  $\beta$ -фазы и частицы интерметаллидных фаз  $Cu_3Sn$ ;  $Cu_2Sb$ .

*Баббит Б16* применяют в подшипниках ответственного назначения для спокойных условий работы без ударных нагрузок. Из него изготавливают моторно-осевые и опорные подшипники электровозов, путевых машин, паровозов, гидротурбин и т. д.

*Баббит Б71* дополнительно легирован  $Cd$ ,  $As$ ,  $Ni$ . Кадмий повышает его коррозионную стойкость, мышьяк улучшает жидкотекучесть и теплопроводность, никель упрочняет  $\alpha$ -твердый раствор, повышает износостойкость и сопротивляемость окислению.

Свойства *баббита БН* зависят от условий литья и термической обработки. Его применяют для заливки вкладышей подшипников дизельных двигателей, компрессоров, судовых приводов, подвергающихся ударным нагрузкам; для заливки подшипников двигателей внутреннего сгорания, паровых турбин, паровых машин.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие легирующие элементы обеспечивают жаропрочность никелевых сплавов?
2. Какую структуру имеют жаростойкие сплавы?
3. Какой термической обработкой упрочняют жаропрочные никелевые сплавы?
4. Назовите особенности и область применения дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе никеля.
5. Какова особенность применения бериллия и его сплавов?
6. Перечислите основные сплавы бериллия и их свойства.
7. Благодаря каким свойствам дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе бериллия нашли применение в ракетостроении?
8. Какова структура антифрикционных сплавов на свинцовой основе?

## *Раздел VI*

# НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

## Глава 24

### КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### **24.1. Определение композиционных материалов**

Одной из основных задач современной науки является разработка научных принципов получения новых материалов с комплексом уникальных свойств. Композиционные материалы независимо от их происхождения являются результатом объемного сочетания разнородных компонентов, один из которых пластичен (связующее, матрица), а другой обладает высокой прочностью и жесткостью (наполнитель, арматура); при этом композиции приобретают свойства, которых не имеют отдельные составляющие. В качестве обоих компонентов могут выступать самые разнообразные по природе и происхождению материалы. Известны композиты на базе металлов, керамики, стекол, углерода, пластиков и других материалов.

Современное определение композиционных материалов предполагает соблюдение следующих условий:

— композиция должна представлять собой сочетание хотя бы двух разнородных материалов с четкой границей раздела между фазами;

— компоненты композиции образуют ее своим объемным сочетанием;

— композиция должна обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

## 24.2. Структура и свойства композиционных материалов

Существующие композиционные материалы можно разделить на три основных класса, отличающихся микроструктурой: *дисперсно-упрочненные*, *упрочненные частицами* и *армированные волокнами* (рис. 24.1).

Все эти материалы представляют собой матрицу из какого-либо вещества или сплава, в которой распределена вторая фаза — обычно более жесткая, чем матрица, которая служит для улучшения того или иного свойства. В основе разделения трех упомянутых классов композиционных материалов лежат особенности их структуры.

Для *дисперсно-упрочненных* композиций характерной является микроструктура, когда в матрице равномерно распределены мельчайшие частицы размером от 0,01 до 0,1 мкм в количестве от 1 до 15 объемных процентов.

Природа упрочняющего эффекта в композитах связана с использованием двух материа-

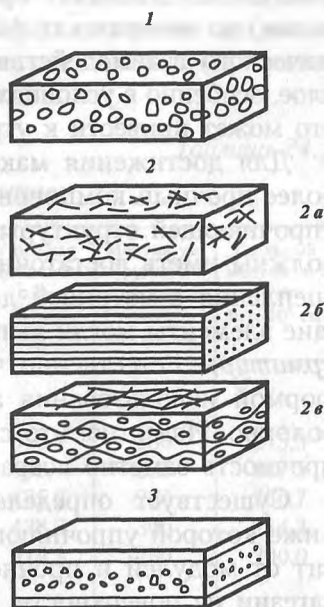


Рис. 24.1. Различные композиты: 1 — композит с дисперсными частицами; 2 — волокнистые композиты: 2а — композит, армированный короткими волокнами; 2б — композит, армированный непрерывными волокнами; 2в — композит, армированный волокнами во многих направлениях; 3 — слоистый композит



лов с различными прочностью и модулем упругости. Этот эффект следует связать с появлением в материале поверхности раздела фаз и пограничных слоев, примыкающих к ней. Именно более высокие характеристики материала пограничных слоев обеспечивают рост прочностных показателей материала, и именно по этой причине в дисперсно-упрочненных композитах стремятся к использованию тонкодисперсных жестких компонентов, распределенных в более пластичной матрице. В композициях, *упрочненных частицами*, реализации наиболее высоких показателей достигают при условии хорошего контакта (смачивания) на поверхности раздела. Вместе с тем возможность химического взаимодействия на поверхности и в пограничном слое, особенно в условиях эксплуатации, нежелательна, так как это может привести к утрате упрочняющего эффекта.

Для достижения максимального упрочняющего эффекта более прочный компонент должен играть роль усиливающей, упрочняющей структуры. Для этого упрочняющие элементы должны иметь достаточную длину. В этом случае прочность сцепления с матрицей достаточно велика, чтобы упрочняющие элементы могли выполнить свою основную роль — роль *арматуры*. Естественно, что в этом случае наиболее выгодной формой использования армирующей фазы является тонкое волокно. Известно, что с уменьшением толщины волокон их прочность заметно возрастает.

Существует определенная критическая длина волокна, ниже которой упрочняющий эффект падает. Эта длина зависит от модулей и прочности матрицы и волокна, величины адгезии на поверхности.

Другое важнейшее направление практического использования композитов — повышение жаропрочности, то есть способности сохранять высокий уровень механических характеристик при повышенных температурах. Для этого также можно использовать волокна, однако лишь такие, температура плавления которых значительно выше температуры плавления матрицы. Но и в этом случае далеко не всегда можно использовать комбинацию «волокно–матрица». Для всех материалов такого рода необходимо учитывать способность к химическому взаимодействию при высоких температурах, ве-

личину деформации при разрушении каждого из компонентов, а также величину времени до разрушения или величину относительного удлинения при разрушении каждого из компонентов в процессе жаропрочных испытаний под нагрузкой.

В табл. 24.1 и 24.2 приведены характеристики различных матричных материалов для получения волоконных композиций, а также данные о свойствах наиболее употребительных волокон. Следует подчеркнуть, что для жаропрочных материалов в качестве волокон наибольший интерес представляют нитевидные кристаллы различного состава и поликристаллические керамические волокна. Наряду с ними широкое применение находят также металлические волокна (проволоки) из сплавов и благородных металлов.

Таблица 24.1

## Характеристики матриц

Материал	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Прочность при растяжении $\sigma$ , кгс/см <sup>2</sup>	Удельная прочность $\sigma/\rho$ , 10 <sup>3</sup> см	Модуль упругости при растяжении $E$ , 10 <sup>2</sup> кгс/см <sup>2</sup>	Удельный модуль упругости $E/\rho$ , 10 <sup>3</sup> см
<i>Термопластические материалы</i>					
Нейлон (66)	1,14	703	616,7	280	245,3
Полнкарбонат	1,20	668	556,7	225	187,5
Полистирол	1,05	457	435,2	280	266,7
Хлорвинил	1,4	600	428,6	300	214,3
Метакрилат	1,4	720	514,3	280	200,0
<i>Термореактивные материалы</i>					
Сложный полиэфир	1,1	410	372,7	380	345,5
<i>Металлы</i>					
Алюминий	2,7	700	259,3	7200	2667,0
Медь	8,65	2500	289,0	12 500	1445,0
Ti + 6Al + 4V	8,7	4500	517,2	11 300	1300,0

Таблица 24.2

## Характеристики волокон

Тип волокна	Плотность $\rho$ , кгс/см <sup>3</sup>	Прочность при растяжении $\sigma$ , 10 <sup>2</sup> кгс/см <sup>2</sup>	Удельная прочность $\sigma/\rho$ , 10 <sup>6</sup> см	Модуль упругости при растяжении $E$ , 10 <sup>2</sup> кгс/см <sup>2</sup>	Удельный модуль упругости $E/\rho$ , 10 <sup>8</sup> см
<b>Металлы</b>					
Алюминий	0,00269	63,3	2,36	7 452	2,733
Титан	0,00471	196,8	4,18	11 740	2,493
Сталь	0,00781	421,8	5,40	21 000	2,689
Бериллий	0,00186	175,8	9,47	30 930	16,666
<b>Неорганические вещества</b>					
Стекло Е	0,00255	351,5	13,80	7382	2,897
Стекло S	0,00249	492,0	19,74	8789	3,525
Углерод высокопрочный	0,00175	250—350	14,3—20	20 000—25 000	11,4—14,3
Углерод	0,00195	200—250	10,3—13	35 000—38 000	17,9—19,5
Бор	0,00258	351,5	13,65	42 180	16,374
<b>Органические вещества</b>					
Квевбра	0,0020	170—225	8,5—11,3	13 300	6,65

В зависимости от особенностей свойств матричных материалов имеется значительное количество различных технологических приемов, позволяющих изготовить достаточно широкий круг изделий.

### 24.3. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы

К группе дисперсно-упрочненных композиций относятся главным образом материалы на основе металлических матриц, где в качестве дискретных частиц выступают оксиды

( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — в медной матрице), а также материалы на основе некоторых силикатных матриц. Для дисперсно-упрочненных композиций характерной является микроструктура, когда в матрице равномерно распределены мельчайшие частицы размером от 0,01 до 0,1 мкм в количестве от 1 до 15 %. Из-за близости формы дисперсных частиц к сферической анизотропии свойств в материалах практически не возникает. Основным механизмом упрочняющего действия в таких композиционных материалах связан с повышением сопротивляемости матрицы деформациям под действием нагрузок, так как дисперсные частицы тормозят движение в ней дислокаций. Величина возрастания прочностных характеристик относительно невелика. Однако большую ценность этим материалам придает их способность работать при повышенных (по сравнению с металлами) температурах, превышающих половину абсолютной температуры плавления или фазового превращения. Так, использование в качестве упрочняющих фаз стабильных тугоплавких соединений (оксиды тория, гафния, иттрия, сложные соединения оксидов и редкоземельных металлов), не растворяющихся в матричном металле, позволяет сохранить высокую прочность материала — до 0,9–0,95  $T_{\text{пл}}$ . В связи с этим такие материалы чаще применяют как жаропрочные. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы могут быть получены на основе большинства применяемых в технике металлов и сплавов.

Для композиционных материалов на основе металлических матриц наибольшее распространение получили методы порошковой металлургии, электрохимические, окислением или восстановлением, кристаллизацией из расплава ( $\text{Mo-TiC}$ ). Некоторые из таких композитов обладают интересными свойствами. Так, композиционный материал на основе меди и оксида бериллия сохраняет более 80 % электрической проводимости при комнатной температуре даже после 2000 ч выдержки при 850 °С, будучи при этом более прочным, чем медь и ряд ее сплавов. При восстановлении оксида никеля, содержащего дискретную двуокись тория (3 %), получают материал, из-

вестный под названием ТД-никель, который обладает значительно более высокой длительной прочностью при температуре 1090 °С по сравнению со сверхпрочными сплавами никеля (инконель и хастеллой).

Широкое применение получили сплавы ВДУ-1 (никель, упрочненный двуокисью тория), ВДУ-2 (никель, упрочненный двуокисью гафния) и ВД-3 (матрица Ni + 20 % Cr, упрочненная окисью тория), обладающие высокой жаропрочностью.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы стойки к разупрочнению с повышением температуры и длительности выдержки при данной температуре.

## 24.4. Композиты, армированные волокнами

Наиболее обширную и разнообразную по своему составу группу составляют композиционные материалы, армированные волокнами. Это объясняется тем, что в композитах данного типа удастся реализовать наиболее высокие прочностные и термические характеристики, так как именно использование волокон дает наибольший упрочняющий эффект. Для этой группы композиционных материалов наиболее полно

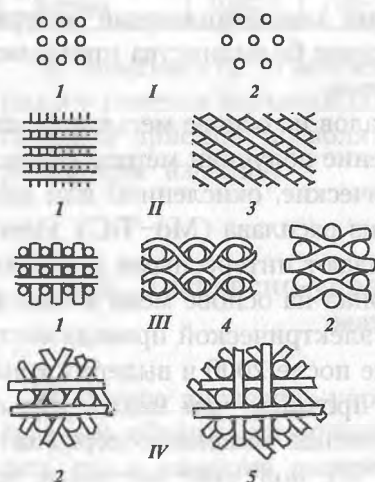


Рис 24.2. Схемы армирования композиционных материалов: I — однонаправленная; II — двухнаправленная; III — трехнаправленная; IV — четырехнаправленная; 1–5 — укладка волокон (1 — прямоугольная, 2 — гексагональная, 3 — косоугольная, 4 — с искривленными волокнами, 5 — система из  $n$  нитей)

разработаны теоретические представления. Да и практическое использование таких композитов, несмотря на значительные трудности, наиболее существенно. На рис. 24.2 приведены схемы армирования композитов.

**Армированные волокнами металлы.** К числу наиболее универсальных видов композитов следует отнести армированные волокнами металлы — они позволяют существенно повысить и прочность, и жаростойкость. Для эффективного упрочнения волокно должно быть прочнее и жестче матрицы, которая в этом случае передает нагрузку на более прочное волокно. Используемые для этих целей волокна в значительной степени определяют возможные методы получения композиционных материалов и изделий из них: керамические волокна и волокна из оксидов («усы» оксидов, боридов, карбидов, нитридов) из-за высокой хрупкости не допускают пластического деформирования матрицы, тогда как более пластичные волокна и «усы» из металлов допускают возможность переформирования заготовок. Из-за плохого смачивания металлами и с целью уменьшения опасности преждевременного разрушения керамические волокна и «усы» иногда покрывают пленкой из металла (через расплав или из газовой фазы). Как уже отмечалось, использование очень тонких волокон и «усов» позволяет достигать наиболее высоких показателей прочности композитов, однако необходимость предотвращения их разрушения на всех промежуточных стадиях и придания им ориентации создает большие трудности в технологическом плане.

При производстве композиционных материалов с металлической матрицей наибольшее распространение получили твердофазные, жидкофазные, газопарафазные, химические и электрохимические процессы.

Как правило, все процессы включают предварительное получение заготовок, которые потом превращают в изделия или полуфабрикаты путем их опрессовки, прокатки, протяжки через фильеру, диффузионной сварки и др.

В настоящее время описан достаточно широкий круг таких материалов на алюминиевых, титановых, железных, никромовых и других матрицах с использованием как металлических, так и оксидных армирующих волокон.

**Эвтектические композиционные материалы.** Другим видом композиционных материалов с металлической матрицей являются эвтектические композиционные материалы. В этих композитах упрочняющей фазой являются ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации. При охлаждении жидкостей определенного состава может идти кристаллизация с образованием двух фаз. Если при этом удастся создать плоский фронт кристаллизации, то возникает упорядоченная ориентированная микроструктура. Такую структуру в сплавах эвтектического состава получают методами направленной кристаллизации (методы Чохральского, Бриджмена, зонной плавки).

В отличие от обычных композиционных материалов, получаемых путем последовательного выполнения нескольких трудоемких технологических операций, эвтектические композиционные материалы получают за одну операцию. Практически это один из путей формирования нитевидных кристаллов (типа «усов») непосредственно в матрице. Направленная ориентированная структура может быть получена на уже готовых изделиях. Такие композиты получены, в частности, из меди и хрома, алюминия и никеля, меди и вольфрама. В последнем случае была достигнута прочность  $175 \text{ кгс/мм}^2$ .

Металлографические исследования показали, что процесс разрушения в таких композитах начинается с разрушения «усов». Это свидетельствует о высокой прочности связи на поверхности раздела.

К преимуществам таких композитов следует отнести простоту их получения — нет необходимости отдельного изготовления «усов», что исключает трудности, связанные с их использованием; высокое значение прочности связи на поверхности раздела; отсутствие оксидных слоев, обеспечивающее высокую термическую устойчивость — возможность длительной работы при повышенных температурах. Однако для указанных композитов характерно постоянство объемной доли эвтектической фазы, что делает невозможным воздействие на свойства путем изменения состава. Кроме того, для реализации плоского фронта кристаллизации необходимо использовать высокочистые вещества, так как примеси этому препятствуют.

**Керамика, армированная волокнами.** Керамика характеризуется низкой прочностью при растяжении в сочетании с высоким модулем Юнга, низкой ударной вязкостью. При высоких температурах одной из причин выхода из строя изделий из керамики является растрескивание. Это создает большие трудности при армировании ее волокнами, поскольку недостаточное удлинение матрицы препятствует передаче нагрузки на волокно. Поэтому волокна должны иметь еще более высокий модуль, чем матрица. В этих целях часто используют металлические волокна. Сопротивление растяжению растет при этом незначительно, но сопротивление тепловым ударам существенно повышается. При этом в зависимости от соотношения коэффициентов термического расширения матрицы и волокна возможны случаи, когда прочность падает.

Материалы такого рода готовят методами горячего прессования (таблетирование с последующим спеканием под давлением) или методом шликерного литья, когда волокна заливают суспензией матричного материала, которая после сушки также подвергается спеканию.

## 24.5. Наноккомпозиты

В последние годы появился класс композиционных материалов — наноккомпозиты, структура которых характеризуется включением второй фазы с размерами в несколько нанометров (10–100 нм), содержание которой достаточно невелико — от долей до нескольких процентов. Вместе с тем введения таких количеств металлов оказывается достаточным, чтобы существенно изменить важные физические свойства, например такие, как каталитическая активность в химических реакциях, магнитные и электромагнитные свойства.

При рассмотрении обычных композиционных материалов речь шла о микроскопных и субмикронных размерах фаз. Изменяя размеры наполнителя, оптимизируя межфазное взаимодействие за счет введения функциональных групп, можно заметно изменять свойства конечного материала. Наиболее



распространенными являются материалы, сочетающие органическую полимерную матрицу с неорганическими включениями. Такие композиты широко распространены в природе и являются основными конструкционными материалами с оптимальными структурой и взаимодействием между матрицей и наполнителем.

Биологические структурные нанокмпозиционные материалы обладают уникальными свойствами, на порядок превосходящими свойства искусственных материалов, что достигается оптимальной комбинацией свойств анизотропной органической матрицы, построенной из коллагеновых волокон и наноразмерных неорганических кристаллов, например фосфатов, и особым строением межфазных областей.

*Нанокмпозиционными* или — в более широком аспекте — *наноструктурированными материалами* называются материалы, имеющие средний размер одной из фаз менее 100 нм. Основными структурными параметрами наночастиц являются их форма, размер, а также распределение частиц по размерам.

Уникальные свойства наночастиц определяются их чрезвычайно высокой удельной поверхностью (отношение поверхности к объему).

Физические, электронные и фотофизические свойства наночастиц и кластеров значительно отличаются как от свойств блочного материала, так и от свойств индивидуального атома.

Другими важнейшими факторами, определяющими свойства конечного материала, как и в случае композитов, являются природа взаимодействия между фазами и строение межфазных областей, объемная доля которых чрезвычайно велика.

Используемые неорганические наночастицы «покрывают» широкий класс материалов — от металлов и керамик (оксиды, нитриды, карбиды, силикаты и т. д.) до биоминералов.

Для наноструктур доля поверхностных атомов ( $N_{\text{пов}}$ ) соизмерима (или даже больше) с числом атомов в объеме час-

тицы ( $N_{об}$ ). Энергетика наночастиц такова, что они способны эффективно взаимодействовать с любыми химическими соединениями, включая инертные газы.

Уменьшение размера приводит к увеличению доли атомов, образующих поверхность кристаллика, что может оказывать существенное влияние на многие физические характеристики. По сути дела, надо проследить за изменениями физических свойств при переходе структуры вещества к нанометрическим размерам. Проблема осложняется тем, что из-за очень малых размеров наноструктуры являются достаточно неравновесными системами.

Поверхностные наноструктуры с их особыми свойствами играют значительную роль в таких объектах, как высокодисперсные системы — адсорбенты и катализаторы, наполнители композиционных материалов, пленочные и мембранные системы.

Значительный интерес к наноструктурам связан с перспективами их широкого использования в микроэлектронике, оптике, акустоэлектронике.

**Механические свойства нанокomпозиционных материалов (НКМ).** Экспериментальные результаты по изучению механических свойств показали, что предел прочности и микротвердости нанокристаллического палладия, меди, серебра значительно выше, чем в соответствующих крупнозернистых аналогах. Почему возрастает прочность при уменьшении размеров зерна? Эксперименты показали, что в нанометровых кристалликах отсутствуют дислокации, которые являются факторами разупрочнения в крупнозернистых кристаллах. Поэтому можно считать, что нанометровые размеры зерна — основной источник прочности НКМ. Кроме того, большой объем межкристаллитной фазы с атомным беспорядком должен приводить к уменьшению прочностных характеристик. Суммарное же действие этих двух факторов приводит к росту предела прочности в 2–2,5 раза. При условии промышленного получения НКМ в соответствующих объемах их применение должно привести к существенной экономии металлов и сплавов для многих конструкций.

Отметим следующий недостаток нанокристаллических структур: такая структура чистых металлов неустойчива; даже при комнатной температуре происходит рост зерна и материал теряет нанокристаллические свойства. Поэтому актуальны разработки по созданию нанокристаллических материалов, структура которых была бы стабильной при комнатной и более высоких температурах.

**Полимер-керамические наноккомпозиты.** Наноккомпозиты на основе различных керамик и полимеров широко используются в настоящее время. Они сочетают в себе такие свойства, как гибкость, упругость, перерабатываемость с характерными свойствами стекол, твердость, износостойкость, высокий показатель преломления.

Создание наноккомпозитов обеспечивает достижение многих улучшенных свойств. Включение в их состав силикатов повышает механические свойства композитов и улучшает взаимосвязь между органическим и неорганическим компонентами;  $\text{TiO}_2$  и  $\text{GeO}_2$  используют при создании оптических материалов, окись титана заметно повышает термическую стабильность композитов. Материалы, содержащие  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , обладают высокой твердостью, их поверхность не царапается. Цирконийсодержащие композиты применяют при создании различных блоков двигателей и турбин; при этом достигается упрочнение материала за счет мартенситного перехода от тетрагональной к моноклинной модификации, который, в свою очередь, зависит от размеров кристаллов циркония.

**Оптические наноккомпоненты.** Обработка поверхности наночастиц наполнителей является очень важной процедурой при создании наноккомпозитов, используемых в качестве оптических материалов: фильтров защитных покрытий для видимого и ультрафиолетового диапазонов, окрашенных пленок, материалов с ультравысоким и широким коэффициентом преломления, фотолюминесцирующих пленок. Введение органических красителей в прозрачную полимерную матрицу

ограничено предельной концентрацией растворения красителя в полимере. Другой подход состоит в нанесении красителя на поверхность наночастиц наполнителя. Микрокомпозиты непрозрачны из-за рассеяния света на наполнителе, однако уменьшение размера частиц до 50 нм и меньше позволяет успешно решить эту проблему.

Таким образом, на основе нанокомпозитов полимеров и неорганических веществ можно создать материалы с высоким коэффициентом преломления.

В то же время использование наночастиц металлов позволяет снизить коэффициент преломления материала, что особенно важно при создании волноводов с высокой скоростью передачи сигналов.

Одним из наиболее подходящих полимеров при создании нанокомпозитов оптического применения является полиметилметакрилат.

**Металл-полупроводниковые нанокомпозиты.** Металл-полупроводниковые нанокомпозиты привлекают внимание прежде всего благодаря уникальным свойствам металлических кластеров, входящих в их состав. Металлические кластеры представляют собой агрегаты атомов от десяти до нескольких тысяч штук. Их размер составляет 1–10 нм, что соответствует огромной удельной поверхности. Свойства таких наночастиц отличаются как от свойств блочного материала, так и от свойств индивидуального атома или молекулы. Так, например, ширина полосы поглощения, спектральные свойства, электронный транспорт в наночастицах заметно отличаются от аналогичных свойств в блочном материале. В полупроводниках эта зависимость проявляется особенно сильно (вплоть до размеров частиц в сотни нанометров). При переходе от нанокристалла CdS к макрокристаллу, например, ширина запрещенной зоны уменьшается от 4,5 до 2,5 эВ, время жизни на нижнем возбужденном уровне изменяется от пикосекунд до нескольких наносекунд, температура плавления повышается от 400 до 1600 °C и т. д.

Нелинейные оптические свойства нанокластеров и создание на их основе «регулируемых квантовых светодиодов» чрезвычайно перспективны для развития микроэлектроники и телекоммуникаций.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Какие материалы называют композиционными?*
2. *Какова природа упрочняющего эффекта в композиционных материалах?*
3. *Каков механизм дополнительного упрочняющего действия в дисперсно-упрочненных композиционных материалах?*
4. *Какие материалы используют в качестве упрочняющих волокон?*
5. *Что такое наноккомпозиты? Каковы их разновидности?*

## Глава 25

### ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ

#### 25.1. Назначение, состав и классификация пластмасс

*Пластическими массами* или просто *пластмассами* называют композиционные материалы на основе полимеров.

Наиболее характерные особенности пластмасс: малый вес, хорошая химическая стойкость, высокие диэлектрические свойства, низкая теплопроводность и сравнительно большое термическое расширение. По прочности пластмассы уступают большинству сталей, но часто превосходят их по удельной прочности.

Несмотря на такие недостатки пластмасс, как умеренная прочность, невысокая теплостойкость, изменчивость свойств

при изменении температурных и других условий, малая жесткость, они нашли широкое применение в промышленности.

Пластмассы разнообразны по назначению. В машино- и приборостроении их широко используют как конструкционные материалы, в других целях — для производства клеев, лаков и красок, в качестве материалов для технологической оснастки.

Пластмассы представляют собой смеси полимеров с другими веществами. Название «полимеры» происходит от греческих слов *поли* — много, *мерос* — часть. Согласно определению *полимеры* — это высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа одинаковых группировок (повторяющихся звеньев), соединенных химическими связями. Повторяющиеся звенья низкомолекулярного соединения образованы из *мономера*. Макромолекула — структурная единица полимера — представляет собой «гигантскую молекулу», которая по химическому строению характеризуется последовательными повторениями вдоль цепи одной и той же структурной группы — звена (мономера). Степень полимеризации измеряется числом звеньев.

Высокомолекулярные соединения с молекулярными массами  $M = 500\text{—}10\,000$  называются *полимерами*, а с меньшими молекулярными массами — *олигомерами*. Принято считать, что к олигомерам относятся вещества с  $M = 500\text{—}5000$ . Это разделение по молекулярным массам условно, в ряде случаев к полимерам относятся соединения с молекулярной массой  $M = 20\,000$  и выше (полиэтилен и др.).

В отличие от жестких молекул простых низкомолекулярных веществ, для линейных макромолекул полимеров характерна большая гибкость. В связи с этим можно сказать, что полимер формируется при синтезе лишь тогда, когда цепные молекулы имеют большое число звеньев.

В названии конкретного полимера вторая часть слова указывает на исходное вещество — мономер (*полиэтилен*, *полистирол* и др.) или на характерную группу атомов (*полиамид* и др.).

Если в макромолекулы объединены разные звенья, то такие полимеры называют *сополимерами*. Сополимеризация аналогична легированию сплавов, она изменяет свойства материалов.

Внутри полимерной цепи существует сильная ковалентная связь между атомами углерода, а также между атомами углерода и водорода. Между молекулами действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса и водородные связи, являющиеся по силе вторичными. Силы, связывающие цепи друг с другом, являются слабыми электростатическими.

При приложении нагрузки разрушение обычно вызывается отделением цепей друг от друга, а не разрывом цепей. Линейные цепи стремятся скользить относительно друг друга. Присутствие боковых цепей ограничивает это движение и изменяет прочность материала.

В зависимости от вида связей между молекулами полимеры подразделяют на термопластичные и термореактивные.

### Полимеры

Термопласты	Промежуточные	Термореактивные
Полиэтилен Полиамиды Полиэфиры Целлюлозы Поликарбонаты Ацетаты Акрилаты Хлорсодержащие термопласты	Эластомеры (каучуки)	Эпоксидные смолы Фенолсодержащие смолы Полиэфирные смолы Аминсодержащие смолы Уретаны

**Термопластичные полимеры.** Термин «термопластичный» применяют к материалам, которые легко деформируются. Однако пластмассы при обычной температуре не являются пластичными, а приобретают это свойство только при высоких температурах. Они могут многократно размягчаться

при нагреве и твердеть при охлаждении без изменения свойств. Температура нагрева не должна быть слишком высокой во избежание разложения полимера. У этих полимеров между молекулами действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса и нет химических поперечных связей.

**Термореактивные полимеры.** У этих полимеров при нагреве (а также по другим причинам) между линейными молекулами появляются химические связи, и полимер превращается в жесткое неплавящееся и нерастворимое вещество. Соединение линейных молекул химическими связями называют *отверждением*. До отверждения термореактивный полимер размягчается как термопластичный. После отверждения он остается жестким и неплавящимся. Теперь между молекулами действуют прочные химические связи и более слабые силы Ван-дер-Ваальса.

Получение полимеров основано на реакциях полимеризации или поликонденсации. Известны случаи взаимодействия полимеров с другими веществами (полимераналогичные превращения).

Способ производства полимера определяет строение его молекул, среднюю молекулярную массу ( $M$ ), количество остаточных примесей, что влияет на комплекс свойств материала.

Хотя рассмотренная классификация полимеров используется широко, разработка и получение различных новых полимеров со специфическими свойствами приводят к различным исключениям из этой классификации. Например, полиэтилен сверхвысокой молекулярной массы при нагреве не обладает вязкотекучестью, хотя термопластичность предполагает это; многие полимеры текут (деформируются) без воздействия тепла, просто при механическом давлении. Термореактивность означает отверждение при нагреве, однако силикаты, эпоксидные и полиэфирные смолы могут отверждаться и без тепла и т. д. Поэтому правильнее было бы говорить о линейных и поперечно-сшитых полимерах. Линейная структура озна-



чает, что полимерные цепи остаются линейными и после переработки. Сшитые полимеры образуются из линейных цепей. Они связываются необратимо во время переработки в трехмерную пространственную сетку. Это объясняет, почему полиэтилен может также становиться термореактивным, а полиэфиры и полиуретаны могут быть термопластичными.

## 25.2. Свойства пластмасс

По сравнению с металлами применение пластмасс экономически более выгодно благодаря простоте изготовления изделий из них и малому количеству отходов, небольшой стоимости пластмасс, меньшим расходам на перевозку, монтаж и эксплуатацию изделий.

Под действием окружающей среды полимеры медленно стареют. При старении происходит как разрыв макромолекул на части, так и соединение частей самих молекул друг с другом поперечными связями. Старение развивается при одновременном или раздельном действии нагрева, окисления, ионизации, механических напряжений, облучения (свет, излучение, потоки электронов и нейтронов). Интенсивность старения определяется условиями эксплуатации и структурой. Материалы, стойкие в одних условиях, быстро разрушаются в других. Термопласты и резины стареют быстрее, чем реактопласты.

**Теплостойкость.** Все полимеры разрушаются при нагреве, и большинство разлагается при температуре 150—300 °С. Стойкость композитов на основе пластмасс зависит от свойств наполнителей, пластификаторов и других составляющих. Пластмассы с неорганическими наполнителями (стеклянное волокно, асбест и др.) более стойки, чем пластмассы с органическими наполнителями (бумага, дерево, хлопчатобумажное волокно). Некоторые полимеры (полистирол, органическое стекло, а также пористые пласт-

массы на их основе) огнеопасны. Горючесть их устраняется специальными добавками или модифицированием полимеров.

**Теплофизические свойства.** Полимеры плохо проводят тепло, сильно расширяются при нагреве и имеют значительную теплоемкость.

Теплопроводность полимеров в десятки и сотни раз меньше, чем у металлов. Пластмассы, наполненные графитом или металлическим порошком, значительно более теплопроводны.

Наименьшую теплопроводность имеют пористые пластмассы.

Коэффициенты теплового расширения полимеров в 10—30 раз больше, чем металлов. Из-за различия коэффициентов теплового расширения полимеров и металлов возникают термические напряжения при плотном соединении материалов друг с другом. Термические напряжения возникают в клеевых швах, пластмассовых деталях с металлическими вставками, проводниках электрического тока, залитых пластмассами, и т. д. Термическое расширение пластмасс можно уменьшить, используя неорганические наполнители с низким коэффициентом линейного расширения (стекло, порошки,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ).

**Электрические свойства.** Полимеры характеризуются небольшими значениями диэлектрической проницаемости ( $\epsilon' = 2-3$ ), высоким удельным объемным электросопротивлением  $\rho_v = 10^{10}$  Ом/см и электрической прочностью  $E_{\text{пр}} = 10-500$  кВ/мм.

Пластмассы легко электризуются при трении и долго сохраняют статические заряды на поверхности. Не электризуются пластмассы, наполненные графитом или порошками металлов, а также пластмассы со специальными добавками против электризации.

При разрушении полимеров под действием электрических разрядов на поверхности изделий образуется обугленный то-

копроводящий слой. Этого недостатка не имеют полистирол, фторопласты, органическое стекло, кремнийорганические полимеры.

Свойства пластмасс с неорганическими наполнителями выше, чем пластмасс с органическими наполнителями.

Свойства пластмасс снижаются при нагреве. У термопластов при нагреве немного выше температуры  $T_{ст}$  или  $T_{кр}$  резко возрастают электропотери, снижается удельное объемное электросопротивление.

Пластмассы с неоднородной структурой анизотропны в результате ориентации макромолекул и наполнителей. Электрическая прочность  $E_{пр}$  перпендикулярно вытянутым молекулам увеличена. У полимерных пленок величина  $E_{пр}$  в несколько раз больше, чем у полимеров большого объема. При вытяжке пленок  $E_{пр}$  увеличивается еще на 30–50 % из-за ориентации молекул. Слоистые пластики имеют наилучшие свойства перпендикулярно слоям наполнителя, вдоль слоев величины  $E_{пр}$  и  $\rho_v$  понижены.

Большинство пластмасс не используют при частотах электрического поля свыше 20 000 Гц, так как они недопустимо разогреваются и теряют электрическую прочность. Высокочастотными пластмассами являются неполярные полиэтилен, фторопласт-4, полистирол и специальные термореактивные пластмассы с низкими потерями.

**Механические свойства.** Пластмассы характеризуются вязкоупругим поведением полимеров под нагрузкой. *Деформация полимера* — это сумма *упругой, высокопластичной и вязкотекучей деформаций*.

Соотношения между тремя составляющими общей деформации непостоянны и зависят от структуры материала, температуры и условий деформирования. Полная характеристика поведения пластмассы под нагрузкой представляет сложную задачу. При необходимости механические свойства

оценивают по результатам испытаний на растяжение, сжатие, удар, хотя эта оценка неполна.

Термореактивные пластмассы прочнее термопластов, более жестки, их свойства меньше зависят от температуры. Сетчатая структура мешает развиваться высокоэластичной деформации, и реактопласты разрушаются с незначительной остаточной деформацией. Термопласты, как правило, разрушаются с остаточной деформацией порядка десятков и сотен процентов. Эта вынужденная высокоэластичная деформация возникает при вытягивании макромолекул под действием напряжений. Вынужденная высокоэластичная деформация при снятии напряжения не исчезает, так как ниже температуры  $T_{ст}$  повороты в основных цепях молекул заторможены.

Пластическое течение кристаллических полимеров сопровождается рекристаллизацией, то есть заменой исходной кристаллической структуры на новую с ориентированными кристаллами. Кристаллическая решетка при этом, конечно, не меняется. Рекристаллизация состоит из трех последовательных этапов: разрушение кристаллов под действием напряжения; вытягивание молекул вдоль направления растяжения на участке с разрушенными кристаллами; образование новых благоприятно ориентированных кристаллов между параллельно ориентированными молекулами. Новые кристаллы фиксируют полученную высокоэластичную деформацию, и она сохраняется после снятия нагрузки.

Особенности механических свойств пластмасс таковы.

*Малая жесткость.* Практически все полимеры и пластмассы имеют низкие модули, которые в 100—1000 раз меньше, чем у металлов. Наполнители незначительно увеличивают жесткость. Жесткость реактопластов больше жесткости термопластов.

*Зависимость свойств от температуры.* При повышении температуры прочность и жесткость уменьшаются и пласт-

массы становятся более вязкими; ускоряется ползучесть под нагрузкой и теряется несущая способность. При понижении температуры возрастают прочность и жесткость, но уменьшается сопротивление удару.

*Зависимость от скорости деформирования.* При увеличении скорости деформирования повышается жесткость пластмасс, так как не успевает развиваться высокоэластичная деформация и возрастает склонность к хрупкому разрушению.

*Зависимость от длительности нагружения.* При длительном действии нагрузки уменьшается прочность и появляется ползучесть. С ростом напряжений и температуры ползучесть увеличивается. Из-за ползучести приходится ограничивать напряжения, чтобы сохранить размеры изделий неизменными. Наибольшую стабильность размеров изделий под нагрузкой имеют термопласты с высокой температурой  $T_{ст}$  (например, поликарбонат, у которого  $T_{ст}$  около  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), наполненные термопласты и реактопласты с плотными поперечными связями.

*Зависимость свойств от структуры.* Пластмассы с неоднородной структурой имеют различные значения механических свойств. Слоистые пластики имеют максимальную прочность вдоль листов наполнителя, они сравнительно легко раскалываются или расслаиваются параллельно листам наполнителя. Анизотропия листов наполнителя еще более усиливает неоднородность свойств пластмассы.

Вдоль ориентированных вытянутых молекул прочность термопластов максимальна, а в поперечном направлении уменьшена. В массивных изделиях ориентация молекул нежелательна, так как из-за нее в определенных направлениях прочность снижается. В пленках и листах ориентация полезна, так как при вытяжке в 2—4 раза прочность может повышаться вдвое. Листы и пленки после одноосной вытяжки анизотропны, поэтому чаще применяют двухосную вытяжку,

в результате которой материал получается более однородным.

Хрупкость пластмасс возрастает при повышении плотности связей в реактопластах и при увеличении степени кристаллизации свыше 85 % у кристаллических полимеров (но не у всех). Для уменьшения хрупкости применяют пластификаторы, а также волнистые наполнители.

Пористые пластмассы имеют наименьшую прочность и жесткость. В целом пластмассы хуже сопротивляются растяжению, чем сжатию. При растяжении допустимые напряжения у термопластов не превышают 10 МПа, у реактопластов они равны 15—40 МПа и больше — в зависимости от наполнителя. При повышенных температурах допустимые напряжения снижаются.

*Хорошее сопротивление усталости.* При переменных нагрузках пластмассы отличаются долговечностью и большей, чем у многих сталей и сплавов, деформирующей способностью. Потери на механический гистерезис особенно велики вблизи температуры  $T_{ст}$  (или  $T_{кр}$ ). Пластмассы и некоторые резины с большим механическим гистерезисом используются в качестве звуко- и вибропоглощающих материалов.

*Плотность.* Полимеры имеют плотность от 0,9 до 2,2 г/см<sup>3</sup>, самые легкие — полиэтилен и полистирол, а самый тяжелый — фторопласт-4 плотностью 2,2 г/см<sup>3</sup>. Плотность пластмасс обычно равна 1,1—1,6 г/см<sup>3</sup>, а пористых пластмасс — всего 0,01—0,2 г/см<sup>3</sup>.

*Стойкость в агрессивных средах.* Полимеры стойки против долговременного действия промышленных агрессивных сред, включая щелочи и концентрированные кислоты, и применяются для изготовления защитных покрытий на металлы. В отличие от металлов полимеры практически не подвержены электрохимической коррозии. В то же время для каждой группы полимеров известны вещества, с которыми они взаимодействуют химически. К ним относятся окислители (кислород, озон, азотная и серная кислоты, органиче-

ские перекиси), галоиды, амины, щелочи. Некоторые полимеры гидролизуются, для них опасны вода и водяной пар при температурах выше 100 °С.

Термопластичные полимеры растворяются, а термореактивные с сетчатой структурой лишь набухают в органических растворителях. При растворении химических изменений обычно не происходит и полимерные молекулы не разрушаются. При проникновении растворителя ослабляется межмолекулярное притяжение, понижаются прочность и твердость, изменяются другие свойства.

Часто обязательным компонентом пластмасс является *связующее вещество*. В качестве связующих для большинства пластмасс используют синтетические смолы, реже — эфиры целлюлозы. Однако многие пластмассы, главным образом термопластичные (полиэтилен, органическое стекло и др.), состоят из одного связующего вещества.

*Наполнители* добавляют в количестве 40—70 % (по массе) для повышения механических свойств, снижения стоимости и изменения других свойств. Наполнители — это органические и неорганические вещества в виде порошков (древесная мука, сажа, слюда, тальк,  $\text{SiO}_2$ , графит,  $\text{TiO}_2$ ), волокон (хлопчатобумажные, стеклянные, асбестовые, полимерные), листов (бумага, ткани из различных волокон, древесный шпон).

*Стабилизаторы* — различные органические вещества, которые вводят в пластмассы в количестве нескольких процентов по массе для замедления старения; это стабилизирует их свойства и удлиняет срок эксплуатации. Старение — это необратимое изменение свойств пластмассы под влиянием среды. В основе старения лежит изменение структуры молекул полимера.

*Пластификаторы* добавляют в качестве 10—20 % для уменьшения хрупкости и улучшения перерабатываемости пластмасс. Пластификаторами являются вещества, которые

уменьшают межмолекулярное взаимодействие и хорошо совмещаются с полимерами. Часто пластификаторами служат дибутилфталат, а иногда и полимеры с гибкими молекулами.

*Отвердители* вводят в количестве нескольких процентов в реактопласты для соединения полимерных молекул химическими связями. В итоге образуется пространственная молекулярная сетка (сетчатая структура), а молекулы отвердителя становятся частями этой сетки. В качестве отвердителей используют серу, органические перекиси (в каучуках), полиамиды (в эпоксидных смолах) и другие соединения.

*Специальные добавки* — смазки; красители; добавки для уменьшения статических зарядов, горючести, защиты от плесени; ускорители и замедлители отверждения — служат для изменения или усиления какого-либо свойства.

### 25.3. Классификация пластмасс

Основой классификации служит химический состав полимеров. В зависимости от природы полимера пластмассы разделяют на *фенолформальдегидные, эпоксидные, полиэфирные, полиамидные, полиуретановые* и др. В группе пластмасс, близких по химическому составу, могут оказаться термопластичные и термореактивные вещества, жесткие и резиноподобные пластмассы и т. п.

В зависимости от состава пластмассы подразделяют на *простые* и *сложные*. Простые пластмассы — это чистые полимеры без добавок. Они отличаются наивысшими электрическими свойствами, прозрачностью и удобны для переработки в изделия. Сложные пластмассы — это полимеры с различными добавками. Они прочнее, дешевле и разнообразнее по свойствам, чем простые пластмассы. Свойства первых определяются свойствами полимера и свойствами и количеством других составляющих.



Пластмассы без наполнителей называются *ненаполненными*, а с наполнителями — *наполненными*. По виду наполнителя пластмассы подразделяют на пресс-порошки, волокниты и слоистые пластики. В пресс-порошках используют порошковые наполнители, в волокнитах — волокна, в слоистых пластиках — листы наполнителя. Пористые пластмассы называются *поропластами* или *пенопластами*.

Сложные пластмассы относят к композиционным материалам.

**Сортамент пластмасс.** Пластмассы производят в виде порошков, гранул, таблеток, волокон наполнителей, пропитанных полимерами, в виде полуфабрикатов — пленок, листов, плит, стержней, труб и блоков. Некоторые реактопласты выпускают в виде жидких веществ, которые смешиваются перед употреблением (полиэфиры, полиэпоксиды, полиуретаны и др.). Жидкие смеси удобны для пропитки наполнителей, склеивания, нанесения покрытий на металлы.

## 25.4. Пластмассы, применяемые в промышленности

Существует множество полимерных материалов, пригодных для использования в промышленности. Одни из них находят всеобщее применение, другие являются более специфичными, некоторые не используют широко по техническим и экономическим причинам. Ниже приведены основные полимерные материалы, используемые в промышленности.

**Термореактивные материалы. Фенолформальдегидные смолы.** Это термореактивные материалы, представляющие собой продукт поликонденсации фенолов с формальдегидом. В зависимости от условий поликонденсации образуются термореактивные или термопластичные смолы; в процес-

се переработки они отверждаются с образованием трехмерных структур.

Жидкую смолу заливают в формы и затем отверждают. Если добавляют наполнитель и красители, то продукт получается в виде порошка.

Чистый полимер является молочно-белым и непрозрачным, но в промышленности производится темно-коричневым или черным. Его первое коммерческое название — бакелит. Свойства этого материала зависят от наполнителей: асбеста, муки, графита, волокон и др. Фенолформальдегидные материалы могут быть использованы для изготовления электроизоляции методом прессования. Их производят также в виде листов, труб или прутков.

**Полиэфирные смолы.** Эфир — это продукт реакции кислоты и спирта. Обычно термореактивные полиэфиры наполняют стекловолокном и отверждают для получения жесткой структуры. Добавление растворителей и масел к полиэфиру (или полиамидной смоле) дает возможность использовать его как покрытие.

Существуют алкидные прессованные составы, которые включают термореактивные смолы типа полиэфирных; их совмещают с мономерами для поперечного сшивания с другими добавками, чтобы получить желаемые свойства. Изделия из них получают прессованием или литьем под давлением. Наиболее важными свойствами являются низкое влагопоглощение, превосходная устойчивость размеров и хорошие электрические свойства. Полиэфиры используют в электротехнической и электронной промышленности для изготовления деталей.

**Эпоксидные смолы.** Эти смолы дороже, чем полиэфирные, но наиболее распространены.

Эпоксидную смолу производят в жидком и твердом виде. Отвердитель, обычно содержащий аминогруппы, добавляют к смоле для поперечной сшивки, чтобы образовать жесткую структуру. Количество отвердителя невелико. Эпоксидные

смолы наполняют. Например, графитовый наполнитель улучшает модуль упругости.

**Полиуретаны.** Эти материалы получают реакцией конденсации изоината ( $R = N = C = O$ ) и спирта ( $ROH$ ) в виде твердого термореактивного материала или эластомеров, то есть каучуков.

Основное свойство полиуретанов — высокое сопротивление абразивному износу.

**Термопластичные материалы. Полиэтилен.** Получают полимеризацией этилена.

Свойства полиэтилена зависят от длины цепи. Различают полиэтилен низкой плотности, высокой плотности и ультравысокой молекулярной массы.

Полиэтилен низкой плотности производят полимеризацией в газовой фазе при высоких температуре и давлении.

Полиэтилен высокой плотности производят при низком давлении реакцией в растворе. Он является линейным и высококристаллическим полимером; хорошо сопротивляется различным растворителям, кислотам; достаточно прочен, гибок; его используют в качестве электроизоляционных материалов для изготовления труб, пленок, пакетов, различных сосудов. Имея низкую температуру размягчения, полиэтилен высокой прочности легко переводится в вязкотекучее состояние, хорошо формуется и прессуется.

Полиэтилен сверхвысокой молекулярной массы хорошо сопротивляется абразивному износу и несколько хуже — обрабатывается давлением. Его используют в чистом виде или наполняют сажей, пигментами и т. д.

**Полипропилен.** Получают реакцией полимеризации пропилена.

Полипропилен — кристаллический полимер, прочный, более жесткий, чем полиэтилен, несколько дороже его. Полипропилен может быть использован для изготовления нагруженных деталей. Он легко поддается обработке литьем под

давлением, по сравнению с полиэтиленом имеет более высокие температуру размягчения и химическую стойкость. В основном используют для изготовления чистых химических сосудов, медицинских изделий.

**Поливинилхлорид (ПВХ).** Получают полимеризацией винилхлорида.

Материал обычно имеет добавки солей, которые выступают как стабилизаторы и предотвращают разложение от действия света и тепла. Жесткий поливинилхлорид используют для изготовления «неответственных» изделий: он малопрочен, требует усиления, плохо перерабатывается. Для пластификации в полимер добавляют мягчители (масло), эфиры или растворы, увеличивающие гибкость и эластичность. Количество вводимых пластификаторов может составлять от 5 до 50 % общей массы полимера. Однако добавки могут сильно удорожить материал. Жесткий и пластифицированный поливинилхлорид обладает хорошей химической стойкостью, но меньшей по сравнению с полиэтиленом.

**Полистирол.** Получают полимеризацией стирола.

Полистирол является жестким материалом, плохо противостоит ударным нагрузкам, используется как электро- и теплоизоляционный материал в виде пенопласта. Добавление к полистиролу акрилонитрила, бутадиена повышает его сопротивляемость ударам, действию кислот, щелочей. Из него изготавливают (методом прессования) корпуса приборов, телефонов, детали приборов.

**Полиметилпентан** — умеренно кристаллический полимер. Он почти оптически прозрачен, пропускная способность света составляет до 90 %. Причиной столь высокой световой пропускной способности является то, что кристаллическая и аморфная составляющие структуры полимера имеют одинаковый коэффициент рефракции. У него более низкая плотность, чем у других полиолефинов. Полиметилпентан теплоустоек, сохраняет свои физические свойства продолжительное время до температуры 200 °С. Для долго-

временного использования при температуре выше  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  в него необходимо добавлять антиоксиданты. Полиметилпентан имеет свойства, аналогичные свойствам полиэтилена и пропилена, за исключением большей теплостойкости. Его используют для изготовления лабораторного оборудования, посуды, пищевых контейнеров, уровнемеров для горячей жидкости.

**Фторопласт.** Может классифицироваться как член семейства полимеров на основе этилена или как отдельная группа термопластичных материалов. Наиболее известным из этого семейства является политетрафторэтилен, являющийся полимером тетрафторэтилена. Торговое название — тефлон.

Тефлон имеет атом фтора вместо каждого атома водорода в молекуле этилена; является кристаллическим материалом до  $325\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Он практически не размягчается при нагреве, остается жестким до  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  и сохраняет свою гибкость до  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тефлон химически инертен и имеет низкий коэффициент трения. Его нельзя перерабатывать литьем. Для изготовления деталей из него применяют метод горячего прессования. Расширение полимеров семейства фторопластов вызвано необходимостью создания материала, который мог бы перерабатываться литьем под давлением. Все полимеры семейства фторопластов относительно дороги.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятия «полимерные материалы».
2. По какому принципу и как классифицируются полимерные материалы?
3. Назовите основные свойства пластмасс.
4. Каковы различия между термореактивными и термопластичными материалами?

## Глава 26

## РЕЗИНЫ

Резина — важный конструкционный материал для производства технических изделий во многих отраслях народного хозяйства. Она является продуктом химического превращения (вулканизации) каучуков. Каучуки, взаимодействуя с определенными вулканизирующими веществами, претерпевают внутренние химические изменения, в результате чего образуется новый продукт — резина. Исходный материал для получения резины — резиновая смесь. Ее основу составляет каучук, содержание которого колеблется в различных изделиях от 5 до 95 %.

## 26.1. Основные свойства резины

Резина обладает совокупностью ценных свойств — высокой упругостью и способностью поглощать вибрации; она хорошо сопротивляется истиранию и многократным растяжению и изгибу. Резина газо- и водонепроницаема, стойка против воздействия масел, жидкого топлива и ряда других сред и является диэлектриком. Созданы электропроводная, магнитная, прозрачная и другие резины с новыми свойствами. Резина в готовом изделии находится в термостабильном состоянии; она нерастворима (но способна набухать) и иногда непластична. Исходная же (невулканизированная) резиновая смесь обладает хорошей пластичностью, обеспечивающей возможность формообразования различных изделий.

*Упругопрочностные свойства резины* при растяжении характеризуются: условным пределом прочности — отношением силы, вызывающей разрыв образца, к его первоначальному сечению; относительным удлинением — отношением длины образца в момент разрыва к его первоначальной длине; ус-

ловным напряжением при заданном удлинении образца, а также величинами истинного напряжения при заданном удлинении и истинной прочностью.

*Сопротивление резины истиранию* выражается потерей объема резины, отнесенного к работе трения, и интенсивностью истирания — потерей объема резины в единицу времени.

*Набухание резины* определяется при нахождении ее определенное время в какой-либо жидкости и характеризуется увеличением массы (или объема), отнесенной к исходной массе (или объему), и выражается в процентах.

*Эластичность резины* — свойство резины упруго деформироваться без разрушения под действием силы и восстанавливаться после прекращения действия силы, то есть отношение возвращенной энергии к энергии, затраченной на деформацию образца при ударе, выраженное в процентах.

*Старение резины* — снижение ее свойств (прочности, эластичности, электрического сопротивления и др.) под воздействием эксплуатационных факторов (темпероты, холода, света, воздуха, кислорода, механического нагружения и др.).

*Теплостойкость резины* определяют по снижению предела прочности и относительного удлинения после действия на нее насыщенного пара и не менее чем двухчасового отдыха.

Коэффициент теплостойкости резины ( $K_T$ ) — сопротивление разрыву после шестичасового воздействия насыщенного пара при температуре  $(143 + 3)^\circ\text{C}$  — определяют не менее чем через 2 ч выдержки при нормальных условиях и вычисляют по формуле  $K_T = A_T/A$ , где  $A$  — условная прочность при разрыве до воздействия пара, МПа;  $A_T$  — условная прочность при разрыве после воздействия насыщенного пара, МПа.

*Морозостойкость резины* — способность ее сохранять эластичность и другие свойства при низких температу-

рах. Морозостойкость определяют несколькими способами:

- измерением деформации образца при нормальной (комнатной) и минусовой температурах при одних и тех же величинах и условиях нагружения;
- по эластическому восстановлению образца, сжатого при комнатной и выдержанного при пониженной температурах после снятия нагрузки;
- растяжением образца до заданного удлинения при 23 °С и определением величины удлинения того же «отдохнувшего» образца при низкой температуре под воздействием того же груза.

Во всех случаях потом определяют коэффициент морозостойкости.

*Светостойкость резины* — стойкость к старению в климатических условиях при преимущественном воздействии солнечной радиации.

*Атмосферостойкость резины* — стойкость к старению в климатических условиях под воздействием температуры, влажности воздуха и других факторов.

Свойства резины зависят прежде всего от свойств ее основы — каучука. Каучуки по своему происхождению разделяются на *натуральные* (или естественные) и *синтетические* (или искусственные).

Натуральный каучук получают из млечного сока (латекса) каучуконосных растений. Это природный полимер, обладающий при обычных температурах высокими эластическими свойствами. Важнейшие типы — рифленый смокед-шит (продукт светло-янтарного цвета), светлый креп (продукт светло-кремового цвета).

Синтетический каучук (СК) по свойствам близок к натуральному. Его получают путем синтеза из органических веществ. Промышленные виды СК, которых насчитывается несколько десятков, различаются между собой как по исходному сырью и способам производства, так и по составу и физико-механическим свойствам. Производство СК скла-



дывается из двух основных процессов: получения мономеров (бутадиен, стирол, хлоропрен, акрилонитрил и др.) и их полимеризации в каучукообразный продукт. Сырьем для получения мономеров являются нефтепродукты, природный газ, ацетилен, древесина и др.

СК представляют собой высокомолекулярные вещества, обладающие свойствами, подобными естественным каучукам, и способные вулканизироваться. Общепринятой является классификация СК по областям применения: каучуки *общего назначения*, применяемые в массовом производстве таких изделий, в которых реализуется основное свойство резины — эластичность (шины, транспортные ленты, резиновая обувь и др.), и каучуки *специального назначения*, применяемые в производстве изделий, которые, наряду с эластичностью, должны обладать стойкостью к воздействию различных агентов (растворителей, кислот, щелочей, нефтепродуктов, кислорода, озона и т. д.), тепло- и морозостойкостью (т. е. способностью сохранять эластические свойства в широком интервале температур) или другими специальными свойствами. Эта классификация по областям применения весьма условна. Так, многие СК обладают комплексом свойств, позволяющих применять их как каучуки общего и специального назначения; вместе с тем к ряду резин общего назначения предъявляют также и специфические требования (например, масло- и бензостойкость — для резиновых перчаток и обуви, морозостойкость — для шин и др.).

## 26.2. Приготовление резиновых смесей

В состав смеси для приготовления резины вводят *вулканизующие вещества*, обладающие способностью при химическом взаимодействии с каучуками вызывать в них химические изменения. К ним относятся сера, окислы металлов, различные смолы и др.

Для вулканизации отформованные полуфабрикаты из сырой резиновой смеси нагревают до температуры 140 °С. При

этом вулканизирующее вещество (чаще всего сера) вступает в соединение с каучуком и полуфабрикат, теряя пластичность, становится эластичным, формование может совмещаться с нагревом.

Свойства получаемой резины во многом зависят от количества вулканизирующих веществ (до 5 % от массы каучука). Увеличение содержания серы уменьшает эластичность резины. Если в составе смеси сера превысила 25 %, то получается твердая резина, или эбонит.

При производстве резины используют также ускорители вулканизации, наполнители, противостарители, мягчители, пластификаторы, красители и регенерат.

*Ускорители* вулканизации — химические вещества, вводимые в состав резиновых смесей в небольших количествах с целью сокращения продолжительности вулканизации и снижения температуры этого процесса. К ускорителям относятся органические продукты: дифенилгуанидин, каптакс, тиурам и некоторые минеральные вещества.

*Наполнители* в составе смеси придают резине определенные свойства. Их делят на активные и неактивные. Активные (сажа, окись марганца и др.), количество которых в смеси достигает 45—60 %, способствуют повышению некоторых механических свойств резины (сопротивлению растяжению, износостойкости и др.). Неактивные не оказывают существенного влияния на механические свойства резины, их вводят главным образом с целью ее удешевления.

*Противостарители* — вещества, предохраняющие резину от быстрого старения, то есть изменения физико-механических свойств с течением времени. В качестве таких веществ применяют органические соединения в количестве 3—5 % от массы резиновой смеси. К противостарителям относятся ароматические амины, диамины — продукты конденсации аминов с альдегидами, эфирами и т. д.

*Мягчители и пластификаторы* — вещества, которые облегчают смешение каучука с твердыми порошкообразными составляющими и придают резине мягкость, эластичность и мо-

розостойкость. Это стеариновая и олеиновая кислоты, некоторые минеральные масла, парафин и т. п. В смеси их 2—5 %.

*Красители* окрашивают резину в определенный цвет и в некоторых случаях замедляют старение. В качестве красителей применяют ультрамарин, охру и др.

*Регенерат* — пластичный продукт, который получают специальной обработкой бывшей в употреблении резины. Применение регенерата удешевляет производство резины и несколько повышает ее пластичность.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные свойства резины.
2. Какие каучуки используют при получении резины?
3. Каково назначение активных и неактивных наполнителей в составе резины?
4. От каких компонентов резины и как зависят ее свойства?

## Часть 2

# ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛОВ

---

## *Раздел VII*

# ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### Глава 27

## ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА И УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

### 27.1. Общие сведения

Сущность литейного производства состоит в получении отливок — литых металлических изделий — путем заливки расплавленного металла или сплава в литейную форму.

Первые литые изделия получали еще в III—II тысячелетиях до н. э. — сначала из бронзы, позже из чугуна. Значительное развитие литье из чугуна получило примерно с XIII—XIV вв. Стальные отливки начали получать в XIX в., литые изделия из алюминиевых и магниевых сплавов — несколько десятков лет назад.

Нет ни одной отрасли машиностроения и приборостроения, где не применяли бы литые детали. В машиностроении масса литых деталей составляет около 50 % массы машин и механизмов, в станкостроении — около 80 %, в тракторостроении — около 60 %. Это объясняется рядом преимуществ литейного производства по сравнению с другими способами по-

лучения заготовок или готовых изделий. Литьем получают детали как простой, так и очень сложной формы с внутренними полостями, которые нельзя или очень трудно получить другими способами. Во многих случаях это наиболее простой, достаточно универсальный и дешевый способ получения изделий. Масса литых деталей может составлять от нескольких граммов до сотен тонн.

Некоторые специальные способы литья позволяют получать отливки с высокой точностью и чистотой поверхности, что резко сокращает или совсем исключает их последующую механическую обработку. Кроме «традиционных» литейных сплавов: чугуна, бронзы, углеродистых сталей, — литье все шире применяют для изготовления изделий из нержавеющей и жаропрочных сталей, магнитных и других сплавов, имеющих пониженные литейные свойства.

Широкому развитию литейного производства, особенно за последнее десятилетие, способствуют совершенствование традиционных и появление новых способов литья, непрерывно повышающийся уровень механизации и автоматизации, специализация и централизация производства.

## **27.2. Развитие отечественного литейного производства**

Широко известным свидетельством высокого искусства русских литейщиков-умельцев является «Царь-пушка» — чугунная отливка массой около 39 т, изготовленная Андреем Чоховым в 1586 г. Михаил Маторин в 1733—1735 гг. отлил уникальный бронзовый «Царь-колокол» с массой ствола около 200 т. Мировую известность получило чугунное художественное литье Каслинского завода на Урале, основанного в XVIII в. Событием в истории литейного производства стала отливка в 1873 г. детали кузнечного молота массой 620 т на заводе в Перми.

Развитию научных основ литейного производства во многом способствовали работы Д.К. Чернова, П.П. Аносова и других ученых.

Дореволюционная Россия по производству литья занимала четвертое место в мире. Однако технический уровень производства был низким. Преобладал ручной труд.

В СССР в годы довоенных пятилеток была проведена коренная реконструкция литейного производства.

По объему литейного производства в 1936—1937 гг. Советский Союз занимал второе место в мире (уступая США). В послевоенные годы наше литейное производство вновь достигло высокого уровня, а по объему производства отливок с 1967 г. СССР занимал первое место в мире.

Большое значение для развития и совершенствования литейного производства имели решения о создании специализированных литейных цехов и заводов-центролитов. Централизация и специализация в литейном производстве дают возможность наиболее полно использовать достижения научно-технического прогресса. Так, например, если затраты труда на 1 т литья в единичном и мелкосерийном производстве условно принять за 100 %, то в крупносерийном производстве они составляют примерно 60 %, в массовом высокomeханизированном производстве — 35—40%.

Одной из главных задач литейного производства является ускорение роста производительности труда на основе нового высокопроизводительного оборудования, комплексной автоматизации и механизации. В настоящее время в литейном производстве работают автоматические линии. В повышении эффективности литейного производства важнейшими направлениями являются улучшение качества, надежности, точности и чистоты поверхности отливок с максимальным их приближением к готовым деталям; снижение на 15—20 % массы литых деталей путем внедрения новых прогрессивных технологических процессов получения отливок; улучшение качества литейных сплавов.

В последнее время широко применяют специальные методы литья: по выплавляемым моделям, в оболочковые фор-

мы, в металлические формы (кокили), литье под давлением, центробежное литье и др. Эти способы отличаются материалом, используемым для формы, и технологией ее изготовления; условиями заливки металла в форму (свободная заливка и заливка под давлением); условиями формирования отливки (например, кристаллизация металла отливки под действием центробежных сил) и другими особенностями. Все это в конечном итоге определяет технологические возможности способа и влияет на качество получаемой отливки.

Специальные методы литья позволяют получать точные отливки с чистой поверхностью и небольшими припусками на механическую обработку. Кроме того, технологический процесс изготовления отливки этими способами в значительной степени механизирован и автоматизирован, что повышает его производительность и улучшает санитарно-гигиенические условия труда.

### 27.3. Физическая природа кристаллизации металлов

*Кристаллизацией* (первичной) называют процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое. Движущей силой процесса является стремление системы (сплава) к более термодинамически устойчивому состоянию, характерному пониженной свободной энергией (энергией Гиббса  $G$ ) (рис. 27.1). Здесь  $T$  — равновесная температура кристаллизации, когда термодинамические потенциалы расплава и твердого металла равны:  $G_{\text{ж}} = G_{\text{тв}}$ ;  $T_{\text{ф}}$  — фактическая температура кристаллизации;  $\Delta T = T_s - T_{\text{ф}}$  — степень переохлаждения.

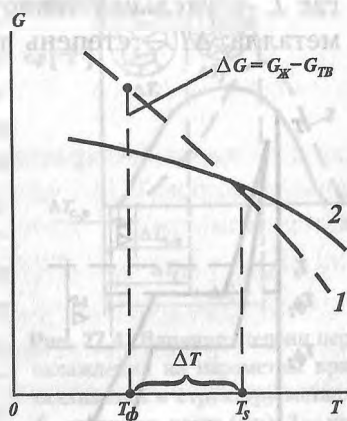


Рис. 27.1. Температурная зависимость свободной энергии ( $G$ ) металла в жидком (1) и твердом (2) состояниях



Кристаллизация чистого металла происходит при постоянной температуре, причем чем выше скорость охлаждения ( $v_2 > v_1$ ), тем больше степень переохлаждения ( $\Delta T_2 > \Delta T_1$ ) (рис. 27.2). При кристаллизации происходит образование зародышей, вырастающих затем в кристаллиты (зерна).

Минимальный размер зародыша, обеспечивающий его устойчивость, рост и осуществление процесса кристаллизации, называют *критическим* (рис. 27.3). В процессе образования зародыша размером  $r_{кр}$  происходят увеличение межфазной поверхностной энергии ( $\Delta G_s$ ) и уменьшение объемной свободной энергии ( $\Delta G_v$ ) расплава за счет появления поверхностей раздела. Общее изменение свободной энергии металла ( $\Delta G_{общ}$ ) в результате формирования твердой частицы сферической формы радиуса  $r$  равно

$$\Delta G_{общ} = \Delta G_v + \Delta G_s = -L\rho(\Delta T/T_{пл}) \cdot (4/3) \pi r^3 + 4\pi r^2 \gamma_{т-ж}, \quad (27.1)$$

где  $L$  — удельная теплота кристаллизации;  $\rho$  — плотность металла;  $\Delta T$  — степень переохлаждения;  $T_{пл}$  — температура

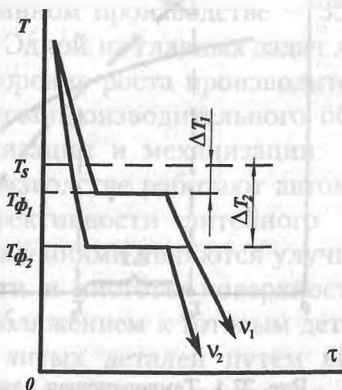


Рис. 27.2. Влияние скорости охлаждения на характер термических кривых ( $v_1 > v_2$ )

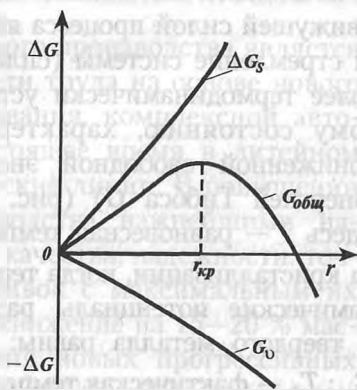


Рис. 27.3. Зависимость изменения свободной энергии расплава от размера зародышей

плавления металла;  $\gamma_{\text{т-ж}}$  — удельная поверхностная (межфазная) свободная энергия на границе твердой и жидкой фаз. Зародыш может сохраняться лишь при условии уменьшения  $\Delta G_{\text{общ}}$  (при фиксированном переохлаждении  $\Delta T$ ). Однако при малых размерах частицы это условие не реализуется, поскольку отношение площади поверхности частицы к объему слишком велико. Зародыши же с размерами, равными критическому и большими критического ( $r_{\text{кр}}$ ), растут с уменьшением энергии и поэтому способны к существованию. Критический размер зародыша определяется из условия

$$d(G_{\text{общ}})/dr = 0; \quad (27.2)$$

$$r_{\text{кр}} = \gamma_{\text{т-ж}} T_{\text{пл}} / (L_p \Delta T). \quad (27.3)$$

Из уравнения (27.3) видно, что с уменьшением межфазного натяжения ( $\gamma_{\text{т-ж}}$ ) и увеличением степени переохлаждения критический размер зародыша уменьшается.

Рост кристаллов характеризуется скоростью роста линейных размеров кристалла; размерность — м/с. Интервалы метастабильности ( $\Delta T$ ) для процессов зарождения и роста кристаллов неодинаковы:  $\Delta T_{\text{с.р}}$  меньше  $\Delta T_{\text{ч.ц}}$ . На рис. 27.4 приведены зависимости скорости роста (с.р) кристаллов и числа центров кристаллизации от степени переохлаждения металла.

В зависимости от степени переохлаждения отношение между ними изменяется; это приводит к тому, что с увеличением  $\Delta T$  изменяется зерно металла.

Передача теплоты литейной форме при затвердевании сплавов осуществляется через расплав, слой затвердевшего

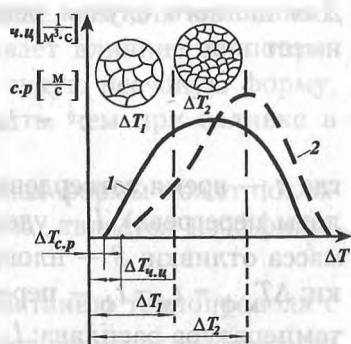


Рис. 27.4. Влияние степени переохлаждения на параметры кристаллизации и структуру металла: 1 — скорость роста (с.р); 2 — число центров (ч.ц)

металла, форму и поверхность раздела «металл–форма». При этом интенсивность процесса теплообмена определяется критерием Био:

$$Bi = \alpha/(\lambda/l), \quad (27.4)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от поверхности тела к окружающей среде;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $l$  — толщина тела;  $\lambda/l$  — термическая проводимость данного тела.

В процессе затвердевания отливка охлаждается, а форма нагревается. Литейные формы существенно различаются также по теплофизическим свойствам, поэтому процессы затвердевания отливок в различных формах, будучи подобными, в то же время характеризуются различными значениями критерия  $Bi$  (от 0 до  $\infty$ ). Например, при литье в песчаные формы значения критерия Био для отливки и песчаной формы находятся в следующих пределах:  $Bi_{отл} \ll 1$ ;  $Bi_{\phi} \gg 1$ . Для данного случая решение уравнения теплопроводности имеет вид

$$\tau^{\frac{1}{2}} = Lm/(1,13b_{\phi}\Delta T_{м-ф}S), \quad (27.5)$$

где  $\tau$  — время затвердевания (без учета времени отвода теплоты перегрева);  $L$  — удельная теплота кристаллизации;  $m$  — масса отливки;  $S$  — площадь суммарной поверхности отливки;  $\Delta T_{м-ф} = t_m - t_{\phi}$  — перепад температур металл–форма ( $t_m$  — температура расплава;  $t_{\phi}$  — начальная температура формы);  $b_{\phi} = (\lambda_{\phi} C_{\phi} \rho_{\phi})^{0,5}$  — коэффициент аккумуляции теплоты (мера скорости поглощения теплоты материалом формы);  $C_{\phi}$  — теплоемкость формы.

Из уравнения (27.5) видно, что время затвердевания отливки в песчаной форме в основном определяется перепадом температур  $\Delta T_{м-ф}$  и теплоаккумулирующей способности  $b_{\phi}$ .

## 27.4. Литейные свойства

Основными литейными свойствами являются жидкотекучесть, усадка, склонность к трещинообразованию, склонность к газопоглощению и ликвация.

Жидкотекучесть характеризует способность сплава течь по литейной форме, заполнять все ее полости и давать четкие очертания отливки. Для сравнительной оценки жидкотекучести сплавов используют различные пробы. Наиболее распространенной является спиральная проба: металл заливают в песчаную форму, выполненную в виде спирального канала сечением 0,56 см. Величину жидкотекучести определяют по длине отлитой спирали в миллиметрах.

Жидкотекучесть зависит от состава сплава, температуры его заливки и свойств формы. Хорошую жидкотекучесть имеют серые чугуны, оловянистые бронзы, силумины. Так как с повышением температуры сплава его жидкотекучесть увеличивается, то для тонкостенного литья температура сплава при заливке должна быть выше, чем для массивных отливок. На жидкотекучесть оказывает влияние теплопроводность формы. Сплав, залитый в сухую песчаную форму, будет иметь большую жидкотекучесть, чем при заливке в сырую форму.

Мерой скорости, с которой материал формы может поглощать теплоту расплавленного металла, является коэффициент аккумуляции теплоты  $b_{\text{ф}}$ .

Увеличение  $b_{\text{ф}}$  приводит к возрастанию теплопровода с поверхности расплава, что сокращает время затвердевания металла и тем самым снижает жидкотекучесть. Так, для чугунной формы  $b_{\text{ф}}$  на порядок выше, чем для сырой песчаной, — 14 000 и 1150 Вт · с<sup>1/2</sup>/(м<sup>2</sup> · К) соответственно. Жидкотекучесть ( $l_{\text{ж}}$ ) можно оценить по теплофизическим свойствам металла и условиям литья:

$$l_{\text{ж}} = A\rho[c(t_{\text{ж}} - t_0) + L_{\text{кр}}]/t_{\text{м}} - t_{\text{ф}}, \quad (27.6)$$

где  $l_{\text{ж}}$  — длина спирали (контрольной части литой пробы), характеризующая жидкотекучесть;  $\rho$  — плотность сплава;  $c$  — теплоемкость сплава;  $L_{\text{кр}}$  — удельная теплота кристаллизации (до момента нулевой жидкотекучести);  $t_{\text{ж}}$  — температура перегрева металла (над температурой ликвидуса);  $t_0$  — температура нулевой жидкотекучести;  $t_{\text{м}}$  и  $t_{\text{ф}}$  — температура металла и формы соответственно;  $A$  — коэффициент, зависящий от условий литья. Из выражения (27.6) видно, что с повышением температуры литейной формы  $t_{\text{ф}}$  жидкотекучесть возрастает. Поэтому для повышения жидкотекучести расплава керамические и металлические литейные формы часто подогревают.

Характер течения расплава (ламинарный или турбулентный) должен оказывать влияние на жидкотекучесть. Характер течения жидкостей в канале диаметром  $D$  оценивается значением числа Рейнольдса (Re):

$$\text{Re} = vD/\eta,$$

где  $v$  — скорость потока, м/с;  $\eta$  — кинематическая вязкость металла, м<sup>2</sup>/с. При  $\text{Re} > \text{Re}_{\text{кр}}$  течение жидкости становится неустойчивым, в потоке возникают завихрения, приводящие к увеличению гидравлического сопротивления течению и, как следствие, снижению жидкотекучести. Расчеты показывают, что турбулентное течение чугуна наступает при скорости, в 1,5 раза большей, чем у стали.

Высокое качество поверхности отливки при литье под давлением, точность ее геометрических параметров и четкость оформления рельефа обеспечиваются гидродинамическим давлением ( $P_{\text{ф}}$ ) расплава на стенку формы, возникающим в момент окончания движения расплава:

$$P_{\text{ф}} = \rho_{\text{м}} v_{\text{ф}}^2, \quad (27.7)$$

где  $\rho_{\text{м}}$  — плотность расплава;  $v_{\text{ф}}$  — скорость потока в форме.

Жидкотекучесть существенно зависит от склонности металла к окислению, сплошности и прочности оксидной пленки. При заливке формы оксидные пленки оказывают сопротивление течению расплава и замедляют заполнение им формы. В случае плавки и заливки металла в вакууме или защитной среде жидкотекучесть непрерывно возрастает с повышением температуры перегрева ( $t_{\text{п}}$ ) расплава (рис. 27.5, кривая 1). При заливке на воздухе (рис. 27.5, кривая 2) температурная зависимость жидкотекучести имеет максимум ( $t_{\text{опт}}$ ), соответствующий температуре, превышение которой вызывает активное окисление расплава с образованием оксидных пленок. В целях повышения жидкотекучести увеличивают температуру заливки металла или подогревают литейную форму.

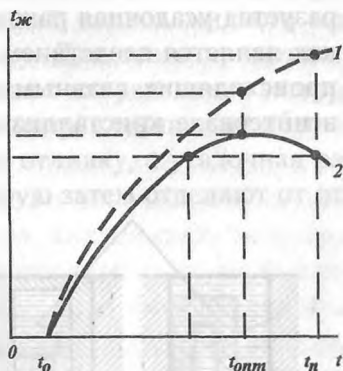


Рис. 27.5. Влияние среды температуры расплава на его жидкотекучесть: 1 — вакуум, 2 — воздух

Усадка — это свойство сплава уменьшаться в объеме при затвердевании и охлаждении. Характеризуется изменением объемных и линейных размеров отливки, в соответствии с чем различают усадку линейную и объемную. Ее величину выражают обычно в процентах. С явлением усадки связаны основные технологические трудности производства фасонных отливок из-за образования в них усадочных раковин, пористости и трещин.

Усадочная раковина в отливках образуется в результате уменьшения объема жидкого металла при кристаллизации. На рис. 27.6, а показан процесс последовательного затвердевания отливки в разные моменты времени. У стенок формы начинает образовываться корка затвердевшего металла, которая постепенно нарастает. При затвердевании объем металла уменьшается, а питания отливки жидким металлом не происходит, т. е. не поступает дополнительной порции металла, ко-

Усадочная раковина в отливках образуется в результате уменьшения объема жидкого металла при кристаллизации. На рис. 27.6, а показан процесс последовательного затвердевания отливки в разные моменты времени. У стенок формы начинает образовываться корка затвердевшего металла, которая постепенно нарастает. При затвердевании объем металла уменьшается, а питания отливки жидким металлом не происходит, т. е. не поступает дополнительной порции металла, ко-

торая компенсировала бы усадку. В результате в отливке образуется усадочная раковина. Усадочная пористость в отливках является следствием рассмотренных усадочных явлений, происходящих главным образом при затвердевании сплавов в интервале кристаллизации.

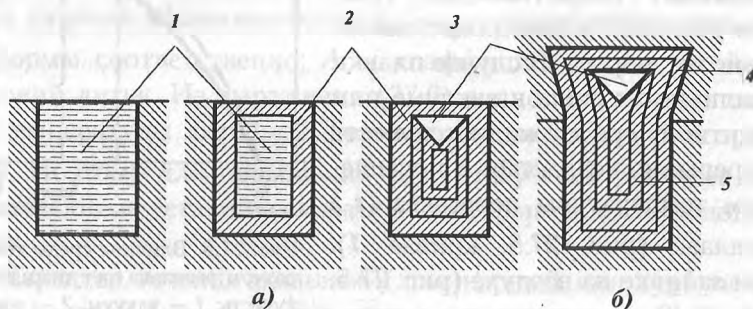


Рис. 27.6. Образование усадочной рыхлости в отливке (а) и прибыли (б):  
 1 — жидкий металл; 2 — твердый металл; 3 — усадочная раковина;  
 4 — прибыль; 5 — отливка

Различают линейную  $\epsilon_{\text{лин}}$  и объемную  $\epsilon_v$  усадки (в %):

$$\epsilon_{\text{лин}} = ((l_{\text{ф}} - l_{\text{отл}})/l_{\text{отл}}) \cdot 100 \%, \quad (27.7)$$

$$\epsilon_v = ((V_{\text{ф}} - V_{\text{отл}})/V_{\text{отл}}) \cdot 100 \%, \quad (27.8)$$

где  $l_{\text{ф}}$ ,  $l_{\text{отл}}$ ,  $V_{\text{ф}}$  и  $V_{\text{отл}}$  — размеры и объемы формы и отливки соответственно.

Усадка сплава начинается с момента образования прочного кристаллического скелета в объеме отливки (в случае присутствия жидкой фазы) и твердого каркаса на ее поверхности. Полная объемная усадка  $\epsilon_{\text{вполн}}$  складывается из усадок сплава в жидком состоянии  $\epsilon_{\text{уж}}$ , при затвердевании  $\epsilon_{\text{вз}}$  и в твердом состоянии  $\epsilon_{\text{ув}}$ ;  $\epsilon_v \approx 3\epsilon_{\text{лин}}$ . Возникновение наружной усадки, усадочных раковин и пористости (скопление мелких пустот, заполненных газами) в отливке является результатом и проявлением объемной усадки металла.

Главное условие предупреждения в отливках усадочных раковин и пористости — непрерывный подвод жидкого металла к кристаллизующемуся сплаву. Для этого применяют прибыли (см. рис. 27.6) и обеспечивают направленное затвердевание отливки — снизу вверх в направлении к прибыли. Жидкий металл из прибыли питает отливку, а усадочная раковина образуется в прибыли, которую затем отделяют от отливки.

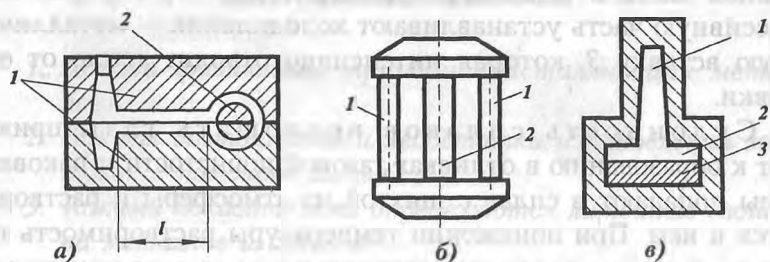


Рис. 27.7. Затрудненная усадка в отливках: механическое торможение (а); термическое торможение (б, в)

Свободному уменьшению размеров отливки оказывают сопротивление части формы и стержни (механическое торможение усадки). Так, свободной усадке ребра на длине 1 (рис. 27.7, а) мешают части формы 1, а усадке кольца — стержень 2. Торможение усадки может происходить и в результате неравномерного распределения температуры в различных частях отливки. Например, тонкие ребра 1 решетки (рис. 27.7, б) затвердевают быстрее, чем массивное ребро 2, и препятствуют его усадке (термическое торможение).

Из-за затрудненной усадки — механического, термического или совместного торможения — в отливке возникают внутренние напряжения. Эти напряжения могут быть значительными и вызывать искривление (коробление) отливки. Если величина напряжений превысит предел прочности сплава при данной температуре, то в отливке возникнут трещины. Так, вследствие затрудненной усадки в массивном



ребре 2 решетки (рис. 27.7, б) появятся растягивающие напряжения, а в тонких ребрах 1 — сжимающие. В результате стержни 1 могут искривиться, а в стержне 2 возможно появление трещины.

Для предупреждения трещин следует применять форму и стержни, обладающие хорошей податливостью, и обеспечивать равномерное охлаждение отливки в форме. Например, для обеспечения одновременного затвердевания массивной части и тонкого ребра 1 (рис. 27.7, в) в форме под массивную часть устанавливают холодильник — металлическую вставку 3, которая интенсивно отводит тепло от отливки.

Склонность сплавов поглощать газы приводит к образованию в отливках газовой пористости и раковин. Газы попадают в сплав с шихтой из атмосферы и растворяются в нем. При понижении температуры растворимость газов в жидком металле уменьшается и они выделяются из металла. Образующиеся в расплаве газовые пузырьки стремятся всплыть на поверхность. Однако понижение температуры приводит к увеличению вязкости сплава, что затрудняет всплывание пузырьков. Газовые пузырьки, оставшиеся в сплаве, образуют газовую пористость.

При местном скоплении газовых пузырей образуются газовые раковины. Для сплавов, склонных к газопоглощению, применяют ряд технологических мер при их приготовлении и заливке (тщательная подготовка шихты, применение флюсов, вакуума, рафинирования и т. д.). Литейные формы и стержни должны иметь минимальную газотворную способность и хорошую газопроницаемость.

Ликвацией называют неоднородность химического состава сплава в различных частях отливки. Ликвацию разделяют на дендритную и зональную. Дендритная ликвация характеризуется химической неоднородностью внутри зерна (дендрита), а при зональной ликвации неоднородность обнаруживается в отдельных частях объема отливки. Наиболее опасной для большинства сплавов является зональная ликвация, так как она не устраняется термической обработкой.

При производстве отливок ликвация определяется двумя факторами: химическим составом сплава и условиями кристаллизации. Зональная ликвация усиливается при увеличении объема отливки и медленном затвердевании. Ликвация снижает прочностные свойства и общую работоспособность детали.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова физическая природа кристаллизации металлов?
2. Каковы достоинства и недостатки изготовления заготовок с помощью литья?
3. Какими показателями определяются литейные свойства металлов и сплавов?
4. От каких факторов зависит жидкотекучесть металла?
5. Какие последствия вызывает усадка металла при литье?
6. Какие явления могут приводить к пористости и химической неоднородности в отливках?

## Глава 28

### ЛИТЬЕ В ПЕСЧАНЫЕ ФОРМЫ

#### 28.1. Литейная технологическая оснастка

Для изготовления отливок применяют большое число различных приспособлений, которые называют *литейной оснасткой*.

В комплект литейной технологической оснастки для изготовления форм из формовочных смесей входят модели, модельные плиты, стержневые ящики и др.

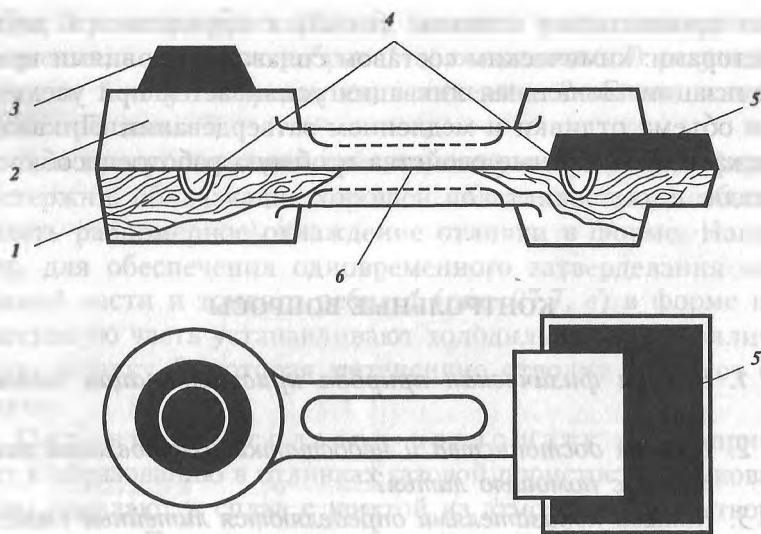


Рис. 28.1. Модель: 1 — нижняя половина; 2 — верхняя половина; 3, 5 — знаки; 4 — шипы; 6 — плоскость разъема

Модели (рис. 28.1) — приспособления, при помощи которых в формовочной смеси получают отпечатки полости, соответствующие наружной конфигурации отливок.

Отверстия и полости внутри отливок, а также иные сложные контуры получают при помощи стержней, устанавливаемых в формы.

Размеры модели делают больше, чем соответствующие размеры отливки, на величину линейной усадки сплава, которая для углеродистой стали составляет 1,8–2 %, а для чугуна — 0,8–1,2 %. Если отливки подвергают механической обработке, то в соответствующих размерах модели учитывают размер припусков — слоя металла, удаляемого при механической обработке. Припуск зависит от размера отливки, вида сплава. Так, для мелкого чугунного литья он составляет 0,7–5 мм на сторону. Модели делают из древесины, металлических сплавов и пластмасс.

Деревянные модели изготавливают из плотной, хорошо просушенной древесины. Для предотвращения коробления

модель делают не из целого куска древесины, а склеивают из отдельных частей (брусочков), с тем чтобы направление волокон было разным.

Преимущества деревянных моделей — дешевизна, простота изготовления, при больших размерах — небольшая масса; основной недостаток — недолговечность.

Металлические модели по сравнению с деревянными имеют значительно большую долговечность, высокую точность и чистую рабочую поверхность. Такие модели чаще всего делают из алюминиевых сплавов.

Для получения в форме отпечатков знаковых частей стержней, которыми стержень крепится в форме, модель имеет знаки — выступающие части; чтобы при извлечении модели форма не разрушалась, вертикальные стенки модели делают с уклонами.

Сопряжение стенок в отливках должно быть плавным, без острых углов. Это также учитывается в моделях. Скругление внутренних углов называется *галтелью*, наружных — *закруглением*.

Модели из пластмасс устойчивы к действию влаги при эксплуатации и хранении, не подвергаются короблению, имеют небольшую массу. Перспективным является применение моделей из вспененного полистирола, газифицирующегося при заливке металла в форму. Применение таких не удаляемых из формы моделей упрощает формовку, способствует улучшению качества литья.

Для машинной формовки широко применяют модельные комплекты: металлические модельные плиты и быстросменную модельную оснастку (рис. 28.2 и 28.3).

Металлические модельные плиты с одной или несколькими моделями используют в массовом производстве. Такие плиты могут быть односторонними — для раздельной формовки верхней и нижней полуформ, а также двусторонними, когда части моделей размещены на обеих сторонах плиты. Машинная формовка с применением металлических плит обеспечивает высокое качество отливок.

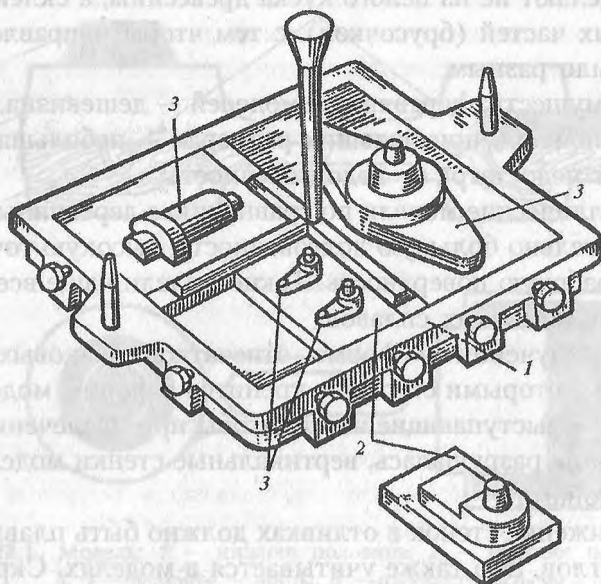


Рис. 28.2. Секционная модельная плита: 1 — модельная плита; 2 — быстросъемные вкладыши; 3 — модели

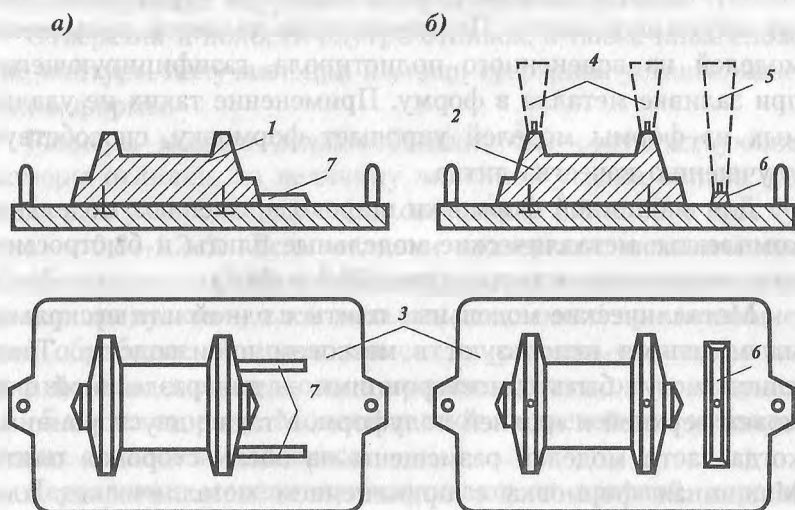


Рис. 28.3. Односторонние модельные плиты: а — нижняя; б — верхняя

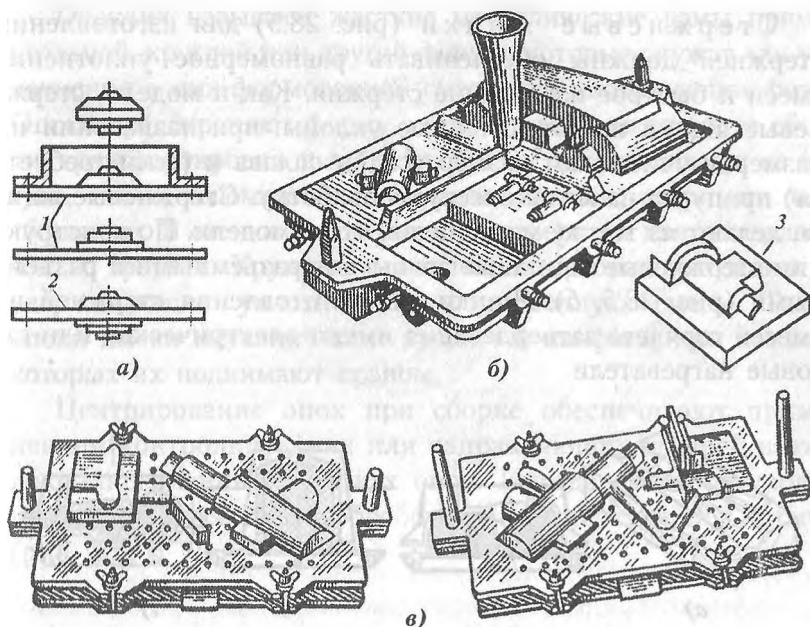


Рис. 28.4. Модельные комплекты: а — модельная плита односторонняя (1) и двусторонняя (2); б — подмодельная плита со сменными вкладышами (3); в — координатная плита

Координатные подмодельные плиты (рис. 28.4) применяют, когда по условиям производства необходима частая смена моделей. Металлическая плита имеет большое число отверстий. Они обозначены по горизонталям буквами, по вертикалям — цифрами, и таким образом каждое отверстие имеет свой шифр, например: А5, Б8 и т. д. Модель быстро и точно устанавливают на плите по направляющим штифтам и затем укрепляют на плите при помощи болтов.

Подмодельные плиты со сменными вкладышами (рис. 28.4, б) состоят из металлической рамки и сменных металлических или деревянных вкладышей (иногда координатных) с прикрепленными к ним моделями. Конструкция плит предусматривает быструю смену и надежное крепление вкладышей.

Стержневые ящики (рис. 28.5) для изготовления стержней должны обеспечивать равномерное уплотнение смеси и быстрое извлечение стержня. Как и модели, стержневые ящики имеют литейные уклоны, при назначении их размеров учитывают размер усадки сплава и (если требуется) припуска на механическую обработку. Стержневые ящики делают из тех же материалов, что и модели. По конструкции стержневые ящики могут быть неразъемными и разъемными (рис. 28.5, б). Ящики для изготовления стержней из смесей горячего затвердевания имеют электрические или газовые нагреватели.

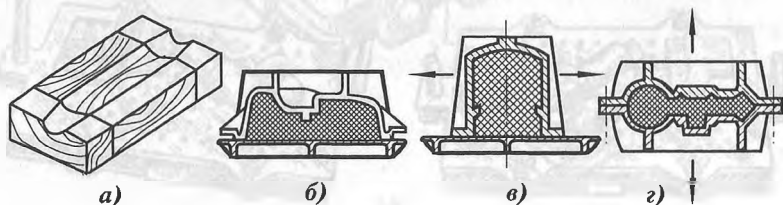


Рис. 28.5. Стержневые ящики: а — деревянный (половина); металлические: б — неразъемный; в — с вертикальным разъемом; г — с горизонтальным разъемом

Для изготовления форм кроме модельных комплектов используют опочную оснастку: опоки, контрольные и центрирующие штыри, наполнительные рамки и другие приспособления (рис. 28.6).

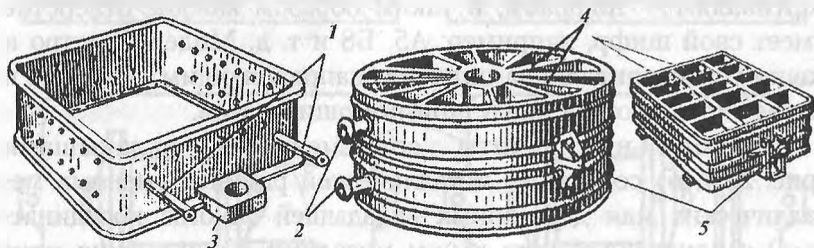


Рис. 28.6. Опоки: 1 — ручка; 2 — цапфа; 3 — центрирующее отверстие; 4 — внутренние ребра; 5 — скрепление опок

*Опоками* называют жесткие металлические рамы прямоугольной, круглой или другой формы, которые служат для уплотнения в них формовочной смеси при изготовлении форм. Опоки предохраняют форму от разрушения во время ее сборки, транспортировки и заливки. Опоки изготавливают из чугуна, стали, алюминиевых сплавов литыми, сварными или сборными. В стенках опок имеются отверстия для выхода газов из формы. Крупные опоки имеют ребра-крестовины 3, удерживающие уплотненную формовочную смесь. Такие опоки имеют металлические ручки 1 и цапфы 2, при помощи которых их поднимают краном.

Центрирование опок при сборке обеспечивают применением контролирующих или направляющих штырей и втулок, закрепленных в ушках опок. Иногда вместо втулок в ушках имеются точно обработанные отверстия под штыри (рис. 28.7).

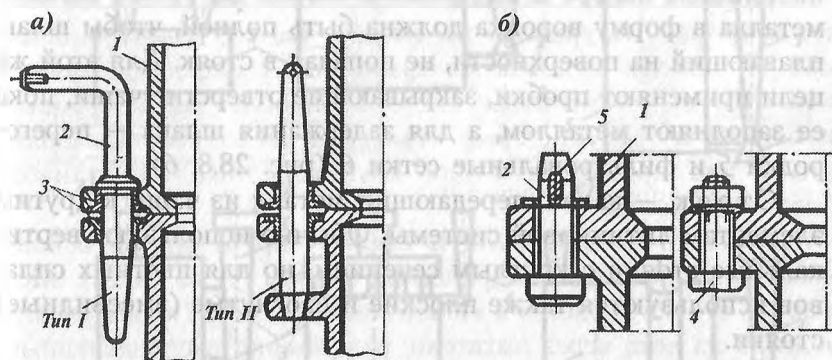


Рис. 28.7. Спаривание (а) и скрепление (б) опок: 1 — опока; 2 — штырь; 3 — втулка; 4 — болт; 5 — клин

**Литниковые системы.** Модели литниковой системы служат для образования в форме совокупности каналов, по которым металл из ковша поступает в полость литейной формы. Основными элементами литниковой системы (рис. 28.8, а) являются литниковая чаша (или воронка) 1, стояк 2, шлакоуловитель 3 и питатели 4.



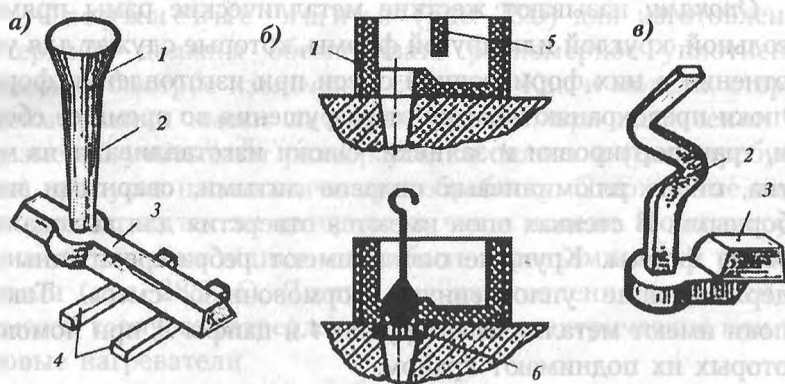


Рис. 28.8. Элементы литниковой системы

Литниковая воронка (для мелких отливок) или чаша (для средних и крупных отливок) служат для приема металла из заливочного ковша, подачи металла в форму при постоянном напоре и задержания шлака. Во время заливки металла в форму воронка должна быть полной, чтобы шлак, плавающий на поверхности, не попадал в стояк. Для этой же цели применяют пробки, закрывающие отверстие чаши, пока ее заполняют металлом, а для задержания шлака — перегородки 5 и фильтровальные сетки 6 (рис. 28, б).

Стояк — канал, передающий металл из чаши к другим элементам литниковой системы. Обычно используют вертикальные стояки с круглым сечением, но для цветных сплавов используются также плоские и изогнутые (змеевидные) стояки.

Шлакоуловитель — горизонтальный канал, имеющий обычно сечение в виде трапеции. Служит для задержания шлака и передачи металла к питателям. Такой канал для стального литья обычно называют *литниковым ходом*, для чугунного — *шлакоуловителем*, для цветного литья — *коллектором*. Шлакоуловитель располагают чаще всего в верхней полужорме.

Питатели (литники) — каналы, предназначенные для передачи металла непосредственно в полость формы. Пита-

тель в форме может быть один, а может быть и несколько питателей. Их выполняют обычно в нижней полужоформе.

Для изготовления отливок применяются сужающиеся литниковые системы  $F_{ст} > F_{шл} > F_{пит}$ , где  $F_{ст}$ ,  $F_{шл}$  и  $F_{пит}$  — площади сечения соответственно стояка, шлакоуловителя и питателя (питателей).

Сужающиеся литниковые системы лучше улавливают шлак и увеличивают литейную скорость прохождения металла через каналы литниковой системы. Их применяют при литье сплавов, мало склонных к окислению (чугуны, стали).

Подвести металл в форму можно по-разному, в зависимости от конструкции отливки, ее высоты, заливаемого сплава. На рис. 28.9 представлены различные типы литниковых систем. Верхняя литниковая система (рис. 28.9, а) проста по

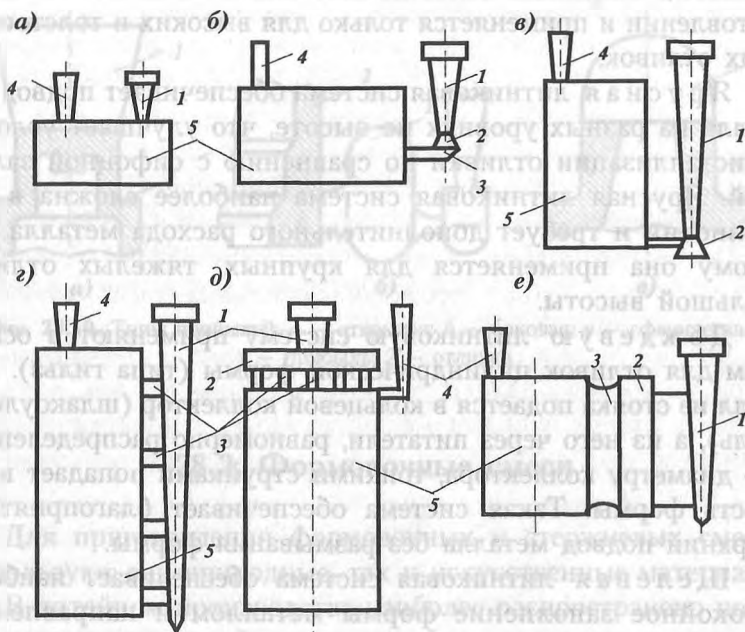


Рис. 28.9. Типы литниковых систем: а — верхняя; б — боковая; в — сифонная; г — ярусная; д — дождевая; е — щелевая; 1 — стояк; 2 — шлакоуловитель; 3 — питатель; 4 — выпор; 5 — отливка

конструкции, обеспечивает принцип направленного затвердевания (горячий металл подается сверху), но при заливке струя металла, падая, размывает форму. Поэтому заливку сверху применяют для низких отливок небольшой массы и простой конфигурации.

**Боковая литниковая система** имеет наибольшее применение; ее удобно выполнять в форме — шлакоуловитель и питатель расположены по плоскости разъема, уменьшается высота падения металла, однако направленное затвердевание не обеспечивается.

**Сифонная заливка** металла создает спокойное заполнение формы без опасности ее разрушения, но внизу возникает местный перегрев (горячий металл поступает снизу), что способствует образованию дефектов (усадочных раковин, трещин). Сифонная литниковая система более сложна в изготовлении и применяется только для высоких и толстостенных отливок.

**Ярусная литниковая система** обеспечивает подвод металла на разных уровнях по высоте, что улучшает условия кристаллизации отливки по сравнению с сифонной заливкой. Ярусная литниковая система наиболее сложна в выполнении и требует дополнительного расхода металла, поэтому она применяется для крупных, тяжелых отливок большой высоты.

**Дождевую литниковую систему** применяют в основном для отливок цилиндрической формы (типа гильз). Металл из стояка подается в кольцевой коллектор (шлакоуловитель), а из него через питатели, равномерно распределенные по диаметру коллектора, тонкими струйками попадает в полость формы. Такая система обеспечивает благоприятный верхний подвод металла без размывания формы.

**Щелевая литниковая система** обеспечивает наиболее спокойное заполнение формы металлом и направленное затвердевание отливки; применяется для алюминиевых и магниевых сплавов.

**Прибыли и выпоры.** Модель прибыли образует в форме дополнительные емкости для жидкого металла, кото-

рым питается отливка при затвердевании. По конструкции прибыли, необходимые для устранения возможности образования усадочных раковин, бывают верхние открытые, боковые и сферические закрытые (рис. 28.10). Модели открытых прибылей делают съемными, их устанавливают перед формовкой на модель отливки; модели закрытых прибылей жестко монтируют на модельной плите, как и модель отливки. Открытые прибыли применяют для крупных ответственных отливок. Открытые прибыли можно доливать сверху горячим металлом. Модели выпоров образуют в форме каналы, которые соединяют полость формы с атмосферой и по которым вытесняются воздух и газы из полости формы. Выпоры при формовке обычно устанавливают на самых высоких частях модели или в местах предполагаемого скопления газов.

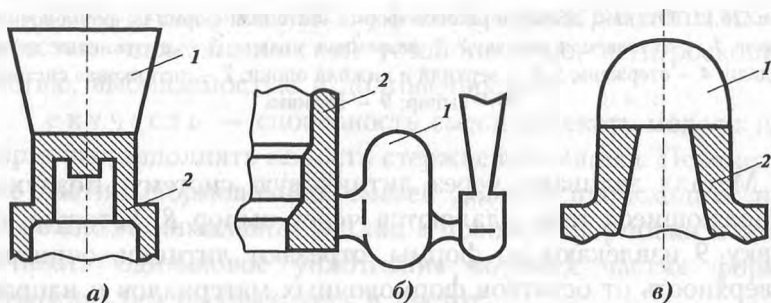


Рис. 28.10. Типы прибылей: а — открытая; б — боковая; в — сферическая; 1 — прибыль; 2 — отливка

## 28.2. Формовочные смеси

Для приготовления формовочных и стержневых смесей используют как природные, так и искусственные материалы.

В литейном производстве наиболее распространено получение литых деталей в разовых формах, изготовленных из песчано-глинистых и других смесей.

Разовая форма пригодна для получения только одной отливки. При выемке (выбивке) готовой детали форму раз-

рушают. На рис. 28.11 приведена литейная форма для получения втулки. Форма состоит из двух полуформ, полученных набивкой (уплотнением) формовочной смеси в металлические рамки — опоки. Для изготовления верхней и нижней полуформ используют разъемную модель 2. Отверстие в отливке получают с помощью стержня 4, отдельно изготовленного из стержневой смеси. При сборке формы стержень устанавливают в углубления (гнезда), образованные в форме знаками модели 3.

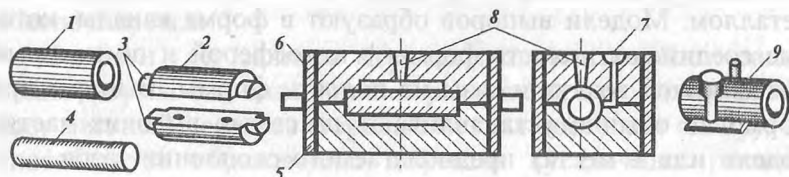


Рис. 28.11. Отливка детали в разовой форме. Литейная форма из формовочной смеси: 1 — отливаемая деталь; 2 — разъемная модель; 3 — стержневые знаки модели; 4 — стержень; 5, 6 — верхняя и нижняя опоки; 7 — литниковая система; 8 — выпор; 9 — отливка

Металл заливают через литниковую систему. Воздух и выделяющиеся газы удаляются через выпор 8. Готовую отливку 9 извлекают из формы, отрезают литники, очищают поверхность от остатков формовочных материалов и направляют на механическую обработку.

Для получения отливок высокого качества формовочные смеси, из которых делают разовые литейные формы, должны обладать определенными механическими, технологическими и физическими свойствами. Ниже перечислены основные из этих свойств.

**Прочность** — способность смеси обеспечивать сохранность формы (стержня) без разрушения при ее изготовлении и использовании. Формы (стержни) не должны разрушаться от толчков при сборке и транспортировке и должны выдерживать давление заливаемого металла. Стандартными характеристиками являются: для сырых смесей — предел прочности при сжатии, для сухих форм (после сушки) — предел

прочности при растяжении. Для песчано-глинистых смесей  $\sigma_{сж} = 30-70$  кПа;  $\sigma_p = 80-100$  кПа.

Поверхностная прочность (осыпаемость) — сопротивление истирающему действию струи металла при его заливке. При недостаточной поверхностной прочности наблюдают осыпаемость, то есть отделение частиц формовочной смеси, попадающих в отливку.

Пластичность — способность смеси воспринимать очертания модели (стержневого ящика) и сохранять полученную форму.

Податливость — способность смеси сокращаться в объеме под действием усадки сплава. При недостаточной податливости в отливке возникают большие напряжения, которые могут привести к образованию трещин.

Технологические свойства смесей характеризуются их текучестью, термохимической устойчивостью, негигроскопичностью, выбиваемостью и долговечностью.

Текучесть — способность смеси обтекать модели при формовке, заполнять полость стержневого ящика. Перемещение частиц формовочных смесей должно происходить при возможно минимальном усилии в процессе формовки и обеспечивать одинаковое уплотнение во всех частях формы (стержня) без рыхлых мест и пустот.

Термохимическая устойчивость (непригораемость) — способность смеси выдерживать высокую температуру заливаемого сплава без оплавления или химического взаимодействия с ним.

Гигроскопичность — способность смеси после сушки поглощать влагу из воздуха в течение длительного времени.

Выбиваемость — способность смеси легко удаляться из форм и полостей отливок при их выбивке после охлаждения. Хорошую выбиваемость имеют смеси, в которых связующие вещества теряют прочность при нагреве после заливки сплава.

Долговечность — способность смеси сохранять свои свойства при многократном использовании.

Технологические свойства не могут быть выражены количественно, их оценивают по экспериментальным данным.

**Газопроницаемость** — способность пропускать газы через стенки формы вследствие пористости — одно из важнейших свойств формовочных смесей. В расплавленном металле всегда содержатся растворенные газы, выделяющиеся при его охлаждении и затвердевании. Большое количество водяных паров и газов выделяется также из самих формовочных материалов при их нагревании. При недостаточной газопроницаемости в теле отливки могут образовываться газовые пузыри — раковины.

**Теплофизические свойства** — теплопроводность, удельная теплоемкость — существенно влияют на скорость кристаллизации металла и его последующего охлаждения и тем самым на структуру и свойства отливок.

**Песок** — основной исходный материал для всех формовочных и стержневых смесей. Наиболее часто применяют кварцевый песок, в основном состоящий из кремнезема  $\text{SiO}_2$ , обладающего высокой огнеупорностью ( $t_{\text{пл}} = 1713^\circ\text{C}$ ), прочностью, твердостью, термохимической устойчивостью. Недостатком кварца является то, что при нагреве до  $575^\circ\text{C}$  в нем происходит аллотропическое превращение, связанное с изменением объема. Это приводит к растрескиванию зерен песка и обогащению формовочной смеси пылевидными частицами. Смесью для повторного использования необходимо обогащать добавками свежего песка.

Мелкозернистые пески используют для мелкого литья, что обеспечивает получение гладкой поверхности отливки. Для крупных отливок применяют крупнозернистые пески, обеспечивающие более высокую газопроницаемость формовочных смесей.

**Глина** — второй основной исходный материал в песчано-глинистых формовочных смесях. Она является связующим веществом, обеспечивающим их прочность и пластичность.

Чем больше воды удерживает на поверхности глина, тем выше ее связующая способность, а также пластичность фор-

мовочной смеси. При нагревании (сушке) по мере удаления влаги прочность смеси возрастает.

Песчано-глинистые смеси по характеру использования делят на облицовочные, наполнительные и единые.

Обычно связующие вводят в формовочные и стержневые смеси в небольших количествах (1,5—3 %).

*Облицовочная смесь* — более качественная, с высокой прочностью, газопроницаемостью и другими свойствами. Для ее получения берут большее количество свежих материалов (песка, глины). При формовке такую смесь наносят на модель, создавая в литейной форме поверхностный слой толщиной 40—100 мм, подвергаемый наибольшему воздействию расплава при заливке. Остальной объем формы заполняют *наполнительной смесью*, менее качественной, в основном состоящей из оборотной смеси (смеси, бывшей в употреблении). Оборотные смеси используют для уменьшения расхода свежего песка и глины.

*Единые формовочные смеси* применяют в массовом производстве, при машинной формовке для заполнения всего объема формы. Эти смеси, как и облицовочные, непосредственно соприкасаются с расплавленным металлом и должны обладать высокими свойствами.

По состоянию литейной формы при ее сборке и перед заливкой металлом различают два вида формовки: по-сырому и по-сухому — и в соответствии с этим — отливку в сырые и в сухие формы.

*Сырые формы* применяют для получения мелких и средних отливок, в особенности в серийном и массовом производствах. Эти формы изготавливают из формовочных смесей, содержащих до 10—12 % глины с хорошей связующей способностью во влажном состоянии; влажность смеси — 4—5 %. Преимуществами формовки по-сырому являются хорошая пластичность и податливость смеси, легкая выбиваемость, меньшая стоимость изготовления форм. Главные недостатки — повышенная влажность и невысокая прочность стенок формы, а также большой расход формовочных смесей, который зависит от массы, размеров, сложности отливок, вида литейного сплава и т. д.



Сухие формы применяют для крупных и толстостенных отливок, для получения отливок повышенного качества. Сухими считают формы, подвергаемые тепловой сушке. Их изготавливают из формовочных смесей, содержащих до 15 % глины. После сушки такие формы имеют высокую прочность. При формовке влажность смеси составляет 6—8 %.

В сырые формовочные смеси для чугунного литья с целью уменьшения пригара добавляют каменноугольную пыль. При заливке чугуна частицы угля газифицируются и затем сгорают. Образующиеся восстановительные газы препятствуют окислению сплава, уменьшают опасность пригара. В смесях для стального литья в качестве противопригарной добавки используют пылевидный кварц (маршалит). Для повышения податливости и газопроницаемости сухих форм для чугунных отливок в смеси добавляют древесные опилки; при их сгорании образуются капиллярные каналы и поры. В сухие формовочные смеси для стального литья часто вводят как связующие сульфитно-спиртовую барду и другие вещества — коллоидные растворы органических веществ. Такие добавки повышают не только прочность — в результате их выгорания увеличиваются также газопроницаемость и податливость смесей.

Сушку форм осуществляют в камерных печах (сушилах) при температуре 300—350 °С. Ее продолжительность (ориентировочно 1 ч на 25 мм толщины сечения стенок) нередко составляет 4—6 ч, для крупных форм — до 24 ч и более.

Прогрессивным способом является сушка горячим воздухом, подаваемым в полость формы. Иногда применяют поверхностную сушку на глубину 10—40 мм переносными сушилами или установками с инфракрасными лучами.

### 28.3. Стержневые смеси

При заливке формы стержни в большинстве случаев находятся в тяжелых условиях, испытывая значительное термическое и механическое воздействие расплавленного литейного сплава. Поэтому к стержневым смесям предъявляют более

высокие требования по прочности и другим свойствам, чем к формовочным. В зависимости от конфигурации, толщины сечения, размещения в форме стержни делят на пять классов.

В соответствии с требованиями разработана многочисленная рецептура стержневых смесей. Для стержней I класса наполнителем является свежий песок с минимальным содержанием глинистых веществ. В качестве связующих используют, например, раствор растительных масел и канифоли в уайт-спирите с добавками сульфитно-спиртовой барды или другие аналогичные связующие вещества; для стержней менее ответственного назначения применяют смесь песка и глины (3–5 %) с добавками сульфитно-спиртовой барды, древесного пека и т. п. Стержни IV, V классов можно изготавливать из смесей, содержащих, кроме свежего песка, 20–60 % оборотной смеси, до 10 % глины и добавки древесного пека.

Требуемая прочность и другие свойства стержневых смесей обеспечиваются сушкой в конвейерных печах (сушилах), инфракрасными лучами и т. д. В соответствии с природой связующего температура сушки составляет 160–250 °С (иногда до 300–350 °С). Продолжительность сушки зависит от размеров сечения и других условий и колеблется в широких пределах — от 40–60 мин до нескольких часов. Для изготовления стержней очень широко применяют самотвердеющие специальные смеси.

## 28.4. Специальные формовочные смеси

Использование специальных формовочных смесей для изготовления форм и стержней позволяет наиболее эффективно применять современные средства механизации и автоматизации, исключить ручной труд, существенно повысить производительность труда и улучшить качество отливок.

Как правило, в специальных формовочных смесях основным компонентом является кварцевый песок с минимальным содержанием глинистых веществ. В качестве связующих используют синтетические смолы, жидкое стекло; в смеси вводят катализаторы.

Одним из основных требований к специальным формовочным смесям является отсутствие или минимальное количество токсичных выделений из смол (связующих, катализаторов) в условиях производства.

В настоящее время  $\text{CO}_2$ -процесс на заводах все чаще заменяется ПСС-процессом.

Пластичные самотвердеющие смеси (ПСС). Эти смеси на основе жидкого стекла разработаны на заводе «Станколит». Приготавливают их по двухстадийной технологии. В центральном смесеприготовительном отделении приготавливают базовую смесь, состоящую из 92 % песка; 5 % глины; 3 % молотого угля; 5,5 % жидкого стекла. Влажность смеси — 3,5 %. Такая смесь имеет высокую пластичность.

После изготовления формы из нее можно сразу удалять модель, через 30 мин — окрашивать, а через 4–6 ч — заливать форму металлом. Это важно при машинной формовке в условиях серийного производства.

Смеси горячего отверждения для стержней принципиально не отличаются от используемых смесей для сухих стержней и форм, также упрочняемых при нагреве, продолжительность которого иногда составляет несколько часов. Данные стержневые смеси отверждаются за 1–2 мин при нагреве смеси до 250–280 °С в горячих стержневых ящиках с электрическими или газовыми нагревателями. Такой способ дает возможность эффективно автоматизировать процесс литья, исключив из него сушку стержней в печах. Поэтому эти смеси нашли широкое применение в цехах массового производства. Наполнителем в смесях горячего отверждения является кварцевый песок. В качестве связующих обычно используют карбамидно-фурановые и другие смолы с добавками соответствующих катализаторов, обеспечивающих быстрое отверждение стержня при невысоком нагреве.

Общим недостатком подобных смесей является необходимость в дорогостоящей металлической оснастке — стержневых ящиках с нагревателями. При охлаждении извлеченных из ящиков горячих стержней может происходить их коробление. Следует также отметить, что карбамидно-фурановые

смолы имеют высокую стоимость. Более перспективным в настоящее время считают изготовление стержней из самотвердеющих смесей.

Жидкие самотвердеющие смеси (ЖСС) для изготовления форм и стержней разработаны в нашей стране и нашли очень широкое применение в литейном производстве. В отличие от других формовочных смесей формы и стержни из ЖСС изготавливают не методами уплотнения, а путем заливки. Смесь затвердевает через 30—40 мин.

Жидкие самотвердеющие смеси имеют различный состав, основным наполнителем в смесях является кварцевый песок (95—97 %). В качестве связующих и веществ, обеспечивающих затвердевание смеси на воздухе, обычно используют жидкое стекло, феррохромовый шлак, иногда цемент с добавками соответствующих катализаторов.

Смесь начинает отверждаться сразу же после введения феррохромового шлака; при приготовлении смеси его загружают в смеситель в последнюю очередь. Смесь должна быть залита в формы (стержневые ящики) в течение 1,5—2 мин после приготовления. Извлекают модели (стержни из ящика) через 40 мин.

Цементные жидкоподвижные смеси содержат: кварцевый песок — 92 %; цемент — 8 %. Воду — 10 % и катализатор — 2 % добавляют сверх 100 %. Время затвердевания смеси до извлечения модели — 40—50 мин. Через 3 ч форму окрашивают противопожарной краской, через 4—6 ч заливают металл.

Использование ЖСС исключает формовку, применение формовочных машин, значительно упрощает технологию изготовления форм и стержней, снижает трудоемкость, повышает качество отливок и производительность труда, а также дает возможность организовать поточные механизированные линии в единичном и мелкосерийном производстве, значительно упростить изготовление форм для очень крупных отливок.

Холоднотвердеющие смеси (ХТС) изготавливают из песка с добавками синтетических смол (полимеров),

катализаторов и др. Продолжительность отверждения некоторых смесей до извлечения моделей из формы (стержня из ящика) составляет от 30 с до 1 мин; дальнейшее отверждение происходит в течение нескольких часов.

Одна из особенностей технологии состоит в том, что холоднотвердеющие смеси имеют живучесть 20—30 мин (иногда — до 5 мин). Как правило, их готовят на месте изготовления формы в шнековых смесителях, сначала перемешивая песок с жидкой смолой, а затем добавляют катализатор. Формы и стержни имеют высокую прочность после отверждения, но при заливке силава смола выгорает, прочность смеси резко падает, и они легко выбиваются.

Использование холоднотвердеющих смесей обеспечивает высокую точность и чистоту поверхности отливок, что существенно сокращает их последующую механическую обработку. Эти смеси все шире применяют в литейном производстве для изготовления не только мелких и средних, но и крупных форм и стержней. Вместе с тем некоторые смолы имеют высокую стоимость и являются дефицитными.

В формах для чугунных отливок используют порошкообразную смесь оксида магния, древесного угля и бетонита, порошкообразный графит, а для стальных отливок применяют порошкообразную смесь оксида магния и огнеупорной глины, пылевидный кварц, циркон и другие материалы. Для сухих форм применяют противопопригарные краски, водные суспензии этих материалов с добавками связующих. Краски наносят кистью, пульверизатором, иногда — окунанием. Для исключения повторной сушки окрашивают горячие формы, не успевшие остыть после сушки.

В настоящее время для форм и стержней, в особенности из самотвердеющих специальных смесей, широко применяют самотвердеющие и самовысыхающие краски. В самотвердеющих красках для чугунного литья в качестве противопопригарного наполнителя используют порошкообразный графит или графито-бентонитовую пасту, для стального литья — маршалит, циркон, огнеупорную глину. Плотность красок регули-

руется добавками воды. Продолжительность затвердевания различных самотвердеющих красок составляет 0,5—1,5 ч. Краски наносят тонким слоем, иногда в два-три слоя, через 15—30 мин. При многослойном нанесении краски полуформы и стержни выдерживают на воздухе 2—5 ч для естественной подсушки каждого слоя.

Для предотвращения пригара и улучшения чистоты поверхности отливок формы и стержни покрывают тонким слоем противопригарных материалов. Для сырых форм применяют припылы.

Технология изготовления формовочных смесей включает подготовку свежих песка, глины и других исходных материалов; подготовку оборотных смесей; приготовление смеси.

Пески сушат при 250 °С в кипящем слое или в воздушном потоке, а также в печах барабанного типа или других установках и затем просеивают.

Глину сушат при 200—250 °С в печах барабанного типа, размельчают на дробилках, затем размалывают в шаровых мельницах или бегунах и просеивают. В формовочную смесь глину целесообразно вводить не в порошковом состоянии, а в виде суспензии (35—40 частей глины и 45—60 частей воды), приготовляемой в лопастных смесителях и других устройствах.

Угольный порошок получают размолом угля аналогично получению порошкообразной глины.

Порошкообразный кварц, графит, синтетические смолы, катализаторы и другие исходные материалы поступают в цех в готовом виде.

Оборотную смесь после выбивки из опок разминают на гладких валках, очищают от металлических частиц на магнитном сепараторе и просеивают.

Регенерация формовочных и стержневых смесей, содержащих пленки синтетических смол и других связующих, приобретает все более важное значение, так как позволяет сократить расход свежего песка на 40—60 % (для крупного завода-центрولита экономия составляет примерно 150—200 тыс. т песка в год). Один из применяемых в

производстве способов — процесс гидрогенерации; он включает в себя дробление, магнитную очистку, оттирку (разрушение пленок связующих с применением ультразвукового, вибрационного и других методов), классификацию (разделение песка по крупности) и обезвоживание. Регенерат со степенью оттирки до 80 % по свойствам практически не отличается от свежего песка.

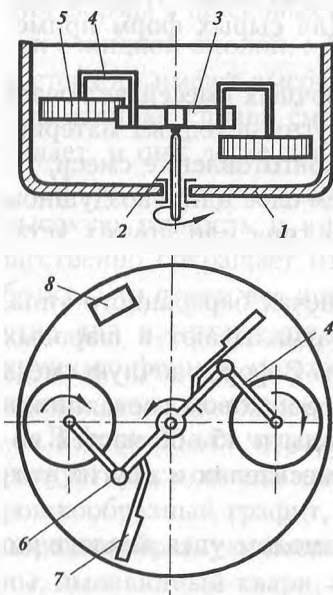


Рис. 28.12. Смешивающие бегуны с горизонтальными катками: 1 — чаша; 2 — вертикальный вал; 3 — траверса; 4 — маятники; 5 — катки; 6 — шарниры; 7 — плужки; 8 — люк для удаления смеси

Приготовление песчано-глинистых формовочных смесей состоит из нескольких операций: перемешивания компонентов смеси, увлажнения, вылеживания и разрыхления. Перемешивание смеси наиболее часто проводят в смесителях-бегунах с вертикальными или горизонтальными катками (рис. 28.12). Песок, глину, воду и другие компоненты загружают с помощью дозаторов; перемешивание смеси происходит под действием катков и плужков, подающих смесь под катки.

Готовую формовочную смесь выдерживают 2—5 ч в бункерах-отстойниках для равномерного распределения влаги и образования водных оболочек вокруг глинистых частиц. Затем смесь разрыхляют в специальных устрой-

ствах и подают на формовку. Аналогичным способом приготавливают и многие другие смеси.

Для самотвердеющих смесей применяют быстроходные смесители, устанавливая их непосредственно у рабочих мест формовки.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Что такое литейная технологическая оснастка?*
2. *Из каких элементов состоит литниковая система?*
3. *Какие требования предъявляют к формовочным смесям?*
4. *Перечислите основные компоненты формовочных и стержневых смесей.*

## Глава 29

# СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ЛИТЬЯ

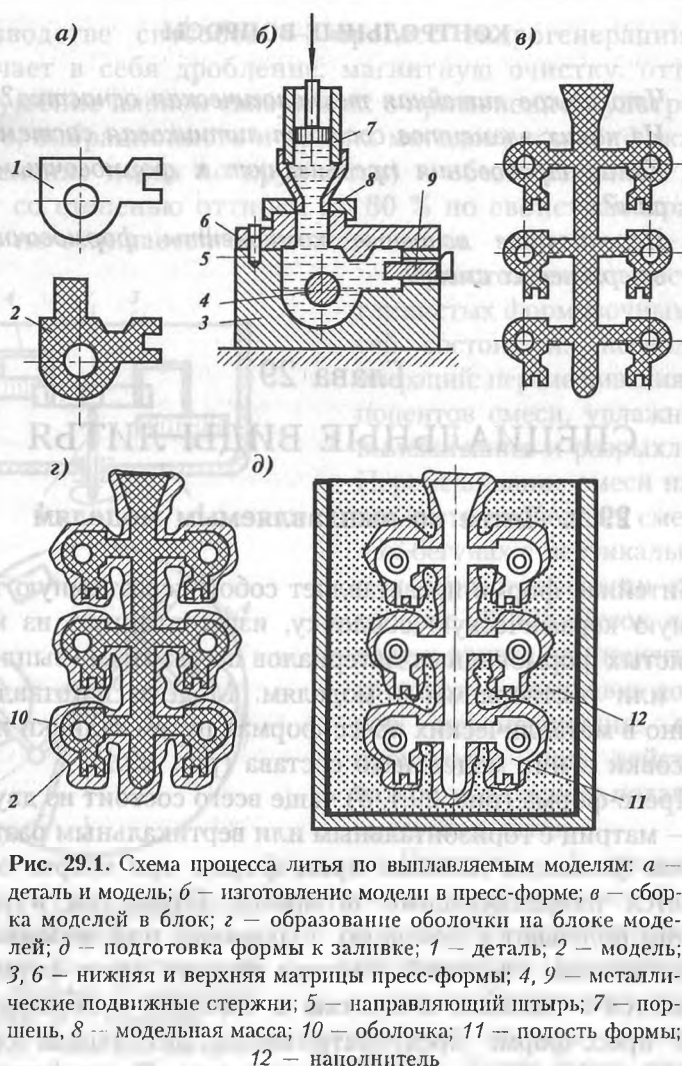
### 29.1. Литье по выплавляемым моделям

Литейная форма представляет собой неразъемную тонкостенную керамическую оболочку, изготовленную из мелкозернистых формовочных материалов по разовым (выплавляемым или растворяемым) моделям. Модели изготавливают обычно в металлических пресс-формах путем заливки или запрессовки в них модельного состава (рис. 29.1).

Пресс-форма (рис. 29.1, б) чаще всего состоит из двух частей — матриц с горизонтальным или вертикальным разъемом. Точная фиксация половин пресс-формы при сборке обеспечивается направляющими штырями. Отверстия в модели обычно получают с помощью подвижных или неподвижных металлических стержней. Рабочая полость пресс-формы выполняется с высокой точностью и чистотой поверхности.

В пресс-форме предусматривается литниковая система для заполнения ее модельным составом. Пресс-формы выполняются многоместными и одностными. Открывание и запираение их осуществляется ручными, механическими или пневматическими механизмами. Модельные составы, применяемые для изготовления разовых моделей, многочисленны, но их можно подразделить на следующие группы: легкоплавкие на основе воскообразных веществ; тугоплавкие на основе





пластмасс; растворимые. В качестве исходных материалов для приготовления модельных составов используются: парафин — продукт возгонки нефти, бурого угля, горючих сланцев; стеарин — продукт переработки растительных и животных жиров; буроугольный и торфяной воск — продукты пе-

переработки бурого угля и торфа; церезин — смесь твердых высокомолекулярных углеводов; канифоль — продукт хвойных пород дерева; полистирол — твердое бесцветное вещество с аморфной структурой (получают полимеризацией стирола); карбамид — техническая мочеви́на и ряд других веществ.

Воскообразные модельные составы получают обычно из парафина и стеарина. Парафино-стеариновый (ПС) двухкомпонентный состав приготавливают в любом соотношении. Наиболее часто применяют состав ПС50-50, содержащий по 50% каждого компонента. Модельные составы ПС имеют невысокую температуру плавления (54–55 °С), достаточно хорошую жидкотекучесть и пригодны для многократного использования (возврат модельного состава равен 90–98 %).

Недостатками модельных составов ПС являются низкая прочность и твердость и большая нестабильная усадка.

Для улучшения качества моделей в модельные составы добавляют буроугольный воск, церезин и другие материалы. Воскообразные модельные составы применяют для изготовления моделей мелких отливок средней сложности.

Модели крупногабаритных и тонкостенных отливок изготавливают из более тугоплавких модельных составов. К ним относятся модельный состав КПсЦ50-30-20, содержащий 50 % канифоли; 30 % полистирола и 20 % церезина. Обладает высокой прочностью, твердостью и стабильной усадкой; температура плавления состава — около 180 °С. К недостаткам КПсЦ можно отнести сложность приготовления, низкую жидкотекучесть и высокую вязкость. Вследствие низкой жидкотекучести при запрессовке КПсЦ требуется повышенное давление. Из-за высокой вязкости этот модельный состав плохо выплавляется из формы, большая часть его остается в форме и выжигается при ее прокатке, поэтому только 30–40 % модельного состава идет на повторное использование.

Растворимые модельные составы приготавливают на основе карбамида с добавкой до 2 % борной кислоты (например, состав КББк98-2). Температура плавления этого состава 120–125 °С. Карбамидные модели обладают высокими прочностью, твердостью и практически не имеют усадки. Не-

достатками состава КбБк98-2 являются гигроскопичность и плохая спаиваемость, что ограничивает применение состава для сложных моделей, изготавливаемых по частям.

Процесс изготовления моделей состоит в заполнении подготовленной пресс-формы модельным составом, выдержке для затвердевания модели, извлечении модели из пресс-формы и охлаждении модели на воздухе или в проточной воде до окончания усадки.

К крупным моделям припаивают элементы литниковой системы, а мелкие модели объединяют в блоки с общей литниковой системой (см. рис. 29.1, в). Сборка в блоки осуществляется путем припаивания моделей к литниковой системе подогретым ножом-паяльником вручную, склеиванием с помощью клеящих веществ или нанизыванием секций на металлический стояк-каркас. Секцию моделей изготавливают в многоместной пресс-форме. Она состоит из нескольких моделей, питателей и центрального кольца.

Для получения тонкостенной керамической формы по изготовленным моделям используют формовочную смесь в виде жидкой суспензии, состоящую в основном из пылевидного кварца  $\text{SiO}_2$  и связующего, например гидролизованного раствора этилсиликата  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$ . Жидкую формовочную смесь (обмазку) наносят на блок моделей, многократно окуная его в ванну с обмазкой.

При извлечении блока из ванны дают стечь излишней обмазке, после чего покрытие немедленно обсыпают кварцевым песком. Обсыпка блока производится в пескосыпах или окунанием в псевдокипящий слой песка (песчинки находятся во взвешенном состоянии под действием сжатого воздуха). Каждый слой покрытия на этилсиликате сушат парами воздуха или аммиака. Для образования оболочки на блоке моделей (см. рис. 29.1, г) необходимой толщины и прочности на блок наносят четыре, пять, шесть и более слоев обмазки.

Удаление моделей из полученной неразъемной керамической формы производят выплавлением горячей водой, паром, горячим воздухом или растворением в воде. Выбор способа

удаления моделей в основном определяется модельным составом. Формы для отливок по выплавляемым моделям применяются без наполнителей и с наполнителями, упрочняющими формы (см. рис. 29.1, д). Наполнителями могут быть сыпучие огнеупорные материалы или специальные смеси — «жидкие наполнители».

Прокалку формы при температуре порядка 950 °С осуществляют с целью удаления остатков модельного состава и окончательного упрочнения формы за счет спекания частиц связующего с частицами пылевидного огнеупорного материала. Кроме того, форма после прокалики становится газопроницаемой.

Заливку металла производят чаще всего в горячие формы сразу же после прокалики. Формы для толстостенных отливок перед заливкой охлаждают.

После выбивки отливок из формы производят их очистку от керамической оболочки на пневматических установках. Затем от отливок отделяют литниковую систему, подвергают их окончательной очистке в кипящем растворе щелочей и промывают водой.

С целью улучшения структуры и механических свойств отливок они проходят термическую обработку.

Способ литья по выплавляемым моделям имеет следующие характерные особенности: разовая легкоплавкая модель не имеет разъема и знаковых частей и строго соответствует конфигурации отливки; формовочная смесь в виде жидкой суспензии хорошо смачивает модель при изготовлении неразъемной формы. Это обеспечивает получение гладкой поверхности формы и высокую точность ее размеров. Заливка металла в горячие формы дает возможность изготавливать тонкостенные отливки сложной конфигурации, причем из сплавов с низкими литейными свойствами.

Способом литья по выплавляемым моделям изготавливают детали сложной конфигурации из сталей, цветных металлов, тугоплавких и трудно обрабатываемых сплавов. Масса таких деталей может быть от нескольких граммов до 500 кг, толщина стенки — 1—3 мм.

## 29.2. Литье в оболочковые формы

Литейная форма представляет собой разъемную тонкостенную оболочку, изготовленную из песчано-смоляных смесей по горячей металлической модели.

Формовочная смесь для оболочковых форм состоит из мелкозернистого кварцевого песка (или другого огнеупорного материала), синтетической термореактивной или термопластичной смолы, которая является связующим, и различных технологических добавок.

Способ изготовления оболочек основан на специфических свойствах смол. При комнатной температуре смолы могут быть жидкими или твердыми. При нагревании до 100–120 °С жидкие смолы становятся еще более жидкими, твердые смолы расплавляются; и в том и в другом случае они обволакивают песчинки огнеупорного материала. При дальнейшем нагревании до 200–250 °С термореактивные смолы необратимо твердеют. Для перевода термопластичных смол в твердое необратимое состояние в них добавляют отвердители.

Формовочные смеси применяют двух видов: неплакированные и плакированные. Неплакированная смесь содержит кварцевый песок и смолу в виде порошка, равномерно перемешанную с песком. Плакированная смесь специально подготавливается и содержит смолу в виде тонкой пленки, покрывающей поверхность песчинок. Такая смесь обладает лучшими свойствами (прочностью, газопроницаемостью и др.).

Модельная оснастка для изготовления оболочковых форм состоит из двух модельных плит (верхней и нижней), стержневых ящиков и вспомогательных приспособлений. Модельные плиты изготавливают из стали, чугуна или алюминиевых сплавов и снабжают толкателями для снятия оболочек. На рабочие поверхности модельных плит и стержневых ящиков наносят разделительную жидкость для предупреждения прилипания оболочек. Модельная оснастка нагревается в электрических печах или от плит с электронагревателями.

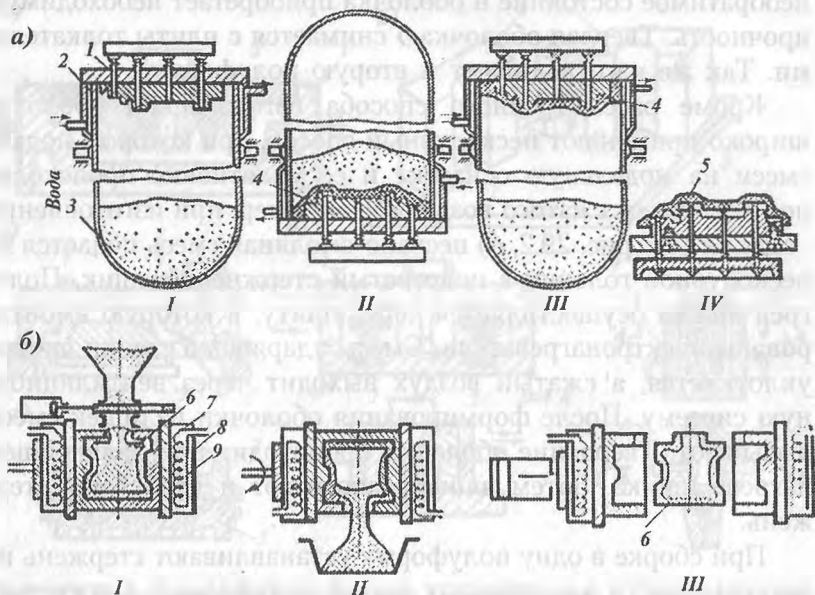


Рис. 29.2. Схема процесса изготовления оболочковой формы (а) и оболочкового стержня (б)

На рис. 29.2, а показана схема насыпного, или бункерного, способа изготовления оболочковых форм. Модельную плиту 1 нагревают до температуры  $200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$  и закрепляют на бункере 2 с песчано-смоляной смесью 3. При повороте бункера на  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  смесь падает на модельную плиту и уплотняется. Иногда для лучшего уплотнения смеси используют вибрацию или подпрессовку. Время контакта песчано-смоляной смеси с нагретой модельной плитой составляет  $10\text{--}30\text{ с}$ . Под действием тепла модельной плиты слой 4 смеси, прилегающей к ней, прогревается на глубину  $6\text{--}20\text{ мм}$ . Смола сначала размягчается, склеивает частицы песка, а затем затвердевает, образуя на модели полутвердую оболочку. Часть смеси, которая не успевает прогреться, ссыпают в бункер при его повороте в исходное положение. Оболочку вместе с модельной плитой помещают в печь, где при температуре  $300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$  выдерживают  $1\text{--}3\text{ мин}$ . При этом смола переходит в твердое

необратимое состояние и оболочка приобретает необходимую прочность. Твердая оболочка 5 снимается с плиты толкателями. Так же изготавливают и вторую полуформу.

Кроме рассмотренного способа изготовления оболочек широко применяют пескодувный способ, при котором подача смеси на модельную оснастку и ее уплотнение происходят под действием сжатого воздуха. Например, при изготовлении стержня (см. рис. 29.2, б) песчано-смоляная смесь подается из пескодувной головки в подогретый стержневой ящик. Подогрев ящика осуществляется через плиту, в которую вмонтированы электронагреватели. Смесь, ударяясь о стенки ящика, уплотняется, а сжатый воздух выходит через вентиляционную систему. После формирования оболочки излишек смеси высыпает. Твердение оболочки происходит при дальнейшем нагреве ящика. Затем ящик раскрывают и извлекают стержень.

При сборке в одну полуформу устанавливают стержень на знаковые части и накрывают другой полуформой. Скрепляют полуформы с помощью скоб, струбцин или склеивают термоактивным клеем.

В оболочковых формах получают тонкостенные отливки массой до 100 кг из чугуна, стали, цветных и специальных сплавов, точные по размерам, с чистой поверхностью.

Способ литья в оболочковые формы является высокопроизводительным, так как процессы изготовления форм и стержней в серийном и массовом производствах автоматизированы. Расход формовочной смеси при литье в оболочковые формы во много раз меньше, чем при литье в песчаные формы. Оболочковые стержни находят применение и в других способах литья.

### 29.3. Литье в металлические формы (кокили)

Металлические формы — кокили являются литейными формами многократного использования. Их изготавливают в основном из стали и чугуна.

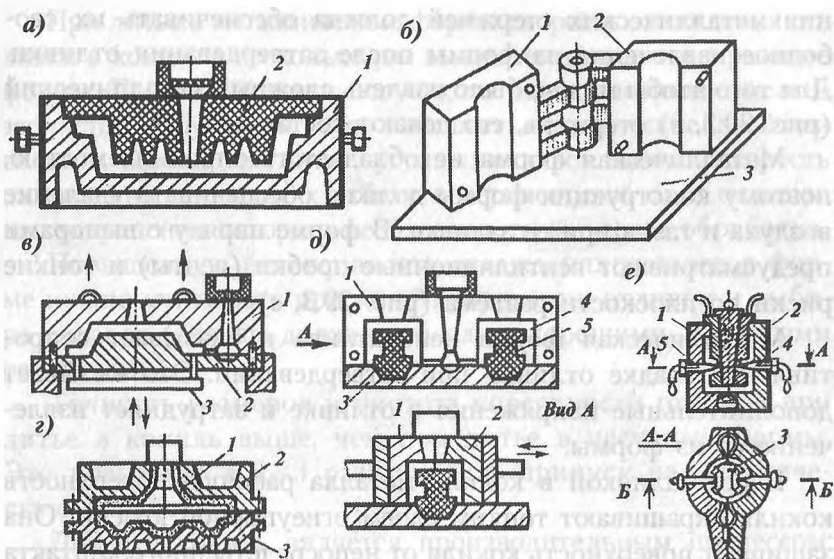


Рис. 29.3. Примеры конструкций кокилей: а — неразъемный: 1 — кокиль; 2 — песчаный стержень; б — створчатый: 1, 2 — матрицы кокиля; 3 — плита; в — с горизонтальным разъемом: 1 — верхняя матрица; 2 — нижняя матрица; 3 — плита толкателей; г — облицованный: 1 — оболочка; 2, 3 — матрица; д — с вертикальным разъемом: 1, 2 — левая и правая матрицы; 3 — плита; 4 — полость формы; 5 — песчаный стержень; е — разъемный с металлическими стержнями: 1, 2 — матрицы кокиля; 3, 4, 5 — металлические стержни

По конструкции металлические формы бывают неразъемными (рис. 29.3, а) и разъемными. Неразъемные кокили применяют для отливок, конструкция которых обеспечивает свободное удаление их из формы вместе с литниковой системой при повороте формы на 180 градусов. Разъемные кокили делают створчатыми (рис. 29.3, б), с горизонтальной плоскостью разъема (рис. 29.3, в), с вертикальной плоскостью разъема (рис. 29.3, д, е) и более сложных конструкций.

Внутренняя полость кокиля (рабочая поверхность) оформляет наружную конфигурацию отливки. Отверстия, пазы и полости в отливке выполняются при помощи стержней — обычных песчаных или металлических. При этом конструк-



ция металлических стержней должна обеспечивать их свободное извлечение из формы после затвердевания отливки. Для того чтобы можно было извлечь сложный металлический (рис. 29.3, *е*) стержень, его делают составным.

Металлическая форма не обладает газопроницаемостью, поэтому конструкция формы должна обеспечивать удаление воздуха и газов при ее заливке. В форме наряду с выпорами предусматривают вентиляционные пробки (венты) и тонкие риски по плоскости разъема (рис. 29.3, *в*).

Металлическая форма неподатлива и оказывает сопротивление усадке отливки при затвердевании. Это вызывает дополнительные напряжения в отливке и затрудняет извлечение ее из формы.

Перед заливкой в кокиль металла рабочую поверхность кокиля окрашивают тонким слоем огнеупорной краски. Она защищает поверхность кокиля от непосредственного контакта с жидким металлом и тем самым уменьшает износ формы. Кроме того, толщиной слоя краски можно регулировать интенсивность охлаждения отливки, так как краска менее теплопроводна, чем металлический кокиль.

Полости литниковой системы, прибылей, выпоров облицовывают теплоизоляционным материалом (например, асбестом) и окрашивают более толстым слоем краски. Металл в этих каналах будет затвердевать в последнюю очередь.

Перед началом работы кокили подогревают до температуры 200–300 °С. Если перед заливкой металла форма будет холодной, то из-за большой теплопроводности формы металл потеряет жидкотекучесть раньше, чем заполнит форму. К тому же при заливке в неподогретый кокиль его поверхность при контакте с жидким металлом испытывает термоудар, что увеличивает износ формы.

Наименьшую стойкость имеют кокили при заливке стали: 10–50 шт. при производстве крупных отливок и 400–600 шт. — при производстве мелких. При литье алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов в кокиле можно получить от нескольких тысяч до сотен тысяч отливок.

При литье в металлические формы скорость охлаждения отливки в кокиле в несколько раз выше, чем при литье в разовые формы. Поэтому отливки получаются более плотные, с мелкозернистой структурой, что повышает механические свойства сплавов. Однако при литье чугуновых отливок высокая скорость охлаждения приводит к отбелу поверхностного слоя отливки, для устранения которого необходима термическая обработка.

Повышенную интенсивность охлаждения металла в форме нужно учитывать при конструировании отливки и выборе сплавов (сплавы должны обладать хорошими литейными свойствами).

Точность размеров и чистота поверхности отливок при литье в кокиль выше, чем при литье в песчаные формы. Это позволяет в 2—3 раза снизить припуск на механическую обработку.

Литье в кокиль является производительным процессом: трудоемкость изготовления отливок в кокилях меньше, чем при литье в песчаные формы, условия труда лучше. Однако из-за высокой стоимости изготовления металлической формы литье в кокиль экономически целесообразно только в серийном и массовом производствах.

Разновидностью литья в кокиль является способ изготовления отливки в облицованных металлических формах (см. рис. 29.3, з). Внутреннюю поверхность кокиля облицовывают тонкостенной оболочкой из песчано-смоляной смеси. Форма приобретает податливость и газопроницаемость. Кроме того, оболочка уменьшает отвод теплоты от залитого металла, что позволяет получить чугуновые отливки без отбела. Стойкость таких кокилей при заливке чугуна и стали значительно увеличивается.

## 29.4. Литье под давлением

Литейная форма представляет собой сложную разъемную металлическую форму, называемую *пресс-формой*. Ее изготавливают из легированной и закаленной стали. Рабочую по-

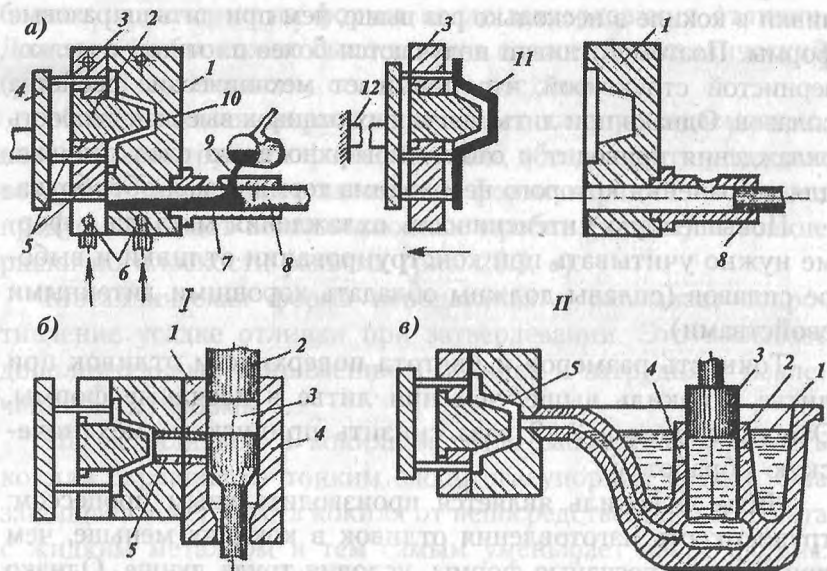


Рис. 29.4. Схема литья под давлением на машинах: а — с холодной горизонтальной камерой; б — с холодной вертикальной камерой; в — с горячей вертикальной камерой

лость пресс-формы механически обрабатывают с высокой точностью размеров и чистотой поверхности.

Пресс-форма (рис. 29.4, а) состоит из неподвижной матрицы 1 и подвижной матрицы 3. Для образования полос-тей и отверстий в отливке используют только металличе-ские стержни, которые находятся обычно в подвижной по-луформе, как, например, стержень 2. Пресс-форма имеет каналы 6 для водяного охлаждения. Для извлечения отлив-ки из формы предусмотрены толкатели 5, закрепленные на плите толкателей 4.

Машины для литья под давлением бывают поршневые и компрессорные. Наибольшее распространение получили поршневые машины с холодной и горячей камерами прессо-вания.

Поршневые машины с холодной камерой прессования подразделяют на машины с горизонтальной (рис. 29.4, *а*) и вертикальной (рис. 29.4, *б*) камерами.

Перед заливкой пресс-форму подогревают и наносят смазку на ее рабочие поверхности, камеры прессования 7 и на пресс поршня 8 (рис. 29.4, *а*). В камеру прессования (позиция I) заливают мерную порцию сплава 9. Пресс-поршень 8 перекрывает заливочное отверстие, создает давление в камере прессования, и сплав с большой скоростью заполняет полость формы 10. После затвердевания сплава пресс-форма раскрывается — отходит подвижная часть формы вместе с отливкой, плунжер возвращается в исходное положение. Плита толкателей перемещается вместе с пресс-формой до упора 12 (позиция II). При дальнейшем движении пресс-формы толкатели снимают отливку 11 со стержня 2 и она поступает в контейнер. Пресс-форму обдувают сжатым воздухом, смазывают, закрывают, и процесс повторяется.

На машине с вертикальной камерой прессования 1 (рис. 29.4, *б*) плунжер 2 давит на залитый металл 3 и перемещает вниз пята 4. При этом открывается отверстие 5 литника, металл заполняет форму, пята 4 поднимается, отрезает и выталкивает пресс-остаток металла.

Поршневые машины с холодной камерой прессования применяют для получения отливок из медных, алюминиевых, магниевых и других цветных сплавов, а также стальных отливок.

В отечественном литейном производстве все большее распространение получают машины с горизонтальной камерой прессования. Они более производительны и проще в обслуживании.

Машины с горячей камерой прессования (рис. 29.4, *в*) имеют печь с тиглем 1, в котором образована камера прессования 2. При верхнем положении плунжера 3 металл заполняет камеру через отверстия 4. При движении плунжера вниз он перекрывает эти отверстия, и сплав под давлением заполняет полость пресс-формы.

Такие машины имеют высокую производительность, так как не нужно производить операцию заливки сплава — металл сам заливается в камеру при обратном ходе плунжера. Поэтому большинство машин работает в автоматическом режиме. Производительность может достигать до 3000 и более отливок в час. Машины с горячей камерой прессования используют в основном для литья легкоплавких сплавов (цинковых, свинцово-сурьмянистых и др.).

Применение металлической формы и давления на заливаемый металл позволяет получить сложные отливки высокой точности, с чистой поверхностью и минимальными припусками на механическую обработку. Благодаря давлению возможно получение отливок со стенками толщиной 1–1,5 мм. Прочность отливок выше, чем при литье в песчаные формы. Но пластические свойства отливок снижаются из-за низкой газопроницаемости формы.

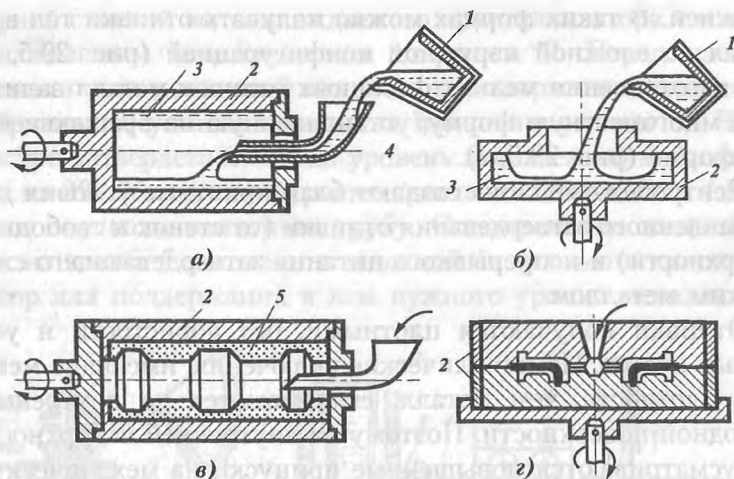
Литье под давлением является наиболее прогрессивным и производительным способом для получения отливок из цветных сплавов в массовом производстве.

## 29.5. Центробежное литье

Литейными формами служат обычно металлические формы, изготовленные из стали или чугуна. При центробежном литье металл заливают во вращающуюся форму, установленную на центробежной машине. В некоторых случаях форма приводится во вращение после заливки. Вращение формы осуществляется вокруг горизонтальной или вертикальной оси.

Машины с горизонтальной осью вращения (рис. 29.5, а) применяют для отливки чугунных и стальных труб, втулок и других отливок тел вращения. Жидкий металл из ковша по желобу заполняет вращающуюся форму. После затвердевания сплава и остановки машины отливку клещами извлекают из формы. На машинах для литья труб большой длины пре-

дусмотрены постепенное выдвижение желоба из формы или отход формы от желоба с целью ее равномерного заполнения.



**Рис. 29.5.** Схемы центробежного литья: *а* — с горизонтальной осью вращения формы; *б* — с вертикальной осью вращения формы; *в* — в облицованные формы; *г* — в песчаные формы; 1 — ковш; 2 — форма; 3 — металл; 4 — желоб; 5 — облицовка

На машинах с вертикальной осью вращения металл из ковша 1 (рис. 29.5, б) заливают во вращающуюся форму 2. Под действием центробежных сил металл 3 прижимается к боковым стенкам формы. После затвердевания отливки вращение формы прекращают и отливку извлекают. В отливке под влиянием веса металла наблюдается небольшая разностенность (внизу стенка отливки толще, чем сверху). Поэтому этот способ применяют для изготовления отливок небольшой высоты — втулок, колец, зубчатых колес, фланцев и т. п.

Металлические формы при центробежном литье, так же как и при кокильном, предварительно подогревают и на поверхность наносят защитные покрытия. Для форм, вращающихся горизонтально, можно применять сыпучие покрытия, которые вводят в форму перед заливкой. Под действием центробежных сил порошок покрытия равномерно распределяется по всей цилиндрической поверхности формы.

При центробежном литье возможно применение облицованных форм — песчаных, керамических или собранных из стержней. В таких формах можно получать отливки тел вращения со сложной наружной конфигурацией (рис. 29.5, *в*). Для изготовления мелких фасонных отливок металл заливают в многоместную форму, установленную на вращающейся платформе (рис. 29.5, *г*).

Центробежные силы создают благоприятные условия для направленного затвердевания отливки (от стенок к свободной поверхности) и непрерывного питания затвердевающего слоя жидким металлом.

Отливки получаются плотными, без пористости и усадочных пустот. Неметаллические включения, имеющие меньшую плотность, чем металл, скапливаются на внутренней свободной поверхности. Поэтому на внутренней поверхности предусматриваются повышенные припуски на механическую обработку.

При центробежном литье полых изделий (труб, гильз, втулок и т. д.) отсутствуют стержни и литниковая система. Хорошее заполнение формы обеспечивается даже для сплавов с пониженной жидкотекучестью.

Недостатком данного способа является значительная ликвация. С увеличением скорости вращения формы ликвация усиливается.

Центробежным способом чаще всего получают отливки из чугунов, стали и цветных металлов, имеющие форму тел вращения, и реже — фасонные. Например, из серого чугуна отливают водопроводные трубы длиной от 2 до 5 м, диаметром от 50 до 1000 мм и толщиной стенок от 7,5 до 30 мм.

## 29.6. Специальные способы литья

Полунепрерывное литье чугунных труб и втулок — один из перспективных высокопроизводительных способов, позволяющий получать изделия диаметром до 1000 мм и длиной до 10 м, что невозможно при других способах. В ус-

тановке для полунепрерывного литья труб (рис. 29.6, а) жидкий чугун заливают в кольцевой зазор, образованный внутренней стенкой водоохлаждаемого кристаллизатора 1 и водоохлаждаемым металлическим стержнем 2. Перед началом заливки этот кольцевой зазор плотно закрыт металлическим стержнем 3, установленным на подвижном столе 4. Чугун быстро затвердевает. Когда уровень заливаемого металла будет на 20—25 мм ниже уровня кристаллизатора, стол 4 начинают опускать, вытягивая трубу. Одновременно жидкий чугун из ковша 5 заливают с заданной скоростью в кристаллизатор для поддержания в нем нужного уровня металла.

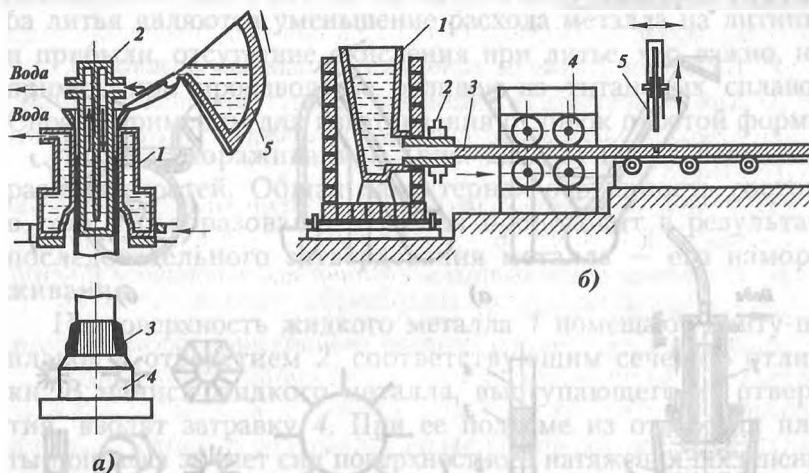


Рис. 29.6. Схема установки полунепрерывного (а) и непрерывного (б) литья

Трубы, получаемые этим способом, имеют чистую внутреннюю и наружную поверхность. Структура сплава таких труб получается мелкозернистой. Полунепрерывное литье используют также для получения квадратных, шестигранных и других фасонных профилей из чугуна, бронз, латуней и других сплавов.

На рис. 29.6, б показан метод непрерывного литья заготовок. Жидкий металл, поступающий из тигля 1, быстро затвердевает в водоохлаждаемом кристаллизаторе 2 и обра-



зует непрерывную заготовку 3; ее вытягивают с определенной скоростью тянущими роликами 4 и разрезают дисковой пилой 5 на куски мерной длины.

Литье выжиманием (рис. 29.7, а) применяют для получения тонкостенных крупногабаритных отливок типа панелей размерами до 1000—2500 мм с толщиной стенки 2—5 мм из алюминиевых магниевых сплавов. При повороте подвижной полуформы залитый жидкий металл заполняет полость формы, его излишек сливают в приемный ковш. Существуют установки с плоскопараллельным перемещением подвижной полуформы. Литье выжиманием осуществляют на автоматических установках.

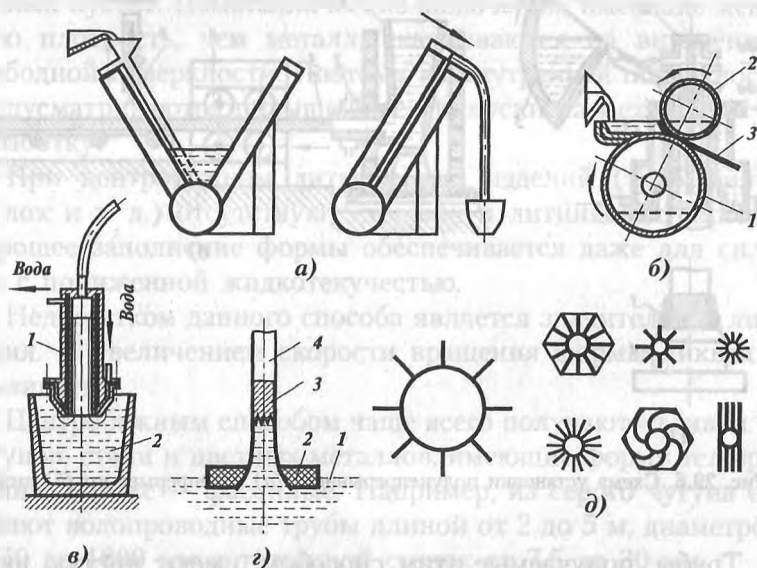


Рис. 29.7. Схемы литья: а — выжиманием; б — «жидкой прокаткой»; в — вакуумным всасыванием; г — намораживанием; д — примеры сечений отливок, полученных намораживанием из расплава

При «жидкой прокатке» (рис. 29.7, б) металл непрерывной струей заливают в приемник, состоящий из двух вращающихся валков 1, 2 с внутренним водяным охлаждением. На поверхности валков намораживается слой металла, образуя

лист или ленту 3. Таким способом на специальных установках с полной автоматизацией процесса отливают чугунные листы, ленты.

Литье вакуумным всасыванием (рис. 29.7, в) состоит в том, что металл заполняет литейную форму 1 благодаря разрежению, создаваемому в ней вакуум-насосом. После затвердевания носок формы-кристаллизатора извлекают из ванны с жидким металлом 2. В результате пуска атмосферного воздуха в полость формы отливка удаляется.

Наиболее часто этот способ применяют для получения втулок, вкладышей, подшипников скольжения из дорогих и дефицитных бронз и латуней. Преимуществами такого способа литья являются уменьшение расхода металла на литники и прибыли, отсутствие окисления при литье, что важно, например, при производстве отливок из титановых сплавов. Способ применим для изготовления отливок простой формы.

Литье намораживанием (рис. 29.7, г) имеет несколько разновидностей. Общая характерная особенность состоит в том, что образование изделия происходит в результате последовательного затвердевания металла — его намораживания.

На поверхность жидкого металла 1 помещают плиту-поплавок с отверстием 2, соответствующим сечению отливки. В мениск жидкого металла, выступающего из отверстия, вводят затравку 4. При ее подъеме из отверстия плиты-поплавка за счет сил поверхностного натяжения постепенно вытягивается жидкий металл, затвердевающий (намораживающийся) и образующий изделие 3. Скорость вытягивания изделия должна быть точно согласована со скоростью охлаждения и затвердевания металла. Таким способом изготавливают ленты шириной 100 мм и более, трубы с внутренними и наружными ребрами и другие изделия из алюминиевых и некоторых других сплавов (рис. 29.7, д).

Электрошлаковое литье (ЭШЛ) — это способ получения фасонных отливок в водоохлаждаемой металлической литейной форме — кристаллизаторе, основанный на применении электрошлакового переплава (ЭШП) расходуемого электрода.

Сущность ЭШЛ заключается в том, что приготовление расплава (плавка) совмещено по месту и времени с заполнением литейной формы: отливка последовательно наплавляется в форме. Используется для получения отливок из специальных сталей и сплавов и отливок ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования по качеству металла, механическим свойствам.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите этапы получения отливки по выплавляемым моделям.
2. Назовите составы основных модельных сплавов.
3. Как влияет нагрев формы на процесс получения отливки?
4. Какие существуют способы получения отливок в оболочковые формы?
5. В чем состоят особенности литья в металлические формы?
6. Назовите основные схемы литья под давлением и центробежного литья.
7. В каких случаях применяют специальные способы литья?

---

## *Раздел VIII*

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

## Глава 30

### ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

#### **30.1. Сущность обработки металлов давлением**

Обработка металлов давлением основана на их способности в определенных условиях пластически деформироваться без разрушения в результате воздействия на деформируемое тело (заготовку) внешних сил.

Если при упругих деформациях деформируемое тело полностью восстанавливает исходные форму и размеры после снятия внешних сил, то при пластических деформациях изменение формы и размеров, вызванное действием внешних сил, сохраняется и после прекращения действия этих сил. Упругая деформация характеризуется смещением атомов относительно друг друга на величину, меньшую межатомных расстояний, а после снятия внешних сил атомы возвращаются в исходное положение. При пластических деформациях атомы смещаются относительно друг друга на величины, большие межатомных расстояний, и после сня-

тия внешних сил не возвращаются в свое исходное положение, а занимают новые положения равновесия.

Для начала перехода атомов в новые положения равновесия необходима определенная величина действующих напряжений, зависящая от межатомных сил и характера взаимного расположения атомов (типа кристаллической решетки, наличия и расположения примесей, формы и размеров зерен поликристалла и т. п.).

Различают деформацию упругую (обратимую) и пластическую (необратимую, остаточную). Пластическая деформация при обработке металлов давлением способствует образованию формы изделия, а упругая деформация затрудняет ее образование. Так, при снятии внешней нагрузки формы и размеры заготовки изменяются вследствие остаточной упругой деформации.

Скольжение одной части кристаллической решетки относительно другой происходит по плоскостям наиболее плотного размещения атомов (плоскостям скольжения). В реальных металлах кристаллическая решетка имеет линейные дефекты (дислокации), перемещение которых облегчает скольжение.

Величина пластической деформации не безгранична, при определенных ее значениях может начаться разрушение металла.

На величину пластической деформации, которой можно достичь без разрушения (предельная деформация), оказывают влияние многие факторы, основные из которых — механические свойства металла (сплава), температурно-скоростные условия деформирования и схема напряженного состояния. Последний фактор оказывает большое влияние на значение предельной деформации. Наибольшая предельная деформация достигается при отсутствии растягивающих напряжений. Схемы напряженного состояния в различных процессах и операциях обработки давлением различны, вследствие чего для каждой операции, для каждого металла и температурно-скоростных условий существуют свои определенные предельные деформации.

Существенные преимущества обработки металлов давлением — возможность значительного уменьшения отхода металла, а также повышения производительности труда, поскольку в результате однократного приложения усилия можно значительно изменить форму и размеры деформируемой заготовки. Кроме того, пластическая деформация сопровождается изменением физико-механических свойств металла заготовки, что можно использовать для получения деталей с наилучшими эксплуатационными свойствами (прочностью, жесткостью, высокой износостойкостью и т. д.) при наименьшей их массе. Эти и другие преимущества обработки металлов давлением способствуют неуклонному росту ее удельного веса в металлообработке. Совершенствование технологических процессов обработки металлов давлением, а также применяемого оборудования позволяет расширять номенклатуру деталей, изготавливаемых обработкой давлением, увеличивать диапазон деталей по массе и размерам, а также повышать точность размеров полуфабрикатов, получаемых обработкой металлов давлением.

Как уже было сказано, в основе обработки металлов давлением лежит процесс пластической деформации, при котором изменяется форма без изменения массы. Все расчеты размеров и формы тела при обработке давлением основаны на законе постоянства объема, суть которого заключается в том, что объем тела до и после пластической деформации принимается неизменным:  $V_1 = V_2 = \text{const}$  ( $V_1$  и  $V_2$  — объем тела до и после деформации).

Изменение формы тела может происходить в направлении трех главных осей; при этом каждая точка стремится перемещаться в том направлении, в котором создается наименьшее сопротивление ее перемещению. Это положение в теории обработки металлов давлением носит название закона наименьшего сопротивления.

При свободном формоизменении тела в различных направлениях наибольшая деформация происходит в том направлении, в котором большинство перемещающихся точек встречает наименьшее сопротивление своему перемещению.

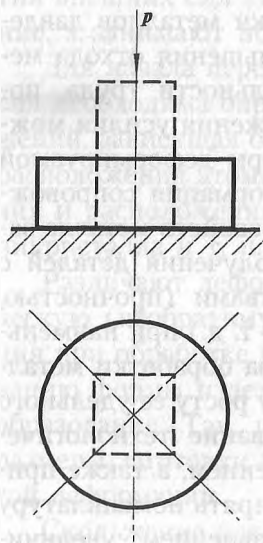


Рис. 30.1. Схема осадки образца квадратного сечения

Так, например, если при прокатке в двух валках с поперечными насечками течение металла вдоль оси прокатки сдерживается, а в поперечном направлении увеличивается, то при круговых насечках будет наблюдаться обратное явление.

Другим примером действия закона наименьшего сопротивления может служить превращение образца квадратного сечения (или любого другого) при его осаживании в круговое (рис. 30.1).

Законы постоянства объема и наименьшего сопротивления распространяются на все способы обработки металлов давлением.

При этом закон постоянства объема используют для определения размеров заготовок, а закон наименьшего сопротивления позволяет определить, какие размеры и форму поперечного сечения получит заготовка с тем или иным сечением в процессе обработки давлением.

**Влияние обработки давлением на структуру и свойства металла.** В зависимости от температурно-скоростных условий деформирования различают холодную и горячую деформацию.

Холодная деформация характеризуется изменением формы зерен, которые вытягиваются в направлении наиболее интенсивного течения металла. При холодной деформации формоизменение сопровождается изменением механических и физико-химических свойств металла. Это явление называют упрочнением (наклепом): возрастают характеристики прочности, в то время как характеристики пластичности снижаются. Упрочнение возникает вследствие поворота плоскостей скольжения, увеличения искажений кристаллической решетки в процессе холодного деформирования (накопление дислокаций у границ зерен).

Изменения, внесенные холодной деформацией в структуру и свойства металла, не необратимы. Они могут быть устранены, например, с помощью термической обработки — отжига. В этом случае происходит внутренняя перестройка, при которой за счет дополнительной тепловой энергии, увеличивающей подвижность атомов, в твердом металле без фазовых превращений из множества центров растут новые зерна, заменяющие собой вытянутые, деформированные. Так как в равномерном температурном поле скорость роста зерен по всем направлениям одинакова, то новые зерна, появившиеся взамен деформированных, имеют примерно одинаковые размеры по всем направлениям.

Явление зарождения и роста новых равноосных зерен взамен деформированных, вытянутых, происходящее при определенных температурах, называется рекристаллизацией. Для чистых металлов она начинается при абсолютной температуре, равной 0,4 абсолютной температуры плавления металла. Рекристаллизация протекает с определенной скоростью. Время, требуемое для рекристаллизации, тем меньше, чем выше температура нагрева деформированной заготовки.

При температурах ниже температуры начала рекристаллизации наблюдается явление, называемое возвратом. При возврате (отдыхе) форма и размеры деформированных, вытянутых зерен не изменяются, но частично снимаются остаточные напряжения. Снятие остаточных напряжений при возврате почти не изменяет механических свойств металла, но влияет на некоторые его физико-химические свойства. Так, например, в результате возврата значительно повышаются электрическая проводимость, сопротивление коррозии холоднодеформированного металла.

Формоизменение заготовки при температуре выше температуры рекристаллизации сопровождается одновременным протеканием упрочнения и рекристаллизации.

Горячей деформацией называют деформацию, характеризующуюся таким соотношением скоростей деформи-



рования и рекристаллизации, при котором рекристаллизация успевает произойти во всем объеме заготовки и микроструктура после обработки давлением оказывается равноосной, без следов упрочнения.

Чтобы обеспечить условия протекания горячей деформации, приходится с увеличением ее скорости повышать температуру нагрева заготовки (для увеличения скорости рекристаллизации).

Если металл по окончании деформации имеет структуру, не полностью рекристаллизованную, со следами упрочнения, то такая деформация называется неполной горячей деформацией. Неполная горячая деформация приводит к получению неоднородной структуры, снижению механических свойств и пластичности, поэтому обычно нежелательна.

При горячей деформации сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной деформации, а отсутствие упрочнения приводит к тому, что сопротивление деформированию (предел текучести) незначительно изменяется в процессе обработки давлением. Этим обстоятельством объясняется в основном то, что горячую обработку применяют для изготовления крупных деталей, так как при этом требуются меньшие усилия деформирования (менее мощное оборудование).

Горячую деформацию целесообразно применять и при обработке труднодеформируемых, малопластичных металлов и сплавов, а также заготовок из литого металла (слитков). В то же время при горячей деформации окисление заготовки более интенсивно (на поверхности образуется слой окалины), что ухудшает качество поверхности и точность получаемых размеров.

Холодная деформация без нагрева заготовки позволяет получать большую точность размеров и лучшее качество поверхности по сравнению с обработкой давлением при достаточно высоких температурах. Температура нагрева для деформации зависит в первую очередь от природы деформируемого материала. Однако в любых случаях температура нагрева должна быть значительно ниже температуры соли-

дуса сплава. Если материал перегрет, то может наступить пережог, выражающийся в интенсивном окислении границ зерен, и как следствие — охрупчивание материала. Пережог — дефект нагрева, который не может быть исправлен. Длительное пребывание металла при температуре, несколько меньшей, чем температура пережога, может привести к значительному росту зерна и снижению пластических свойств заготовки — явлению перегрева. В большинстве случаев перегрев может быть исправлен дополнительной температурной обработкой.

Температуру начала обработки давлением следует назначить на 50—100 °С ниже температуры солидуса сплава (рис. 30.2).

Заканчивать деформирование следует при температуре не ниже, чем  $T_{рек}$ ; деформирование при более низких температурах может привести к образованию трещин вследствие снижения пластичности.

В то же время окончание процесса деформации при температурах выше, чем  $T_{рек}$ , также нежелательно, так как пребывание при высоких температурах может привести к чрезмерному росту зерна, а следовательно, к снижению механических характеристик металла.

Каждый металл и сплав имеет свой строго рекомендованный температурный интервал обработки давлением, определяемый по соответствующему справочнику.

Обработка давлением без специального нагрева заготовки позволяет сократить продолжительность технологического цикла, облегчает использование средств механизации и автоматизации и повышает производительность труда.

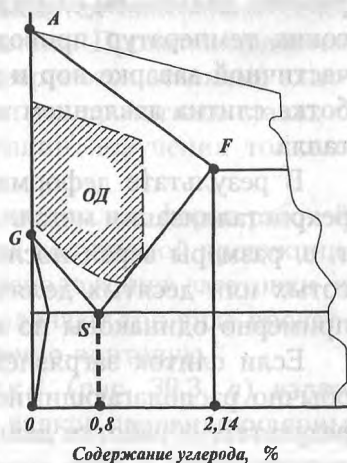


Рис. 30.2. Температурный интервал обработки давлением (ОД) низкоуглеродистых сталей

Влияние холодной деформации на свойства металла можно использовать для получения наилучших эксплуатационных свойств деталей, а управление изменением свойств в требуемом направлении и на желаемую величину может быть достигнуто выбором рационального сочетания холодной и горячей деформации, а также числа и режимов термических обработок в процессе изготовления детали.

Исходной заготовкой для начальных процессов обработки металлов давлением (прокатки, прессования) является слиток. Кристаллическое строение слитка неоднородно; кроме того, в нем имеются пористость, газовые пузыри и т. п. Обработка давлением слитка при нагреве его до достаточно высоких температур приводит к деформации кристаллитов и частичной заварке пор и раковин. Таким образом, при обработке слитка давлением может увеличиться и плотность металла.

В результате деформации кристаллитов и последующей рекристаллизации металл получает мелкозернистое строение, т. е. размеры зерен после рекристаллизации исчисляются в сотых или десятых долях миллиметра, причем эти размеры примерно одинаковы по всем направлениям.

Если слиток загрязнен неметаллическими включениями, обычно располагающимися по границам кристаллитов, то в результате обработки давлением неметаллические включения вытягиваются в виде волокон по направлению наиболее интенсивного течения металла.

Металл с явно выраженной волокнистой макроструктурой характеризуется анизотропией механических свойств. При этом характеристики прочности (предел текучести, временное сопротивление и др.) в разных направлениях отличаются незначительно, а характеристики пластичности (относительное удлинение, ударная вязкость и др.) вдоль волокон выше, чем поперек их. При этом общие рекомендации следующие: необходимо, чтобы наибольшие растягивающие напряжения, возникающие в деталях в процессе работы, были направлены вдоль волокон, а если какой-либо элемент этой

детали работает на срез, то желательно, чтобы перерезывающие силы действовали поперек волокон; необходимо, чтобы волокна подходили к наружным поверхностям детали по касательной и не перерезались наружными поверхностями детали.

## 30.2. Прокатное производство

*Прокаткой* называется процесс деформирования металла путем его обжатия между вращающимися валками прокатного стана, в результате чего уменьшается поперечное сечение заготовки и увеличивается ее длина. Прокатка является первичной обработкой, которой подвергаются стальные слитки. Процесс прокатки осуществляют на прокатных станах с нагревом заготовки, и только операции получения тонкого листа производят без нагрева.

Инструментом при прокатке являются валки, форма рабочей поверхности которых зависит от вида получаемой продукции.

В зависимости от взаимного расположения заготовки и валков и характера их движения различают три вида прокатки: продольную, поперечную, поперечно-винтовую.

При продольной прокатке (рис. 30.3, а) валки имеют цилиндрическую форму; оси валков перпендикулярны

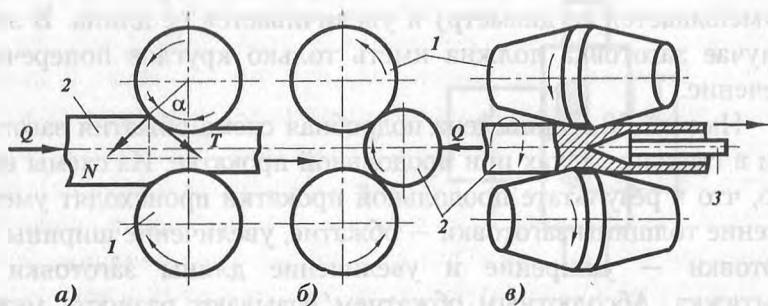


Рис. 30.3. Основные виды процессов прокатки: 1 — валки; 2 — заготовка; 3 — оправка

оси заготовки. Валки вращаются в разные стороны. Благодаря трению между валками и заготовкой последняя втягивается в зазор между вращающимися валками и движется поступательно вдоль своей оси. В результате продольной прокатки заготовка получает обжатие по высоте, незначительное уширение и значительное увеличение длины. Форма и величина поперечного сечения изделия по всей длине постоянны. Продольной прокаткой обрабатываются слитки и заготовки разнообразных поперечных сечений.

При поперечной прокатке (рис. 30.3, б) валки имеют тоже цилиндрическую форму, а их оси параллельны оси заготовки. Валки вращаются в одну сторону. В этом случае заготовка только вращается и поперечным усилием вталкивается в зазор между валками. В результате уменьшается поперечное сечение заготовки на длине, приблизительно равной длине валка, и увеличивается ее длина. Этим способом можно обрабатывать заготовки только круглого поперечного сечения.

При поперечно-винтовой прокатке (рис. 30.3, в) валки имеют бочкообразную форму и вращаются в одну сторону, вследствие чего заготовка получает вращение в противоположную сторону. Оси валков расположены под углом друг к другу и к оси заготовки. Благодаря этому заготовка кроме вращательного движения получает одновременно и поступательное движение вдоль оси (т. е. винтовое). В результате такой прокатки заготовка получает поперечное обжатие (уменьшается ее диаметр) и увеличивается ее длина. В этом случае заготовка должна иметь только круглое поперечное сечение.

На рис. 30.4 приведена подробная схема обжатия заготовки в гладких валках при продольной прокатке. Из схемы видно, что в результате продольной прокатки происходят уменьшение толщины заготовки — обжатие, увеличение ширины заготовки — уширение и увеличение длины заготовки — вытяжка. Абсолютным обжатием называют разность между исходной  $h_0$  и конечной  $h_r$  толщиной полосы:  $\Delta h = h_0 - h_r$ ; относительным обжатием — отношение абсолютного обжатия

к исходной толщине полосы:  $E = \Delta h/h_0$ . Абсолютным уширением называют разность между конечной шириной  $v_k$  и исходной шириной  $v_b$ :  $\Delta v = v_k - v_b$ ; относительным уширением — отношение абсолютного уширения к исходной ширине заготовки:  $y = \Delta v/v_b$ .

Коэффициентом вытяжки при прокатке прямоугольной полосы называется отношение длины полосы после прокатки  $l_r$  к исходной длине полосы:  $l_r / l_0$ .

Объем металла, находящийся в каждый данный момент прокатки между валками в зоне  $abcd$ , называется очагом деформации. В очаге деформации металл обжимается каждым из валков по дугам  $ab$  и  $cd$ . Эти дуги называются дугами захвата, а центральные углы, соответствующие этим дугам, — углами захвата. Угол захвата является одним из главных параметров процесса прокатки. Как видно из схемы (рис. 30.4), с увеличением угла захвата увеличивается абсолютное обжа-

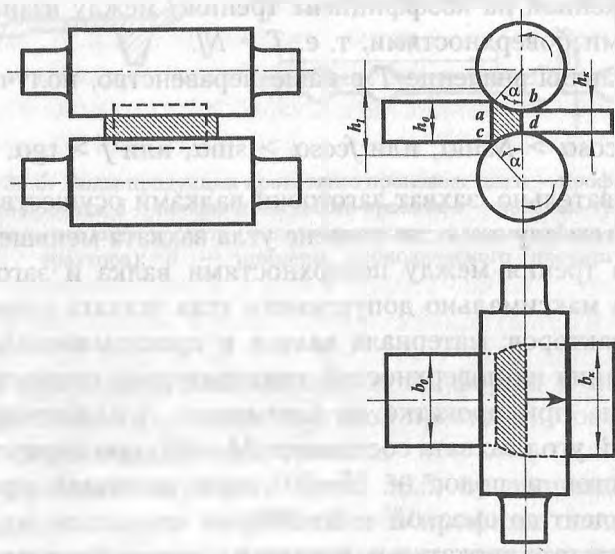


Рис. 30.4. Схема прокатки металла в гладких валках

тие, а следовательно, и производительность труда. Так, углу  $\gamma_1$  соответствует обжатие

$$\Delta h_1 = h_1 - h_k > \Delta h = h_0 - h_k.$$

Но угол захвата нельзя увеличивать безгранично, так как его величина лимитируется условием захвата заготовки валками. Условие захвата заготовки валками иллюстрируется схемой на рис. 30.3, *а*. В момент захвата со стороны каждого вала на металл действуют две силы: нормальная сила реакции  $N$  и касательная сила трения  $T$ . Перемещение заготовки вдоль оси осуществляется за счет неравенства проекций сил  $N$  и  $T$  на горизонтальную ось  $x$ . Причем сила  $Tx$  затягивает заготовку в зазор между валками, а сила  $Nx$  выталкивает ее в противоположную сторону. Отсюда следует, что для обеспечения захвата заготовки валками и ее движения вправо должно выполняться неравенство  $Tx > Nx$  или  $Tx \cos \alpha > Nx \sin \alpha$ . Из механики известно, что сила трения равна нормальной силе, умноженной на коэффициент трения  $f$  между взаимодействующими поверхностями, т. е.  $T = Nf$ .

Подставляя значение  $T$  в наше неравенство, получим

$$Nf \cos \alpha > N \sin \alpha, \text{ или } f \cos \alpha > \sin \alpha, \text{ или } f > \operatorname{tg} \alpha.$$

Следовательно, захват заготовки валками осуществляется только в том случае, если тангенс угла захвата меньше коэффициента трения между поверхностями вала и заготовки. Величина максимально допустимого угла захвата зависит от многих факторов: материала валков и прокатываемой полосы, состояния их поверхностей, температуры и скорости прокатки. Так, при прокатке на блюмингах и слябингах максимальный угол захвата составляет  $24\text{--}30^\circ$ , при горячей прокатке листов и полос —  $15\text{--}20^\circ$ , при холодной прокатке листов и лент со смазкой —  $2\text{--}10^\circ$ .

В результате прокатки получают изделия, имеющие самые разнообразные профили. Совокупность профилей и их размеров составляет сортамент прокатных изделий.

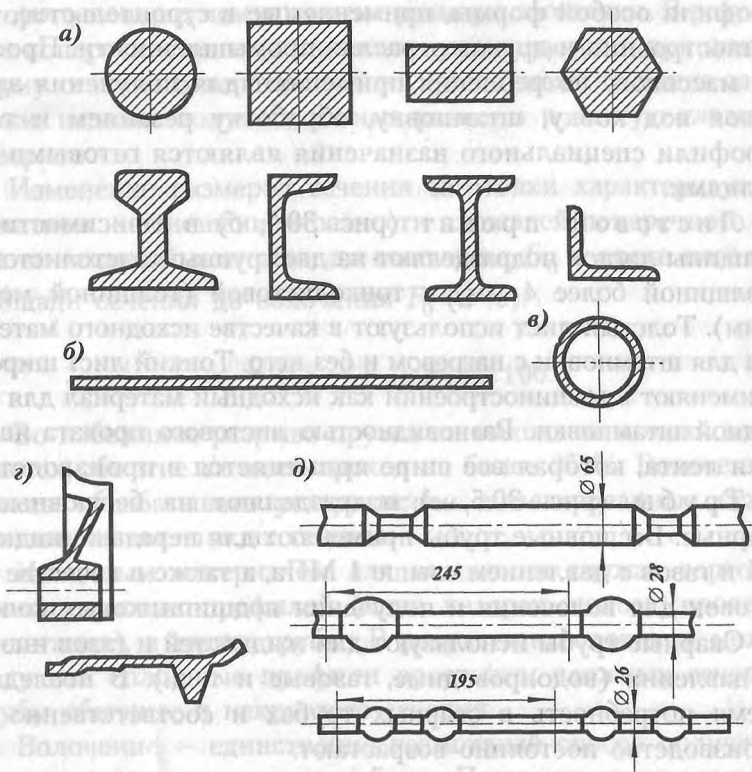


Рис. 30.5. Виды продукции прокатного производства: *а* — профили сортового проката; *б* — профили листового проката; *в* — профиль грубы; *г* — специальные виды проката (железнодорожное колесо, профиль башмака трактора); *д* — примеры периодического проката

Все профили в зависимости от их формы и назначения разделяют на четыре вида: сортовой прокат, листовой прокат, трубы, специальные виды проката.

Сортовой прокат (рис. 30.5, *а*) подразделяют на профили массового потребления и профили специального назначения. К первой группе относят простые профили — круг, квадрат, полоса, проволока — и фасонные — уголок, двутавр, швеллер и др. Ко второй группе относят рельсы,



профили особой формы, применяемые в строительстве, машиностроении и других отраслях промышленности. Профили массового потребления применяют для получения заготовок под ковку, штамповку, обработку резанием и т. д. Профили специального назначения являются готовыми изделиями.

Листовой прокат (рис. 30.5, б) в зависимости от толщины листов подразделяют на две группы: толстолистовой (толщиной более 4 мм) и тонколистовой (толщиной менее 4 мм). Толстый лист используют в качестве исходного материала для штамповки с нагревом и без него. Тонкий лист широко применяют в машиностроении как исходный материал для холодной штамповки. Разновидностью листового проката является лента, которая все шире применяется в производстве.

Трубы (рис. 30.5, в) подразделяют на бесшовные и сварные. Бесшовные трубы применяют для передачи жидкостей и газов с давлением свыше 1 МПа, а также в качестве заготовок для волочения и получения подшипниковых колец.

Сварные трубы используют для жидкостей и газов низкого давления (водопроводные, газовые и т. д.). В последнее время потребность в сварных трубах и соответственно их производство постоянно возрастают.

Специальные виды проката (рис. 30.5, г) — это заготовки, имеющие в основном форму готовых изделий и обрабатываемые только по сопрягаемым поверхностям (шарики для подшипников, железнодорожные колеса, бандажи, конические зубчатые колеса и т. д.), а также прутки с периодически изменяющимся поперечным сечением (рис. 30.5, д), которые применяют в качестве исходного материала для получения заготовок при штамповке на кривошипных горячештамповочных прессах и горизонтально-ковочных машинах.

### 30.3. Волочение

*Волочением* называется процесс деформирования металла путем его протягивания через отверстие в волоке, размеры

которого меньше, чем исходные размеры заготовки. В результате поперечное сечение заготовки уменьшается и принимает форму сечения отверстия волокна, увеличивается длина заготовки, изделие получает точные размеры и чистую гладкую поверхность.

Изменение размеров сечения заготовки характеризуется обжатием — отношением разности площадей поперечного сечения исходной заготовки до волочения  $F_0$  и после него  $F$  к площади сечения до волочения  $F_0$  (в %):

$$\lambda_{\text{в}} = [(F - F_0)/F_0] \cdot 100.$$

Во избежание разрыва прутка на выходе из волокна допускается обжатие за один проход не более 35 %. Волочением можно обрабатывать углеродистые и легированные стали, цветные металлы и их сплавы.

Исходным материалом для волочения служат сортовой прокат простых профилей (круг, квадрат, полоса, проволока-катанка), а также трубы. В результате волочения можно получить сплошные профили простых и сложных сечений, трубы обычные и некруглого сечения.

Волочение — единственно возможный способ получения проволоки диаметром менее 5 мм. Получают этим способом и проволоку диаметром в несколько тысячных долей миллиметра. Инструментом для волочения служит волочильная матрица — волока, изготовленная из твердого сплава и остающаяся в процессе волочения неподвижной.

Волочильные станы состоят из волокна и тянущих устройств, последние могут иметь прямолинейное (цепные, реечные, винтовые, канатные, гидравлические) и круговое (барабанные) движение. На станах с прямолинейным движением тянущих устройств изготавливают прутки, профили, трубы; на барабанных станах — проволоку и трубы малого диаметра.

Профиль продукции обеспечивается формой волокна, изготавливаемой из инструментальных сталей У8, У12, Х12М, твердых сплавов ВК2, ВК3, а для получения тонкой проволоки (менее 0,3 мм) — из алмаза.

Волочение осуществляют в холодном и горячем состояниях с обильным применением смазки. Изделия из алюминия, меди, никеля и их сплавов, стали получают при комнатной температуре с промежуточными отжигами для снятия наклепа. Хрупкие металлы (молибден, вольфрам и др.) обрабатывают в горячем состоянии в защитной атмосфере или вакууме.

В последние годы нашло промышленное применение волочение (например, тонкостенных труб из сталей и цветных металлов) с применением ультразвука. При этом на 25–35 % снижается усилие волочения, улучшается качество поверхности изделий.

### 30.4. Прессование

*Прессованием* называется процесс горячего деформирования металла в замкнутом объеме контейнера путем выдавливания металла через отверстие в матрице, имеющее значительно меньшее поперечное сечение, чем заготовка.

Изделие, полученное прессованием, имеет поперечное сечение отверстия матрицы и длину, во много раз превышающую длину заготовки (рис. 30.6). В данном случае степень обжатия определяется как отношение разности площадей по-

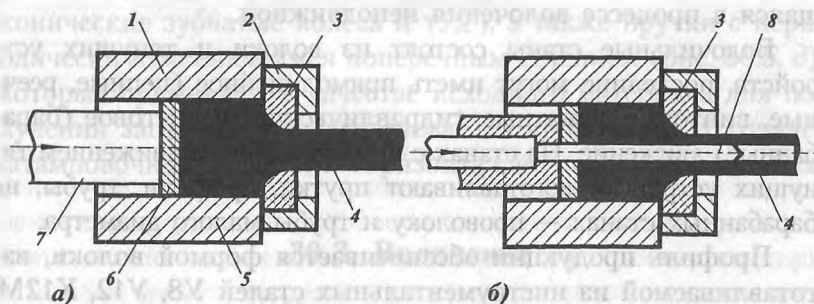


Рис. 30.6. Схемы процессов прямого прессования: а — прутков; б — труб

перечных сечений полости контейнера  $F_k$  и отверстия в матрице  $F_m$  к площади  $F_k$  (в %):

$$\lambda_{\Pi} = (F_k - F_m)/F_k \cdot 100.$$

Степень обжатия при прессовании высокая и составляет примерно 80—95 %. Это объясняется тем, что заготовка в контейнере находится в состоянии всестороннего сжатия и приобретает повышенную пластичность. Благодаря этому прессованием можно обрабатывать и труднодеформируемые металлы и сплавы. Прессованные профили получают из сплавов на основе алюминия, меди, магния, титана и других металлов.

Изделия, полученные прессованием, могут иметь самые разнообразные поперечные сечения. Некоторые из них никаким другим способом получить не представляется возможным.

В настоящее время прессованные профили широко применяют в строительных конструкциях для облицовки дверных и оконных проемов, рам и т. д.

В процессе прессования применяют сложный инструмент (см. рис. 30.6, а). Основной частью инструмента является цилиндр 1, называемый контейнером, из которого в процессе прессования выдавливается заготовка 5. С одной стороны контейнер закрывается крышкой — матрицедержателем 2; в крышке закрепляется матрица 3, через которую выдавливается заготовка, и получается изделие 4 в виде прутка или трубы. С другой стороны в контейнер входит пресс-шайба 6, перемещаемая пуансоном 7. Пуансон через пресс-шайбу передает усилие пресса на металл.

Такая схема расположения частей инструмента характерна для прямого способа прессования, когда пуансон и выдавливаемый металл движутся в одном направлении. Существует способ обратного прессования, при котором пуансон и выдавливаемый металл движутся навстречу друг другу. Несмотря на некоторые преимущества (меньшее усилие, меньший отход металла), этот способ широкого применения не получил в силу ограниченной длины изделий, выходящих из контейнера в направлении расположения рабочих элементов пресса.

При прессовании труб и других полых изделий (см. рис. 30.6, б) металл выдавливается из контейнера в кольцевой зазор, образованный стенками матрицы 3 и иглой 8.

Наиболее прогрессивным оборудованием для прессования являются специализированные горизонтальные гидравлические прессы, принцип действия которых аналогичен гидравлическим ковочным прессам. По сравнению с другими типами оборудования воздействие гидравлического прессы на заготовку в процессе прессования является наиболее благоприятным, а горизонтальное направление усилия дает возможность получать изделия неограниченной длины.

Прессы такого типа имеют программное управление, которое автоматизирует весь цикл прессования, начиная с загрузки заготовки в нагревательное устройство, подачи ее в контейнеры и кончая уборкой готовых изделий.

Среди высокопроизводительных методов прессования следует отметить гидропрессование (гидроэкструзию) жидкостью высокого давления (до 3000 МПа) и прессование с использованием энергии взрыва. В первом случае жидкостное трение на контакте «заготовка — матрица» устраняет серьезный недостаток обычного прессования — трение металла о стенки контейнера и матрицы. В результате скорость выдавливания возрастает; изделия получают равномерные свойства по длине, практически полированную поверхность; повышается износостойкость инструмента; усилие уменьшается на 30—40 %; уменьшается и неоднородность деформации, что позволяет обрабатывать хрупкие материалы (сплавы вольфрама, бериллия, ниобия и др.). Гидропрессование проводят при комнатной температуре.

В случае прессования с использованием энергии взрыва процесс протекает с высокой скоростью, что позволяет обрабатывать малопластичные материалы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы физико-механические основы обработки давлением?

2. *Как изменяются свойства металлов при горячей и холодной обработке давлением?*
3. *Как определить оптимальный температурный интервал обработки металлов давлением?*
4. *Назовите разновидности процессов прокатки.*
5. *Какой тип заготовок можно получить волочением и прессованием?*

## Глава 31

# ПОЛУЧЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

### 31.1. Ковка

*Ковкой* называется процесс горячего деформирования металла с помощью бойков и другого инструмента на молоте или прессе, при котором течение металла ограничено только в направлении движения инструмента.

В процессековки предварительно нагретая заготовка укладывается на нижний боек молота или прессы, а верхним бойком наносятся удары либо по самой заготовке, либо по подкладному инструменту, в результате чего материал заготовки перемещается в направлениях, заданных инструментом, и заготовка изменяет свою форму.

Фасонные заготовки, полученные ковкой, называют *поковками*. С помощьюковки можно получать поковки с высокими механическими свойствами и самых различных форм, размеров и массы. Примерами тяжелых поволовок могут служить роторы мощных гидротурбин, валы корабельных двигателей и т. п.

При свободной ковке перемещение деформированного металла не встречает сопротивления своему движению со стороны инструмента. Этим методом можно получать поковки массой до 250 т и более. Исходным материалом дляковки деталей служат слитки и различный прокат.

Ковку подразделяют на ручную и машинную. Ручную ковку осуществляют молотом на наковальне и применяют для индивидуального изготовления мелких изделий или при ремонтных работах. Механическую ковку производят на ковочных молотах и прессах.

Молоты используют для изготовления изделий средних размеров, прессы — для изготовления крупных изделий. Все типы молотов и прессов имеют подвижные (баба и верхний боек) и неподвижные (шабот и нижний боек) части.

При всех операциях свободной ковки обработка ведется последовательными ударами молотов, но высокоскоростные молоты рассчитаны на одноударное действие. Наибольшее распространение получили паровоздушные, пневматические, механические молоты и гидравлические прессы.

Основные операции ковки показаны на рис. 31.1.

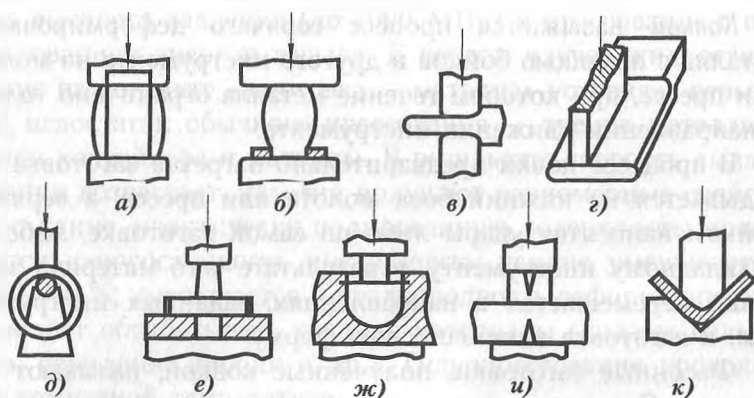


Рис. 31.1. Операции ковки: а — осадка; б — высадка; в — протяжка; г — разгонка; д — раскатка; е и ж — прошивка; и — отрубка; к — гибка

Процесс ковки является малопроизводительным, так как требует многократных перемещений заготовки между бойками. При ковке небольших по массе поковок эти перемещения осуществляются вручную, а тяжелые заготовки перемещают-

ся различными средствами механизации. Поковки, полученные ковкой, имеют большие припуски на механическую обработку.

Ковка экономически выгодна в единичном и мелкосерийном производствах для получения поковок любой массы. Для крупных деталей машин массой от 2 до 250 т ковка — единственно возможный способ изготовления. На предприятиях тяжелого машиностроения ковка является одним из основных заготовительных процессов.

Исходным материалом при ковке мелких и средних поковок служит сортовой прокат круглого и квадратного сечений, а также блюмы и слябы. При ковке поковок массой более 2 т в качестве заготовок используют слитки.

### 31.2. Объемная штамповка

Для массового производства поковок следует применять штамповку, производительность которой в десятки раз выше, чем свободнойковки, а необходимая квалификация рабочих значительно ниже. Кроме того, при объемной штамповке достигаются значительно большие, чем при свободной ковке, точность размеров и чистота поверхности. Однако штамповка выгодна лишь в серийном производстве, потому что затраты на изготовление штампов оправдываются при выпуске значительного количества поковок.

При объемной штамповке формообразование поковок осуществляется в специальных инструментах — штампах, рабочие полости (ручьи) которых допускают течение деформируемого металла только в определенном направлении и до определенных пределов, в результате чего обеспечивается принудительное получение заданной формы и размеров поковки.

Горячую объемную штамповку широко используют в массовом и крупносерийном производствах, а в мелкосерийном производстве применяют значительно реже.



Горячей объемной штамповкой изготавливают поковки различной формы и размеров из сталей, цветных металлов и сплавов.

Штамповка может быть осуществлена в открытых и закрытых штампах. Открытыми называют штампы, у которых вдоль всего внешнего контура штамповочного ручья сделана специальная облойная канавка. Так как облойную канавку делают очень узкой, то течение в облой металла затруднено и возможно только при значительном давлении металла, находящегося в полости штампа.

При штамповке в открытых штампах поковка получается с облоем за счет некоторого избытка металла в исходной заготовке, вытесненного на заключительной фазе процесса штамповки в облойную канавку, состоящую из узкого зазора — мостика — и расширенной части — магазина (рис. 31.2, а). По мере затекания металла в облойную канавку давление нарастает и заставляет металл плотно заполнять все, даже очень небольшие и неудобные для заполнения, элементы формы ручья штампа, обеспечивая хорошее формообразование поковки. Для создания облоя массу заготовки при штамповке в открытых штампах несколько увеличивают, отход металла в облой составляет в среднем 10–20 % от массы поковки.

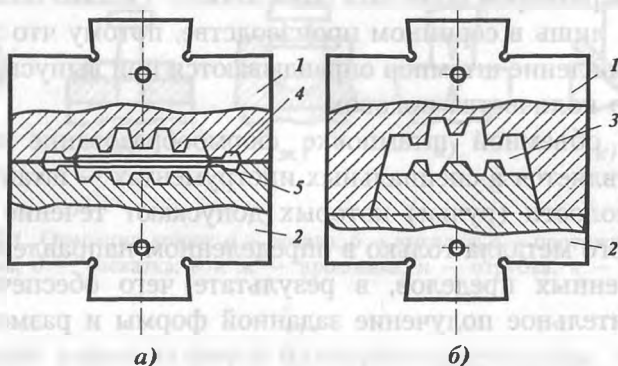


Рис. 31.2. Штамповка в открытом (а) и закрытом (б) штампах: 1 — верхняя половина штампа; 2 — нижняя половина штампа; 3 — конфигурация поковки; 4 — магазин; 5 — мостик

Штамповка в закрытых штампах является безоблойной (рис. 31.2, б).

Возможна холодная объемная штамповка — экономичный высокопроизводительный процесс изготовления небольших точных деталей из стали и цветных металлов. Холодной объемной штамповкой получают детали по 4—3-му классам точности с высокой чистотой поверхности, при этом металл упрочняется и его механические и физические свойства изменяются.

Основные операции холодной объемной штамповки — объемная формовка, выдавливание, калибровка, высадка и чеканка. Детали, изготавливаемые с применением этих операций, показаны на рис. 31.3.

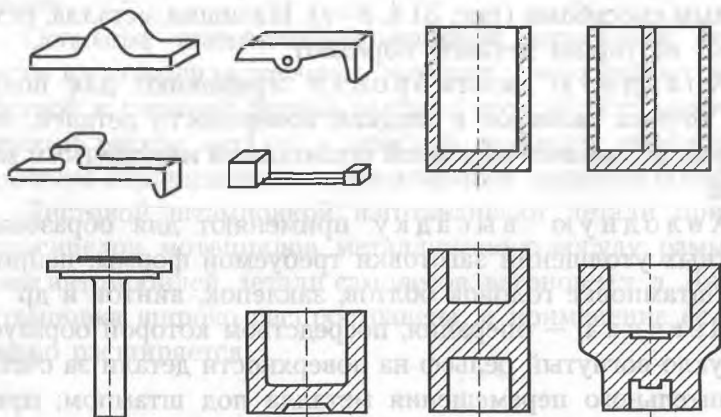


Рис. 31.3. Детали, изготавливаемые холодной объемной штамповкой

Объемная формовка (рис. 31.4, а) — операция, при которой деталь получают обжатием заготовки в открытом или закрытом штампе. Наиболее производительным методом объемной формовки является штамповка изделий из полосы с последующей обрезкой их на специальном штампе.

Холодное выдавливание — изготовление сплошных и полых тонкостенных изделий из толстой заготовки вы-

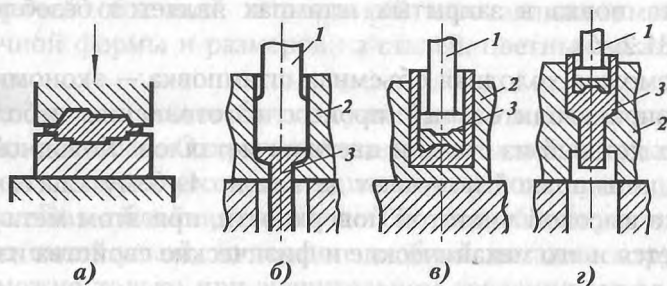


Рис. 31.4. Операции холодной объемной штамповки: 1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — изделие

давливанием металла в зазор между пуансоном и матрицей. Эту операцию выполняют прямым, обратным и комбинированным способами (рис. 31.4, б–г). Излишки металла, остающиеся на торцах деталей, обрезают.

Холодную калибровку применяют для получения точных размеров и гладкой поверхности деталей, изготовленных горячей объемной штамповкой или другими методами.

Холодную высадку применяют для образования местных утолщений заготовки требуемой формы, например при штамповке головок болтов, заклепок, винтов и др.

Чеканка — операция, посредством которой образуется выпукло-вогнутый рельеф на поверхности детали за счет незначительного перемещения металла под штампом; применяют в производстве монет, жетонов, медалей и др.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях для получения заготовок применима ковка?
2. Перечислите особенности объемной штамповки в открытых и закрытых штампах.
3. Назовите основные операции холодной объемной штамповки.

## Глава 32

## ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА

**32.1. Листовая штамповка — определение**

*Листовая штамповка* представляет собой метод изготовления плоских и объемных тонкостенных изделий из листового материала, ленты или полосы с помощью штампов на прессах или без применения прессов. Листовая штамповка может проводиться в холодном состоянии и с нагревом. Наиболее распространена холодная листовая штамповка из полос толщиной 0,1—5 мм. Горячая листовая штамповка производится, как правило, из полос толщиной >5 мм.

Основные преимущества листовой штамповки: возможность изготовления прочных, жестких, тонкостенных деталей простой и сложной формы, высокая производительность, экономный расход металла и простота процесса, относительная простота механизации и автоматизации процесса обработки.

Листовой штамповкой изготавливают детали приборов, велосипедов, мотоциклов, металлическую посуду, рамы и кузова автомобилей, детали самолетов, вагонов и т. д. Листовая штамповка широко распространена, и применение ее непрерывно расширяется.

**32.2. Разновидности листовой штамповки**

Все операции листовой штамповки можно классифицировать на разделительные и формоизменяющие.

К основным разделительным операциям относятся: *резка* — последовательное отделение части металла по прямой или кривой линии; *вырубка* — единовременное отделение материала от заготовки по замкнутому контуру, причем отделяемая часть является изделием; *пробивка* — получение отверстий материала по замкнутому контуру внутри детали (рис. 32.1, а; 32.2).

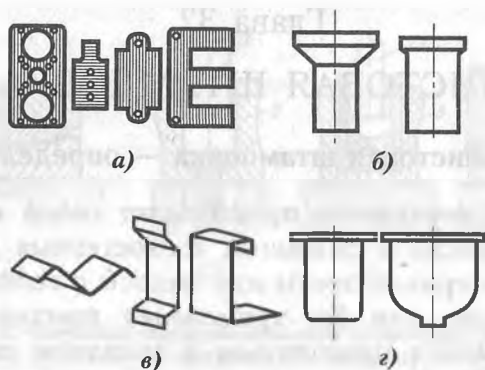


Рис. 32.1. Листовые штампованные детали, полученные вырубкой и пробивкой (а); отбортовкой (б); гибкой (в); вытяжкой и формовкой (г)

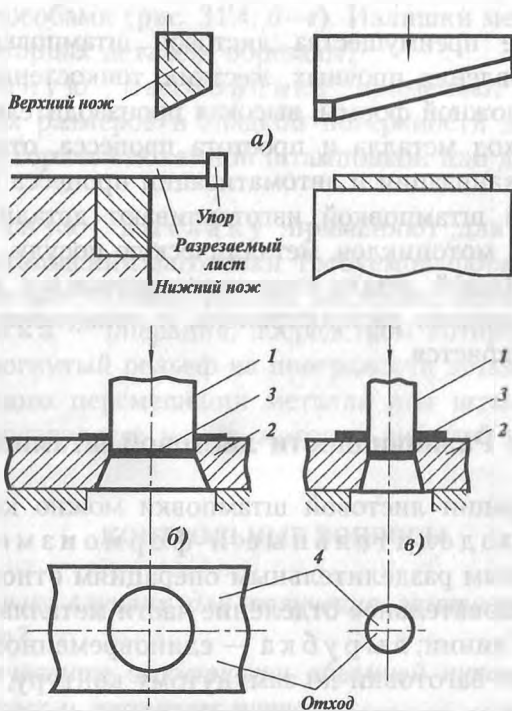


Рис. 32.2. Разделительные операции листовой штамповки: 1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — изделия или полуфабрикаты; 4 — отходы

К основным формоизменяющим операциям относятся правка, гибка, вытяжка, протяжка, отбортовка и формовка (рис. 32.1, б–г).

Правку применяют для устранения неровностей и искривлений плоских деталей после вырубки, пробивки, а также для исправления отдельных элементов формы деталей после гибки или других формоизменяющих операций. Так, плоские детали правят в штампах с гладкими плитами (рис. 32.3, а).

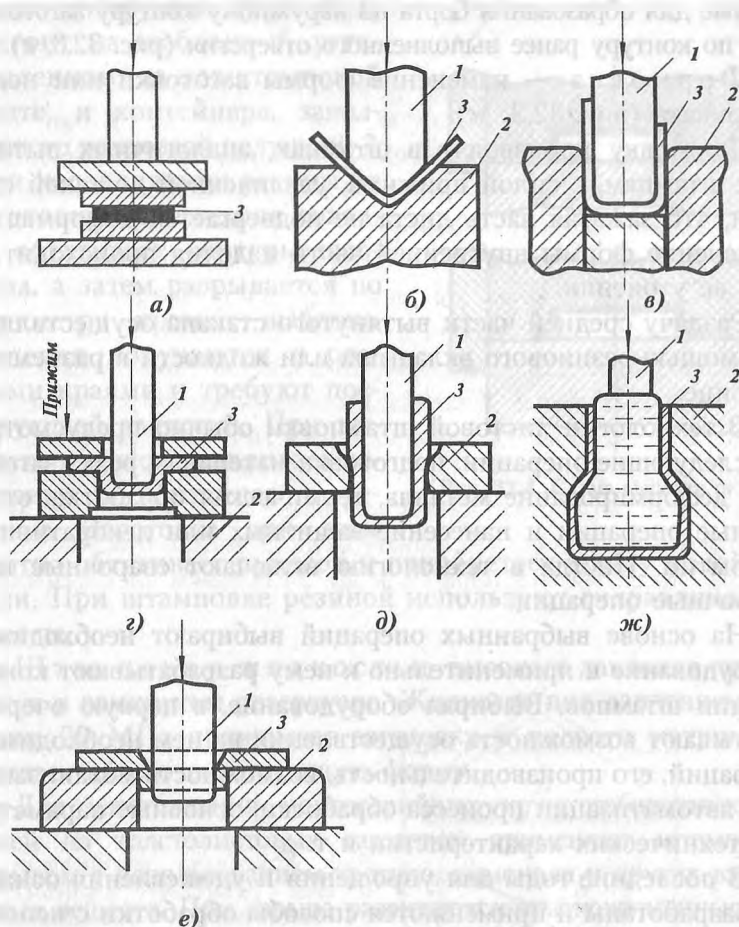


Рис. 32.3. Формоизменяющие операции листовой штамповки: 1 — пуансоны; 2 — матрицы; 3 — изделия или полуфабрикаты

Г и б к а бывает одноугловая (V-образная) и двухугловая (U-образная) (рис. 32.3, б, в), а также многоугловая.

В ы т я ж к а — операция, превращающая плоскую заготовку в полую деталь или полуфабрикат (рис. 32.3, г).

Протяжка — вытяжка с утонением. Эту операцию применяют для изготовления полых тонкостенных деталей (рис. 32.3, д).

Отбортовка и разбортовка — операции, осуществляемые для образования борта по наружному контуру заготовки или по контуру ранее выполненного отверстия (рис. 32.3, е).

Формовка — изменение формы заготовки или полуфабриката (рис. 32.3, ж).

Формовку производят в штампах, аналогичных вытяжным штампам, с силой прижима, увеличенной до такой степени, что зажатая часть листа не подвергается деформации. Изменение формы внутренней части изделия происходит за счет ее утонения.

Раздачу средней части вытянутого стакана осуществляют с помощью резинового вкладыша или жидкости в разъемной матрице.

В технологии листовой штамповки обычно предусмотрены следующие операции: подготовка материала, резка заготовок, деформирование металла, термическая обработка, отделочные операции и нанесение защитных или декоративных покрытий. Иногда в технологию включают сварочные или сборочные операции.

На основе выбранных операций выбирают необходимое оборудование и применительно к нему разрабатывают конструкции штампов. Выбирая оборудование, в первую очередь учитывают возможность осуществления на нем необходимых операций, его производительность, возможность механизации или автоматизации процесса обработки, основные параметры его технических характеристик и т. д.

В последние годы для упрощения и удешевления оснастки разработаны и применяются способы обработки с использованием в качестве штампов эластичных материалов (например, резины).

Штамповку резиной применяют для выполнения вырубki, пробивки, гибки, отбортовки и вытяжки при изготовлении сравнительно крупных деталей из пластичных материалов толщиной до 2 мм. При вырубке и пробивке инструмент (рис. 32.4) состоит из шаблона 1, установленного на подштамповой плите, и контейнера, заполненного резиновой подушкой 3. При надавливании резины на заготовку 2 последняя сначала обтягивает контуры шаблона, а затем разрывается по периметру кромки шаблона. Изделия получают с ровными краями и требуют последующей зачистки. При вытяжке пуансон вдавливает заготовку в контейнер с резиной. Заготовка при этом плотно обтягивает пуансон и приобретает форму полый детали. При штамповке резиной используют гидравлические прессы.

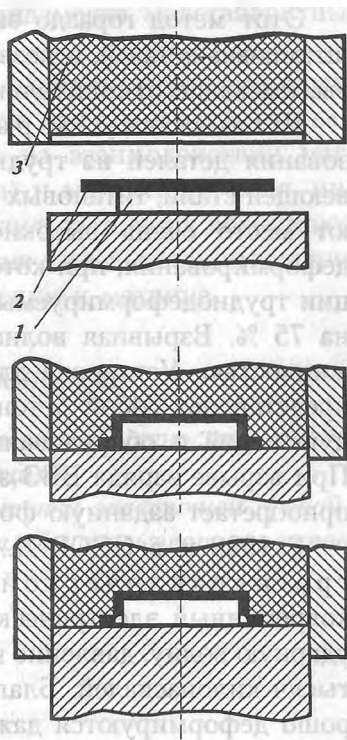


Рис. 32.4. Схема вырезки резиной

Штамповку жидкостью высокого давления производят в замкнутом резервуаре. Жидкость под давлением порядка 20 МПа прижимает заготовку к полости матрицы и придает ей соответствующую форму.

Для изготовления мелкосерийных крупногабаритных деталей из толстолистовых заготовок применяют штамповку взрывом с использованием тротила, аммонала и других взрывчатых веществ. При взрыве развиваются кратковременные высокие давления, под действием которых заготовка принимает форму штампа.



Этот метод гораздо экономичнее, чем обычная листовая штамповка деталей, и позволяет обрабатывать металлы и сплавы, имеющие относительное удлинение 10–14 %.

Штамповку взрывом применяют для формообразования деталей из труднодеформируемых сплавов (нержавеющей стали, титановых сплавов и т. п.). В этом случае имеют место очень высокие удельные давления и скорости деформирования, при которых степень допустимой деформации труднодеформируемых сплавов увеличивается примерно на 75 %. Взрывная волна передается заготовке газами или жидкостью. Установка для штамповки взрывом в жидкости представляет собой бетонную камеру (рис. 32.5), заполненную водой и оборудованную грузоподъемным устройством. При взрыве заряда ВВЗ заготовка прижимается к матрице и приобретает заданную форму.

В 1938 г. в СССР Л.А. Юткин разработал метод электрогидравлической штамповки металла. Кратковременный электрический разряд в жидкой среде создает ударную волну, давление которой достигает нескольких сотен тысяч килопаскалей. Благодаря всестороннему давлению хорошо деформируются даже малопластичные материалы. Изделия имеют высокую точность размеров и не требуют дополнительной обработки. Этим методом производят детали из листового материала, объемные мелкие детали для самолетов, автомобилей, фотоаппаратов и др. Установки электрогидрав-

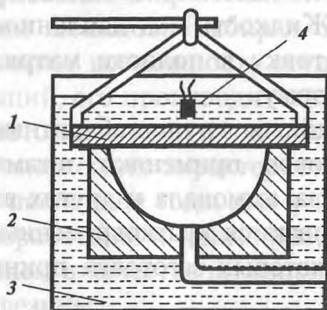


Рис. 32.5. Схема штампования в воде (штамповка взрывом): 1 — заготовка; 2 — матрица; 3 — емкость с водой; 4 — заряд взрывчатого вещества

лической штамповки не требуют фундамента, малогабаритны, легко перемещаются.

Для тонкостенных деталей небольших размеров (мембран, сильфонов) с успехом применяют магнитопульсную штамповку, основанную на взаимодействии магнитных полей катушки (соленоида) и магнитного поля, индуцированного в заготовке, в результате чего возникают значительные электромеханические силы, отталкивающие заготовку от соленоида в направлении к матрице.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Какие операции листовой штамповки относят к разделительным и формоизменяющим?*
2. *Назовите особенности штамповки эластичной средой.*
3. *Для изготовления каких деталей используют штамповку взрывом?*

---

## Раздел IX

# ОСНОВЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### Глава 33

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Сваркой* называется технологический процесс получения неразъемных соединений. Сварку применяют для соединения однородных и разнородных металлов и сплавов, металлов с некоторыми неметаллическими материалами (керамикой, графитом, карборундом, стеклом и др.), а также пластмасс.

Впервые сварка металлов плавлением была осуществлена в России в 1881 г., когда русский инженер Н.Н. Бенардос использовал электрическую дугу, открытую в 1802 г. В.В. Петровым, для сварки и резки металлов с применением неплавящегося угольного электрода. В 1888 г. другой русский инженер — Н.Г. Славянов разработал способ дуговой сварки плавящимся металлическим электродом и изобрел первый автомат для сварки под флюсом.

В 1887 г. Н.Н. Бенардос запатентовал устройство для точечной контактной сварки, в котором в качестве электродов были использованы угольные стержни.

В 1895 г. химик Ле Шателье получил ацетилено-кислородное пламя, а в 1902 г. инженеры Пикари и Фуше создали промышленные газовые горелки.

Сварка — экономичный, высокопроизводительный и в значительной степени механизированный технологический процесс; ее широко применяют практически во всех отраслях машиностроения и строительной промышленности. Сварку как один из основных технологических процессов используют в авиации, ракето- и судостроении (при изготовлении цельносварных корпусов судов), при строительстве домн, резервуаров для хранения жидкости и газов, нефти и газопроводов, в транспортном машиностроении (при изготовлении цистерн, цельнометаллических вагонов), в энергомашиностроении (при производстве котлов, паровых и гидравлических турбин и многих других машин и конструкций). Замена деталей машин на прокатно-сварные или комбинированные, включающие литые, кованные и штампованные элементы, соединенные сваркой, является экономически целесообразной, особенно если конструкция имеет сложную геометрическую форму, а также при единичном и мелкосерийном производстве. Применение сварки в этих случаях приводит к экономии металла, сокращению трудоемкости, снижению себестоимости и улучшению условий труда.

### **33.1. Физические основы получения сварного соединения**

Физическая сущность процесса сварки заключается в образовании прочных связей между атомами или молекулами на поверхности соединяемых заготовок. Для получения сварного соединения требуется сблизить соединяемые поверхности на расстояния, в пределах которых начинают действовать межатомные силы сцепления, и создать необходимые для возникновения межатомных или межмолекулярных связей условия: определенные температуру, время контакта и качество поверхности.

Таким образом, сварочный процесс, как и пайка, направлен на получение монолитного соединения, которое возника-

ет в случае установления связей между атомами свариваемых деталей на границе их раздела, аналогично связям, действующим в твердом теле.

Определения понятия сварки могут быть различными — в зависимости от основных признаков, которые в данном определении превалируют. Например, сварка определяется как процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании. В данном определении указывается и на физическую сущность процесса, и на технологические принципы его реализации.

Наиболее общим определением процесса сварки является ссылка на ее термодинамическую сущность: сварка — это процесс получения монолитного соединения материалов за счет термодинамически необратимого превращения тепловой и механической энергии и вещества в стыке.

Процесс сварки включает в себя две стадии: образование физического контакта между соединяемыми деталями и возникновение электронного взаимодействия между их поверхностями. Далее происходит развитие диффузионных процессов.

В идеальном случае сварка должна происходить после того, как соединяемые поверхности сблизилась на межатомные расстояния. На рис. 33.1 показано, каким образом изменяются межатомные силы взаимодействия (притяжения и отталкивания), а также потенциальная энергия по мере сближения атомов. Как видно, на первой стадии сближения силы притяжения  $P_{пр}$  больше сил отталкивания  $P_{от}$  (рис. 33.1, *а*). Затем начинается процесс взаимного перекрытия электронных оболочек атомов и наблюдается резкое возрастание сил отталкивания.

При  $r = r_0$  силы притяжения и отталкивания сравняются. В дальнейшем сближение атомов будет сопровождаться интенсивным возрастанием сил отталкивания.

В идеальном случае атомы после некоторых колебательных движений должны самопроизвольно установиться на расстоянии  $r = r_0$ , когда  $P_{пр} - P_{от} = 0$ .

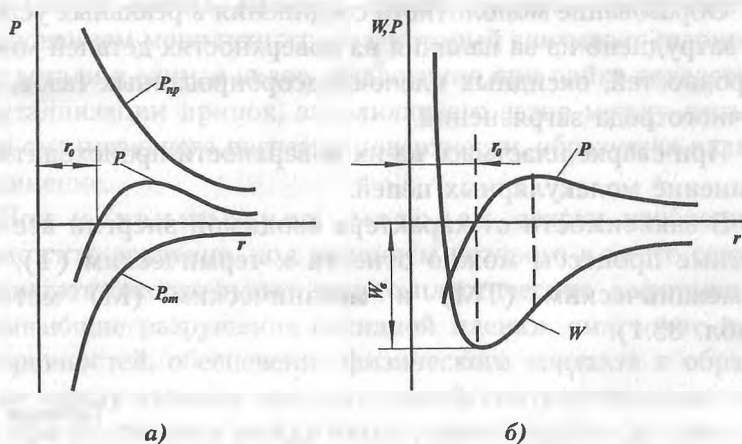


Рис. 33.1. Характер изменения сил взаимодействия (а) и потенциальной энергии (б) при сближении атомов

В этот момент величина потенциальной энергии системы  $W$  будет минимальна, что характерно для устойчивого равновесия (рис. 33.1, б). Стремление системы к минимуму свободной энергии соответствует второму закону термодинамики, а минимум потенциальной энергии  $W_{\text{в}}$  — энергии ван-дер-ваальсовой связи. Если энергию поверхности монокристалла принять за  $W_{\text{п}}$ , то после соединения монокристаллов между ними устанавливается одна поверхность раздела с энергией  $W_{\text{в}}$ . Эта энергия меньше суммарной энергии двух поверхностей, т. е.  $W_{\text{в}} \ll 2W_{\text{п}}$ .

Рассмотренная схема образования монолитного соединения при сварке, не противоречащая второму закону термодинамики, возможна, однако при наличии некоторой энергии активации, а не только в результате сближения соединяемых поверхностей. Поэтому в любом случае для сварки обязательно потребуется затратить энергию активации  $W_{\text{п}}$ , например в виде теплоты (термическая активация) или упругопластической деформации (механическая активация).

Образование монолитного соединения в реальных условиях затруднено из-за наличия на поверхностях деталей микронеровностей, оксидных пленок, адсорбированных газов, различного рода загрязнений.

При сварке пластмасс на их поверхности происходит объединение молекулярных цепей.

В зависимости от характера вводимой энергии все сварочные процессы можно отнести к термическим (Т), термомеханическим (ТМ) и механическим (М) методам (табл. 33.1).

Таблица 33.1

### Классификация видов сварки

	Класс		
	термический	термомеханический	механический
Виды сварки	Дуговая	Контактная	Холодная
	Электрошлаковая	Диффузионная	Взрывом
	Электронно-лучевая	Индукционно-прессовая	Ультразвуковая
	Плазменная	Газопрессовая	Трепием
	Ионно-лучевая	Дугонпрессовая	Магнитно-импульсная
	Тлеющим разрядом	Шлакопрессовая	
	Световая	Термокомпрессионная	
	Индукционная	Печная	
	Газовая		
	Термитная		
	Литейная		

При термических методах сварки с помощью внешнего источника нагрева кромки расплавляются, образуя так называемую сварочную ванну. Расплавление металла способствует его объединению в единое целое.

После прекращения поступления теплоты к сварочной ванне (удаление источника теплоты или его отключение) происходят быстрое охлаждение и последующая кристаллизация расплавленного металла при максимальном теплоотво-

де в стенки ванны. Процесс кристаллизации заканчивается образованием монокристаллического шва, который связывает свариваемые детали в единое целое. Аналогично при пайке вследствие кристаллизации припоя, заполняющего зазор между деталями и смачивающего нагретые поверхности, образуется паяное соединение.

При механических методах сварки необходимо приложить давление, под влиянием которого в месте сварки возникают значительные упруго-пластические деформации, вызывающие разрушение оксидной пленки, смягчение микронеровностей, обеспечение физического контакта и образование между атомами прочных связей, соответствующих связям при расстоянии между ними, равном параметру кристаллической решетки.

При термомеханических методах сварки металл в месте соединения деталей нагревается от внешних источников теплоты до температуры плавления или пластического состояния. Нагревание позволяет снизить удельное давление, уменьшить величину минимальной относительной деформации, необходимой для сварки.

В соответствии с термодинамическим определением процессов сварки основными признаками для их классификации должны служить форма вводимой энергии, наличие давления и вид инструмента — носителя энергии, на основании чего классифицируют виды сварки.

Кроме того, сварку классифицируют и по другим признакам:

- по способу защиты металла в зоне сварки (сварка на воздухе, в вакууме, в защитном газе, под флюсом и т. п.);
- по непрерывности сварки (непрерывные и импульсные процессы);
- по степени механизации (ручная, механизированная, автоматическая);
- по технологическим отличиям (вид электрода или дуги, род сварочного тока, полярность, тип и количество электрических дуг и т. п.).



### 33.2. Свариваемость

*Свариваемость* — технологическое свойство материалов (металлов) или их сочетаний образовывать в процессе сварки соединения, отвечающие конструктивным и эксплуатационным требованиям к ним. Это определение следует отличать от свариваемости как простой возможности получать соединение. Свариваемость — сложное, комплексное свойство материала. Она в основном определяется типом и свойством структуры, возникающей в сварном соединении при сварке. При сварке однородных металлов и сплавов в месте соединения, как правило, образуется структура, идентичная или близкая структуре соединяемых заготовок. При сварке разнородных материалов в зависимости от различия их физико-химических свойств в месте соединения образуется твердый раствор с решеткой одного из материалов либо химическое или интерметаллидное соединение с решеткой, резко отличающейся от решеток исходных материалов. Механические и физические свойства твердых растворов (особенно химических или интерметаллидных соединений), например твердость, пластичность, электропроводность и другие свойства, могут значительно отличаться от свойств соединяемых материалов. Различие свойств может также вызываться образованием закалочных структур в зоне сварного соединения материалов вследствие локального высокотемпературного сварочного нагрева и быстрого охлаждения. Наличие хрупких и твердых структур в сварном соединении в условиях действия сварочных напряжений в ряде случаев приводит к возникновению трещин в шве или в околошовной зоне. В последнем случае материалы относят к категории удовлетворительно или плохо сваривающихся.

По мере совершенствования технологии сварки и разработки новых способов сварки с использованием интенсивных высокотемпературных источников теплоты, высоких давлений, глубокого вакуума, промежуточных сред и материалов и т. п. удастся получать работоспособные в отношении заданных свойств соединения плохо сваривающихся

материалов. При этом возможна также сварка некоторых сочетаний материалов, ранее считавшихся практически несвариваемыми.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Какие основные причины препятствуют образованию монолитного сварного соединения и каковы способы их устранения?*
2. *По каким признакам и как классифицируют методы сварки?*
3. *В чем сущность технологического свойства свариваемости?*

## Глава 34

# ТЕРМИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ

### 34.1. Ручная дуговая сварка

Источником теплоты при дуговой сварке является электрическая дуга, которая горит между двумя электродами, при этом часто один электрод представляет собой свариваемую заготовку. В зависимости от материала и числа электродов, а также способа включения электродов и заготовки в цепь электрического тока различают следующие схемы дуговой сварки: сварка неплавящимся (угольным или вольфрамовым) электродом 1 дугой прямого действия 2 (рис. 34.1, а), при которой соединение выполняется путем расплавления только основного металла 3, либо с применением присадочного металла 4; сварка плавящимся (металлическим) электродом 1 дугой прямого действия 2 (рис. 34.1, б) с одновременным расплавлением основного металла 3 и электрода, который поставляет сварочную ванну жидким металлом; сварка косвенной дугой 5 (рис. 34.1, в), горящей между двумя, как правило,

неплавящимися электродами 1, при этом основной металл 3 нагревается и расплавляется теплотой столба дуги; сварка трехфазной дугой 6 (рис. 34.1, г), при которой дуга горит между электродами 1, а также между электродом и основным металлом 3.

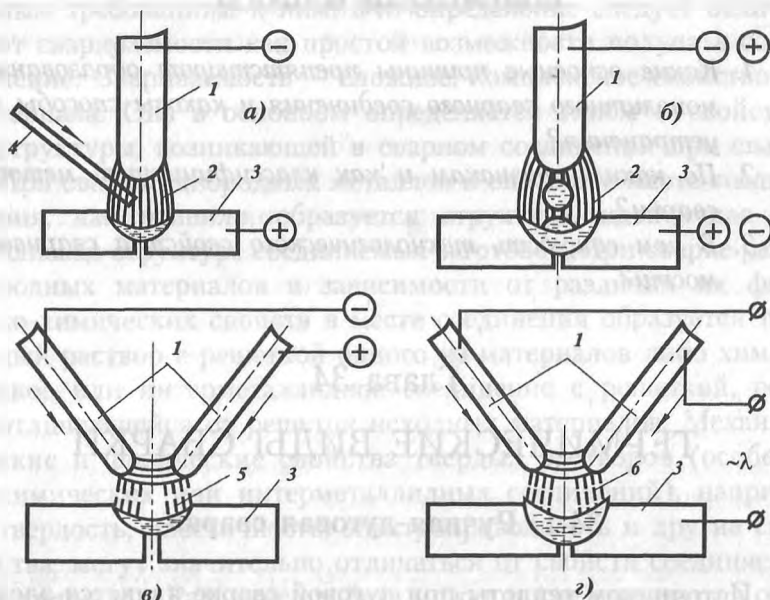


Рис. 34.1. Схемы электродуговой сварки

При применении постоянного тока различают сварку на прямой и обратной полярности. В первом случае электрод подключается к отрицательному полюсу и служит катодом, во втором — к положительному и служит анодом.

## 34.2. Понятие об электрической дуге и ее свойствах

Дуга — мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и непрерывно поддерживается в процессе ее горения.

Процесс зажигания дуги в большинстве случаев включает в себя три этапа: короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3—6 мм и возникновение устойчивого дугового разряда. Короткое замыкание (рис. 34.2, *а*) выполняют для разогрева торца электрода 1 и заготовки 2 в зоне контакта с электродом. После отвода электрода (рис. 34.2, *б*) с его разогретого торца (катода) под действием электрического поля начинается эмиссия электронов 3. Столкновение быстро движущихся по направлению к аноду электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации 4. В результате дуговой промежуток становится электропроводным. Процесс зажигания дуги заканчивается возникновением устойчивого дугового разряда (рис. 34.2, *в*).

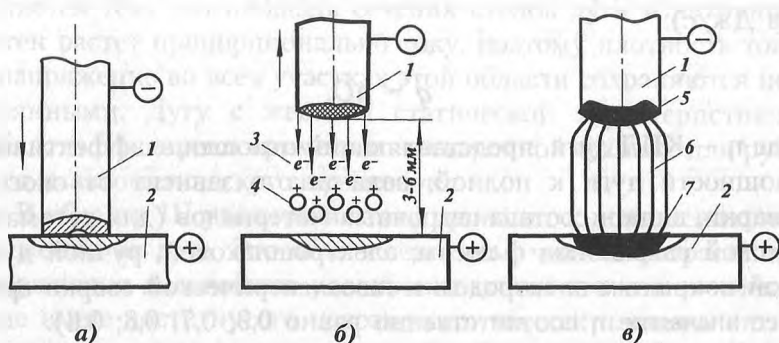


Рис. 34.2. Схема процесса зажигания дуги

Возможно зажигание дуги без короткого замыкания и отвода электрода с помощью высокочастотного электрического разряда через дуговой промежуток, обеспечивающего его первоначальную ионизацию. Для этого в сварочную цепь подключают источник высокочастотного переменного тока высокого напряжения (осциллятор). Этот способ применяют для зажигания дуги при сварке неплавящимся электродом.

Электрическая дуга — концентрированный источник теплоты с очень высокой температурой. Температура столба дуги 6

достигает 6000—7000 °С, а температура катодного 5 и анодного 7 пятен стальных электродов — 2400 и 2600 °С (рис. 34.2, в).

Полная тепловая мощность дуги (в Дж/с):

$$Q = KI_{\text{св}} U_{\text{д}},$$

где  $K$  — коэффициент несинусоидальности напряжения и тока (для постоянного тока равен единице, для переменного тока — 0,7—0,97);  $I_{\text{св}}$  — сварочный ток, А;  $U_{\text{д}}$  — напряжение дуги, В.

Однако не вся мощность дуги полностью расходуется на нагрев и расплавление электрода и основного металла, часть ее теряется в результате теплоотдачи в окружающую среду.

Часть мощности дуги, расходуемая на нагрев заготовки, называется *эффективной тепловой мощностью сварочной дуги* (в Дж/с):

$$q = \eta Q,$$

где  $\eta$  — КПД дуги, представляющий отношение эффективной мощности дуги к полной; величина  $\eta$  зависит от способа сварки, вида и состава сварочных материалов (для автоматической сварки под флюсом, электрошлаковой, ручной дуговой покрытым электродом и газосварочной сварки среднее значение  $\eta$  соответственно равно 0,9; 0,7; 0,8; 0,6).

Для обеспечения устойчивости горения сварочной дуги необходимо, чтобы ее основные параметры (ток и напряжение) находились в определенной зависимости друг от друга.

Графическое изображение этой зависимости при работе в статическом режиме (состояние установившегося равновесия) называют *статической* или *вольт-амперной* характеристикой дуги (рис. 34.3). Кривую статической характеристики дуги можно разделить на три области. В области I увеличение тока до 80 А вызывает резкое падение напряжения на дуге. Дугу с падающей характеристикой практически не используют в сварочной технике вследствие ее малой устойчивости.

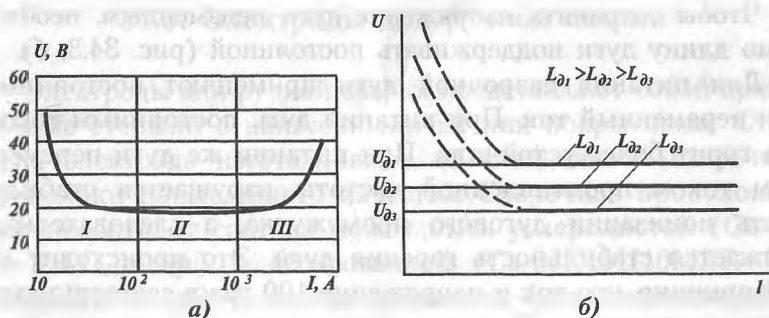


Рис. 34.3. Статическая (вольт-амперная) характеристика дуги (а) и зависимость напряжения дуги  $U_d$  от ее длины  $L_d$  (б)

В области II статическая характеристика носит жесткий характер. Увеличение тока от 80 до 800 А не изменяет напряжение дуги. Оно практически остается постоянным. Это объясняется тем, что площадь сечения столба дуги и активных пятен растет пропорционально току, поэтому плотность тока и напряжение во всех участках этой области сохраняются постоянными. Дугу с жесткой статической характеристикой (область II) широко применяют в сварочной технике для ручного и автоматического процессов.

В области III увеличение тока приводит к повышению напряжения на дуге. Это объясняется тем, что без возрастания напряжения дальнейшее увеличение плотности тока в электроде выше достигнутого невозможно, так как площадь пятна на торце электрода становится равной площади этого торца. Таким образом, дальнейшее повышение тока, проходящего через электрод, в данных условиях возможно только при повышении напряжения на дуге. Этим и объясняется возрастающая форма статической характеристики дуги в области III. Дугу с возрастающей статической характеристикой широко используют в автоматических и полуавтоматических процессах при сварке под флюсом и в защитных газах.

Каждому участку характеристики дуги соответствует определенный характер переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну: I и II — крупнокапельный, III — мелкокапельный или струйный.

Чтобы сохранять напряжение дуги неизменным, необходимо длину дуги поддерживать постоянной (рис. 34.3, б).

Для питания сварочной дуги применяют постоянный или переменный ток. При питании дуги постоянным током она горит более устойчиво. При питании же дуги переменным током промышленной частоты нарушается стабильность ионизации дугового промежутка, а следовательно, снижается стабильность горения дуги. Это происходит по той причине, что ток и напряжение 100 раз в секунду изменяют направление. При перемене знака, т. е. при нулевом значении тока, дуга гаснет, температура дугового промежутка и активных пятен снижается и происходит деионизация газов столба дуги.

Следовательно, в условиях пониженной ионизации дугового промежутка зажигание дуги может происходить в начале каждого полупериода только при повышенном напряжении повторного зажигания дуги. Пик зажигания (напряжение зажигания в начале каждого полупериода) всегда выше стационарного напряжения дуги. С увеличением силы тока и введением токов высокой частоты горение дуги улучшается, высокая температура и большая концентрация теплоты сварочной дуги позволяют почти мгновенно расплавлять небольшие объемы металлов электрода и изделия при сварке.

На нагрев изделия при прямой полярности (плюсовая клемма источника тока присоединена к детали, а минусовая — к электроду) расходуется 50 % тепловой мощности дуги, на нагрев электрода — 30 %, и потери в окружающую среду составляют примерно 20 %. Таким образом, 75—85 % всей мощности дуги расходуется на нагрев и расплавление металла. Различие тепловыделения на катоде и аноде используют при решении технологических задач. Сварку изделий, требующих большого подвода теплоты для нагрева кромок, выполняют на прямой полярности, а сварку тонколистовых конструкций и конструкций из нержавеющей и жаропрочных сталей осуществляют при обратной полярности: плюсовая клемма присоединена к электроду, а минусовая — к детали.

### 34.3. Электроды для ручной сварки

Электроды для ручной сварки представляют собой провололочные стержни с нанесенными на них покрытиями. Стержень электрода изготавливают из специальной сварочной проволоки повышенного качества. Сварочная проволока в зависимости от состава может быть углеродистой (Св-08, Св-ЮГС и др.) и легированной (Св-06Х19Н10М5Т, Св-07Х25Н13 и др.). В марках проволоки буквосочетание «Св» означает «сварочная», затем следует марка сталей.

Сварочную проволоку используют для изготовления стержней покрытых электродов, а также при автоматической дуговой сварке под флюсом, сварке плавящимся электродом в среде защитных газов и как присадочный материал при сварке неплавящимся электродом и газовой сварке (рис. 34.4).

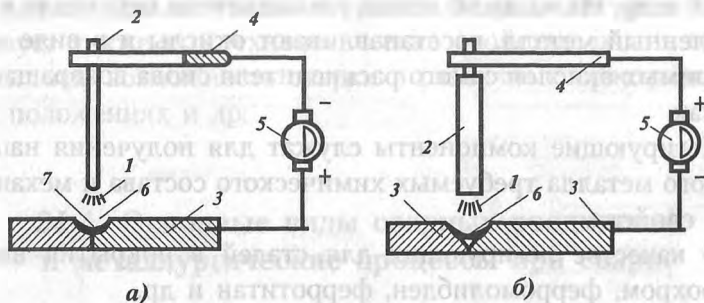


Рис. 34.4. Схема ручной электродуговой сварки: 1 — электрическая дуга; 2 — металлический электрод; 3 — изделие; 4 — держатель; 5 — генератор тока; 6 — сварочная ванна; 7 — присадка

Электроды классифицируют по следующим признакам: типу покрытия, химическому составу жидкого шлака, назначению.

В состав покрытия электродов входят стабилизирующие, газообразующие, шлакообразующие, раскисляющие, легирующие и связующие компоненты.

Стабилизирующие компоненты увеличивают степень ионизации дугового промежутка и повышают стабильность горения



дуги. В качестве стабилизирующих веществ применяют соединения калия, натрия, кальция, бария. За счет газообразующих составляющих при нагреве создается зона защитных газов вокруг дуги. К газообразующим относятся органические вещества и карбонаты (крахмал, мрамор, магнезит). Шлакообразующие компоненты при расплавлении образуют жидкий шлак на поверхности сварочной ванны. Шлак служит для защиты расплавленного металла от воздействия воздуха, а также является средой, через которую осуществляется раскисление и легирование наплавленного металла. Для получения шлака в покрытия вводят марганцевую руду, полевого шпат, плавиковый шпат, мрамор, рутил и др. Раскисляющие компоненты предназначены для восстановления окислов, находящихся в сварочной ванне. В качестве раскислителей в ряде случаев применяют ферросплавы: ферромарганец, ферросилиций и др. Из жидкого шлака раскислители переходят в расплавленный металл, восстанавливают окислы и в виде нерастворимых окислов самого раскислителя снова возвращаются в шлак.

Легирующие компоненты служат для получения наплавленного металла требуемых химического состава и механических свойств.

В качестве легирующих для сталей в покрытия вводят феррохром, ферромolibден, ферротитан и др.

В качестве связующего в основном применяют жидкое натриевое стекло. Жидкое стекло связывает порошкообразные составляющие покрытия в обмазочную массу, а после просушивания и прокалки придает покрытию электродов необходимую прочность.

По химическому составу жидких шлаков электродные покрытия можно подразделить на кислые и основные. В шлаках кислых покрытий преобладает окись кремния  $\text{SiO}_2$ . Кислые шлаки обладают хорошими раскисляющими свойствами, но через них нельзя в широких пределах легировать наплавленный металл в связи с интенсивным выгоранием легирующих примесей. В состав кислых покрытий входят марганцевая ру-

да, полевого шпат, рутил и т. п. Электроды с кислыми покрытиями применяют для сварки углеродистых и низколегированных сталей. В шлаках основных покрытий преобладает окись кальция ( $\text{CaO}$ ). Основные шлаки обеспечивают достаточно хорошее раскисление и позволяют вводить в металл шва значительные количества легирующих элементов. В состав основных покрытий входят мрамор, плавиковый шпат ( $\text{CaF}_2$ ) и ферросплавы. Электроды с основным покрытием используют для сварки легированных и высоколегированных сталей.

Электроды для сварки конструкционных сталей подразделяют на типы (Э34, Э42) и марки. Цифры в обозначении типа электрода обозначают прочность наплавленного металла.

Важной характеристикой электрода является его марка, которая определяет состав покрытия. Марка электрода характеризует также его технологические свойства: род и полярность тока, возможность сварки в различных пространственных положениях и др.

#### **34.4. Основные виды сварных соединений и металлургические процессы при сварке**

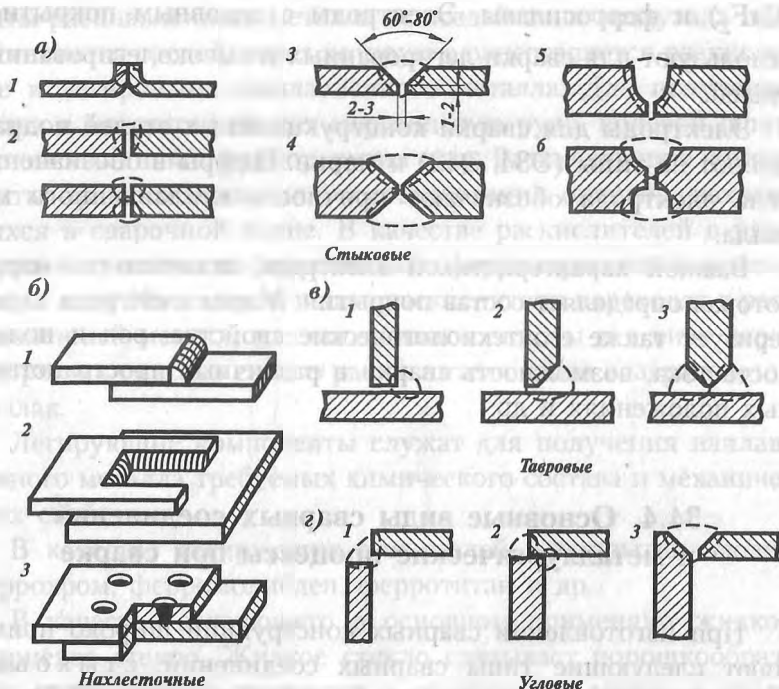
При изготовлении сварных конструкций широко применяют следующие типы сварных соединений: стыковые, нахлесточные, тавровые, угловые (рис. 34.5).

Стыковые соединения имеют преимущества перед другими типами по прочности и технико-экономическим показателям.

Шов, соединяющий элементы стыкового соединения, называют *стыковым*, а таврового и нахлесточного — *угловым* или *валиковым*. В зависимости от числа проходов (слоев), необходимых для получения расчетного сечения шва, различают однопроходный (однослойный) и многопроходный (многослойный) стыковой и угловой швы.

Шов, соединяющий заготовки по всей их ширине, называют *сплошным*; шов, где сваренные участки чередуются с несваренными, — *прерывистым*.

Перед сваркой элементы конструкций подвергают соответствующей подготовке. Виды подготовки зависят от мате-



**Рис. 34.5.** Типы сварных соединений: *а* — стыковые: 1 — отбортовочное; 2 — без разделки кромок; 3 — V-образная разделка кромок; 4 — X-образная разделка кромок; 5 — U-образная разделка кромок односторонняя; 6 — U-образная разделка кромок двусторонняя; *б* — нахлесточные: 1 — с односторонним лобовым швом; 2 — прорезное с односторонним лобовым и фланговыми швами; 3 — заклепочное; *в* — тавровые: 1 — с односторонним фланговым швом; 2 — то же, с односторонней разделкой кромок; 3 — с двусторонним фланговым швом и двусторонней разделкой кромок; *г* — угловые: 1 — с односторонним фланговым швом; 2 — то же, с двусторонними фланговыми швами; 3 — с V-образной разделкой кромок

риала конструкции, его толщины, способа сварки, а также от технологических особенностей свариваемого изделия. Основными видами подготовки кромок являются угол раскрытия, величина притупления и зазор. Угол раскрытия и зазор необходимы для обеспечения провара всего сечения, а притупление предотвращает сквозное проплавление (прожог). Подготовка кромок осуществляется на металлорежущих станках или на газорежущих машинах (кислородных, плазменных). Конструктивные элементы подготовки кромок изделия для ручной электродуговой сварки регламентированы ГОСТом. Наиболее распространенные виды подготовки кромок при ручной электродуговой сварке приведены на рис. 34.5.

Сварные соединения желательно иметь равнопрочными основному металлу при всех температурах эксплуатации и при всех видах нагрузок (статических, ударных и вибрационных). Конструкции, в которых сварные соединения равнопрочны основному металлу, являются наиболее рациональными. Однако на практике достичь этого весьма сложно и не всегда удается в основном из-за того, что при сварке плавлением в результате специфических особенностей процесса (кратковременность, высокие температуры и быстрое охлаждение) кроме сварного шва образуются также зоны термического влияния. Их строение приведено на рис. 34.6 на примере малоуглеродистой стали. Сам шов — наплавленный металл 1 и зоны неполного расплавления — имеет дендритное строение, характерное для литого металла; в связи с высокой скоростью охлаждения в зернах участка 2 может произойти закалка, металл этого участка обладает повышенной хрупкостью и низкими механическими свойствами. Кроме того, в зону термического влияния входят участки с мелкозернистой нормализованной структурой 3; с неполной перекристаллизацией 4 (температура нагрева лежит между  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ ); с рекристаллизованным зерном 5 и зона синеломкости, характеризующаяся повышенной хрупкостью.

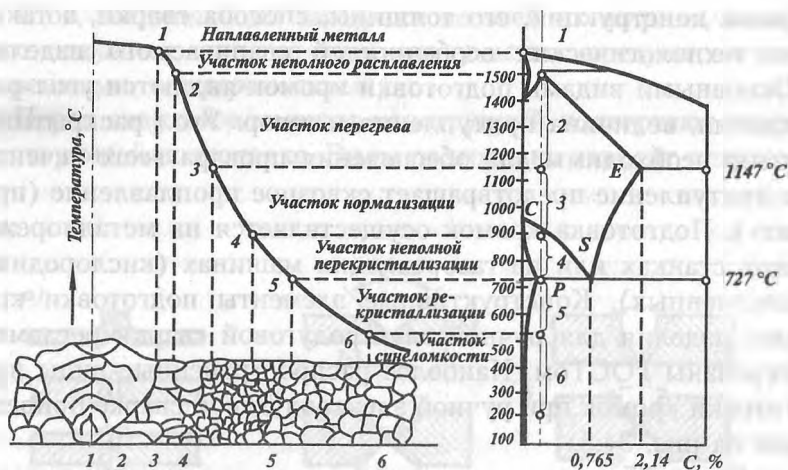


Рис. 34.6. Изменение структуры металла в зоне термического влияния при сварке низкоуглеродистой стали

Неравномерное распределение температур при сварке и другие сопутствующие физико-химические процессы, вызванные нагревом металла в месте соединения элементов конструкции, затрудняют получение свойств металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), близких к свойствам металла изделия. Шов представляет собой литой сплав, состоящий из основного металла (изделия) и присадочного (электрод), а ЗТВ — околосшовный участок металла, нагретый в процессе сварки от 100 °С до температуры плавления.

Структура зоны термического влияния и ее ширина зависят от способа и режима сварки, химического состава и толщины свариваемого изделия.

Участок 5 называется *участком рекристаллизации*. Здесь происходит сращивание раздробленных зерен металла, поступившего на сварку после обработки его давлением (прокат, штамповка, ковка и др.). При сварке изделий из литья рекристаллизации не наблюдается. Для металлов и сплавов, склонных к старению, необходимо учитывать снижение пластичности на этом участке и снижение работоспособности конструкции.

За участком 5 располагается последний участок 6 с нагревом от 100 до 500 °С. Этот участок не претерпевает видимых структурных изменений и по своим свойствам практически не отличается от металла изделия. Называют его *участком синеломкости*.

### 34.5. Оборудование для ручной электродуговой сварки

Источником питания дуги постоянным током являются генераторы и выпрямители, а источниками питания переменным током — сварочные трансформаторы. Если источник предназначен для питания одной дуги, то его называют *однопостовым*, а если от него питаются несколько дуг — *многопостовым* (рис. 34.7, а).

Генераторы постоянного тока могут быть стационарными и передвижными с приводом от электрического двигателя или двигателя внутреннего сгорания. Генератор вместе с двигателем образуют сварочный аппарат.

Однопостовые сварочные генераторы постоянного тока имеют падающую внешнюю вольт-амперную характеристику и хорошие динамические свойства. Они имеют ступенчатое регулирование сварочного тока, производимое смещением по коллектору или включением различного числа секций из обмоток. Плавное регулирование в пределах каждой ступени осуществляется с помощью реостата.

Многопостовые генераторы имеют жесткую вольт-амперную характеристику. Получение падающей вольт-амперной характеристики осуществляется на каждом сварочном посту. Регулирование тока достигается включением в цепь каждого поста (дуги) балластного реостата.

Кроме того, питание сварочной дуги можно осуществлять постоянным током от выпрямительных установок, собранных из полупроводниковых элементов. По сравнению с генераторами они более просты в эксплуатации, экономичны, имеют меньшую массу и габариты.

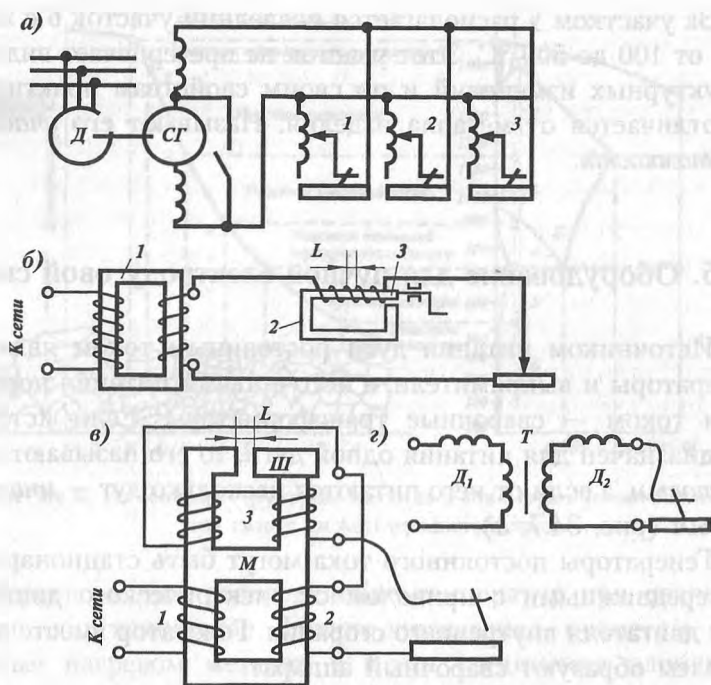


Рис. 34.7. Схемы питания сварочных постов: *а* — от многопостового генератора: Д — синхронный двигатель; СГ — сварочный генератор; 1 — 3 — сварочные посты; *б* — от трансформатора с отдельной реактивной катушкой; *в* — от комбинированного трансформатора: 1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка; 3 — реактивная обмотка; *з* — схема замещения реального трансформатора с развитым магнитным рассеянием

Динамические свойства выпрямительных установок лучше, чем у генераторов постоянного тока.

В современной сварочной технике применяют три системы сварочных трансформаторов.

Трансформатор с отдельной дроссельной (реактивной) катушкой (рис. 34.7, *б*) имеет два самостоятельных магнитопровода 1 и 2 и общую сварочную электрическую цепь. Регулирование сварочного тока производится изменением воздушного зазора  $L$  в дроссельной катушке. Увеличение

зазора соответствует увеличению сварочного тока и уменьшению кривизны падающей вольт-амперной характеристики сварочной цепи. Уменьшение зазора соответствует уменьшению сварочного тока и увеличению крутизны вольт-амперной характеристики.

Комбинированный трансформатор (рис. 34.7, в) имеет общие магнитопровод и вторичную (сварочную) электрическую цепь. Сварочный ток регулируется изменением индуктивного сопротивления вследствие изменения зазора  $L$  между магнитным шунтом Ш и магнитопроводом М (сердечником). Увеличению зазора соответствует увеличение сварочного тока и уменьшение крутизны вольт-амперной характеристики, а уменьшению зазора — уменьшение сварочного тока и увеличение крутизны вольт-амперной характеристики.

Трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием имеют единые магнитопровод и сварочную цепь. Изменение кривизны вольт-амперной характеристики и регулирование сварочного тока достигается за счет изменения индуктивного сопротивления, осуществляемого перемещением обмоток трансформатора по сердечнику магнитопровода. Поэтому реальный трансформатор можно представить себе в виде некоторого идеального трансформатора Т без магнитного рассеяния, соединенного с двумя реактивными катушками, включенными последовательно — одна в первичную обмотку  $D_1$ , а другая — во вторичную обмотку  $D_2$  (см. рис. 34.7, г).

За последние годы нашли применение трехфазные трансформаторы для питания трехфазной дуги. Их используют для питания двух дуг сварочных самоходных автоматических головок и для электрошлаковой сварки.

Для повышения стабильности горения дуги переменного тока, а иногда и при работе с маломощными дугами постоянного тока применяют осцилляторы и электронные стабилизаторы, преобразующие низкое напряжение промышленной частоты в импульсы высокого напряжения и высокой частоты. Наложение этих импульсов на дуговой промежуток спо-



способствует возникновению искрового разряда, что облегчает зажигание дуги и повышает устойчивость ее горения.

Для сварки неплавящимся электродом в защитных газах применяют источники постоянного и переменного тока. При сварке плавящимися электродами в защитных газах используют специальные преобразователи с жесткими и возрастающими внешними вольт-амперными характеристиками и сварочные выпрямители с жесткой внешней характеристикой.

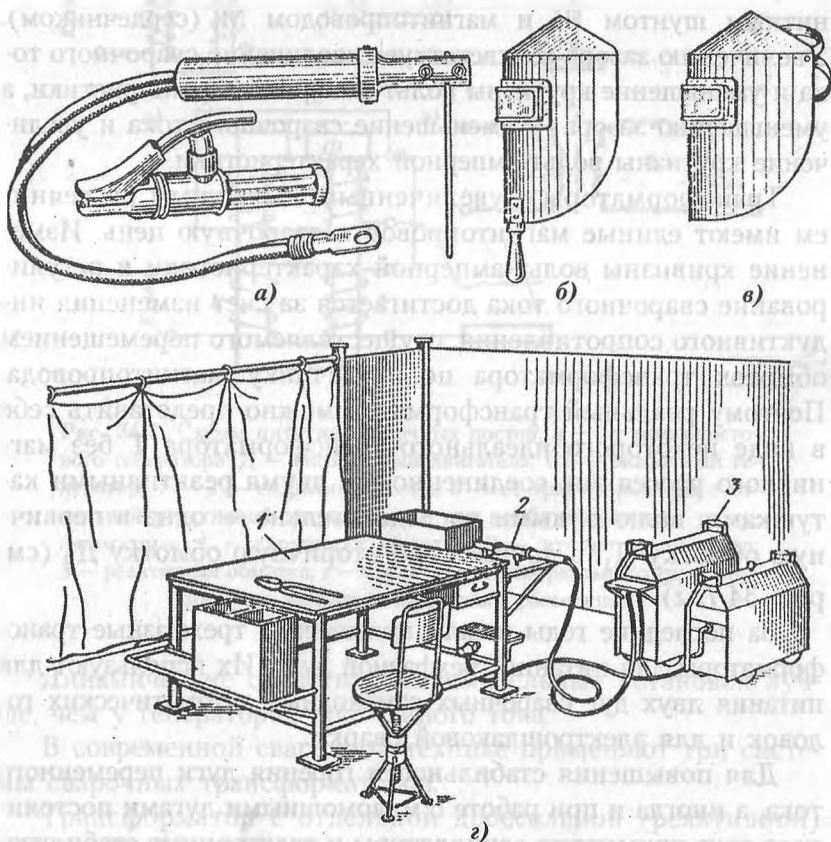


Рис. 34.8. Электрододержатели (а), предохранительный щиток (б), маска (в) и рабочее место для ручной дуговой сварки (г): 1 — стол; 2 — электрододержатель; 3 — сварочный трансформатор

При сварке малогабаритных деталей и узлов рабочее место сварщика огораживается специальными перегородками или брезентовыми шторами. Чтобы уменьшить отражение лучей электрической дуги, перегородки окрашивают в темные матовые тона, а брезентовые шторы пропитывают огнестойкой краской.

Оборудование поста для ручной электродуговой сварки состоит из сварочного аппарата или генератора, рабочего стола или стенда, системы вентиляции, щитка, инструмента, электродержателя с гибким кабелем и сборочно-сварочных приспособлений (рис. 34.8).

Для защиты сварщика от действия инфракрасных и ультрафиолетовых лучей электрической дуги, а также от брызг металла служат щиток или шлем с защитными стеклами, специальный костюм, фартук и рукавицы.

При сварке в защитных газах кроме указанного оборудования устанавливают баллон с защитным газом и соответствующую регулировочную аппаратуру.

### 34.6. Автоматическая сварка под флюсом

Автоматическая сварка под флюсом отличается от ручного процесса тем, что в этом случае подача и перемещение электродной проволоки механизированы, а защита плавильного пространства осуществляется жидким шлаком, полученным в результате расплавления флюса.

Автоматическая сварка под флюсом в 5—10 раз производительней ручного процесса, а качество сварных швов превосходит швы, выполненные вручну. При автоматической сварке под флюсом коэффициент полезного использования теплоты дуги на плавление электродного и основного металла составляет 90—95 %, а при ручной — не превышает 80 %.

Автоматическую сварку под флюсом широко применяют в котлостроении, тепловозо-, вагоно- и судостроении, при производстве сварных труб и в других областях машиностроения и строительства.

Схема процесса автоматической сварки под флюсом представлена на рис. 34.9, а. Сварку изделия производят электродной проволокой 1, которая подается в плавильное пространство механизмом подачи (головкой 2). Структурная схема механизма показана на рис. 34.9, в. Впереди дуги насыпается флюс 4 из бункера 3. Флюс в процессе сварки плавится, и образующийся шлак 5 защищает плавильное пространство и шов. Остатки неиспользованного флюса собираются

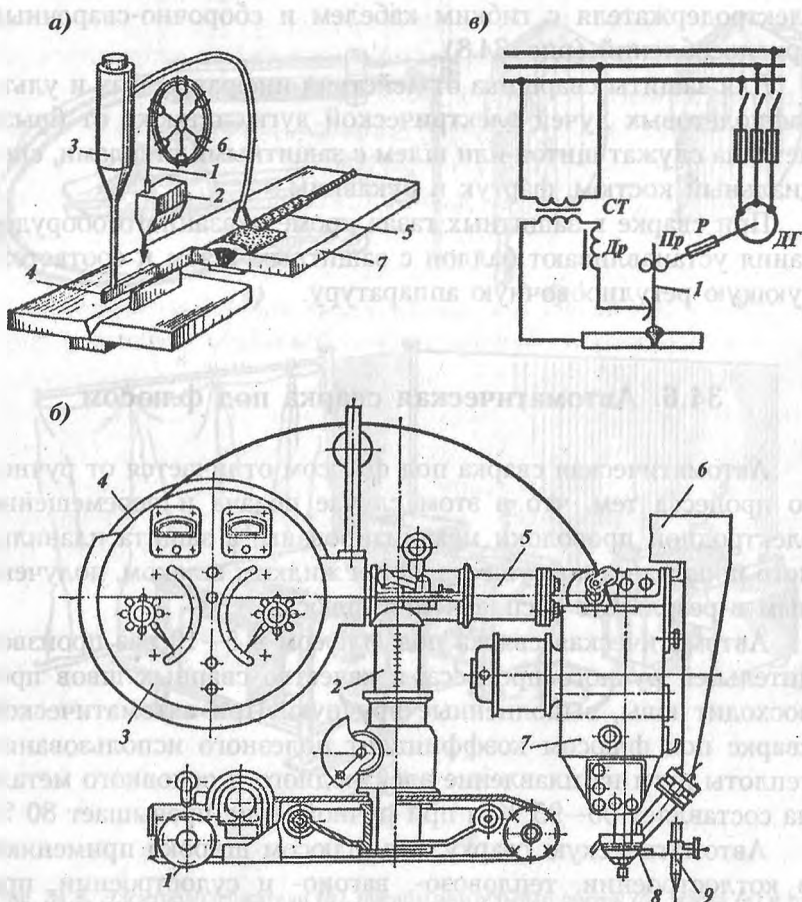


Рис. 34.9. Автоматическая сварка

с поверхности шва и с помощью пневмошланга 6 (рис. 34.9) возвращаются в бункер. Таким образом, дуга и все плавильное пространство находятся в условиях полной изоляции от атмосферы (рис. 34.10).

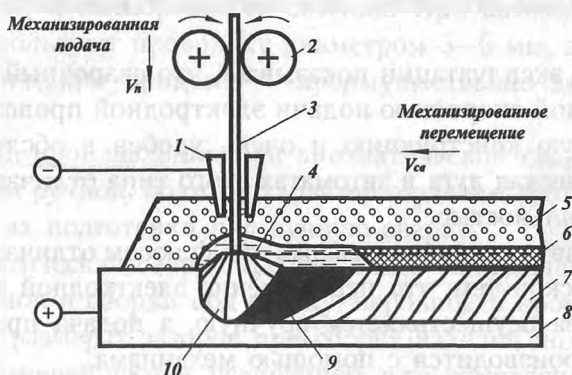


Рис. 34.10. Схема автоматической дуговой сварки под флюсом: 1 — токопроводящая втулка; 2 — подающие ролики; 3 — сварочная проволока; 4 — жидкий шлак; 5 — флюс; 6 — застывший шлак; 7 — сварной шов; 8 — деталь; 9 — жидкий металл; 10 — электрическая дуга

Сварочный автомат имеет следующие основные части: механизм подачи электродной проволоки в зону дуги (автоматическая головка), механизм перемещения головки или перемещения изделия.

Сварочные автоматы, у которых головка закреплена на самоходной тележке, имеющей самостоятельный привод, называют *сварочными тракторами* (см. рис. 34.9, б).

Для того чтобы горение дуги было устойчивым, необходимо равенство скоростей подачи и плавления электродной проволоки.

Сварочные автоматы с постоянной и регулируемой скоростью подачи электродной проволоки широко применяют в производстве сварных конструкций открытой дугой и под флюсом.

Трактор-автомат может производить сварку, перемещаясь по специальным направляющим в виде рельсов или непосредственно по изделию.

Трактор передвигается вдоль свариваемого изделия при помощи электродвигателя постоянного тока с регулируемым числом оборотов, что позволяет изменять скорость сварки.

Опыт эксплуатации показывает, что сварочный аппарат с постоянной скоростью подачи электродной проволоки имеет простую конструкцию и очень удобен в обслуживании. Электрическая дуга в автоматах этого типа отличается высокой стабильностью.

Полуавтоматическая сварка под флюсом отличается от автоматической тем, что перемещение электродной проволоки вдоль шва осуществляется вручную, а подача проволоки и флюса производится с помощью механизма.

С помощью полуавтомата можно выполнять сварку стыковых, тавровых и нахлесточных соединений. Он позволяет также сваривать короткие и криволинейные швы разного калибра, недоступные для сварки обычными автоматами.

По способу изготовления флюсы разделяют на плавленные и керамические, а по характеру образуемого шлака — на кислые и основные.

Флюс представляет собой зернообразный продукт с размером зерна 1—3 мм. Из флюса, расплавленного в зоне дуги, образуется шлак. Последний надежно защищает плавильное пространство от окружающей среды, раскисляет металл сварочной ванны, а в некоторых случаях и легирует металл шва (керамические флюсы).

Флюсы и электродная проволока при автоматической и полуавтоматической сварке должны обеспечивать устойчивое горение дуги, требуемый химический состав и механические свойства металла шва, отсутствие в нем пор и трещин и легкую отделяемость шлаковой корки от поверхности шва.

В зависимости от количества соединений марганца и кремния различают высоко- и низкомарганцовистые флюсы или высоко- и низкокремнистые флюсы.

К электродной проволоке при сварке под флюсом предъявляют строгие требования по химическому составу, чистоте поверхности и калибровке ее сечения. При автоматической сварке используют проволоку диаметром 3–6 мм, а при полуавтоматическом процессе — преимущественно диаметром до 2 мм.

Глубина проплавления при автоматической сварке больше, чем при ручной, поэтому характер разделки кромок отличается от их подготовки под ручную сварку.

Автоматическая сварка требует более тщательной подготовки кромок и сборки под сварку: неровности кромок и колебания в размерах зазоров при сборке изделия под ручную сварку компенсируются ускорением или замедлением процесса сварки, тогда как при автоматической сварке этого сделать невозможно.

Автоматическая сварка стыковых швов производится со скосом и без скоса кромок.

Сварку стыковых швов толщиной до 20 мм можно выполнять с односторонним скосом одной или двух кромок, Х-образной разделкой, с криволинейным скосом и т. п. В остальных случаях сварку стыковых швов с двух сторон производят на весу (рис. 34.11, а), на медной подкладке 1 (рис. 34.11, б) или стальной остающейся подкладке 1 (рис. 34.11, в), с ручной подваркой А (рис. 34.11, г) и на флюсовой подушке (рис. 34.11, д: 1 — флюс; 2 — шланг со сжатым воздухом). При сварке стыковых соединений без подкладок возможны прожоги. Валиковые швы, применяемые в тавровых и нахлестанных соединениях, выполняют «в лодочку» (рис. 34.11, е, ж: 1 — электрод). Для предохранения металла от вытекания при сварке угловых швов применяют те же меры, что и при сварке стыковых швов. Используют флюс и при сварке порошковой проволокой. В этом случае электрод представляет собой

полую тонкостенную гибкую трубку, внутри заполненную флюсом.

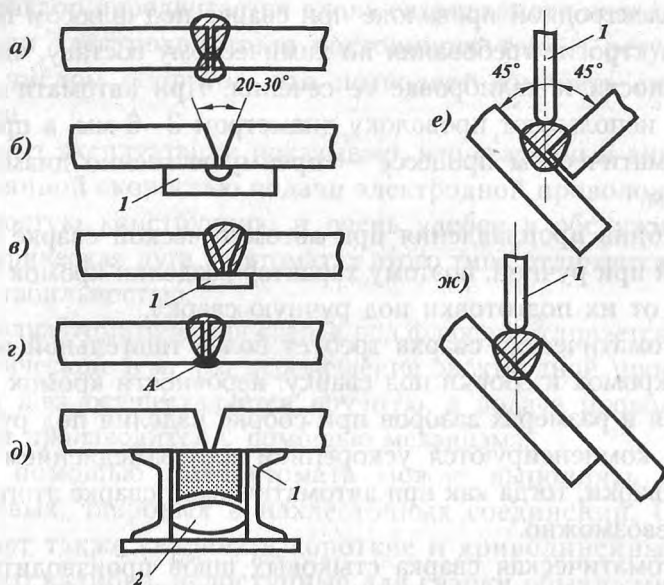


Рис. 34.11. Рекомендованные типы соединений и особенности их сборки

### 34.7. Электрошлаковая сварка

Сущность способа электрошлаковой сварки заключается в том, что расплавление электродной проволоки и свариваемых кромок производится за счет тепла расплавленного флюса, который непрерывно нагревается при прохождении через него тока (рис. 34.12).

Свариваемые детали устанавливают вертикально. К обеим сторонам свариваемого стыка плотно прижимают медные охлаждаемые водой ползуны, которые, в свою очередь, охлаждают расплавленный металл ванночки и препятствуют вытеканию жидкого металла и расплавленного флюса. Охлаждае-

мые ползуны в процессе сварки двигаются вверх. Расплавленный металл электрода и свариваемых кромок стекает вниз, образуя сварочную металлическую ванночку. По мере продвижения автомата вверх происходит затвердевание металла сварочной ванны и образуется шов. При этом способе расплавленный металл надежно защищается расплавленным шлаком от воздействия атмосферы.

Электрошлаковая сварка позволяет сваривать детали больших толщин. Практически верхний предел толщины не ограничен.

Электрошлаковая сварка нашла широкое применение в тяжелом машиностроении (при изготовлении станин прессов, валов, гидротурбин и т. д.), где она произвела техническую революцию в проектировании и изготовлении крупногабаритных конструкций.

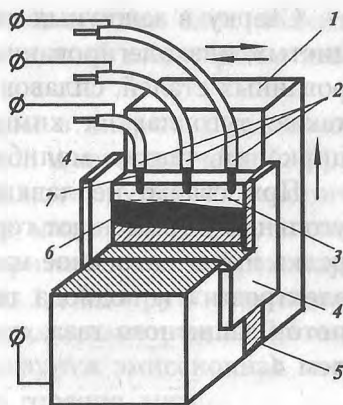


Рис. 34.12. Схема электрошлаковой сварки: 1 — свариваемые детали; 2 — мундштук; 3 — расплавленный флюс; 4 — медные ползуны; 5 — шов; 6 — расплавленный металл; 7 — электрод

### 34.8. Электродуговая сварка в среде защитных газов

Дуговая сварка в среде защитного газа была изобретена Н.Н. Бенардосом. Этот процесс основан на оттеснении окружающего воздуха от зоны плавильного пространства. В результате достигается надежная защита металла электрода, сварочной проволоки и кристаллизующегося металла шва от воздействия внешней среды.

Процесс сварки можно классифицировать по составу защитного газа, типу применяемого электрода (плавящийся или неплавящийся) и степени механизации.



Сварку в защитных газах применяют для сварки углеродистых, низколегированных конструкционных и высоколегированных сталей, сплавов алюминия, магния, никеля, меди, а также тугоплавких химически активных металлов (титан, цирконий, тантал, молибден).

При сварке неплавящимся электродом (вольфрамовым, угольным) применяют горелку, показанную на рис. 34.13. Горелка имеет зажимное цанговое устройство 3 для крепления электрода 1 и подвода тока к нему, сопло 2, формирующее поток защитного газа, подача которого регулируется вентилем 4.

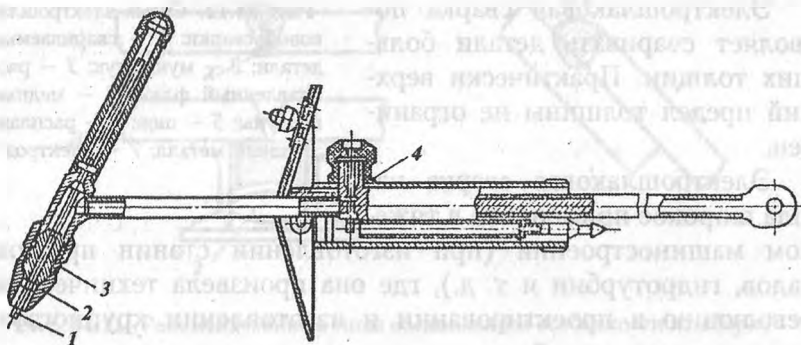


Рис. 34.13. Горелка для сварки в среде защитного газа неплавящимся электродом

Обычно при сварке плавящимся и неплавящимся электродами газовая защита, создаваемая соплом горелки, носит локальный (местный) характер. В случае когда возникает необходимость защиты всего шва изделия от контакта с внешней средой, сварку выполняют в контролируемой атмосфере, т. е. в герметизированной камере, заполненной инертным газом.

В качестве защитных газов применяют инертные (аргон и гелий) и активные ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) газы, а также смеси инертных и активных газов.

Для сварки неплавящимся и плавящимся электродами в защитной среде применяют постоянный или переменный ток.

Сварка неплавящимся электродом в инертных газах может быть ручной, полуавтоматической и автоматической. При сварке переменным током применяют прутки из чистого вольфрама диаметром от 0,5 до 7—8 мм, а для сварки постоянным током прямой полярности применяют вольфрам марки ВЛ-15 с содержанием лантана до 1,5 %. Прутки из лантанированного вольфрама изготавливают диаметром 1—7,5 мм. Благодаря присадке лантана повышаются эмиссионная способность электрода и устойчивость горения дуги.

Род тока в технологии сварки неплавящимся электродом имеет очень большое значение. Сварка постоянным током прямой полярности отличается большей стабильностью процесса и лучшим формированием шва. При сварке сплавов на основе алюминия и магния неплавящимся электродом необходимо использовать переменный ток.

Сварку в инертных газах неплавящимся электродом можно производить с присадкой и без присадки за счет расплавления кромок металла свариваемого изделия.

При автоматической и полуавтоматической сварке тонколистовых изделий необходимо обеспечивать точную сборку и тщательную подгонку кромок, не допуская их смещения относительно друг друга.

В процессе ручной сварки горелку располагают так, чтобы ось вольфрамового электрода с плоскостью свариваемого изделия составляла угол 75—80°, а присадочный пруток находился под углом 90° к оси вольфрамового электрода. Угол между присадочным прутом и поверхностью пластины не должен быть более 10—15°; в противном случае происходят завихрение защитного газа и неизбежное ухудшение защиты сварочной ванны, что отражается на качестве металла шва.

Сварку плавящимся электродом в инертных газах выполняют на автоматах и полуавтоматах с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. При этом способе сварки в большинстве случаев используют тонкую электродную про-

волоку диаметром 0,5–2,0 мм, имеющую химический состав, близкий к составу металла изделия. Для питания дуги обычно применяют источники постоянного тока с жесткой или возрастающей внешней характеристикой и обратную полярность, так как это повышает стабильность горения дуги и уменьшает разбрызгивание металла.

Сварку плавящимся электродом в инертных газах применяют для изготовления ответственных изделий из нержавеющей стали, алюминия, магния и других металлов и сплавов, активно взаимодействующих с кислородом и азотом воздуха. Используя тонкую электродную проволоку, можно сваривать изделия толщиной до 4–5 мм без скоса кромок, а для изделий большей толщины рекомендуется применять V-образную подготовку кромок с углом разделки 30–50°.

При сварке необходимо поддерживать минимальный вылет электрода, так как это улучшает защиту и повышает стабильность процесса. Однако чрезмерное уменьшение вылета затрудняет наблюдение за сварочной ванной и вызывает загрязнение сопла горелки брызгами металла.

Сварка в среде углекислого газа аналогична сварке в среде инертных газов. Однако здесь в качестве защитного газа для сварки низкоуглеродистых, низколегированных и некоторых высоколегированных сталей используют дешевый и недефицитный оксид углерода. При сварке в среде оксида углерода происходит интенсивное окисление металла, так как  $\text{CO}_2$  по отношению к металлам при температуре 1000 °С становится сильным окислителем.

Реакции окисления могут протекать следующим образом:



где Me — окисляемый компонент, содержащийся в стали.

Окислительное действие углекислого газа, происходящее в плавильном пространстве, обычно нейтрализуется благодаря применению низкоуглеродистой сварочной проволоки (Св-08Г2С) с повышенным содержанием марганца и кремния.

Сварку в среде оксида углерода выполняют на автоматах и полуавтоматах с использованием плавящегося, а иногда и неплавящегося (угольного, графитового) электродов.

В качестве плавящегося электрода при этом используют преимущественно тонкую сварочную проволоку диаметром 0,5—3 мм.

Сварку плавящимся электродом, как правило, проводят на обратной полярности.

### 34.9. Электронно-лучевая сварка

Свободный электрон, обладающий элементарным зарядом и минимальной массой из всех известных частиц, под действием электрического поля может развивать огромную скорость (до  $10^5$  км/с) и за счет этого приобретать большой запас кинетической энергии. Это свойство электрона широко используется при электронно-лучевой сварке.

Скорость электрона  $v$  зарядом  $e$  и массой  $m$  определяется величиной ускоряющего напряжения  $u$ :

$$v = (2 \cdot eu/m)^{\frac{1}{2}}.$$

В современных устройствах для электронно-лучевой сварки используют напряжение от 25 до 250 кВт.

Энергия таких быстро движущихся электронов расходуется на плавление металла свариваемых деталей. При ударе электрона о поверхность и внедрении его в металл свариваемых деталей происходит резкое торможение, сопровождающееся превращением кинетической энергии в тепловую. Процесс выделения теплоты происходит на поверхности металла и на некоторой его глубине, где электроны испытывают наибольшее торможение. Вакуум порядка  $133 \cdot 10^{-4}$  Па необходим для того, чтобы энергия электронов не расходовалась на ионизацию газов.

Наличие вакуума создает весьма благоприятные условия для самоудаления с поверхности изделия адсорбированных

газов и оксидных пленок, а благодаря увеличению скорости диффузии происходит усиление процесса дегазации всего объема расплавленного металла шва. Если учесть, что при современной технике вакуумирования легко достигается вакуум  $133 \cdot 10^{-4}$  Па, то чистота вакуумной среды превосходит чистоту аргона в 1000 и более раз.

Схема установки для электронно-лучевой сварки представлена на рис. 34.14. Свариваемую деталь 7 через загрузочный люк помещают в специальную герметическую камеру 9, из которой при помощи непрерывно работающих форвакуумного и диффузионного насосов откачивается воздух и обеспечивается заданная степень разрежения.

Деталь 7, установленная на поворотном устройстве 8, передвигается (вращается) со скоростью сварки с помощью мотора 10 и редуктора 11.

При пропускании переменного тока от низковольтного трансформатора 2 неплавящийся вольфрамовый или металлокерамический катод 1 разогревается и эмитирует (излучает

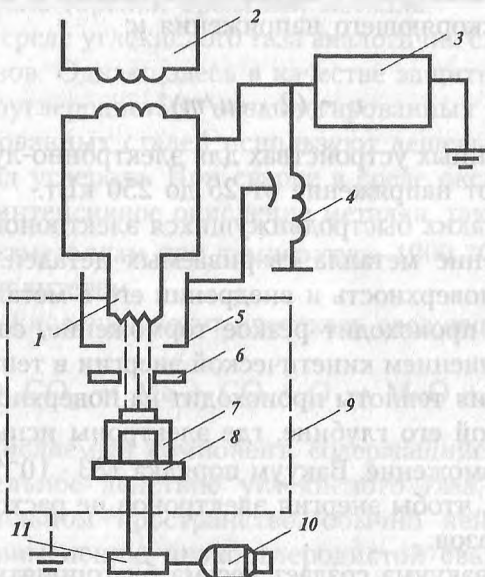


Рис. 34.14. Схема установки для сварки электронным лучом

ет) электроны. Поток электронов проходит через специальную электростатическую линзу 5, отрицательное напряжение которой создается генератором 3, и фокусируется. Регулируется напряжение фокусировки с помощью потенциометра 4. Перемещение луча по свариваемому изделию производится перемещением поворотного устройства 8 или магнитной системой 6.

Устройство, служащее для получения и фокусировки электронов, называют *сварочной электронной пушкой*. Для усиления эмиссии и ускорения электронов от источника постоянного тока к катоду и аноду подводится высокое напряжение.

Концентрация энергии, достигаемая при фокусировке потока электронов, позволяет значительно увеличить удельную энергию и получать провар в виде узкого острого клина.

Наблюдение за процессом сварки электронным лучом ведут через смотровое окно вакуумной камеры. Для устранения опасности поражения током высокого напряжения камеру со свариваемой деталью и фокусирующим устройством заземляют. Необходима защита от воздействия рентгеновского излучения, интенсивность которого возрастает по мере увеличения ускоряющего напряжения. Электронно-лучевую сварку применяют для получения стыковых, угловых и отбортовочных соединений. Кроме того, она позволяет расширить область использования прорезных и заклепочных соединений (особенно при сварке толстолистовых конструкций). Электронно-лучевая сварка является одним из наиболее эффективных и прогрессивных процессов, позволяющих получать высококачественные соединения из тугоплавких и активных металлов.

Большая концентрация энергии и отсутствие потерь теплоты в окружающую среду определяют высокий КПД, достигающий 90 %. Скорость электронно-лучевой сварки в 1,5–2 раза превышает скорость дуговой сварки в аргоне. Малая ширина зоны термического влияния вызывает незначительную деформацию конструкции.

Электронно-лучевая сварка находит широкое применение при изготовлении небольших деталей из тугоплавких химически активных металлов (вольфрама, тантала, ниобия, циркония, молибдена и др.), а также из нержавеющей стали, алюминия, никеля и сплавов на их основе. Для легкоиспаряющихся металлов и сплавов применяют сварку импульсным лучом. Современное оборудование позволяет сваривать не только малые толщины металлов, но и изделия толщиной более 100 мм.

### 34.10. Сварка лазерным лучом

В основу принципа действия квантового генератора и усилителя положено индуцированное (наведенное, направленное) излучение. Принцип действия квантовых генераторов и усилителей (лазеров) основан на свойстве атомов и атомных систем поглощать и излучать порции (кванты) электромагнитной энергии. Квант световой (электромагнитной) энергии, который называют фотоном, будучи поглощен атомом, приводит этот атом в возбужденное состояние. Однако это состояние является неустойчивым, так как в любой момент после поглощения фотона атом может спонтанно (самопроизвольно) выйти из этого состояния и вернуться в исходное. Переход атома в исходное состояние сопровождается излучением поглощенной порции электромагнитной энергии в виде фотона.

Для того чтобы получить индуцированное излучение, необходимо воздействовать на атомную систему таким источником энергии, который при введении определенной порции (кванта) энергии вызвал бы переход атома в возбужденное состояние. Тогда возврат атома в исходное состояние будет сопровождаться излучением фотона (кванта) той же энергии. Такое условие для преимущественной генерации вынужденного излучения и создается в оптических квантовых генераторах.

Основным энергетическим элементом оптического квантового генератора (ОКГ) является кристалл рубина (кристалл оксида алюминия, содержащий 0,05 % Cr).

При концентрации нагрева металлов при сварке световой луч лазера превосходит все известные источники теплоты.

Лазерные установки на рубине имеют очень низкий КПД. Только 0,001 доля энергии газоразрядной лампы накачки превращается в энергию луча лазера, воздействующего на изделие в виде короткого, но очень мощного теплового импульса.

Существенно расширились возможности лазерной сварки после разработки газодинамических лазеров, позволяющих вести сварочный процесс деталей сравнительно больших толщин в непрерывном режиме. Преимущества сварки световым лучом по сравнению со сваркой электронным лучом следующие: простота фокусировки луча; возможность сварки на воздухе, в защитной атмосфере и в вакууме без существенных изменений исходного состояния свариваемого металла. Возможность точной дозировки энергии позволяет использовать этот метод в электронной и радиоэлектронной технике для сварки микросоединений из различных металлов и сплавов. Этот перспективный способ сварки находит применение и в других отраслях народного хозяйства, например в медицине — для соединения живых тканей.

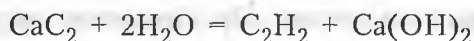
### 34.11. Газовая сварка металлов

Газовая сварка представляет собой процесс, в котором расплавление металла изделия и присадочного металла осуществляется за счет теплоты, получаемой при сгорании горючего газа в кислороде. При этом способе сварки горючий газ является не только источником теплоты, но и средством защиты от проникновения азота и кислорода воздуха в сварочную ванну.



Для образования сварочного пламени при газовой сварке используют различные горючие газы (ацетилен, пропан, бутан, природный газ, водород) или пары горючих жидкостей: бензина, керосина и др. Однако из всего перечисленного наиболее широко применяют ацетилен ( $C_2H_2$ ), так как он обеспечивает получение пламени с более высокой температурой ( $3200\text{ }^{\circ}C$ ). При этом следует отметить, что для работы по восстановлению отбракованных отливок из чугуна, алюминия и бронз целесообразней использовать заменители ацетилена, так как они менее дефицитны и более экономичны.

Ацетилен можно получить в генераторах воздействием на карбид кальция водой:



Ацетиленовые генераторы взрывоопасны и нуждаются в специальном обслуживании. По этой причине для работы одного-двух постов используют преимущественно баллонный ацетилен. Ацетиленовый баллон емкостью 40 л предварительно заполняется активированным углем и на 1/3 объема заливается ацетоном. Ацетиленовый баллон всегда окрашивается в белый цвет. Хранение и эксплуатация таких баллонов безопасны.

Технический кислород, используемый при газовой сварке, получают из сжиженного воздуха. К месту потребления его доставляют в специальных металлических баллонах, окрашенных в синий цвет.

Один баллон емкостью 40 л, наполненный кислородом под давлением 15 МПа, содержит 6000 л кислорода в свободном состоянии.

Питание газосварочного поста кислородом и ацетиленом осуществляется от ацетиленового и кислородного баллонов; от кислородного баллона и ацетиленового генератора; от ацетиленовой и кислородной рампы (централизованное снабжение). Последний способ питания применяют при значительном количестве постов газовой сварки и резки.

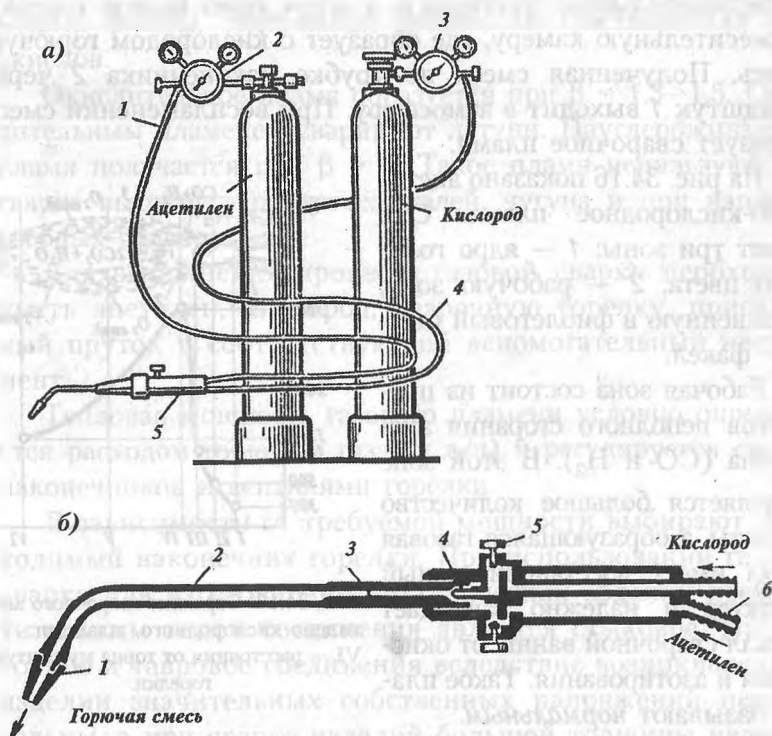


Рис. 34.15. Оборудование газосварочного поста: а — схема газосварочного поста с питанием от баллонов: 1 — шланг подачи ацетилена; 2 — редуктор ацетиленовый; 3 — редуктор кислородный; 4 — шланг подачи кислорода; 5 — сварочная горелка; б — схема инжекторной горелки

Схема питания газосварочного поста от баллонов представлена на рис. 34.15, а. Для газовой сварки в основном применяют инжекторные горелки, так как они работают на ацетилене низкого давления и относительно безопасны в работе.

На рис. 34.15, б представлена схема инжекторной горелки. По шлангу к вентилю 5, через него в инжектор 4 поступает кислород. Вытекая с большой скоростью из инжектора в смешительную камеру 3, струя кислорода создает разрежение, вызывающее подсос ацетилена. Ацетилен поступает по шлангу

к соединительному шлангу 6, а затем через корпус горелки в смесительную камеру, где образует с кислородом горючую смесь. Полученная смесь по трубке наконечника 2 через мундштук 1 выходит в атмосферу. При воспламенении смесь образует сварочное пламя.

На рис. 34.16 показано ацетилено-кислородное пламя. Оно имеет три зоны: 1 — ядро голубого цвета; 2 — рабочую зону, окрашенную в фиолетовый цвет; 3 — факел.

Рабочая зона состоит из продуктов неполного сгорания ацетилена ( $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ ). В этой зоне выделяется большое количество теплоты, а образующаяся газовая среда имеет восстановительный характер и надежно защищает металл сварочной ванны от окисления и азотирования. Такое пламя называют *нормальным*.

Для его получения необходимо, чтобы в смеси газов на один объем химически чистого кислорода приходился один объем ацетилена. Однако на практике для питания горелки используют технический кислород, содержащий небольшое количество примесей. Этим и объясняется, что реально для получения нормального пламени соотношение газов смеси составляет

$$\beta = \text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 = 1,1 - 1,2.$$

Нормальное пламя используют для сварки низкоуглеродистых, низколегированных и высоколегированных сталей, а также для сварки меди, никелевых сплавов, алюминия, цинка, свинца и др. При сварке цветных металлов, окислы которых не восстанавливаются газами пламени, необходимо при-

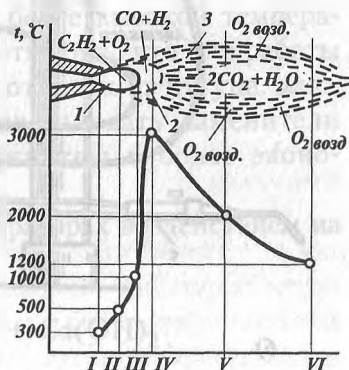


Рис. 34.16. Строение сварочного ацетилено-кислородного пламени: 1 — VI — расстояния от торца мундштука горелки

менять флюсы, содержащие химические растворители этих окислов.

Окислительное пламя образуется при  $\beta = 1,3-1,5$ . Окислительным пламенем сваривают латуни. Науглероживающее пламя получается при  $\beta = 1$ . Такое пламя используют при сварке высокоуглеродистых сталей, чугуна и при наплавке твердых сплавов.

Для выполнения процесса газовой сварки необходимо иметь ацетилен, кислород, сварочную горелку, присадочный пруток и соответствующий вспомогательный инструмент.

Тепловая мощность газового пламени условно определяется расходом горючего газа (в л/ч) и регулируется сменой наконечников и вентилями горелки.

В зависимости от требуемой мощности выбирают необходимый наконечник горелки. При использовании газовой сварки для изготовления металлических изделий предпочтительным типом соединения является стыковое. Нахлесточное и тавровое соединения вследствие возникновения в изделии значительных собственных напряжений нежелательны, а при сварке изделий большой толщины недопустимы.

Сварка сталей толщиной до 2 мм осуществляется без скоса кромок и без зазора между листами или с отбортовкой кромок. При толщине листа 2—5 мм соединение встык выполняют без скоса кромок, но с соответствующим зазором.

Сталь толщиной более 5 мм сваривают только встык с применением одностороннего или двустороннего скоса кромок.

По тепловой эффективности воздействия газосварочного пламени на металл изделия различают два способа газовой сварки — правый (рис. 34.17, а) и левый (рис. 34.17, б). Практика сварки показывает, что при толщине изделия из стали до 3 мм более производительным является левый способ, а для изделий больших толщин — правый.

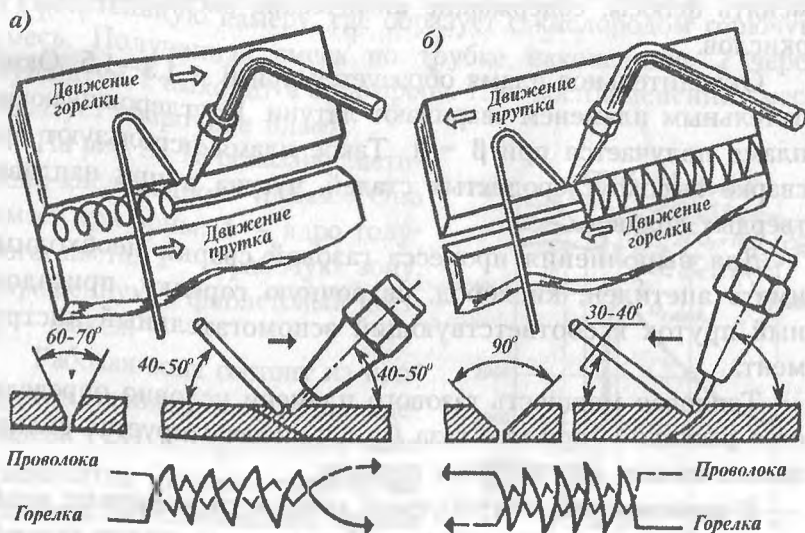


Рис. 34.17. Способы газовой сварки

В зависимости от применяемого способа сварки и толщины свариваемого изделия диаметр присадочной проволоки (в мм) определяют по следующим формулам:

для левого способа  $d = S/2 + 1$ ;

для правого способа  $d = S/2$ .

При сварке изделия толщиной более 15 мм диаметр проволоки принимают не более 6—8 мм.

Основное время (в мин), затрачиваемое на сварку 1 м шва, определяют по формуле

$$t = KS,$$

где  $K$  — коэффициент, зависящий от вида металла и равный: для низко- и среднеуглеродистой стали 4—5; для меди и ее сплавов, чугуна и легированной стали — 6; для алюминия — 4.

### 34.12. Специальные термические процессы в сварочном производстве

**Резка металлов.** В процессе резки металл из полости реза может быть удален термическим (расплавляется по линии реза и вытекает) и химическим (окисляется, превращается в окислы и шлаки, которые также удаляются из полости реза) способами. Оба эти процесса могут происходить одновременно. К термическому и химическому воздействию может присоединиться механическое действие струи газа, электрода, порошка, способствующее выталкиванию жидких и размягченных продуктов из полости реза.

Существует несколько способов резки, но в промышленности наиболее распространена газокислородная резка.

**Газокислородная резка.** Этот способ относится к термохимической резке и заключается в сжигании металла в струе технически чистого кислорода и удалении этой струей образующихся окислов. При горении железа в кислороде выделяется значительное количество теплоты по реакции



Для начала горения металл подогревают до температуры его воспламенения в кислороде (например, сталь — до 1000–1200 °С). На рис. 34.18 показан процесс газокислородной резки. Металл 3 нагревается в начальной точке реза до температуры воспламенения специальным ацетилено-кислородным пламенем 2, затем направляется струя режущего кислорода 1 и

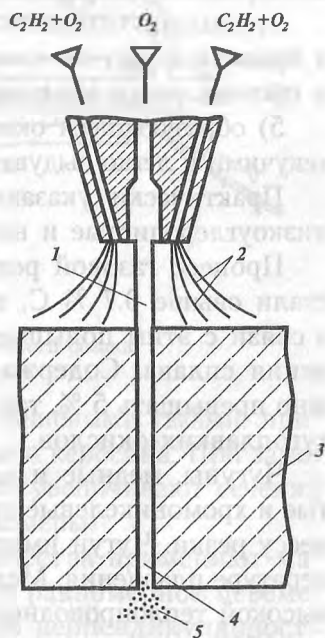


Рис. 34.18. Схема газокислородной резки

нагретый металл начинает гореть. Горение металла сопровождается выделением теплоты, которая вместе с подогревающим пламенем разогревает лежащие ниже слои. Образующиеся окислы 5 в расплавленном состоянии выдуваются струей режущего кислорода из зоны реза 4. Конфигурация перемещения струи соответствует заданной форме реза. Металл будет разрезаться по заданной линии.

Для обеспечения нормального процесса резки металл должен отвечать следующим требованиям:

1) температура его плавления должна быть выше температуры горения в кислороде;

2) температура плавления окислов металла должна быть ниже температуры его плавления;

3) количество теплоты, выделяющейся при сгорании металла в кислородной струе, должно быть достаточным для поддержания непрерывного процесса резки;

4) теплопроводность не должна быть слишком высокой, в противном случае слишком интенсивно отводится теплота и процесс резки прерывается;

5) образующиеся окислы должны быть достаточно жидкотекучими и легко выдвигаться вниз струей режущего кислорода.

Практически указанным требованиям отвечают железо, низкоуглеродистые и низколегированные стали.

Процесс газовой резки затрудняется при содержании в стали свыше 0,7 % С, так как температура воспламенения в связи с этим повышается и достигает температуры плавления сплава. Содержание легирующих примесей не должно превышать 5 %, так как они способствуют образованию тугоплавких окислов.

Чугуны, медные и алюминиевые сплавы, высокохромистые и хромоникелевые стали не поддаются нормальному процессу резки. Чугун имеет температуру горения, равную температуре плавления. Медь и ее сплавы не режутся вследствие высокой теплопроводности и малой теплоты сгорания. Алюминий и его сплавы и высоколегированные стали покрыты тугоплавкой пленкой окислов, поэтому процесс резки затруднен.

Резка может быть ручной и машинной. Для ручной резки применяют универсальный резак типа УР со сменными мундштуками (рис. 34.19). В резак конструктивно объединены подогревающая и режущая части. Подогревающая часть аналогична таковой у сварочных горелок. Режущая часть состоит из дополнительной трубки 4 для подачи режущего кислорода. В мундштуке находятся два концентрически расположенных отверстия для выхода подогревающего пламени 1 и режущей струи 2. Мундштук резака 3 образует прямой угол со стволом, и в него впаена трубка 4 для подачи режущего кислорода. Газы в мундштук резака подаются с помощью вентиля.

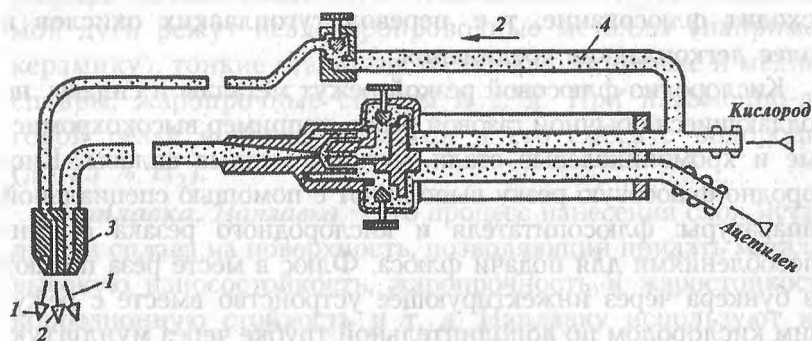


Рис. 34.19. Схема газокислородного резака

Ацетилен можно заменить более дешевыми газами: природными, светильным, парами бензина и керосина. При замене ацетилена другими газами в резак увеличивают сечения каналов инжектора и смесительной камеры.

Для получения реза высокого качества применяют машинную резку, которая обеспечивает равномерное перемещение резака по линии реза, строгую перпендикулярность режущей струи по отношению к разрезаемой поверхности и постоянное расстояние мундштука от поверхности металла.



Обычной кислородной резкой режут металлы толщиной 5—300 мм. При резке металла толщиной более 300 мм применяют специальные резаки.

**Кислородно-флюсовая резка.** При этом способе в зону резки вместе с режущим кислородом вдувают порошкообразный флюс с железной основой. При сгорании флюса в кислородной струе выделяется дополнительное количество теплоты. Окислы железа, образующиеся при сгорании железного порошка, сплавляясь с окислами разрезаемого металла, образуют более легкоплавкий и жидкотекучий шлак. В то же время частицы флюса, выходя из сопла резака с большой скоростью, механически удаляют тугоплавкие окислы. К железному порошку примешивают флюсующие добавки, поэтому кроме термического и механического удаления окислов происходит флюсование, т. е. перевод тугоплавких окислов в более легкоплавкие соединения.

Кислородно-флюсовой резкой режут металлы и сплавы, не поддающиеся обычной газовой резке, например высокохромистые и хромоникелевые стали, чугуны, медные сплавы. Кислородно-флюсовую резку выполняют с помощью специальной аппаратуры: флюсопитателя и кислородного резака с приспособлениями для подачи флюса. Флюс в месте реза подают из бункера через инжектирующее устройство вместе с режущим кислородом по дополнительной трубке через мундштук.

**Дуговая электрическая резка.** Эта резка основана на выплавлении металла по линии реза теплотой электрического дугового разряда. Дуга возбуждается угольным или стальным электродом. Расплавленный металл стекает по стенкам образующегося углубления — реза — под действием собственной массы и незначительного давления дуги. Качество реза и производительность резки низкие. Этот способ является подсобным процессом при сварочно-монтажных работах.

**Воздушно-дуговая резка.** При этом способе металл расплавляется дугой с неплавящимся угольным или графитовым электродом, а расплавленный металл выдувается из полости реза потоком сжатого воздуха, подаваемого параллельно электроду.

Для воздушно-дуговой резки используют специальные резаки, представляющие собой держатель электродов; головка его имеет сопла для воздуха. Рукоятку держателя можно присоединять к токоподводящему кабелю и воздушному шлангу; она имеет устройство для пуска и выключения воздуха.

**Плазменно-дуговая резка.** При резке проникающей дугой металл выплавляется из полости реза направленным потоком плазмы, совпадающим с токоведущим столбом создающей его дуги прямого действия. Этим способом режут толстые листы алюминия и его сплавов (до 80—120 мм), коррозиестойкую сталь и медные сплавы.

При резке струей дуговой плазмы используют струю свободной газовой плазмы, полученной в столбе дугового разряда независимой дуги. Плазменной струей независимой дуги режут неэлектропроводные металлы (например, керамику), тонкие стальные листы, алюминиевые и медные сплавы, жаропрочные сплавы и т. д. При плазменно-дуговой резке используют аргон и его смесь с водородом (до 35 %  $H_2$ ).

**Наплавка.** Наплавка — это процесс нанесения слоя металла или сплава на поверхность, позволяющий придать металлу высокую износостойкость, жаропрочность и жаростойкость, коррозионную стойкость и т. д. Наплавку используют как при изготовлении новых деталей, так и в ремонтных работах. Основные способы наплавки:

- 1) ручная дуговая электродами со стержнями и покрытиями специальных составов;
- 2) автоматическая наплавка под флюсом. Электроды могут быть сплошного сечения или в виде проволоки с внутренним порошковым напылением;
- 3) наплавка плавящимся и неплавящимся электродами в среде защищенных газов;
- 4) плазменная наплавка;
- 5) электрошлаковая наплавка;
- 6) электронно-лучевая, лазерная наплавка;
- 7) наплавка газокислородным пламенем.

Во всех случаях свойство наплавленного слоя определяется составом электродов или флюса. Наплавка тем эффективнее, чем меньше перемешивание материала электрода и основного металла.

**Напыление.** При напылении расплавленные по всему объему или по поверхностям частицы материала будущего покрытия направляют на поверхность нагретой заготовки. При соударении с поверхностью частицы деформируются, обеспечивая хороший физический контакт с деталью. Напыление позволяет в определенной степени получить требуемые свойства детали без дорогостоящего объемного легирования.

Наибольшее распространение получили процессы газоплазменного и плазменного напыления. Более высокие адгезионные свойства могут быть получены за счет диффузионных покрытий. В этом случае нагретая деталь в печи контактирует с материалом покрытия, находящимся в виде порошка или газовой фазы. За счет активных диффузионных процессов при высокой температуре и длительной выдержке получаемое на детали покрытие представляет с ним практически одно целое.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Что представляет собой электрическая дуга как источник нагрева при сварке?*
2. *Каково назначение покрытия электродов для ручной дуговой сварки?*
3. *Какие источники питания используют для дуговой сварки и каковы требования к ним?*
4. *Каковы особенности автоматической сварки под флюсом и электрошлаковой сварки?*
5. *Каковы различия в защите расплавленного металла при аргонодуговой сварке и сварке в углекислом газе?*
6. *Каковы области применения электронно-лучевой и лазерной сварки?*

7. Каково устройство инжекторной горелки для газовой сварки?
8. Назовите основные условия обеспечения процесса газокислородной резки металлов.
9. Каковы особенности кислородно-флюсовой резки?
10. Каково назначение наплавки и напыления в промышленности? Чем они отличаются друг от друга?

## Глава 35

# СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ С НАГРЕВОМ (ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ КЛАСС)

### 35.1. Электрическая контактная сварка.

#### Сущность процесса

Контактная сварка относится к способам сварки давлением с кратковременным нагревом места соединения без оплавления или с оплавлением и с осадкой заготовок. Характерная особенность — быстрота пластической деформации, в ходе которой формируется сварное соединение.

Место соединения разогревается проходящим по металлу электрическим током, причем максимальное количество теплоты выделяется в месте сварочного контакта. Количество выделяемой теплоты определяется законом Джоуля—Ленца:

$$Q = 0,24I^2Rt,$$

где  $Q$  — количество теплоты, выделяемое в сварочном контуре, Дж;  $R$  — полное сопротивление сварочного контура, Ом;  $I$  — сварочный ток, А;  $t$  — время протекания тока, с.

Полное сопротивление сварочного контура  $R$  состоит из сопротивления свариваемых заготовок  $R_{\text{заг}}$ , сопротивления

сварочного контакта  $R_k$  и сопротивления между электродами и заготовками  $R_{эл}$ , т. е.

$$R = R_{заг} + R_k + R_{эл}.$$

Сопротивление сварочного контакта  $R_k$  является наибольшим, так как поверхности стыка заготовок даже после тщательной обработки имеют неровности и соприкасаются только в отдельных точках (рис. 35.1). Благодаря этому происходит резкое уменьшение действительного сечения металла, через которое проходит ток, и в зоне контакта возникают большие плотности тока. Кроме того, на поверхности свариваемого металла имеются пленки окислов и загрязнения с малой электропроводностью, которые также увеличивают сопротивление.

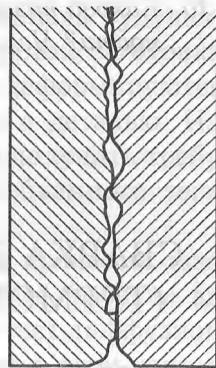


Рис. 35.1. Физический контакт

В результате высокой плотности тока в точках контакта металл нагревается до термопластического состояния или до оплавления. При непрерывном сдавливании нагретых заготовок образуются новые точки соприкосновения, и так до тех пор, пока не произойдет полного сближения до межатомных расстояний, т. е. сварки поверхностей.

Контактную сварку классифицируют по типу свариваемого соединения, определяющего вид сварочной машины, и по характеру тока, питающего сварочный трансформатор. По типу сварного соединения различают сварку стыковую, точечную, рельефную, шовную (роликовую).

## 35.2. Стыковая сварка

*Стыковая сварка* является видом контактной сварки, при котором соединение происходит по всей поверхности соприкосновения. При стыковой сварке свариваемые соединения

закрепляют в зажимах стыковой машины (рис. 35.2). Зажим 3 установлен на подвижной плите 4, перемещающейся в направляющих. Зажим 2 укреплен на неподвижной плите 1.

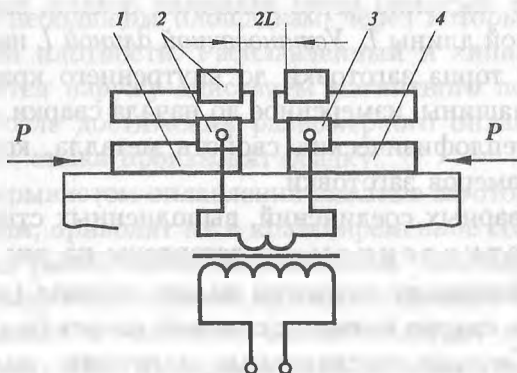


Рис. 35.2. Контактная стыковая сварка

Сварочный трансформатор соединен с плитами гибкими шинами и питается от сети переменного тока через включающее устройство. Плиты перемещаются, и свариваемые детали сжимаются под действием усилия  $P$ , развиваемого механизмом осадки.

Стыковую сварку с разогревом стыка до пластического состояния и последующей осадкой называют *сваркой сопротивлением*, а при разогреве торцов заготовок до оплавления — *сваркой оплавлением*.

Для правильного формирования сварного соединения необходимо, чтобы процесс протекал в определенной последовательности.

При сварке сопротивлением заготовки должны быть очищены от окисных пленок и торцы их плотно пригнаны друг к другу. Для подгонки необходима механическая обработка торцов.

Заготовки, закрепленные в специальных зажимах, сдавливают небольшим усилием  $P$ , включают ток, и металл разогревается до пластического состояния; затем производят осадку. Место сварки имеет усиление металла.

Параметрами режима контактной стыковой сварки являются плотность тока  $j$  (в  $\text{А/м}^2$ ), усилие сжатия торцов заготовок  $P$  (в  $\text{Н/м}^2$ ) и время протекания тока  $t$  (в с), которое определяют косвенно через величину осадки, зависящую от установочной длины  $L$ . Установочной длиной  $L$  называют расстояние от торца заготовки до внутреннего края электрода стыковой машины, измеренное до начала сварки. Длина  $L$  зависит от теплофизических свойств металла, конфигурации стыка и размеров заготовки.

Типы сварных соединений, выполненных стыковой сваркой с сопротивлением, представлены на рис. 35.3. Этим способом соединяют заготовки малого сечения (до  $100 \text{ мм}^2$ ), так как при сварке больших сечений нагрев будет неравномерным. Сечения соединяемых заготовок должны быть одинаковыми по форме с малоразвитым периметром (круг, квадрат, прямоугольник с малым отношением сторон), а металл соединяемых заготовок — однородным. Сварка сопротивлением дает хорошие результаты для металлов, обладающих удовлетворительной свариваемостью в пластическом состоянии. Этим методом можно сваривать низкоуглеродистые конструкционные стали; алюминиевые, медные сплавы.

Стыковая сварка оплавлением имеет две разновидности: непрерывное и прерывистое оплавление.

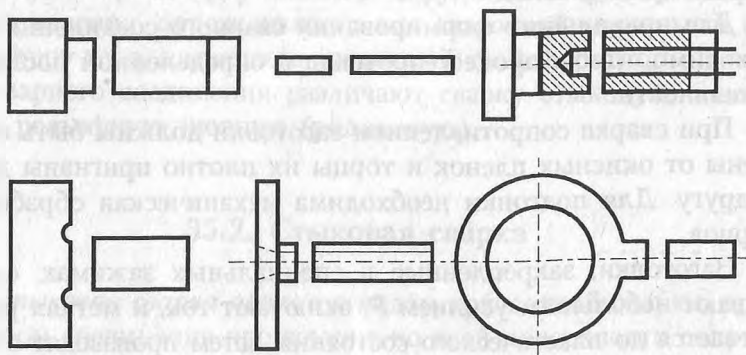


Рис. 35.3. Типы сварных соединений стыковой сварки сопротивлением

При непрерывном оплавлении между заготовками, установленными в зажимах машины, оставляют зазор, подключают напряжение и равномерно сближают заготовки под напряжением. Соприкосновение происходит в первую очередь по отдельным небольшим площадкам, через которые протекает ток высокой плотности. Расплавленный и кипящий металл выбрасывается наружу действием магнитного поля и паров металла. После достижения равномерного оплавления всей поверхности стыка производят осадку.

При прерывистом оплавлении зажатые заготовки сближают под током, приводят их в кратковременное соприкосновение и вновь разъединяют на небольшое расстояние. Быстро повторяя следующие одно за другим сближения и разъединения, оплавляют все сечение. Затем включают ток и осаживают заготовку. Под давлением часть расплавленного металла вместе с окислами выдавливается из зоны сварки, образуя грат.

Сварка оплавлением имеет преимущества перед сваркой сопротивлением. В процессе оплавления выравниваются все выступы и неровности стыка, а окислы и загрязнения сгорают и удаляются, поэтому не требуется особой подготовки места соединения. Можно сваривать заготовки с сечением сложной формы, а также заготовки с различными сечениями, разнородные металлы. Примеры сварных соединений, выполненных стыковой сваркой оплавлением, приведены на рис. 35.4. К не-

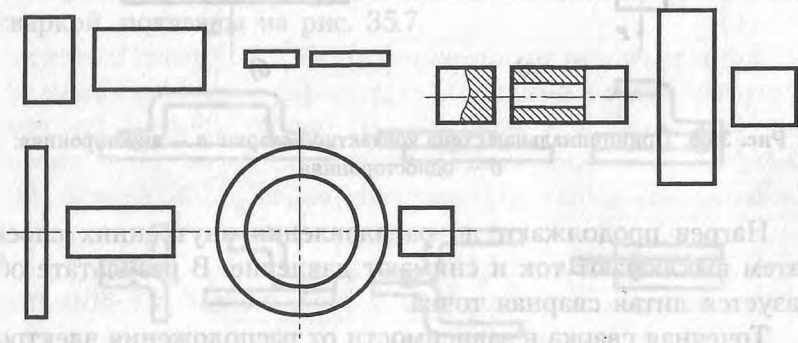


Рис. 35.4. Примеры сварных соединений стыковой сваркой оплавлением



достаткам этой сварки относится увеличенный расход металла на оплавление.

Наиболее типичными изделиями, изготавливаемыми стыковой сваркой, являются элементы трубчатых конструкций, колеса и кольца, инструмент, рельсы, арматура для железобетона.

### 35.3. Точечная сварка

*Точечная сварка* — вид контактной сварки, при которой заготовки соединяются в отдельных точках, причем одновременно можно сваривать одну, две или несколько точек. При точечной сварке заготовки собирают внахлестку и сдавливают с некоторым усилием  $P$  между двумя медными электродами, подводящими ток к месту сварки (рис. 35.5).

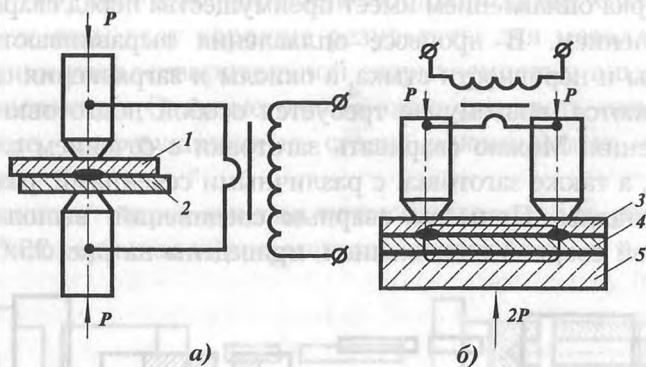


Рис. 35.5. Принципиальная схема контактной сварки: а — двусторонняя; б — односторонняя

Нагрев продолжают до расплавления внутренних слоев, затем выключают ток и снимают давление. В результате образуется литая сварная точка.

Точечная сварка в зависимости от расположения электродов по отношению к свариваемым заготовкам может быть

двусторонней и односторонней. При двусторонней сварке (рис. 35.5, а) две или большее число заготовок 1 и 2 сжимают между электродами точечной машины. При односторонней сварке (рис. 35.5, б) ток распределяется между верхним и нижним листами 3 и 4, причем нагрев осуществляется частью тока, протекающего через нижний лист. Для увеличения тока, проходящего через нижний лист, предусмотрена медная подкладка 5. Односторонней сваркой можно соединять заготовки одновременно двумя точками. Параметрами режима точечной сварки являются: усилие сжатия  $P$  (в Н/м<sup>2</sup>), плотность тока  $j$  (в А/м<sup>2</sup>) и время протекания тока  $t$  (в с).

На рис. 35.6 показана одна из применяемых циклограмм точечной сварки. Весь цикл сварки состоит из четырех стадий: 1) сжатие свариваемых заготовок между электродами; 2) включение тока и разогрев места контакта до температуры плавления, сопровождающиеся образованием литого ядра точки; 3) выключение тока и увеличение усилия сжатия (ковочное давление) для улучшения структуры сварной точки; 4) снятие усилия с электродов. Перед сваркой место соединения очищают от оксидных пленок.

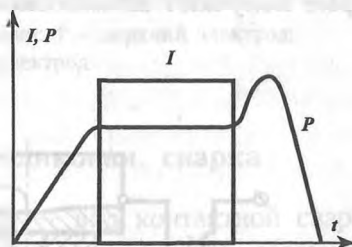


Рис. 35.6. Цикл контактной точечной сварки

Примеры сварных соединений, выполненных точечной сваркой, показаны на рис. 35.7.

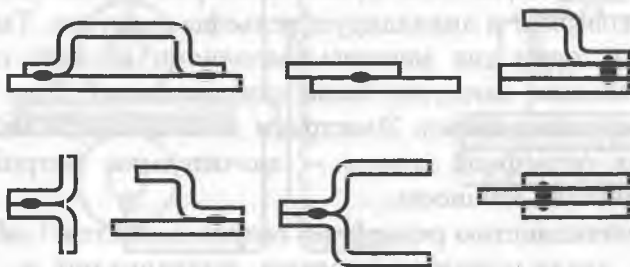


Рис. 35.7. Примеры сварных соединений для точечной сварки

Многоточечная контактная сварка — вид контактной сварки, когда за один цикл сваривается несколько точек.

Многоточечную сварку применяют в основном в массовом производстве, где требуется большое число сварных точек на каждой свариваемой заготовке, например в автомобиле- и вагоностроении.

Рельефная сварка — способ точечной контактной сварки, при котором расположение точек определяется заранее подготовленными выступами в заготовке 2. При рельефной сварке (рис. 35.8) заготовки 2 и 4 зажимают между плоскими электродами 5 и 1. Соединение происходит в точках 3, которые получают штамповкой в одной из заготовок.

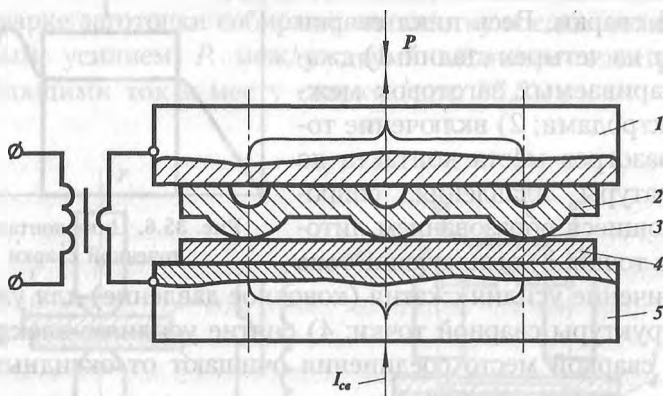


Рис. 35.8. Схема рельефной сварки

При включении тока верхний электрод сжимает заготовки и спрессовывает и ликвидирует рельефы выступов. Таким образом, за один ход машины выполняют столько сварных точек, сколько выступов было отштамповано. Этот способ высокопроизводителен. Электроды изнашиваются мало. Недостаток рельефной сварки — значительная потребляемая электрическая мощность.

Разновидностью рельефной сварки является Т-образная сварка, когда стержни торцами приваривают к листам (рис. 35.9). Концу стержня придают сферическую форму.

Т-образная сварка может быть выполнена на обычных сварочных контактных машинах в дополнительных приспособлениях.

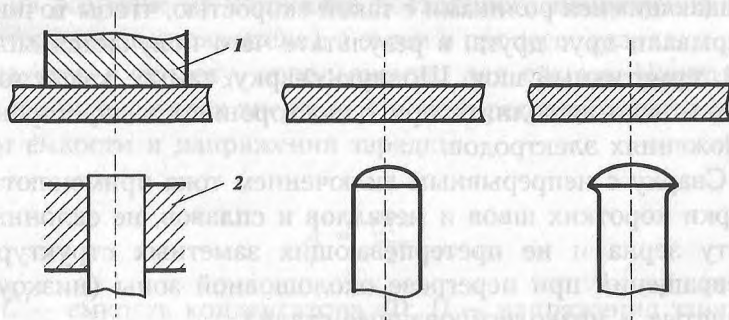


Рис. 35.9. Схема Т-образной сварки: 1 — верхний электрод; 2 — нижний электрод

### 35.4. Шовная, или роликовая, сварка

*Шовная, или роликовая, сварка* — вид контактной сварки, при которой между свариваемыми заготовками образуется прочное и плотное герметичное соединение. Один или оба электрода выполняют в виде плоского ролика. Роликам придают вращение и между ними пропускают свариваемые заготовки.

В процессе шовной сварки (рис. 35.10) листовые заготовки 1 соединяют внахлестку и зажимают между электродами 2.

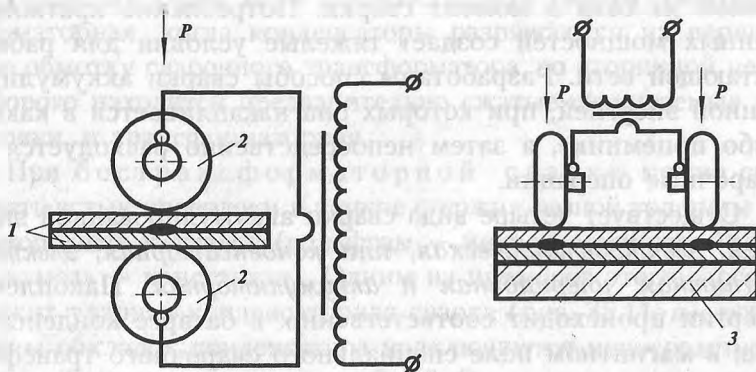


Рис. 35.10. Принципиальная схема шовной сварки: 1 — заготовки; 2 — электроды; 3 — медная подкладка

При пропускании тока образуются сварные точки в форме отпечатка ролика, свариваемые заготовки проходят между вращающимися роликами с такой скоростью, чтобы точки перекрывали друг друга, в результате чего получается сплошной герметичный шов. Шовную сварку, так же как и точечную, можно выполнять при одностороннем и двустороннем положениях электродов.

Сварку с непрерывным включением тока применяют для сварки коротких швов и металлов и сплавов, не склонных к росту зерна и не претерпевающих заметных структурных превращений при перегреве околошовной зоны (низкоуглеродистые и низколегированные стали).

Сварка с прерывистым включением тока обеспечивает стабильность процесса и высокое качество сварного соединения при малой зоне термического влияния и применяется при сварке длинных швов на заготовках из коррозионноустойчивых сталей и алюминиевых сплавов.

### 35.5. Сварка аккумулированной энергией

Недостатком обычной контактной сварки является значительная кратковременная мощность, потребляемая машиной из сети в момент сварки. Потребление кратковременных мощностей создает тяжелые условия для работы питающей сети. Разработаны способы сварки аккумулированной энергией, при которых она накапливается в каком-либо приемнике, а затем непосредственно расходуется на сварочные операции.

Существует четыре вида сварки аккумулированной энергией: *электростатическая*, или *конденсаторная*; *электромагнитная*; *инерционная* и *аккумуляторная*. Накопление энергии происходит соответственно: в батарее конденсаторов; в магнитном поле специального сварочного трансформатора; во вращающихся частях генератора и в аккумуляторной батарее.

Наибольшее промышленное применение получила конденсаторная сварка. Энергия в конденсаторах накапливается при их разрядке от источника постоянного напряжения (генератора или выпрямителя), а затем в процессе разрядки преобразуется в теплоту, используемую для сварки. Накопленную в конденсаторах энергию  $A$  можно регулировать изменением емкости и напряжения зарядки:

$$A = \frac{CU^2}{2},$$

где  $C$  — емкость конденсатора, Ф;  $U$  — напряжение зарядки конденсаторов, В.

При конденсаторной сварке возможны: точная дозировка количества энергии, не зависящая от внешних условий, в частности от напряжения в сети; малое время протекания тока при высокой плотности тока, обеспечивающее малую зону термического влияния, что позволяет сваривать материалы очень небольших толщин; невысокая потребляемая мощность.

Изменение рабочей емкости и напряжения позволяет получать импульсы сварочного тока различных величин и форм. Это облегчает сварку металлов и сплавов в различных сочетаниях.

Существует два вида конденсаторной сварки: бестрансформаторная, когда конденсаторы разряжаются на первичную обмотку сварочного трансформатора, во вторичной цепи которого находятся предварительно сжатые свариваемые заготовки, и трансформаторная.

При бестрансформаторной сварке можно сваривать встык проволоки и тонкие стержни разной толщины из разнородных металлов (вольфрам — никель, молибден — никель, медь — константан). Одним из примеров этого способа служит ударная конденсаторная сварка (рис. 35.11, *а*), когда концы обкладок конденсатора подключаются непосредственно к свариваемым заготовкам 2 и 3. Один из концов заготовки жестко закрепляют, а другой может перемещаться в на-

правляющих 5. Если освободить защелку 4, удерживающую заготовку 2, то под действием пружины 1 она быстро перемещается по направлению к неподвижной заготовке 3 и ударяется о нее. Перед соударением возникает мощный разряд за счет энергии, накопленной в конденсаторе. Этот разряд оплавляет торцы обеих заготовок, которые после соударения свариваются между собой под действием усилия осадки.

Трансформаторная конденсаторная сварка предназначена в основном для точечной и шовной сварки, но может быть использована и для стыковой. При этом способе разряд конденсатора  $C$  преобразуется с помощью сварочного трансформатора  $T$  (рис. 35.11, б).

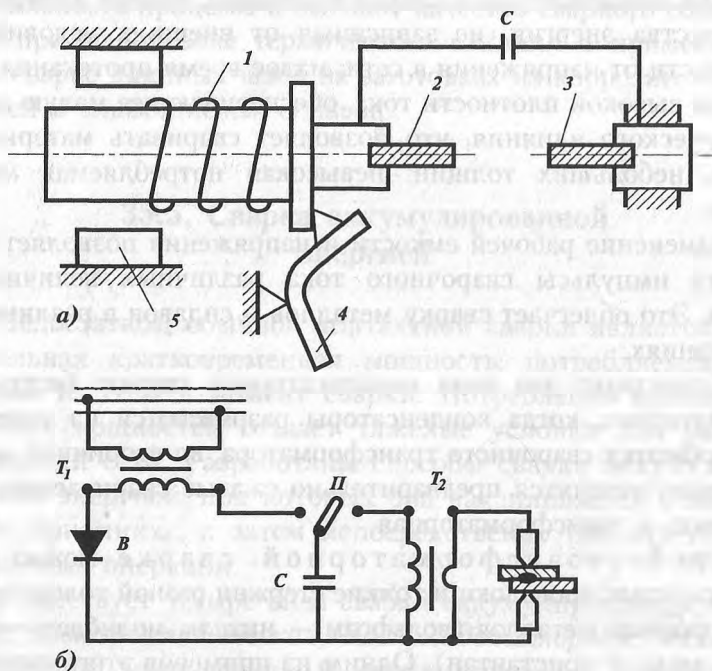


Рис. 35.11. Принципиальные схемы конденсаторной сварки: а - бестрансформаторная; б - трансформаторная;  $T_1$  - повышающий трансформатор;  $T_2$  - сварочный трансформатор;  $C$  - конденсаторная батарея;  $B$  - выпрямитель;  $\Pi$  - переключатель

В левом положении переключателя П конденсатор С заряжается от источника постоянного тока. В правом положении переключателя происходит разряд конденсатора на первичную обмотку сварочного трансформатора Т.

### 35.6. Радиочастотная сварка

Радиочастотная сварка относится к способам сварки давлением с оплавлением свариваемых кромок при кратковременном их нагреве на воздухе.

Радиочастотная сварка происходит в результате местного нагрева кромок заготовок ТВЧ до температуры оплавления или близкой к этой температуре тонкого слоя металла на поверхности сжатия и последовательного сжатия кромок вращающимися роликами (рис. 35.12). Для концентрации нагрева используют так называемый эффект близости.

Сущность эффекта близости заключается в неравномерном распределении плотности прямого и обратного токов, протекающих по двум близко расположенным проводникам и по периметру этих проводников. Плотность тока в близлежащих поверхностных точках проводников максимальная, а в наиболее удаленных точках — минимальная. Чем меньше расстояние между осями проводников и чем больше радиус сечения проводника, тем сильнее проявляется эффект близости.

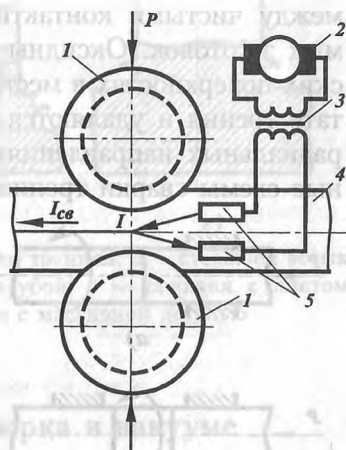


Рис. 35.12. Принципиальная схема радиочастотной сварки: 1 — сжимающие ролики; 2 — ламповый генератор; 3 — трансформатор; 4 — движущаяся заготовка трубы; 5 — контакты;  $I_{св}$  — сварочный ток



Сварочный ток может быть подведен непосредственно от высокочастотного генератора, в цепь которого включено изделие, через скользящие или вращающиеся контакты, а также индукционным путем. Этим способом сваривают продольные или спиральные швы труб.

### 35.7. Сварка трением

Сварка трением относится к процессам, в которых используются давление, кратковременный нагрев и взаимное перемещение свариваемых поверхностей.

Трение поверхностей осуществляется вращением или возвратно-поступательным перемещением свариваемых заготовок, сжимаемых силой  $P$ . В результате нагрева и сжатия возникает совместная пластическая деформация. Сварное соединение образуется в результате возникновения металлических связей между чистыми контактирующими поверхностями свариваемых заготовок. Оксидные пленки, имеющиеся на металлических поверхностях в месте соединения, разрушаются в результате трения и удаляются за счет пластической деформации в радиальных направлениях. На рис. 35.13 даны принципиальные схемы сварки трением.

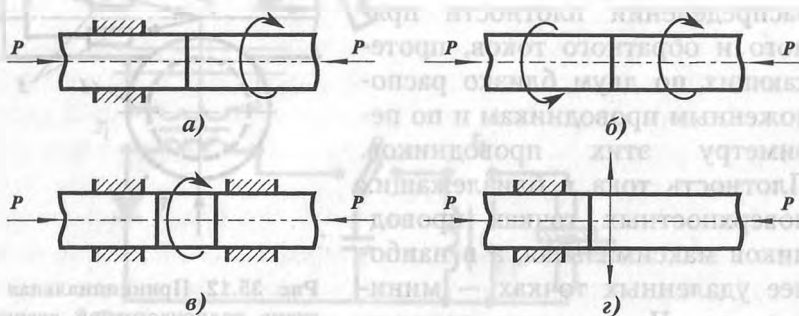


Рис. 35.13. Схемы сварки трением

Сваркой трением соединяют однородные и разнородные металлы и сплавы с различными свойствами, например медь со сталью, медь со сплавами ковар, медь с алюминием, алю-

миний с титаном и др. На рис. 35.14 приведены основные типы соединений, выполненных сваркой трением. В промышленности сварку трением применяют при изготовлении режущего инструмента, различных валов, штоков с поршнями, пуансонов и т. д. При сварке трением по сравнению с контактной стыковой сваркой снижаются затраты энергии и требуемые мощности. Так, например, при сварке стали трением энергии расходуется в 5—10 раз меньше, чем при контактной сварке.

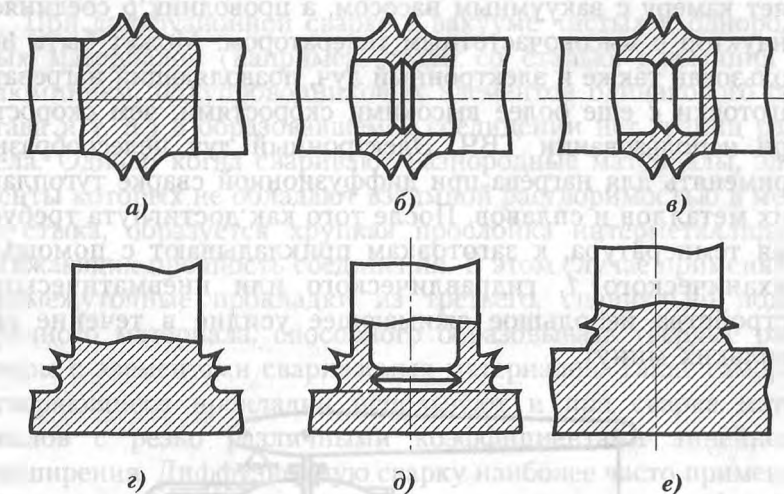


Рис. 35.14. Типы сварных соединений сварки трением: а — стержней встык; б — труб встык; в — встык стержня с трубой; г — стержня с листом; д — трубы с листом; е — стержня с массивной деталью

### 35.8. Диффузионная сварка в вакууме

Диффузионная сварка в вакууме относится к процессам сварки давлением с длительным нагревом в вакууме. При диффузионной сварке соединение образуется в результате взаимной диффузии атомов в поверхностных слоях контактирующих материалов, находящихся в твердом состоянии. Температура нагрева при сварке разнородных материалов не-

сколько выше или ниже температуры рекристаллизации наиболее легкоплавкого из них материала.

Диффузионную сварку в большинстве случаев выполняют в вакууме, однако она возможна в атмосфере инертных газов. Свариваемые заготовки 3 (рис. 35.15) устанавливают внутри охлаждаемой металлической камеры 2, в которой создается вакуум порядка  $133 \cdot 10^{-3} \div 133 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$ , и нагревают с помощью вольфрамового или молибденового нагревателя или индуктора 4, по которому течет вода. Труба 5 соединяет камеру с вакуумным насосом, а проводник 6 соединяет индуктор с высокочастотным генератором. Может быть использован также и электронный луч, позволяющий нагревать заготовки с еще более высокими скоростями, чем скорости при использовании ТВЧ. Электронный луч целесообразно применять для нагрева при диффузионной сварке тугоплавких металлов и сплавов. После того как достигнута требуемая температура, к заготовкам прикладывают с помощью механического 1, гидравлического или пневматического устройства небольшое сжимающее усилие в течение нескольких минут.

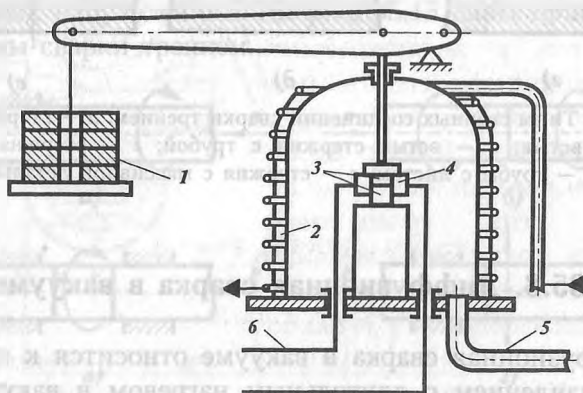


Рис. 35.15. Принципиальная схема диффузионной сварки в вакууме

Чтобы получить соединения хорошего качества, нагрев заготовок по всему сечению должен быть равномерным, а их поверхности — очищены от оксидов и загрязнений. Тончай-

шие адсорбированные и масляные пленки испаряются при нагреве в вакууме и не препятствуют образованию соединения.

Образование и развитие физического контакта происходит под влиянием ползучести и спекания металла. Преимуществом диффузионной сварки в вакууме является отсутствие припоев, электродов и флюсов. Металлы и сплавы можно соединять в однородных и разнородных сочетаниях, не принимая во внимание их твердость и взаимную смачиваемость, и получать прочные соединения без существенного изменения физико-механических свойств.

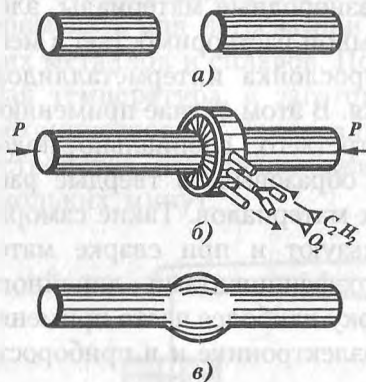
При диффузионной сварке в вакууме чистых и однородных материалов (например, стали со сталью, алюминия с алюминием, полупроводниковых элементов одинакового состава и т. п.) в образовавшемся соединении нет границ раздела. Однако когда сваривают разнородные материалы, элементы которых не обладают взаимной растворимостью в месте стыка, образуется хрупкая прослойка интерметаллидов, снижающих прочность соединения. В этом случае применяют промежуточные прокладки из третьего, специально подобранного материала, способного образовывать твердые растворы с элементами свариваемых материалов. Такие саморастворяющиеся прокладки используют и при сварке материалов с резко различными коэффициентами линейного расширения. Диффузионную сварку наиболее часто применяют в электронной технике, радиоэлектронике и в приборостроении.

### 35.9. Газопрессовая сварка

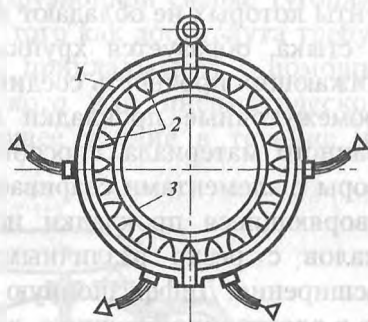
Существует два основных способа газопрессовой сварки: в пластическом состоянии и оплавлением свариваемых поверхностей заготовок.

Газопрессовую сварку в пластическом состоянии и выполняют двумя способами — при постоянном давлении и при заданной температуре. В первом случае свариваемые части сдавливают постоянным осевым усилием в течение все-

го процесса сварки. Во втором случае заготовки вначале сжимают небольшими усилиями, затем нагревают до температуры сварки, после чего увеличивают давление до заданной величины осадки; происходит сварка. На рис. 35.16 показан процесс газопрессовой сварки при постоянном давлении. На рис. 35.17 приведена многопламенная горелка для сварки труб. Горелка состоит из двух полуколец 1. При смыкании полуколец горелки охватывается вся окружность сечения трубы 3, при раскрытии полуколец можно снять горелку с трубы или надеть на нее горелку. На каждом полукольце с внутренней стороны расположены мундштуки 2 для выхода газосварочного пламени. Время нагрева стыка не зависит от диаметра трубы, а зависит только от толщины ее стенки.



**Рис. 35.16.** Принципиальная схема газопрессовой сварки: а — заготовки, подготовленные к сварке; б — изделие в процессе сварки; в — сваренное изделие; Р — усилие осадки



**Рис. 35.17.** Схема газопрессовой горелки

При газопрессовой сварке оплавлением пламя направляют в зазор между торцами свариваемых заготовок. После оплавления торцов заготовки сдавливают и сваривают, при этом расплавленный металл вместе с оксидами в виде графа вытесняется наружу. При сварке оплавлением мощ-

ность пламени больше, чем при сварке в пластическом состоянии, но при этом не требуется предварительной обработки и подготовки кромок под сварку.

Газопрессовую сварку применяют для стыков стальных трубопроводов для газа, нефти диаметром 50—600 мм, для соединения ответственных деталей подвижного состава железных дорог (рельсов, рессорных листов и т. п.). К преимуществам газопрессовой сварки относятся высокое качество сварных соединений; возможность сваривать встык заготовки диаметром более 50 мм и сваривать в полевых условиях, использовать природные горючие газы.

Хорошее качество свариваемого соединения обусловлено защитой места соединения восстановительной атмосферой пламени.

К недостаткам этого способа по сравнению с электрической контактной сваркой можно отнести невысокую производительность, необходимость в отдельной многопламенной горелке для свариваемого стыка каждого размера, довольно сложную газовую аппаратуру, неравномерность нагрева изделия по сечению.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков механизм образования сварного соединения при точечной контактной сварке?
2. Какие существуют способы повышения производительности при точечной сварке?
3. Назовите основные отличия стыковой сварки сопротивлением от сварки оплавлением.
4. В чем преимущества шовной сварки с прерывистым включением тока по сравнению с его непрерывной подачей?
5. Как можно снизить потребляемую мощность при контактной сварке?
6. Что является параметрами режима при диффузной сварке?

## Глава 36

## СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ БЕЗ НАГРЕВА

## 36.1. Холодная сварка

Холодную сварку выполняют без нагрева при нормальных и даже при отрицательных температурах. Физическая сущность процесса заключается в сближении свариваемых поверхностей до образования металлических связей между ними и, следовательно, в получении прочных соединений. Такое сближение достигается приложением больших удельных давлений в месте соединения. В результате возникает совместная пластическая деформация. Большое усилие сжатия обеспечивает разрыв пленки окислов на свариваемых поверхностях и образование чистых поверхностей металла. Совместная пластическая деформация позволяет сблизить друг с другом кристаллы, расположенные перед сдавливанием в глубинных слоях металла. При холодной сварке свариваемые поверхности предварительно очищают от оксидов и жировых пленок. Ею сваривают точечные, шовные и стыковые соединения. На рис. 36.1, а представлен процесс холодной точечной сварки. Свариваемые заготовки 1 с тщательно зачищенной поверхностью 2 в месте соединения помещают между пуансонами 4, имеющими выступы 5. При сжатии пуансонов усилием  $P$  выступы 5 вдавливаются в металл по всей их высоте до тех пор, пока опорные поверхности 3 пуансонов не упрутся в наружную поверхность свариваемых заготовок. Форма сваренной точки зависит от формы выступа в пуансоне (рис. 36.1, з).

При стыковой холодной сварке соединяемые заготовки 7 закрепляют в соосно расположенных зажимах 6 (рис. 36.1, б). При осадке правый и левый зажимы сближают до соприкосновения, и острый край зажима отрубает излишний выдавленный металл — грат. В процессе осадки сближающие зажимы затрудняют течение металла и позволяют увеличить давление

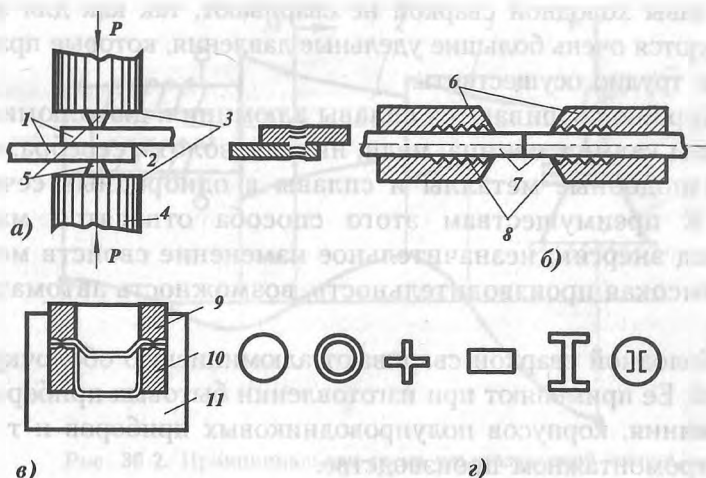


Рис. 36.1. Принципиальная схема холодной сварки: а — точечная; б — стыковая; в — по контуру; з — формы сварной точки

осадки. Деформируемый металл заполняет насечки 8, которые предотвращают его смещение в зажимах. Этим методом сваривают стержни и проволоку круглого, квадратного и прямоугольного сечений. Место сварки получается чистым и не требует последующей обработки.

Для холодной шовной сварки применяют специальные ролики. Непрерывное шовное соединение может быть получено за счет сдавливания одновременно по всей длине соединения или за счет прокатывания ролика. Швы, образующие замкнутый контур небольшой длины в виде кольца, прямоугольника и т. п., получают контурной сваркой. На рис. 36.1, в приведена схема сварки полых деталей по контуру. Пуансоны 9 и 10 строго центрируют с помощью корпуса 11.

Холодной сваркой в основном сваривают металлы и сплавы, обладающие высокой пластичностью при комнатной температуре, с крупнозернистой отожженной структурой.

В недостаточно пластичных металлах при больших деформациях могут образоваться трещины. Высокопрочные металлы



и сплавы холодной сваркой не сваривают, так как для этого требуются очень большие удельные давления, которые практически трудно осуществить.

Хорошо свариваются сплавы алюминия, дюралюминия, сплавы кадмия, свинца, меди, никеля, золота, серебра, цинка и подобные металлы и сплавы в однородных сечениях. К преимуществам этого способа относятся малый расход энергии, незначительное изменение свойств металла, высокая производительность, возможность автоматизации.

Холодной сваркой сваривают алюминиевую оболочку кабелей. Ее применяют при изготовлении бытовых приборов из алюминия, корпусов полупроводниковых приборов и т. д. в электромонтажном производстве.

## 36.2. Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка относится к процессам, в которых используют давление и взаимное трение свариваемых поверхностей. Силы трения возникают в результате действия на заготовки, сжатые осевой силой  $P$ , механических колебаний с ультразвуковой частотой. При ультразвуковой сварке для получения механических колебаний высокой частоты используют магнитострикционный эффект, заключающийся в изменении размеров некоторых металлов, сплавов и керамических материалов под действием переменного магнитного поля. Изменения размеров магнитострикционных материалов очень незначительны, поэтому для увеличения амплитуды и концентрации энергии колебаний и для передачи механических колебаний к месту сварки используют волноводы, в большинстве случаев — суживающейся формы.

На рис. 36.2 показана простейшая схема ультразвуковой сварки.

Свариваемые заготовки 5 размещают на опоре 6. Наконечник 4 рабочего инструмента 3 соединен с двигателем магни-

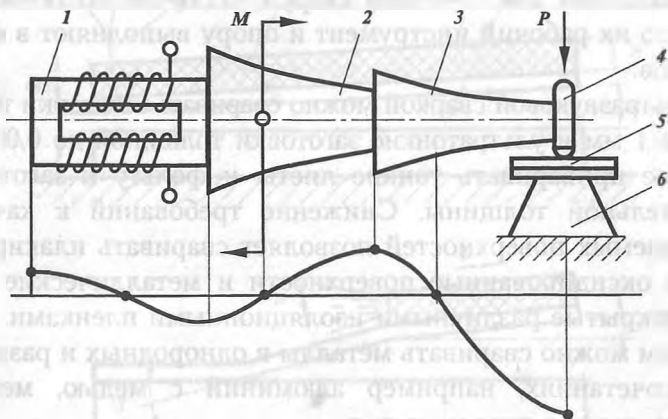


Рис. 36.2. Принципиальная схема ультразвуковой сварки

тострикционного преобразования 1 через трансформатор 2 продольных упругих колебаний, представляющих вместе с рабочим инструментом волновод. Нормальная сжимающая  $P$  создается моментом  $M$  в узле колебаний. В результате ультразвуковых колебаний в тонких слоях контактирующих поверхностей создаются сдвиговые деформации, разрушающие поверхностные пленки.

При сближении чистых поверхностей на расстоянии действия межатомных сил между ними возникает прочная связь. Сравнительно небольшое тепловое воздействие на свариваемые материалы, возникающее из-за трения поверхности одной детали о поверхность другой, обеспечивает минимальное изменение их структуры, механических и других свойств. Например, при сварке меди температура в зоне контакта не превышает  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при сварке алюминия —  $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это особенно важно при сварке химически активных металлов, а также металлов, которые в результате высокотемпературного нагрева разрушаются.

Ультразвуковой сваркой можно получать точечные и шовные соединения внахлестку, а также соединение по контуру. Шовные соединения получают на машинах, аналогич-

ных машинам для точечной сварки. Отличие заключается в том, что их рабочий инструмент и опору выполняют в форме роликов.

Ультразвуковой сваркой можно сваривать заготовки толщиной до 1 мм и ультратонкие заготовки толщиной до 0,001 мм, а также приваривать тонкие листы и фольгу к заготовкам значительной толщины. Снижение требований к качеству свариваемых поверхностей позволяет сваривать плакированные и оксидированные поверхности и металлические изделия, покрытые различными изоляционными пленками. Этим методом можно сваривать металлы в однородных и разнородных сочетаниях, например алюминий с медью, медь со сталью, цинк с оловом и т. д.

Прочность соединения, выполненного ультразвуковой сваркой, достаточно высока.

Ультразвуковым методом сваривают и пластмассы, однако, в отличие от сварки металлов, ультразвуковые колебания здесь подводятся к заготовкам не тангенциально, а вертикально, так как в этом случае нет необходимости в разрушении оксидных пленок (их нет), а нужен только нагрев соединения.

Ультразвуковую сварку применяют в приборостроении, радиоэлектронике, авиационной промышленности и других отраслях.

### 36.3. Сварка взрывом

Сварка взрывом основана на использовании направленного взрыва (рис. 36.3). Соединяемые поверхности двух заготовок 4 и 3, в частности пластин, одна из которых неподвижна и является основанием, располагают под углом друг к другу на расстоянии  $h_0$ . На заготовку 3 кладут взрывчатое вещество 2 толщиной  $H$ , а со стороны, находящейся над вершиной угла, устанавливают детонатор 1. Сваривают на жесткой опоре. Давление в продуктах детонации, возникающее в результате

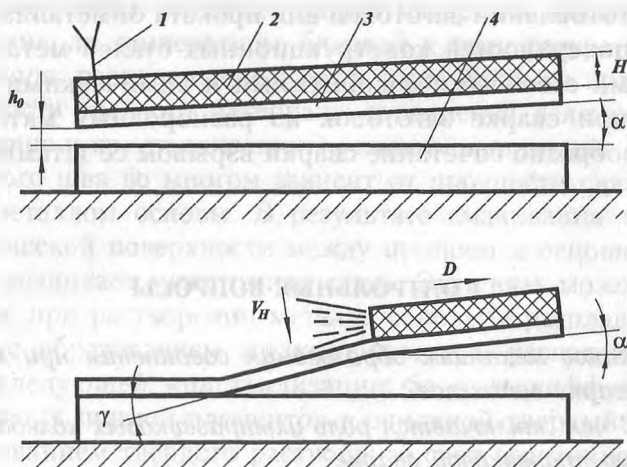


Рис. 36.3. Принципиальная схема сварки взрывом

взрыва, сообщает импульс расположенной под зарядом пластине.

Заготовка 3 отбрасывается взрывом со скоростью 1000 м/с на поверхность неподвижной пластины. В месте соударения заготовки с пластиной образуется угол  $\alpha$ , который перемещается вдоль соединяемых поверхностей. При соударении из вершины угла выдуваются оксидные пленки и другие загрязнения. Соударение пластин вызывает течение металла в их поверхностных слоях. Поверхности сближаются до расстояния действия межатомных сил сцепления, и происходит схватывание по всей площади соединения. Продолжительность сварки взрывом не превышает нескольких микросекунд.

Прочность соединений, выполненных сваркой взрывом, выше прочности соединяемых материалов. Разрушение при испытании происходит на некотором расстоянии от плоскости соединения по наименее прочному металлу. Это объясняется упрочнением тонких слоев металла, прилегающих к соединенным поверхностям, при их пластической деформации. Параметрами сварки взрывом являются скорость детонации  $V_d$ , нормальная скорость  $V_H$  метаемой пластины при соударении с основанием. Сварку взрывом используют

при изготовлении заготовок для проката биметалла, плакировке поверхностей конструкционных сталей металлами и сплавами с особыми физическими и химическими свойствами, при сварке заготовок из разнородных материалов. Целесообразно сочетание сварки взрывом со штамповкой и ковкой.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Каков механизм образования соединения при холодной сварке металлов?*
2. *В чем заключается роль ультразвуковых колебаний при ультразвуковой сварке?*
3. *Что является параметрами режима при сварке взрывом?*
4. *Каковы основные области применения механических способов сварки?*

## Глава 37

# ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### 37.1. Физическая сущность процесса пайки

*Пайкой* называется технологический процесс соединения металлических заготовок без их расплавления посредством введения между ними расплавленного промежуточного металла — припоя. Припой имеет температуру плавления более низкую, чем температуру соединяемых металлов, и заполняет зазор между соединяемыми поверхностями за счет действия капиллярных сил. При охлаждении припой кристаллизуется и образует прочную связь между заготовками. В процессе пайки наряду с нагревом необходимо удалять оксидные пленки с поверхности паяемых металлов.

Процесс пайки включает нагрев материала, образующего соединение, до температуры, близкой к температуре плавления припоя; расплавление и растекание жидкого припоя по поверхности твердого материала; заполнение паяемого шва; охлаждение и кристаллизацию припоя в паяном шве. Качество паяного шва во многом зависит от прочности связи припоя с металлом основы. В результате смачивания твердой металлической поверхности между припоем и основным металлом возникает межатомная связь. Эта связь может образоваться: при растворении металла основы в расплавленном припое с образованием жидкого раствора, распадающегося при последующей кристаллизации; за счет диффузии составляющих припой элементов в основной твердый металл с образованием твердого раствора; за счет реактивной диффузии между припоем и основным металлом с образованием по границе интерметаллических соединений; за счет бездиффузионной связи в результате межатомного взаимодействия.

По особенностям процесса и технологии пайку можно разделить на капиллярную, диффузионную, контактно-реактивную, реактивно-флюсовую и сварку-пайку.

**Капиллярная пайка.** Припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями и удерживается в нем за счет капиллярных сил. На рис. 37.1 показана схема образования шва. Соединение образуется в результате растворения

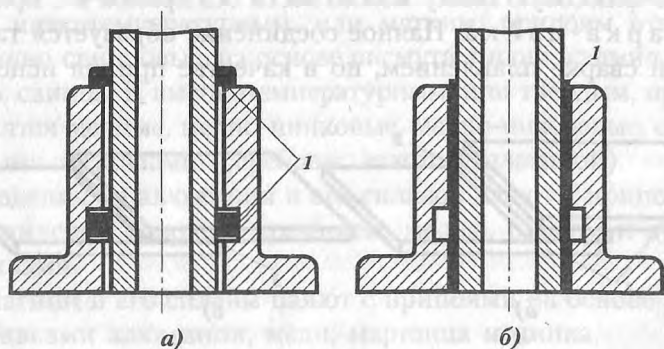


Рис. 37.1. Схема капиллярной пайки: а — перед пайкой; б — после пайки; 1 — припой

основы в жидком припое и последующей кристаллизации раствора.

Капиллярную пайку используют в тех случаях, когда применяют соединение внахлестку. Однако капиллярное явление присуще большинству видов пайки.

**Диффузионная пайка.** Соединение образуется за счет взаимной диффузии компонентов припоя и паяных материалов, причем возможно образование в шве твердого раствора или тугоплавких хрупких интерметаллов. Для диффузионной пайки необходима продолжительная выдержка при температуре образования паяного шва и после завершения процесса при температуре ниже солидуса припоя. За счет этого можно увеличить прочность шва и температуру распая, а значит, и рабочую температуру соединения.

**Контактно-реактивная пайка.** При пайке между соединяемыми металлами или соединяемыми металлами и прослойкой другого металла в результате контактного плавления образуется сплав, который заполняет зазор и при кристаллизации образует паяное соединение. На рис. 37.2 показана схема контактно-реактивной пайки.

**Реактивно-флюсовая пайка.** Припой образуется за счет реакции вытеснения между основным металлом и флюсом. Например, при пайке алюминия с флюсом  $3\text{ZnCl}_2 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{AlCl}_3 + 3\text{Zn}$  восстановленный цинк является припоем. Реактивно-флюсовую пайку можно вести без припоя и с припоем.

**Сварка-пайка.** Паяное соединение образуется так же, как при сварке плавлением, но в качестве припоя использу-

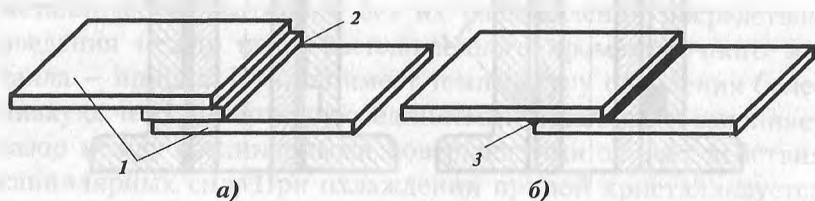


Рис. 37.2. Схема контактно-реактивной пайки: а — перед пайкой; б — после пайки; 1 — медь; 2 — серебро; 3 — эвтектический сплав меди с серебром

ется расплавленный металл одной из соединяемых деталей — той, металл которой наименее тугоплавкий и который частично расплавляется в месте соединения.

### 37.2. Материалы для пайки

**Припой.** Припои для пайки должны отвечать следующим требованиям:

- температура их плавления должна быть ниже температуры плавления паяемых материалов;
- они должны хорошо смачивать паяемый материал и легко растекаться по его поверхности;
- они должны быть достаточно прочными и обеспечивать герметичность;
- коэффициенты термического расширения припоя и паяемого материала не должны резко различаться;
- припои должны иметь высокую электропроводность при паянии радиоэлектронных и токопроводящих изделий.

Все припои по температуре плавления подразделяют на низкотемпературные (температура плавления ниже 500 °С), или мягкие, и высокотемпературные (температура плавления выше 500 °С), или твердые. Припои изготавливают в виде прутков, проволок, листов, полос, спиралей, колец, дисков, зерен, укладываемых в место соединения.

К низкотемпературным, или мягким, припоям относятся оловянно-свинцовые, на основе висмута, индия, кадмия, цинка, олова, свинца. К высокотемпературным, или твердым, припоям относятся медные, медно-цинковые, медно-никелевые, с благородными металлами (серебром, золотом, платиной).

Изделия из алюминия и его сплавов паяют с припоями на алюминиевой основе с кремнием, медью, оловом и другими металлами.

Магний и его сплавы паяют с припоями на основе магния с добавками алюминия, меди, марганца и цинка.

Изделия из коррозионноустойчивых сталей и жаропрочных сплавов, работающих при высоких температурах (выше 500 °С),



паяют припоями на основе железа, марганца, никеля, кобальта, титана, циркония, гафния, ниобия и палладия.

Легкоплавкие припои широко применяют во всех отраслях промышленности и в быту. Они представляют собой сплавы на основе олова, свинца, кадмия и висмута. Наибольшее распространение получили оловянно-свинцовые припои, отличающиеся высокой смачивающей способностью, хорошим сопротивлением коррозии, хорошей электропроводностью.

Из тугоплавких (твердых) припоев широко применяют медно-цинковые и серебряные припои с добавками олова, марганца, алюминия, железа и других металлов.

Медно-цинковые припои выпускают трех марок: ПМЦ-36 — для паяния латуни, содержащей 60–68 % Cu; ПМЦ-48 — для паяния медных сплавов, содержащих свыше 68 % Cu; ПМЦ-54 — для паяния бронзы, меди и стали. В обозначении марки цифры указывают на процентное содержание меди. Медно-цинковые припои плавятся при 700–830 °С.

Соединения, паянные медью и припоями на ее основе, имеют высокую коррозионную стойкость и, как правило, высокие механические свойства. Температура паяния припоями на основе меди составляет 900–1130 °С.

Серебряные припои изготавливают следующих марок: ПСр72, ПСр50Кд, ПСр3Кд, ПСр2 и др. Цифры в обозначении марки указывают на процентное содержание серебра; буквосочетание «Кд» означает кадмий. Серебряные припои плавятся при температуре 630–1000 °С.

**Флюс.** Возможное окисление соединяемых поверхностей при нагревании предотвращается флюсом, который создает жидкую и газообразную защиту зоны пайки от окружающего воздуха. Кроме этого, флюс очищает поверхности паемых заготовок от окисных пленок и способствует лучшему заполнению расплавленным припоем зазоров между спаиваемыми заготовками.

Для паяния мягкими припоями применяют различные сложные флюсы, в состав которых входят хлорид цинка, ортофосфорная кислота, глицерин, вазелин, спирт, канифоль

и др. Часто при выполнении монтажных соединений в качестве флюса используют канифоль без каких-либо добавок.

При паянии твердыми припоями флюсом часто служит бура ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) в виде порошка или пасты, замешенной на воде или спирте.

Флюс (кроме реактивно-флюсовой пайки) не должен химически взаимодействовать с припоем. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя. Флюс в расплавленном и газообразном состояниях должен способствовать смачиванию поверхности основного металла расплавленным припоем. Флюсы могут быть твердые, пастообразные, жидкие и газообразные.

Наиболее распространенными паяльными флюсами являются бура ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) и борная кислота ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), хлористый цинк ( $\text{ZnCl}_2$ ), фтористый калий (KF) и другие галлоидные соли щелочных металлов.

### 37.3. Способы пайки

За основу классификации способов пайки могут братья разные признаки: по удалению оксидных пленок, по характеру кристаллизации полного шва, по получению припоя, по заполнению зазора, по источнику нагрева при пайке. Наибольшее распространение получила классификация, в основу которой положены используемые источники нагрева.

**Пайка в печах.** Нагревают соединяемые заготовки в специальных печах: электросопротивлением, с индукционным нагревом, в газопламенных и газовых. Припой заранее закладывают в шов собранного изделия, на место пайки наносят флюс и затем помещают в печь, где это изделие нагревают до температуры пайки. Припой расплавляется и заполняет зазоры между соединяемыми заготовками. Процесс пайки продолжается несколько часов.

Этот способ обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей, без заметной их деформации.

Крупные детали паяют в камерных печах с неподвижным подом, большую партию мелких деталей — в печах с сетчатым конвейером или роликовым подом. Пайка в печах позволяет механизировать паяльные работы и обеспечивает стабильное качество изделий и высокую производительность труда.

**Индукционная пайка.** Паяемый участок нагревают в катушке-индукторе. Через индуктор пропускают ТВЧ, в результате чего место пайки нагревается до необходимой температуры. Для предохранения от окисления изделие нагревают в вакууме или в защитной среде с применением флюсов. Индуктор выполнен в виде петли или спирали из красной меди. Формы и размеры индуктора зависят от конструкции паяемого изделия. Различают две разновидности пайки с индукционным нагревом: стационарную и с относительным перемещением индуктора или детали.

**Пайка сопротивлением.** Соединяемые заготовки нагревают теплотой, выделяющейся при прохождении электрического тока через паяемые детали и токоподводящие элементы. Соединяемые детали являются частью электрической цепи. Нагрев сопротивлением можно осуществлять на контактных сварочных машинах. С нагревом в контактных сварочных машинах паяют тонкостенные изделия из листового материала или при соединении тонкостенных элементов с толстостенными.

**Пайка погружением.** Эту пайку выполняют в ваннах с расплавленными солями или припоями. Соляная смесь обычно состоит из 55 % KCl и 45 % NaCl, температура ванны — 700–800 °С. На паяемую поверхность, предварительно очищенную от грязи и жира, наносят флюс, между кромками или около места соединения размещают припой, затем детали скрепляют и погружают в ванну. Соляная ванна предохраняет место пайки от окисления. Перед погружением в ванну с расплавленным припоем покрытые флюсом детали нагревают до 550 °С. Поверхности, не подлежащие пайке, защищают от контакта с припоем специальной обмазкой из графита с добавками небольшого количества извести. Пайку

погружением в расплавленный припой используют для стальных, медных и алюминиевых твердых сплавов, деталей сложных геометрических форм. На этот процесс расходуется большое количество припоя. Разновидностью пайки погружением является пайка бегущей волной припоя, когда расплавленный припой подается насосом и образует волну над расплавом. Паяемую деталь перемещают над уровнем расплава в горизонтальном направлении. В момент касания волны припоя происходит пайка. Бегущей волной паяют в радиоэлектронной промышленности при производстве печатного радиомонтажа.

**Пайка с радиационным нагревом.** Пайку выполняют за счет излучения кварцевых ламп, расфокусированного электронного луча или мощного светового потока от квантового генератора (лазера).

Конструкцию, подлежащую пайке, помещают в специальный контейнер, в котором создают вакуум. После вакуумирования контейнер заполняют аргоном и помещают в приспособление, с двух сторон устанавливают для обогрева кварцевые лампы. После окончания нагрева кварцевые лампы отводят, а приспособление вместе с деталями охлаждают. При применении лазерного нагрева сосредоточенная в узком пучке тепловая энергия обеспечивает испарение и распыление окисной пленки с поверхности основного металла и припоя, что позволяет получать спаи в атмосфере воздуха без применения искусственных газовых сред. При радиационном способе пайки лучистая энергия превращается в тепловую непосредственно в материале припоя и паяемых деталей.

**Газопламенная пайка.** Паяемые заготовки нагревают и расплавляют припой газосварочными и плазменными горелками. Газовые горелки обладают наибольшей универсальностью. В качестве горючих газов используют ацетилен, природные газы, водород, пары керосина и т. п.

При использовании газового пламени припой можно заранее помещать у места пайки или вводить в процессе пайки вручную. На место пайки предварительно наносят флюс в ви-

де жидкой пасты, разведенной водой или спиртом; конец прутка из припоя также покрывают флюсом.

Нагревают также паяльными лампами, которые по существу являются газовыми горелками, работающими на жидком топливе. Паяльные лампы используют для работы в полевых условиях или в ремонтных мастерских.

Плазменной горелкой, обеспечивающей более высокую температуру нагрева, паяют тугоплавкие металлы — вольфрам, тантал, молибден, ниобий и др.

**Пайка паяльниками.** Основной металл нагревают и припой расплавляют за счет теплоты, аккумулированной в массе металла паяльника, который перед пайкой или в процессе ее подогревают. Для низкотемпературной пайки применяют паяльники с периодическим нагревом, с непрерывным нагревом, ультразвуковые и абразивные. Рабочую часть паяльника выполняют из красной меди. Паяльник с периодическим нагревом в процессе работы периодически подогревают от постороннего источника теплоты. Паяльники с постоянным нагревом делают электрическими. Нагревательный элемент состоит из нихромовой проволоки, намотанной на слой асбеста, слюды или на керамическую втулку, устанавливаемую на медный стержень паяльника. Паяльники с периодическим и непрерывным нагревом чаще используют для флюсовой пайки черных и цветных металлов мягкими припоями с температурой плавления ниже 300—350 °С.

Ультразвуковые паяльники применяют для бесфлюсовой низкотемпературной пайки на воздухе и для пайки алюминия. Оксидные пленки разрушаются в этом случае за счет колебаний ультразвуковой частоты.

Абразивными паяльниками можно паять алюминиевые сплавы без флюса. Оксидная пленка удаляется в результате трения паяльника об обрабатываемую поверхность. Абразивный паяльник в отличие от электропаяльника имеет рабочий стержень, изготовленный прессованием из порошка припоя и измельченного асбеста.

### 37.4. Типы паяных соединений

Основными типами паяных соединений являются нахлесточные, так как за счет увеличения перекрытия заготовок можно увеличить прочность соединения. Стыковые соединения применяют реже из-за их меньшей прочности. Остальные разновидности соединений являются комбинациями перечисленных. Например, плоские элементы могут быть соединены внахлестку (рис. 37.3, а), ступенчатым (рис. 37.3, б), гребенчатым (рис. 37.3, в), косостыковым (рис. 37.3, г), стыковым (рис. 37.3, д) и тавровым (рис. 37.3, е) соединениями.

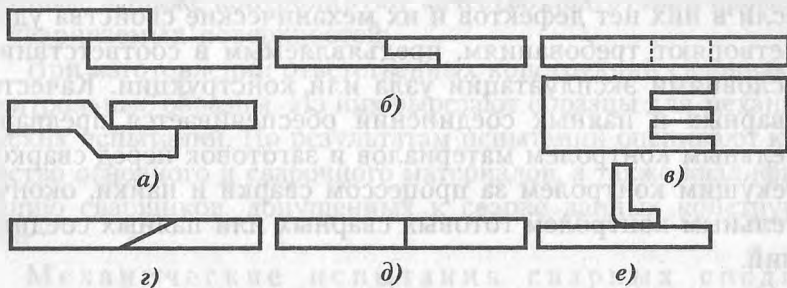


Рис. 37.3. Типы паяных соединений для предотвращения перекосов и относительных смещений

Криволинейные поверхности соединяют между собой и с плоскими поверхностями в сотовых конструкциях, в панелях с гофрированными проставками и т. п. Эти соединения используют в самолетостроении и для изготовления теплообменников.

К паяным соединениям в зависимости от назначения изделия кроме общих требований могут быть предъявлены и специальные — по герметичности, электропроводности, коррозионной стойкости и т. п. Сборочные части изделий перед пайкой должны быть прочно соединены между собой для предотвращения перекосов и относительных смещений.

### 37.5. Контроль качества сварных и паяных соединений

Дефекты в соединениях бывают внешние и внутренние. В сварных соединениях к внешним дефектам относят наплывы, подрезы, наружные непровары и несплавления, поверхностные трещины и поры (рис. 37.4, *а—г*), к внутренним — скрытые трещины и поры, внутренние непровары и несплавления, шлаковые включения и др. (рис. 37.4, *д—ж*). В паяных соединениях внешними дефектами являются наплывы и наteki припоя, неполное заполнение шва припоем, внутренними — поры, включения флюса, трещины и др.

Сварные и паяные соединения считают качественными, если в них нет дефектов и их механические свойства удовлетворяют требованиям, предъявляемым в соответствии с условиями эксплуатации узла или конструкции. Качество сварных и паяных соединений обеспечивается предварительным контролем материалов и заготовок перед сваркой, текущим контролем за процессом сварки и пайки, окончательным контролем готовых сварных или паяных соединений.

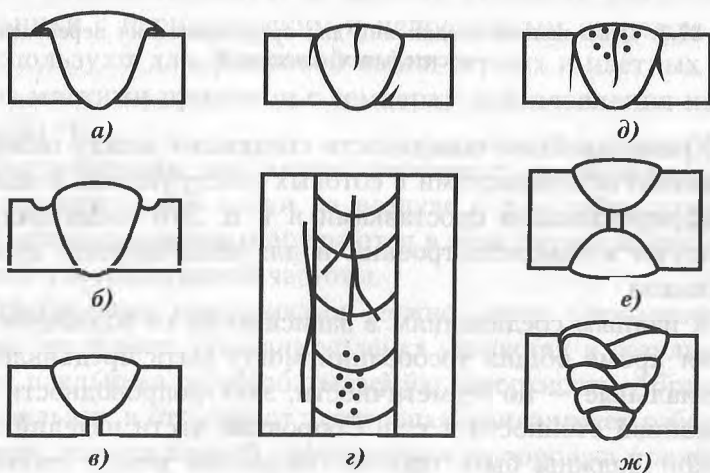


Рис. 37.4. Виды дефектов в сварных соединениях

В зависимости от того, нарушается или не нарушается целостность сварного соединения при контроле, различают разрушающие и неразрушающие методы контроля.

Предварительный контроль материалов и заготовок. При контроле основного и сварочных материалов устанавливают, удовлетворяют ли сертификатные данные в документах заводов-поставщиков требованиям, предъявляемым в соответствии с назначением и ответственностью сварных узлов и конструкций. Осматривают поверхности основного металла, сварочной проволоки и покрытий электродов с целью обнаружения внешних дефектов и повреждений. Перед сборкой и сваркой заготовок проверяют, соответствуют ли их формы и габаритные размеры установленным, а также контролируют качество подготовки кромок и свариваемых поверхностей.

При изготовлении ответственных конструкций сваривают контрольные образцы. Из них вырезают образцы для механических испытаний. По результатам испытаний оценивают качество основного и сварочного материалов, а также квалификацию сварщиков, допущенных к сварке данных конструкций.

Механические испытания сварных соединений предусматривают статические испытания на растяжение и изгиб и испытания на ударную вязкость наплавленного металла и различных участков сварного соединения. При испытаниях определяют пределы  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$ , относительное удлинение  $\delta$  и сужение  $\Psi$ , угол загиба  $\alpha$  и ударную вязкость  $a_{II}$ .

Сварное соединение испытывают на изгиб на плоских сварных образцах со снятым усилением с помощью двух опор и оправки. Диаметр оправки выбирают равным двум толщинам образца, а расстояние между опорами — трем диаметрам оправки. При испытании определяют угол загиба  $\alpha$  при образовании первой трещины в растянутой зоне образца. Угол  $\alpha$  характеризует пластичность сварного шва.

Металлографические исследования проводят на макро- и микрошлифах сварного шва.



Стойкость против образования трещин определяют путем сварки технологических проб или проведения специальных механических испытаний сварных соединений в процессе сварки.

Текущий контроль за процессом сварки. В процессе сварки проверяют соблюдение сварщиками установленных параметров режима сварки и исправность работы сварочного оборудования. Осматривают сварные швы для выявления внешних дефектов и замеряют их геометрические размеры. Замеченные отклонения устраняют непосредственно в процессе изготовления конструкций. Выявленные дефекты удаляют механическим путем или с помощью поверхностной газовой резки, а дефектные участки швов заваривают; дефекты при повторной заварке исправляют в соответствии с установленными нормами.

Окончательный контроль готовых сварных и паяных соединений. Готовые сварные соединения подвергают следующим видам контроля: внешнему осмотру для выявления поверхностных дефектов и обмеру сварных швов; испытаниям на плотность; магнитному контролю; просвечиванию рентгеновскими и гамма-лучами, ультразвуком для выявления внутренних дефектов. Паяные соединения подвергают внешнему осмотру, испытаниям на плотность, магнитному и ультразвуковому контролю. Вид контроля и относительную протяженность контролируемых швов выбирают в зависимости от назначения и ответственности сварной или паяной конструкции.

Емкости для хранения жидкостей, сосуда и трубопроводы, работающие при избыточном давлении, испытывают на плотность путем гидравлического и пневматического погружения, керосином и с помощью течеискателей.

При гидравлическом испытании емкости наполняют водой, а в сосудах и трубопроводах создают избыточное давление жидкости, превышающее в 1,5–2 раза рабочее давление. В таком состоянии изделие выдерживают в течение

5—10 мин. Швы осматривают с целью обнаружения течи, капель и отпотеваний.

При пневматическом испытании в сосуды нагнетают сжатый воздух под давлением, которое на 0,01—0,02 МПа превышает атмосферное. Соединение смачивают мыльным раствором или опускают в воду. Наличие неплотности в швах определяют по мыльным пузырькам или пузырькам воздуха.

При испытании с помощью течеискателей внутри сосуда создают вакуум, а снаружи швы обдувают смесью воздуха с гелием. При наличии неплотностей гелий проникает в сосуд, откуда отсасывается в течеискатель со специальной аппаратурой для его обнаружения. По количеству уловленного гелия судят о неплотности сварных и паяных швов.

При испытании керосином швы емкостей с одной стороны смазывают керосином, с другой — мелом. При наличии неплотности на поверхности шва, окрашенной мелом, появляются темные пятна керосина. Благодаря высокой проникающей способности керосина можно обнаружить поры диаметром в несколько микрон.

Магнитный контроль основан на намагничивании сварных или паяных соединений и обнаружении полей магнитного рассеяния на дефектных участках. Изделие намагничивают, замыкая им сердечник электромагнита или помещая его внутрь соленоида. В зависимости от способа обнаружения потоков рассеяния различают методы магнитного порошка, индукционный и магнитографический. При методе магнитного порошка на поверхность соединения наносят порошок железной окалины или его масляную суспензию. Изделие слегка обстукивают для облегчения подвижности частиц порошка. По скоплению порошка обнаруживают дефекты, залегающие на глубине до 6 мм. При индукционном методе магнитный поток в изделии наводится электромагнитом переменного тока. Рассеяние поля обнаруживают с помощью искателя, в катушке которого индуцируется э. д. с., вызываю-

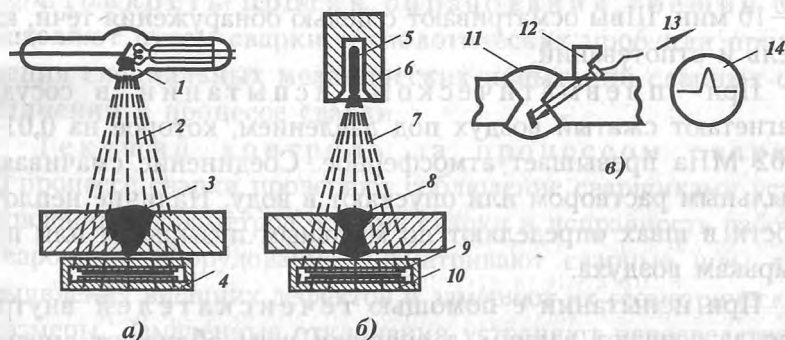


Рис. 37.5. Методы контроля сварных соединений: а — рентгеновский; б — гамма-излучением; в — ультразвуковой

щая оптический или звуковой сигнал на индикаторе. При магнитографическом методе на шов накладывают и прижимают к нему ферромагнитную ленту, на которой фиксируется магнитное изображение шва. Затем это изображение воспроизводится на экране электронно-лучевой трубки.

Рентгеновское просвечивание основано на различном поглощении рентгеновских лучей участками металла с дефектами или без них. Сварные соединения просвечивают с помощью специальных рентгеновских аппаратов. С одной стороны шва 3 на некотором расстоянии от него помещают рентгеновскую трубку 1, с другой стороны к нему плотно прижимают кассету 4 с рентгеновской пленкой (рис. 37.5, а). При просвечивании рентгеновские лучи 2 проходят через сварное соединение и облучают пленку. Для сокращения экспозиции просвечивания в кассету с пленкой закладывают усиливающие экраны. После проявления пленки на ней фиксируют участки, отличные по интенсивности осей основного фона, которые соответствуют дефектным местам в сварном соединении. Вид и размер дефектов определяют сравнением пленки с эталонными снимками.

Применяемые в промышленности рентгеновские аппараты позволяют просвечивать сварные соединения из стали толщиной 10—200 мм, алюминия — толщиной до 300 мм, меди — толщиной до 25 мм. Просвечиванием можно обнару-

жить большинство внутренних дефектов: крупные трещины, параллельные направлению рентгеновских лучей, непровары, поры, шлаковые и другие включения. При этом фиксируют дефекты, размеры которых составляют 2 % от толщины металла.

При просвечивании сварных соединений гамма-лучами источником излучения служат радиоактивные изотопы. Ампулу с радиоактивным изотопом 5 помещают в свинцовый контейнер 6 (рис. 37.5, б). Техника просвечивания сварных соединений 8 гамма-лучами 7 подобна технике рентгеновского просвечивания. Этим способом выявляют аналогичные внутренние дефекты по потемнению участков пленки 9, помещенной в кассету 10.

Просвечивание гамма-лучами по сравнению с рентгеновскими имеет ряд преимуществ. Благодаря портативности аппаратуры этот метод можно применять в любых условиях и для изделий больших толщин. Кроме того, просвечивание гамма-лучами — менее дорогостоящий способ.

Ультразвуковой контроль основан на способности ультразвуковых волн отражаться от поверхности раздела двух сред. С помощью пьезометрического щупа 12 ультразвукового дефектоскопа 13, помещаемого на поверхность сварного или паяного соединения, в металл 11 посылают ультразвуковые колебания (рис. 37.5, в). Ультразвук вводят в изделие отдельными импульсами под углом к поверхности металла. При встрече с поверхностью дефекта возникает отраженная ультразвуковая волна. В перерывах между импульсами щуп является приемником отраженного от дефекта ультразвука. Возникший в нем пьезоэффект преобразуется в электрический заряд. После усиления заряд подается на трубку осциллографа и фиксирует наличие дефекта в соединении в виде пика 14 на его экране.

Промышленные ультразвуковые дефектоскопы позволяют обнаружить дефекты на глубине 1—2500 мм. При этом можно выявлять трещины, непровары, шлаковые включения, поры и другие дефекты с минимальной площадью.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова сущность процесса пайки и каковы его особенности по сравнению со сваркой?
2. По каким признакам и как классифицируют методы пайки?
3. Какие материалы необходимы для пайки?
4. Перечислите методы пайки по способу нагрева.
5. Какие типы соединений рекомендованы для пайки?
6. Назовите наиболее часто встречающиеся дефекты сварных соединений и методы их контроля.

# Раздел X

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Глава 38

#### КЛАССИФИКАЦИЯ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

##### 38.1. Сущность процесса

Обработка металлов резанием — это процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла для получения требуемой геометрической формы, точности размеров и шероховатости поверхностей детали.

Все способы размерной обработки деталей классифицируют по виду используемой энергии на *механические*, *физико-химические* и *комбинированные* (рис. 38.1). Для осуществления процесса резания необходимо наличие относительных движений между заготовкой и режущим инструментом. Каждый станок имеет рабочие органы (шпиндели, суппорты, столы и т. д.), которым сообщаются движения, определяемые назначением станка и характером выполняемых видов обработки. Движения рабочих органов станков подразделяют на движения резания, установочные и вспомогательные.



Рис. 38.1. Классификация способов обработки металлов резанием

Движение, при котором с обрабатываемой заготовки срезается слой металла и изменяется состояние обработанной поверхности, называют *движением резания*, к которому относят главное движение и движение подачи. Движение, определяющее скорость отделения стружки, принимают за *главное движение* — скорость резания. Движение, обеспечивающее непрерывность врезания режущего лезвия инструмента в новые слои материала, называют *движением подачи*, а движение рабочих органов станка, обеспечивающее такое положение инструмента относительно заготовки, при котором с нее срезается определенный слой металла, — *установочным движением*. На схемах обработки его обозначают  $S_t$ .

Движения рабочих органов станка, которые не имеют непосредственного отношения к процессу резания и служат для транспортировки и закрепления заготовки или инструмента, быстрых перемещений рабочих органов, переключе-

ния скоростей резания и подачи и т. д., относятся к вспомогательным движениям.

В процессе обработки на заготовке различают (рис. 38.2) обрабатываемую поверхность 1, с которой предстоит срезать слой материала, обработанную поверхность 3, с которой уже срезан слой материала и превращен в стружку, и поверхность резания 2, образованную главным режущим лезвием инструмента и являющуюся переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями.

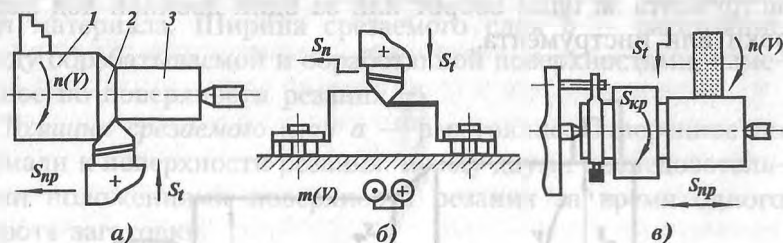


Рис. 38.2. Схемы обработки заготовок: точением (а), строганием (б), шлифованием (в):  $S_{пр}$  — продольная подача;  $S_{п}$  — поперечная подача;  $S_t$  — установочное движение

Элементами процесса резания являются скорость резания, подача и глубина резания. Совокупность этих величин составляет параметры режимов резания.

Первый из них — скорость резания  $V$  — это путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в направлении главного движения в единицу времени. Скорость резания измеряют в м/мин при всех видах обработки резания, кроме шлифования, полирования и некоторых других, где ее измеряют в м/с. Если главное движение является вращательным, то скорость резания (в м/мин)  $V = \pi D_{заг} n / 1000$ , где  $D_{заг}$  — наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм;  $n$  — частота вращения заготовки, об/мин.

Если главное движение является возвратно-поступательным, причем скорости рабочего и холостого ходов разные, то средняя скорость (в м/мин)

$$V_{ср} = \frac{Lm(k+1)}{1000},$$



где  $L$  — расчетная длина хода резца, мм;  $m$  — число двойных ходов резца, мин;  $k$  — коэффициент, характеризующий отношение скорости рабочего и холостого ходов:

$$k = \frac{V_{\text{раб}}}{V_{\text{хол}}}.$$

*Подачей  $S$*  называют путь режущего лезвия инструмента (рис. 38.3) относительно заготовки в направлении движения инструмента за один оборот или за один двойной ход заготовки или инструмента.

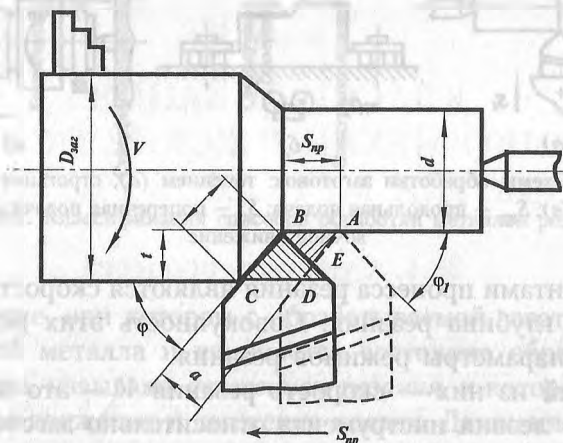


Рис. 38.3. Элементы резания и геометрии срезаемого слоя

Различают подачи: продольную —  $S_{\text{пр}}$ , поперечную —  $S_{\text{п}}$ , вертикальную —  $S_{\text{в}}$ , наклонную —  $S_{\text{н}}$ , круговую —  $S_{\text{кр}}$ , тангенциальную —  $S_{\text{т}}$ , окружную —  $S_{\text{о}}$  и др.

*Глубиной резания  $t$*  называют расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к последней, за один рабочий ход инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

Глубину резания измеряют в миллиметрах.

При точении цилиндрической поверхности глубину резания определяют как полуразность диаметров до и после обработки (рис. 38.3):

$$t = (D_{\text{заг}} - d)/2,$$

где  $d$  — диаметр обработанной цилиндрической поверхности, мм.

При рассмотрении физической сущности процесса резания используют понятия ширины и толщины срезаемого слоя материала. Ширина срезаемого слоя  $b$  — расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное по поверхности резания.

*Толщина срезаемого слоя  $a$*  — расстояние, измеренное по нормали к поверхности резания, между двумя последовательными положениями поверхности резания за время одного оборота заготовки.

Элементы и геометрия токарного проходного резца. Токарный прямой проходной резец (рис. 38.4) состоит из двух частей: рабочей и стержня. Стержень имеет квадратную или прямоугольную форму поперечного сечения и служит для закрепления резца в резцедержателе станка. Рабочая часть резца выполняет работу резания и состоит из нескольких элементов.

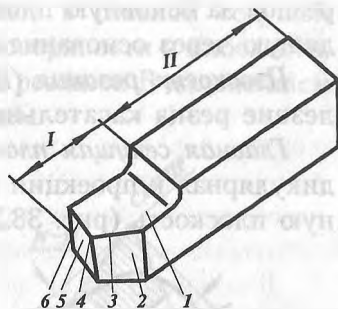


Рис. 38.4. Элементы токарного прямого проходного резца

Передняя поверхность 1 — поверхность, по которой сходит стружка в процессе резания. Главная задняя поверхность 2 — поверхность, обращенная к поверхности резания заготовки. Вспомогательная задняя поверхность 5 — поверхность, обращенная к обработанной поверхности заготовки. Главное режущее лезвие 3 — линия пересечения передней и главной задней поверхностей. Вспомогательное режущее лезвие 6 — линия пересечения передней и вспомогательной задней поверхностей; 4 — вершина резца.

Вершина рабочей части резца может быть острой или закругленной. Если вершина резца закруглена, то шероховатость обработанной поверхности уменьшается, так как в этом случае уменьшается площадь остаточного сечения срезаемого слоя металла. Наличие переходного режущего лезвия также уменьшает шероховатость обработанной поверхности заготовки.

Чтобы выполнять работу резания, рабочей части режущего инструмента придают форму клина. Для этого инструмент затачивают по передней и задней поверхностям. Для определения углов, под которыми располагаются поверхности рабочей части инструмента относительно друг друга, вводят координатные плоскости. Рассмотрим координатные плоскости применительно к токарной обработке.

*Основная плоскость (ОП)* — плоскость, параллельная направлениям продольной и поперечной подач. У токарных резцов за основную плоскость принимают плоскость, проходящую через основание стержня (рис. 38.5, а).

*Плоскость резания (ПР)* проходит через главное режущее лезвие резца касательно к поверхности резания заготовки.

*Главная секущая плоскость (N–N)* — плоскость, перпендикулярная к проекции главного режущего лезвия на основную плоскость (рис. 38.5, б).

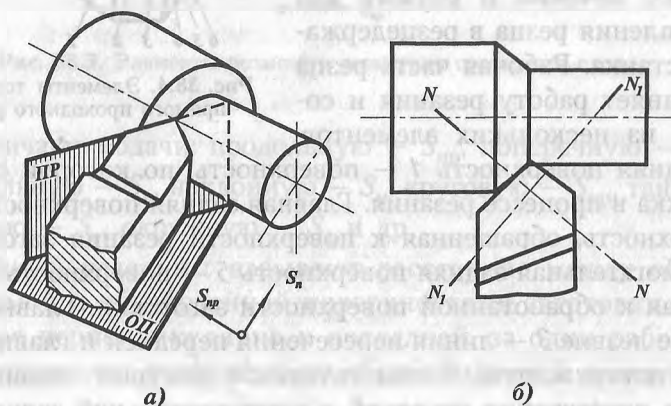


Рис. 38.5. Координатные плоскости

*Вспомогательная секущая плоскость ( $N_1-N_1$ )* — плоскость, перпендикулярная к проекции вспомогательного режущего лезвия на основную плоскость. На рис. 38.5, б показаны следы плоскостей  $N-N$  и  $N_1-N_1$ .

Углы резца определяют положение элементов рабочей части в пространстве относительно координатных плоскостей и относительно друг друга. Эти углы называют углами резца в станине. Знание углов инструмента необходимо для его изготовления в металле. Кроме того, углы инструмента оказывают существенное влияние на процесс резания и качество обработки. У токарного резца различают главные и вспомогательные углы, которые рассматривают исходя из предположения, что ось стержня резца перпендикулярна к линии центров токарного станка: вершина резца находится на линии центров станка. Углы токарного прямого проходного резца показаны на рис. 38.6.

*Главный передний угол  $\gamma$*  измеряют в главной секущей плоскости между следами передней поверхности и плоскости, перпендикулярной к следу плоскости резания. В дальнейшем угол  $\gamma$  будем называть передним углом.

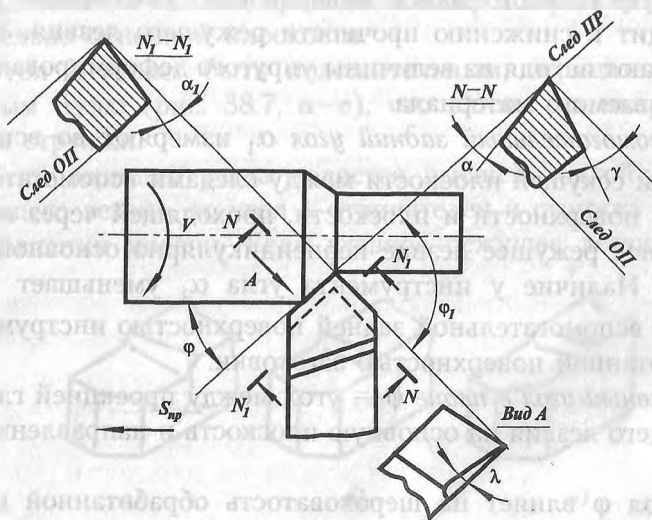


Рис. 38.6. Углы резца в статике

Передний угол  $\gamma$  оказывает большое влияние на процесс резания материала. С увеличением угла  $\gamma$  уменьшается деформация срезаемого слоя, так как инструмент легче врежется в материал, снижаются сила резания и расход мощности. Одновременно улучшаются условия схода стружки и повышается качество обработанной поверхности заготовки.

Однако чрезмерное увеличение угла  $\gamma$  приводит к ослаблению главного режущего лезвия, снижению его прочности, увеличению износа вследствие выкрашивания, ухудшению условий теплоотвода от режущего лезвия.

При обработке хрупких и твердых материалов для повышения прочности и увеличения времени работы инструмента следует использовать резцы меньшими передними углами, при обработке мягких и вязких материалов передний угол может быть больше.

*Главный задний угол  $\alpha$*  измеряют в главной секущей плоскости между следами плоскости резания и главной задней поверхности. Наличие угла  $\alpha_1$  уменьшает трение между главной задней поверхностью инструмента и поверхностью резания заготовки, вследствие чего уменьшается износ инструмента по главной задней поверхности. Увеличение угла  $\alpha$  приводит к снижению прочности режущего лезвия. Угол  $\alpha$  назначают исходя из величины упругого деформирования обрабатываемого материала.

*Вспомогательный задний угол  $\alpha_1$*  измеряют во вспомогательной секущей плоскости между следами вспомогательной задней поверхности и плоскости, проходящей через вспомогательное режущее лезвие перпендикулярно основной плоскости. Наличие у инструмента угла  $\alpha_1$  уменьшает трение между вспомогательной задней поверхностью инструмента и обработанной поверхностью заготовки.

*Главный угол в плане  $\phi$*  — угол между проекцией главного режущего лезвия на основную плоскость и направлением подачи.

Угол  $\phi$  влияет на шероховатость обработанной поверхности заготовки. Однако с уменьшением  $\phi$  шероховатость об-

работанной поверхности уменьшается. Одновременно уменьшается толщина и увеличивается ширина срезаемого слоя материала. Это приводит к тому, что увеличивается активная длина главного режущего лезвия. Сила и температура резания, приходящиеся на единицу длины режущего лезвия, уменьшаются, что снижает износ инструмента. С уменьшением угла  $\phi$  резко возрастает составляющая силы резания, направленная перпендикулярно оси заготовки, что вызывает ее повышенную деформацию. Возможно также возникновение вибраций в процессе резания, что снижает качество обработанной поверхности.

*Вспомогательный угол в плане  $\phi_1$*  — угол между проекцией вспомогательного режущего лезвия на основную плоскость и направлением подачи. С уменьшением угла  $\phi_1$  шероховатость обработанной поверхности уменьшается, одновременно увеличивается прочность вершины резца и снижается его износ.

*Угол наклона главного режущего лезвия  $\lambda$*  измеряют в плоскости, проходящей через главное режущее лезвие резца перпендикулярно основной плоскости, между главным режущим лезвием и линией, проведенной через вершину резца параллельно основной плоскости.

Угол  $\lambda$  может быть положительным, отрицательным и равным нулю (рис. 38.7, *а–в*), что влияет на направление схода стружки.

Если вершина резца является высшей точкой главного режущего лезвия, то угол  $\lambda$  отрицателен и стружка сходит в направлении подачи. Если главное режущее лезвие парал-

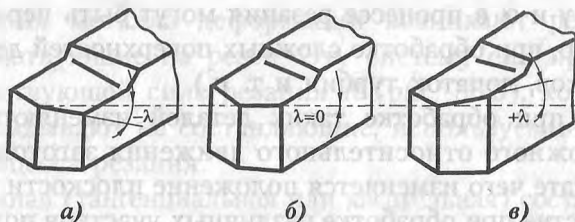


Рис. 38.7. Угол наклона главного режущего лезвия

лельно основной плоскости, то  $\lambda = 0$  и стружка сходит по оси резца. Если вершина резца является низшей точкой главного режущего лезвия, то угол  $\lambda$  положителен и стружка сходит в направлении, обратном направлению подачи.

Направление схода стружки важно учитывать при обработке заготовок на токарных автоматах. При обработке заготовок стружку необходимо отводить так, чтобы она не мешала работе инструментов в соседних позициях автомата.

С увеличением угла  $\lambda$  качество обработанной поверхности ухудшается, осевая составляющая силы резания уменьшается, а радиальная и вертикальная составляющие увеличиваются.

Углы  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$  и  $\varphi_1$  могут изменяться вследствие погрешности установки резца в резцедержателе станка. Если при обтачивании цилиндрической поверхности вершину резца установить выше линии центров станка, то угол  $\gamma$  увеличивается, а угол  $\alpha$  уменьшается. При установке вершины резца ниже линии центров станка угол  $\gamma$  уменьшается, а угол  $\alpha$  увеличивается.

Если ось резца не будет перпендикулярна линии центров станка, то это вызовет изменение углов  $\varphi$  и  $\varphi_1$ .

В процессе резания углы резца  $\gamma$  и  $\alpha$  также изменяются. Это объясняется тем, что изменяется положение плоскости резания в пространстве из-за наличия двух движений: вращения заготовки и поступательного движения резца. В этом случае фактической поверхностью резания, к которой касательна плоскость резания, является винтовая поверхность. Положение плоскости резания в пространстве определяется соотношением скоростей этих двух движений.

Углы  $\gamma$  и  $\alpha$  в процессе резания могут быть переменными (например, при обработке сложных поверхностей деталей типа кулачков, лопаток турбин и т. п.).

Углы при обработке таких деталей изменяются вследствие сложного относительного движения заготовки резца, в результате чего изменяется положение плоскости резания в пространстве при обработке различных участков поверхности заготовки.

Виды стружек и силы резания. При резании металлов образуется стружка.

Сливная стружка (рис. 38.8, *а*) образуется в случаях пластичных материалов при назначении малых глубин и больших скоростей резания, а также больших подач и передних углов резца. С внутренней прирезцовой стороны стружка гладкая, блестящая, представляет собой сплошную ленту; с наружной стороны она имеет пилообразные зазубрины.

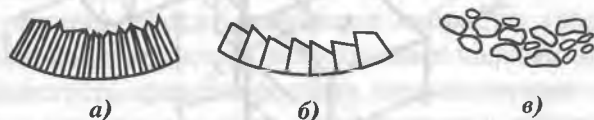


Рис. 38.8. Виды стружек при обработке резанием: *а* — сливная; *б* — скалывания; *в* — надлома

Стружка скалывания (рис. 38.8, *б*) формируется в случаях обработки материалов средней твердости и твердых при больших глубинах и малых скоростях резания, больших подачах и малых передних углах резца. Внутренняя сторона стружки — гладкая лента, внешняя — ярко выраженные зазубрины.

Стружка надлома (рис. 38.8, *в*) получается при обработке хрупких материалов (чугуна и др.) и представляет собой отдельные частицы металла неправильной формы.

Деформирование и срезание слоя металла осуществляется под действием внешней силы, прилагаемой со стороны инструмента к обрабатываемой заготовке. В результате сопротивления металла деформации возникают реактивные силы, действующие на резец. Эту систему сил приводят к равнодействующей силе резания  $R$  (рис. 38.9), которую затем раскладывают на составляющие, используемые для расчетов процесса резания.

Окружная (тангенциальная или касательная) составляющая силы резания действует в плоскости резания в направлении главного движения резания.



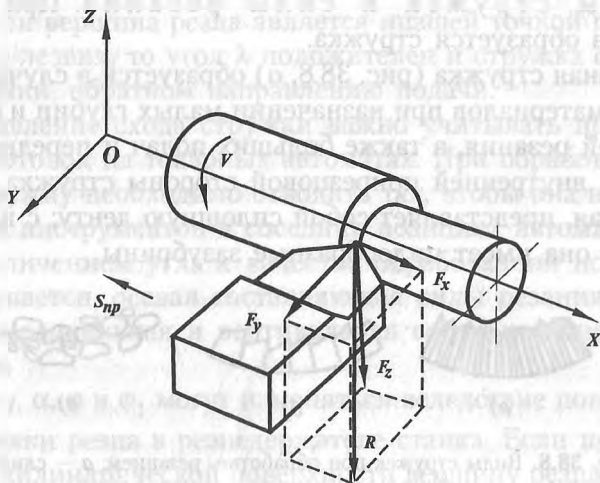


Рис. 38.9. Схема сил резания

Радиальная составляющая силы резания  $F_y$  действует в плоскости  $XOY$  перпендикулярно оси заготовки.

Осевая составляющая силы резания  $F_x$  действует в плоскости  $XOY$  вдоль оси заготовки.

Составляющие силы резания определяют расчетным путем по эмпирическим формулам. На станках замеры сил резания проводят с помощью динамометров.

Физические явления в процессе резания. Обработка резанием характеризуется физическими явлениями, из которых важнейшими являются образование нароста на резце; упрочнение обработанной поверхности; возникновение остаточных напряжений и вибраций элементов технологической системы «станок—приспособление—инструмент—деталь»; нагрев.

*Нарост* — сильно деформированный плотный слой обрабатываемого материала, закрепившийся на передней поверхности инструмента в виде твердого клина. Нарост изменяет условия стружкообразования. Он выполняет функции режущего материала, что предохраняет режущую кромку, уменьшает износ и повышает работоспособность резца. Вместе с тем налипание частиц нароста хаотично, поэтому

чистота обработанной поверхности хуже, чем при обработке заточенным инструментом.

При резании наблюдается упругопластическое деформирование тонкого слоя металла, приводящее к его упрочнению.

Деформирование металла приводит также к образованию в поверхностном слое остаточных растягивающих или сжимающих напряжений. Растягивающие остаточные напряжения снижают предел выносливости, так как приводят к зарождению микротрещин в поверхностном слое заготовки, а сжимающие напряжения повышают его.

При резании иногда возникают вибрации (колебания). Причинами возникновения вынужденных колебаний являются прерывистость процесса резания, неуравновешенность вращающихся масс, погрешность изготовления и сборки передач привода станка и др. Металлорежущие станки характеризуются также автоколебаниями, которые являются следствием изменения силы резания, сил трения на рабочих поверхностях инструмента, возникновения и отрыва нароста, упругих деформаций инструмента и заготовки и др. Автоколебания вызывают волнистость или мелкую рябь, что резко ухудшает качество поверхности. Вибрации системы снижают стойкость режущих инструментов. Борьба с ними заключается в увеличении жесткости системы, уменьшении массы заготовок, применении специальных виброгасителей.

Резание металлов сопровождается образованием теплоты. Она отводится стружкой (25–85 %), заготовкой (10–50 %), инструментом (2–8 %), путем лучеиспускания.

Смазочно-охлаждающие среды (СОС) снижают трение по передней и задней поверхностям инструмента, что повышает его стойкость, препятствует образованию наростов (это снижает шероховатость поверхности, уменьшает температуру резания, одновременно повышается точность обработки). В качестве СОС используют жидкости, газы и газообразные вещества, твердые вещества.

Трение при механической обработке приводит к изнашиванию инструмента. Различают абразивное, окислительное, адгезионное и термическое изнашивание.

## 38.2. Инструментальные материалы

Инструментальные материалы должны иметь высокую твердость, остающуюся достаточной и при высокой температуре, чтобы осуществлять внедрение инструмента в менее твердый конструкционный материал. Твердость должна сохраняться и при высоких температурах, то есть инструментальные материалы должны обладать высокой красностойкостью. Исходя из особенностей нагружения инструментов (консольное закрепление, ударные нагрузки, изгиб, растяжение, сжатие), их основными прочностными показателями считают пределы прочности на кручение, изгиб и сжатие, а также ударную вязкость. Необходимость противостоять интенсивному истиранию ставит задачу создания износостойких инструментальных материалов. Кроме того, они должны быть технологичными и иметь невысокую стоимость.

Углеродистые инструментальные стали марок У7А, У8А, У10А и другие используют для изготовления инструментов с твердостью HRC = 60–62 после термообработки; красностойкость сталей — до 200–250 °С, допустимые скорости резания — 15–18 м/мин. Применяются в производстве напильников, зубил, метчиков, плашек, ножовочных полотен и других инструментов.

Красностойкость легированных инструментальных сталей достигает 250–300 °С, допустимые скорости резания — 15–25 м/мин. Эти стали незначительно деформируются при термической обработке, поэтому из них изготавливают сложные по конфигурации инструменты: плашки, зубила, метчики, развертки, сверла, резцы, фрезы, протяжки и др.

Из быстрорежущих сталей изготавливают режущий инструмент с твердостью HRC = 62–65. После термообработки красностойкость таких сталей сохраняется до 640 °С, скорость резания — до 80 м/мин. Из стали Р9 изготавливают инструменты простой формы (резцы, фрезы, зенкеры и др.), из стали Р18 — сложные инструменты с высокой износостойкостью (метчики, плашки, зуборезный инструмент). Широко распространена быстрорежущая сталь марки Р6М5. Имеются

быстрорежущие стали с малым содержанием вольфрама (11АРМЗФ2) или без него (11М5Ф). Все шире применяют инструменты из быстрорежущих сталей с износостойкими покрытиями. Так, тонкие покрытия нитрида титана увеличивают срок службы инструмента в 2—5 раз.

Твердые сплавы, обладающие высокой износостойкостью, твердостью ( $HRA = 86-92$ ) и красностойкостью ( $800-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), пригодны для скоростей обработки до  $800\text{ м/мин}$ . Однокарбидные твердые сплавы марок ВК2, ВК4, ВК6, ВК8 имеют хорошее сопротивление ударным нагрузкам, используются для обработки чугунов, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов. Двухкарбидные твердые сплавы марок Т5К10, Т14К18, Т15К6, Т30К4 менее прочны, но более износостойки, чем сплавы первой группы. Находят применение при обработке пластичных и вязких металлов и сплавов, углеродистых и легированных сталей. Трехкарбидный твердый сплав марки ТТ7К12 обладает повышенной прочностью, износостойкостью и вязкостью, его применяют для обработки жаропрочных сталей, титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов. К державкам или корпусам инструментов твердосплавные пластинки крепят преимущественно механическим путем или припаивают с помощью медных (латунных) припоев.

С целью повышения износостойкости без снижения прочности твердых сплавов используют особо мелкие зерна карбида вольфрама (ВК6-ОМ). Инструменты оснащают также пластинками с тонкими покрытиями (толщиной  $5-10\text{ мкм}$ ) из износостойких материалов (карбида, нитрида или карбонитрида титана и др.). Это повышает их стойкость в 5—6 раз. Есть и безвольфрамовые твердые сплавы марок ТМ1, ТМ3, ТН-20, КНТ-16, создаваемые на основе карбидов или других соединений титана с добавками молибдена, никеля и других тугоплавких металлов.

Минералокерамика — синтетический материал, основой которого служит глинозем ( $Al_2O_3$ ), спеченный при температуре  $1720-1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Минералокерамика марки ЦМ-332 характеризуется красностойкостью  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Инструменты,

приготовленные из этого материала, имеют высокую износостойкость и размерную стабильность, характеризуются отсутствием налипания металла на инструмент; их недостаток — низкая прочность и хрупкость. Пластинки из минералокерамики крепят механическим путем или пайкой, предварительно подвергнув их металлизации. С целью улучшения эксплуатационных свойств в минералокерамику добавляют вольфрам, молибден, титан, никель и др. Такие материалы называются *керметами*. Известна марка кермета ВЗ, обладающего прочностью при изгибе в 2,5 раза выше, чем у ЦМ-332 при той же твердости. Также применяют керметы ВОК-60, ВОК-63 и др. Пластинки из минералокерамики применяют для безударной обработки заготовок из сталей и цветных сплавов.

Находят применение в инструментах и сверхтвердые материалы (СТМ). К ним относятся материалы на основе кубического нитрида бора, композиты. Режущими пластинками из композитов снабжаются резцы и фрезы.

Абразивные материалы представляют собой порошковые мелкозернистые вещества, используемые для производства абразивных инструментов: шлифовальных кругов, лент, брусков, сегментов, головок. Естественные абразивные материалы (наждак, кварцевый песок, корунд) характеризуются значительным разбросом свойств, поэтому применяются редко.

Абразивные инструменты в машиностроении изготавливают из искусственных материалов: электрокорундов, карбидов кремния, карбидов бора, оксида хрома и ряда новых материалов. Все они отличаются высокими свойствами: красностойкостью (1800—2000 °С), износостойкостью и твердостью. Так, микротвердость карбидов бора составляет 43 % от микротвердости алмаза, карбидов кремния — 35 % и электрокорунда — 25 %. Обработку абразивными инструментами ведут на скоростях 15—100 м/с на завершающих этапах технологических процессов по изготовлению деталей машин.

Шлифовальные и полировальные пасты содержат в своем составе оксид хрома. Из новых материалов в качестве абра-

зиков для обработки твердых сплавов используют эльбор, представляющий собой поликристаллические образования на основе нитрида бора кубического или гексагонального строения.

В промышленности широкое распространение получили различные алмазные инструменты. Используют естественные (А) и синтетические (АС) алмазы, отличающиеся высокими твердостью, красностойкостью, износостойкостью и размерной стойкостью. На алмазный инструмент не налипает обрабатываемые материалы (кроме титана). Недостаток алмазов — повышенная хрупкость. Кристаллические алмазы массой 0,2—0,8 карата (1 карат = 0,2 г) идут на оснащение режущих инструментов (резцов, сверл и др.), а также выглаживателей. Также используют алмазные порошки и микропорошки для изготовления шлифовальных и полировальных кругов. Обработка алмазными инструментами характеризуется высокой точностью, малой шероховатостью поверхности и повышенной производительностью.

### 38.3. Выбор режима резания

Производительность обработки резанием (в шт/мин) определяют количеством деталей, изготавливаемых в единицу времени.

Время обработки складывается из основного ( $T_o$ ), подготовительно-заключительного, вспомогательного времени и времени на оргтехобслуживание.

Из формулы для определения основного технологического времени при обтачивании цилиндрической поверхности на токарно-винторезном станке

$$T_o = Lh/nS_{пр}t$$

следует, что высокая производительность будет при работе с большими подачей, глубиной резания, скоростью резания

при наименьших длине обрабатываемой поверхности и припуске  $h$  (в мм) на обработку. Стремление получить высокую производительность входит в противоречие с точностью обработки и качеством обработанных поверхностей. Действительно, при увеличении  $S_{пр}$  и  $t$  производительность возрастает, а качество поверхностей резко снижается. Поэтому поверхности заготовок следует обрабатывать на таких режимах резания, при которых достигаются высокие точность обработки и качество поверхностей при удовлетворительной производительности.

Элементы режима резания назначают в следующей последовательности. Вначале выбирают значение глубины резания. При этом стремятся весь припуск на обработку снять за один рабочий ход режущего инструмента. Если по технологическим причинам необходимы два рабочих хода, то при первом снимают 80 % припуска, при втором — 20 %. Затем выбирают величину подачи. Рекомендуется назначать наибольшую допустимую подачу исходя из требований точности и допустимой шероховатости обработанной поверхности и учитывая мощность станка, режущие свойства материала инструмента, жесткость и виброустойчивость системы. Наконец, определяют скорость резания исходя из выбранных глубины резания, величины подачи и стойкости режущего инструмента.

Естественно, что для других видов размерной обработки выбор режимов в отдельных деталях отличается.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Какие движения осуществляются рабочими органами станка? Какое из них называют движением резания?*
2. *Какова геометрия токарного проходного резца?*
3. *Какие физические явления сопровождают процесс резания?*
4. *Что является параметрами режима резания и как осуществляется их подбор?*

## Глава 39

ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК  
НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ.

## ТИПЫ СТАНКОВ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ

## 39.1. Общие сведения о токарных станках

Обработка на станках токарной группы заготовок, имеющих форму тел вращения, получила широкое распространение. При точении (обтачивании) совершается два движения резания: вращательное движение заготовки (главное движение) и поступательное движение режущего инструмента — резца (движение подачи).

На станках токарной группы помимо обтачивания наружных цилиндрических, конических и фасонных поверхностей выполняют следующие операции: растачивание цилиндрических и конических отверстий, подрезание торцовых поверхностей, нарезание наружной и внутренней резьбы, разрезание, обкатывание роликами и шарами, алмазное выравнивание. Кроме того, на этих станках можно сверлить, зенковать, развертывать отверстия, а при установке специальных механизмов — проводить и другие виды обработки.

На токарных станках производят обдирочную, черновую, получистовую и чистовую обработки, а также тонкую обработку различными резцами.

На рис. 39.1 показан общий вид токарно-винторезного станка. Левая 1 и правая 14 тумбы поддерживают станину 2 с призматическими направляющими. На станине монтируют узлы станка, в левой тумбе устанавливают электродвигатель главного движения, в правой — насосную станцию и бак для подачи и хранения смазочно-охлаждающей жидкости. Слева устанавливают переднюю бабку 6 с панелью управления 5. Передачи и механизмы передней бабки позволяют изменять в широком диапазоне частоту вращения шпинделя, в данном случае — с закрепленным на нем патроном. Ниже передней



бабки на лицевой стороне станины крепят коробку подач 3. Передатки и механизмы коробки подач служат для изменения скоростей перемещения суппорта (подач). Она дает возможность также переналаживать станок для нарезания резьбы с помощью коробки сменных зубчатых колес 4. Справа на станине располагают заднюю бабку 11, назначение которой (помимо поддержки заготовки во время обработки задним центром) — закрепление осевого инструмента.

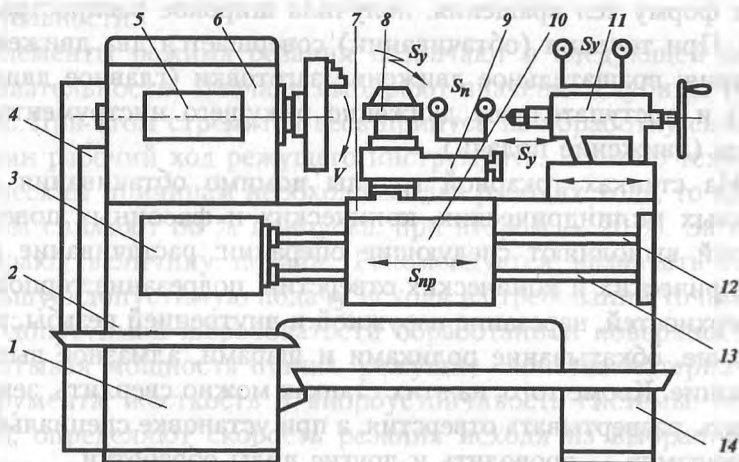


Рис. 39.1. Общий вид токарно-винторезного станка

По направляющим станины между передней и задней бабками перемещается с продольной подачей  $S_{np}$  суппорт 7. На суппорте имеется средняя поперечная каретка, с помощью которой перпендикулярно оси вращения заготовки производится поперечная подача  $S_{pr}$ . Верхний поворотный суппорт 9 устанавливают под любым углом к оси заготовки при обработке конических поверхностей. На верхнем суппорте смонтирован четырехпозиционный поворотный резцедержатель (резцовая головка) 8. На продольном суппорте закреплен фартук 10, передачи и механизмы которого преобразуют вращательное движение ходового винта 12 или ходового валика 13 в поступательное движение

суппорта. На станке устанавливают экран (на схеме не показан) для защиты работающего от стружки.

По способу совершения рабочих циклов станки подразделяют на универсальные, полуавтоматические и автоматические.

На универсальном станке рабочий-оператор составляет порядок обработки и изготавливает деталь. Программой обработки для него является технологический процесс. Ручное управление станком позволяет корректировать непосредственно программу.

Станок, работающий в автоматическом режиме, оснащен системой управления, которая заставляет его выполнять определенную программу без вмешательства человека. Автомат нуждается лишь в контроле и наладке. Полуавтоматом называют машину, работающую с автоматическим циклом, для повторения которого требуется вмешательство рабочего. Неавтоматизированными операциями являются, как правило, загрузка и съём обработанных изделий.

Одним из определяющих признаков классификации современных автоматов и полуавтоматов считается тип системы управления. Существуют станки с механической системой управления, когда в качестве программносителя выступает распределительный вал с кулачками, число которых соответствует числу управляемых механизмов.

Вместо кулачков программносителями являются копии, профиль которых полностью соответствует профилю обрабатываемых деталей. Многие автоматы и полуавтоматы используют систему управления по упорам. При этом передача и преобразование сигналов от упоров осуществляются либо электрической схемой управления станком, либо с помощью ЭВМ. В последнем случае упоры выполняют функции путевых датчиков.

Следующая категория автоматов и полуавтоматов — это станки с электро-, гидро- или фотокопировальными устройствами.

Более прогрессивными являются системы управления, в которых программа работы автомата или полуавтомата задается как система чисел, которые кодируются на магнитной

ленте, перфоленте, перфокартах, а также могут задаваться непосредственно на панели управления.

Представленный на рис. 39.1 токарно-винторезный станок является универсальным и наиболее приемлемым для единичного и мелкосерийного производств.

На токарно-револьверном станке (рис. 39.2, *а*) в револьверной головке (револьверном суппорте) 2 устанавливают различные инструменты. Различают станки с вертикальной, горизонтальной или наклонной осью вращения револьверной головки. На станках с многогранной головкой, вращающейся относительно вертикальной оси, имеются один или два поперечных суппорта 1, что расширяет возможности многоинструментальной обработки.

Быстрая смена инструмента в процессе обработки, предварительная наладка станка, приводящая к возможности обработки по упорам 3, и одновременная обработка несколькими инструментами делают токарно-револьверные станки более производительными и пригодными для серийного производства. Производят на этих станках детали типа штуцеров, ступенчатых валов, фланцев, колец, втулок и др.

Крупные и тяжелые заготовки обрабатываются на токарно-карусельных станках (рис. 39.2, *б*), одно- или двухстоечных (2, 4). Станок имеет круглый стол 1 диаметром до 21 м с вертикальной осью вращения. Инструменты закрепляют в резцедержателях верхнего 3 и бокового 7 суппортов, а также в револьверной головке 6. В одностоечных станках устраивают вертикальный револьверный и боковой суппорты. Револьверную головку и верхний суппорт устанавливают на движущейся вверх-вниз траверсе 5.

Одновременная обработка несколькими инструментами повышает производительность станка. На токарно-карусельных станках обрабатывают заготовки рабочих колес турбин, массивных зубчатых колес, маховиков, корпусов и т. д. в единичном и серийном производствах.

Обработку заготовок ведут и на многолезцовых токарных полуавтоматах (рис. 39.2, *в*), снабженных двумя суппортами: верхним 1, имеющим только поперечную подачу, и нижним 2,

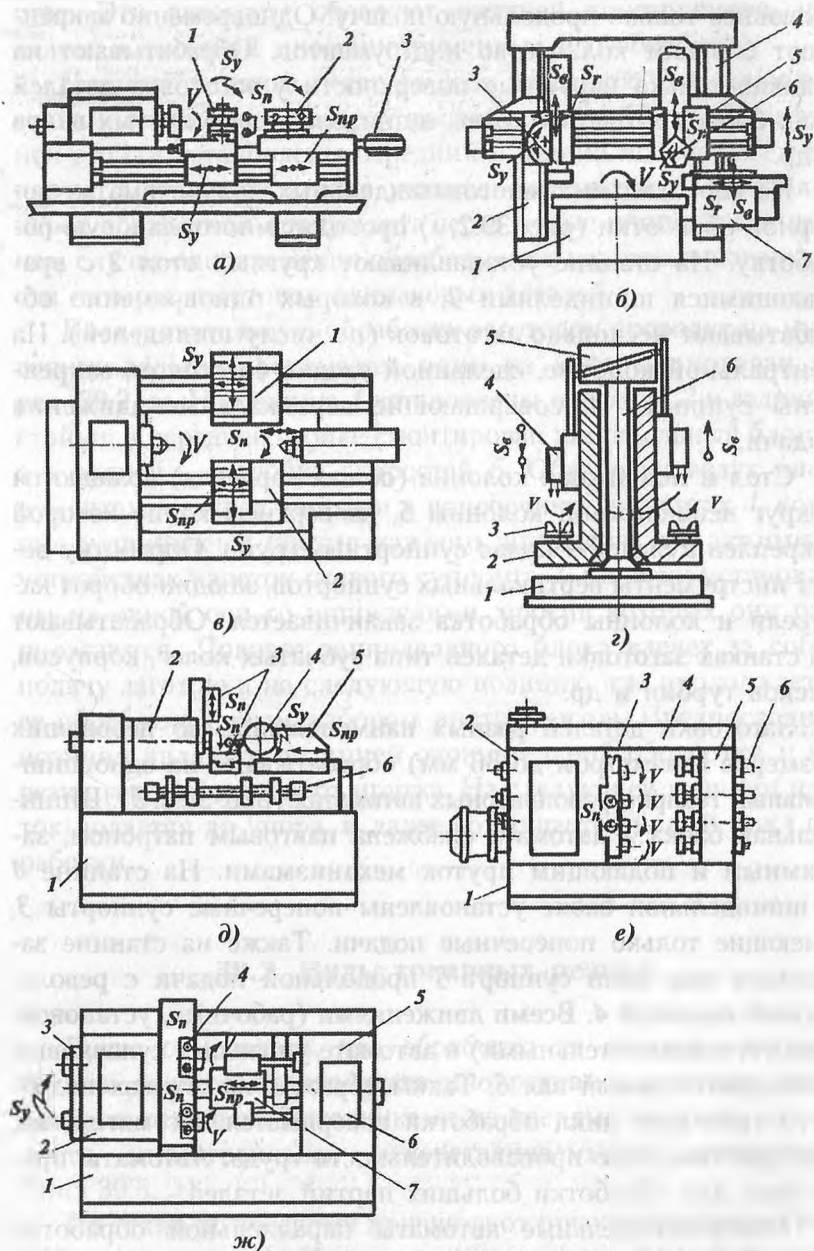


Рис. 39.2. Общий вид станков токарной группы

имеющим только продольную подачу. Одновременно закрепляют большое количество инструментов. Обрабатывают на станках только наружные поверхности у заготовок деталей типа блоков зубчатых колес, шпинделей, ступенчатых валов и др.

На вертикальных многошпиндельных полуавтоматах роторной обработки (рис. 39.2, *г*) проводят многоплановую обработку. На станине устанавливают круглый стол 2 с вращающимися шпинделями 3, в которых одновременно обрабатывают несколько заготовок (по числу шпинделей). На центральной колонне, сделанной заодно со столом, закреплены суппорты 4, совершающие вертикальные движения подачи.

Стол и подвижная колонна (общая карусель) вращаются вокруг неподвижной колонны 6, на верхнем конце которой закреплен кулачок 5 подач суппортных групп. Обработку ведут инструменты вертикальных суппортов, за один оборот карусели и колонны обработка заканчивается. Обрабатывают на станках заготовки деталей типа зубчатых колес, корпусов, дисков турбин и др.

Заготовки деталей разных наименований, но небольших размеров (диаметром до 36 мм) обрабатывают на одношпиндельных токарно-револьверных автоматах (рис. 39.2, *д*). Шпиндельная бабка 2 автомата снабжена цанговым патроном, зажимным и подающим прутки механизмами. На станине 1 и шпиндельной бабке установлены поперечные суппорты 3, имеющие только поперечные подачи. Также на станине закреплен еще один суппорт 5 продольной подачи с револьверной головкой 4. Всеми движениями (рабочими, установочными и вспомогательными) в автомате управляет кулачковый распределительный вал 6. Таким образом, на станках подобного типа весь цикл обработки совершается автоматически. Это дает высокую производительность труда. Автоматы применяют для обработки больших партий деталей.

Многошпиндельные автоматы параллельной обработки (рис. 39.2, *е*) широко распространены в массовом производ-

стве. Эти автоматы обладают жесткой конструкцией, что делает возможной многоинструментальную обработку.

Станина 1 станка несет на себе переднюю 2 и заднюю 5 стойки, соединенные сверху поперечиной 4. На торце передней стойки установлены передний и задний поперечные суппорты 3. В задней стойке установлены упоры 6. Заготовки перед обработкой пропускают через полые шпиндели; в данном случае одновременно обрабатывают наружные поверхности четырех заготовок одинаковых деталей.

Последовательную обработку заготовок проводят на многошпиндельных автоматах, один из которых показан на рис. 39.2, ж. На станине 1 установлены передняя 2 и задняя 5 стойки; в передней стойке смонтирован шпиндельный блок 3, а в задней — коробка скоростей 6. Обработку ведут инструментами, закрепленными в поперечных суппортах 4, которые установлены против каждого шпинделя, и в зажимных устройствах кареток осевого суппорта 7. Каретки установлены на одной оси со шпинделями, против которых они располагаются. Поворот шпиндельного блока влечет за собой подачу заготовки на следующую позицию, где продолжается ее обработка новым набором инструментов. Предпоследняя позиция является позицией окончательной обработки и отрезки готовой детали от прутка. На следующей позиции пруток подается до упора, и далее совершается новый цикл обработки.

### 39.2. Виды токарных резцов

Выше отмечалось, что обработка на станках токарной группы ведется преимущественно резцами, режущая часть которых оснащена пластинками из твердых сплавов, в частности многогранными неперетачиваемыми пластинками (рис. 39.3, л).

По технологическому признаку отличают следующие разновидности резцов. Проходные резцы (рис. 39.3, а) исполь-

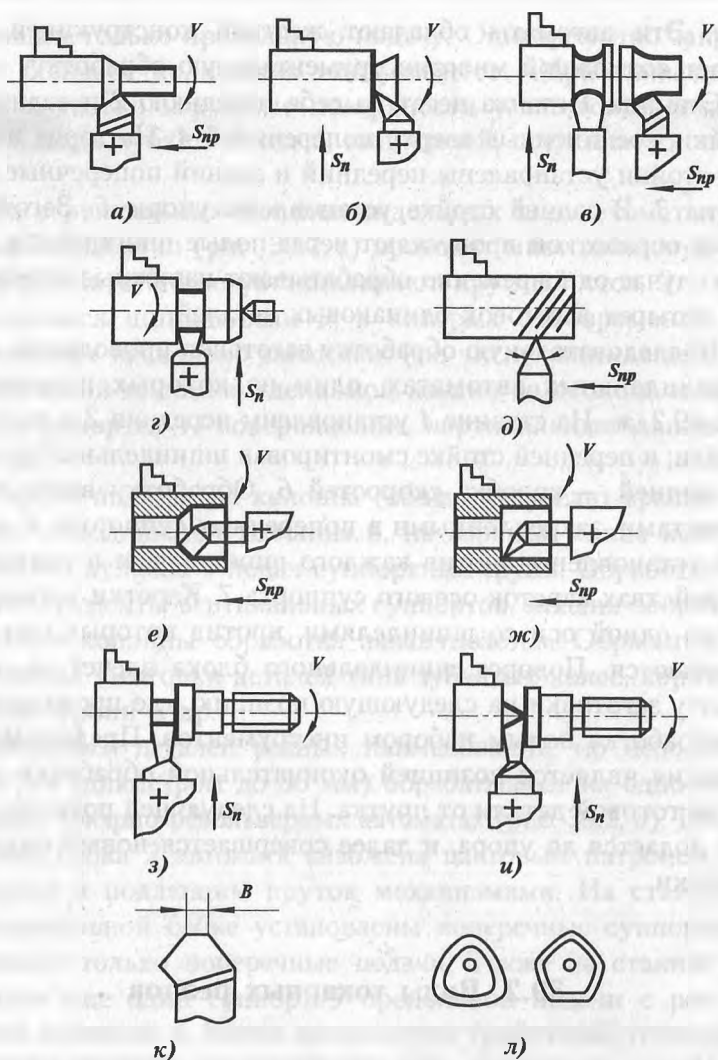


Рис. 39.3. Токарные резцы

зуют для обтачивания наружных цилиндрических и конических поверхностей; резцу задается продольное движение подачи. Подрезные резцы (рис. 39.3, б) предназначены для обтачивания плоских торцевых поверхностей; резцы имеют

поперечную подачу. Обработку поверхностей сложной конфигурации проводят фасонными резцами (рис. 39.3, в), с поперечными либо продольными подачами. Прорезные резцы (рис. 39.3, г) служат для протачивания канавок. Длина главной режущей кромки резца может быть равной ширине канавки; резцу сообщается поперечная подача. Резьбовыми резцами (рис. 39.3, д) проводят нарезание резьбы на наружных и внутренних поверхностях при продольной подаче. Расточными резцами осуществляют обработку внутренних поверхностей. Расточку ведут проходными резцами сквозных (рис. 39.3, е) и упорными резцами глухих (рис. 39.3, ж) отверстий при продольной подаче. Отрезные резцы служат для разделения заготовок на части и отделения готовой детали от заготовки-прутка.

Прямая главная режущая кромка (рис. 39.3, з) приводит к разрушению шейки в конце резки, поэтому торец требует дополнительного прохода. Наклонная кромка (рис. 39.3, и) оставляет после себя чистый торец. Эти резцы применяют при обработке на автоматических станках. Резцу при отрезке сообщают поперечную подачу.

По характеру обработки резцы делят на черновые, получистовые и чистовые.

По форме резцы могут быть прямыми, оттянутыми и изогнутыми.

По направлению подачи резцы считают левыми или правыми.

По способу изготовления различают целые резцы; резцы с приваренной встык рабочей частью; с приваренной или припаянной пластинкой из инструментального материала; со сменными пластинками.

По роду материала резцы разделяют на резцы из быстрорежущей стали, с пластинками из твердого сплава, с пластинками из минералокерамики и с кристаллами алмазов.

Для высокопроизводительного точения при больших подачах используют резцы с дополнительным режущим лезвием  $B$ , которое дает меньшую шероховатость (рис. 39.3, к).



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные узлы токарного станка.
2. Какой тип токарного станка является наиболее универсальным?
3. Перечислите виды станков токарной группы и их возможности.
4. Какие различают виды токарных резцов и по каким признакам их классифицируют?

## Глава 40

### ОБРАБОТКА

### ЗАГОТОВОК НА СВЕРЛИЛЬНЫХ, РАСТОЧНЫХ, СТРОГАЛЬНЫХ, ДОЛБЕЖНЫХ И ПРОТЯЖНЫХ СТАНКАХ

#### 40.1. Характеристика метода обработки сверлением и растачиванием

Сверление и растачивание — методы обработки резанием внутренних цилиндрических поверхностей с помощью сверл или расточных резцов.

Сверлами формируют поверхности отверстий. Расточными резцами ведут обработку в заранее отформованных отверстиях с припуском, чтобы получить отверстия с точно координированными осями. Растачивают средне- и крупногабаритные заготовки корпусных деталей.

На сверлильных станках осуществляют два рабочих движения сверла: вращательное — вокруг своей оси (главное движение) и поступательное — параллельно оси (движение подачи). Расточные станки также имеют два движения: вращение инструмента (главное движение) и перемещение инструментов или заготовки (движение подачи).

Помимо сверл на сверлильных станках используют и другие осевые инструменты для получения поверхностей заданных форм и размеров с высокими показателями по качеству.

На сверлильных и расточных станках проводят и многоинструментную обработку. На расточных станках также применяют осевые инструменты, но чаще — расточные резцы. При обработке используют резцовые головки и резцовые блоки. Более высокую точность обеспечивают алмазные расточные резцы.

## 40.2. Виды режущего инструмента.

### Элементы и геометрия спирального сверла

Обработку заготовок на сверлильных станках проводят сверлами, зенкерами, развертками, метчиками и комбинированными инструментами.

Сверла по конструктивному признаку разделяют на спиральные, центровочные и специальные. Наибольшее распространение получили спиральные сверла (рис. 40.1, а); число режущих зубьев (лезвий)  $z = 2$ . Составными частями сверла являются рабочая часть длиной  $l_1$ , шейка  $l_2$ , хвостовик  $l_3$  и лапка  $l_4$ . Назначение хвостовика — закрепление сверла в шпинделе станка за счет сил трения по конической контактной поверхности. Лапка служит для выбивания сверла из шпинделя, одновременно она предохраняет хвостовик от забоин. Рабочая часть разделена на режущую  $l_5$  и направляющую  $l_6$  части. На рабочей части (рис. 40.1, б) различают пять режущих кромок сверла: главные 1 (две), поперечную 2 (одна) и вспомогательные 3 (две). Основная работа по резанию осуществляется главными режущими кромками. Они образованы пересечением передних 4 и задних 5 поверхностей рабочей части сверла. Для обеспечения правильного направления и уменьшения влияния трения на работу сверла по его цилиндрической части вдоль винтовых канавок идут две узкие ленточки 6.

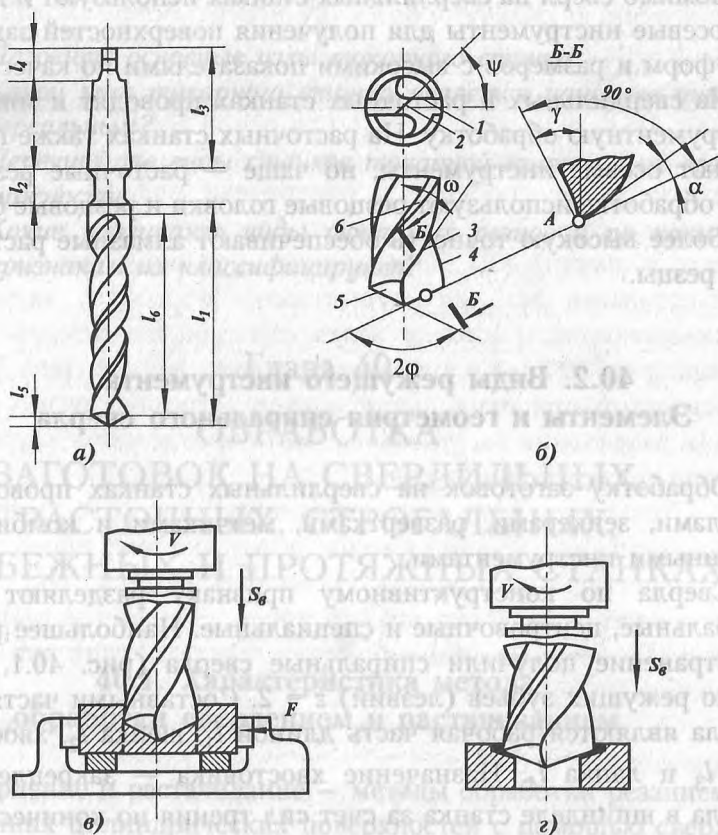


Рис. 40.1. Спиральное сверло: а — общий вид; б — геометрические параметры сверла; в — сквозное сверление; з — рассверливание

Сверлами производят сквозное сверление (рис. 40.1, в) по разметке или применяя специальные приспособления — кондукторы, направляющие сверло. Отверстия диаметром более 30 мм рассверливают спиральными сверлами (рис. 40.1, з).

Геометрические параметры сверла: передний угол  $\gamma$ , задний угол  $\alpha$ , угол при вершине сверла  $2\phi$ , угол наклона поперечной режущей кромки  $\psi$  и угол наклона винтовой канавки  $\omega$  (рис. 40.1, б).

Угол  $\gamma$  измеряют в главной секущей плоскости, перпендикулярной главной режущей кромке. Задний угол измеряют

в той же плоскости. Угол, образованный пересечением двух главных режущих кромок, считается углом при вершине сверла  $2\phi$  (изменяется у стандартных сверл от  $90^\circ$  до  $118^\circ$ ). Между проекциями главной и поперечной режущих кромок на плоскость, перпендикулярную оси сверла, образуется угол  $\psi$ , называемый углом наклона поперечной режущей кромки. Он изменяется у стандартных сверл в диапазоне  $50^\circ$ – $55^\circ$ . По наружному диаметру проводят замер угла наклона винтовой канавки  $\omega$ . Его величина составляет  $18^\circ$ – $30^\circ$ . Имеются сверла специальной конструкции (рис. 40.2). Центровочные сверла (рис. 40.2, а) предназначены для формирования углублений с торца валов, с помощью этих углублений заготовка устанавливается на центрах станка. Отверстия протяженностью более 3–5 диаметров считаются глубокими, поэтому для их обработки нужны специальные сверла для глубокого сверления: шнековые

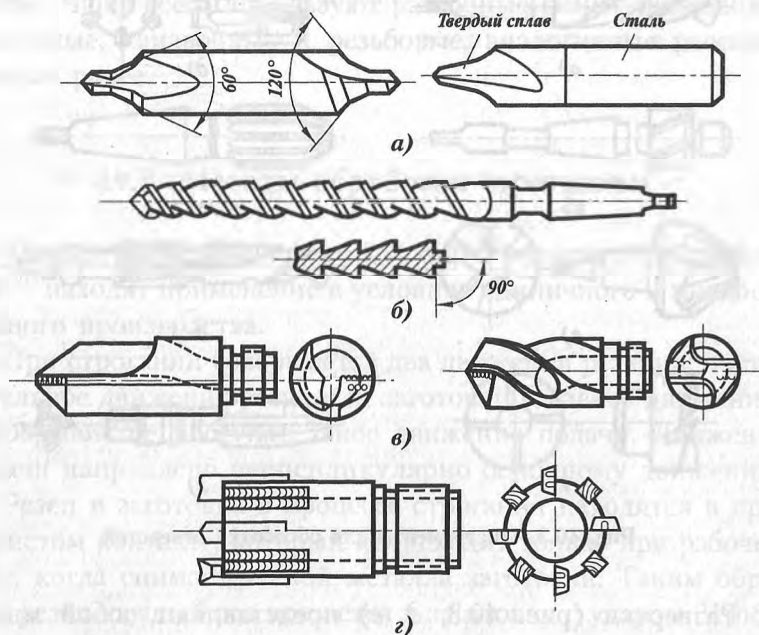


Рис. 40.2. Специальные сверла: а — центровочное; б — шнековое; в — ружейное; г — кольцевого сверления

(рис. 40.2, б), специальные ружейные одностороннего и двустороннего резания (в) и кольцевого сверления (рис. 40.2, г).

Зенкеры (рис. 40.3, а—г) применяют для обработки отформованных отверстий в отливках, поковках или заготовках. Заготовки для этого подвергают предварительной обработке сверлением. По виду обрабатываемых поверхностей зенкеры бывают цилиндрические (а, б), конические (в) и торцевые (г). По конструкции зенкеры различают цельные, насадные и с припаянными твердосплавными пластинками. Зенкеры дают более высокую точность и производительность, чем спиральные сверла. Зенкер отличается от сверла еще и тем, что имеет большое количество режущих лезвий (от 3 до 9) и не имеет поперечной режущей кромки.

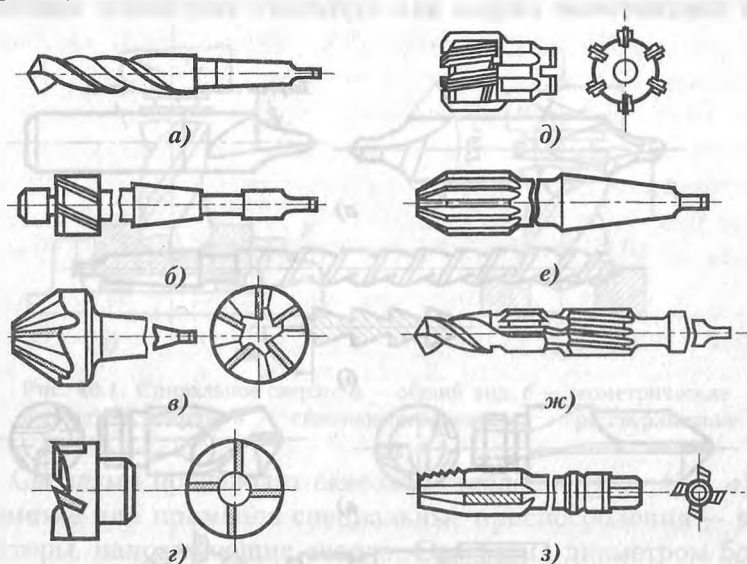


Рис. 40.3. Инструменты для обработки отверстий

Развертки (рис. 40.3, д, е) представляют собой многолезвийный инструмент для окончательной обработки отверстий, они снимают малый слой (припуск) металла, поэтому обеспечивают высокую точность. Как и зенкеры, развертки

подразделяют по виду обрабатываемых поверхностей на цилиндрические и конические, а по конструкции — на целые, со вставными зубьями, насадные. Развертки имеют еще большее число режущих лезвий (от 5 до 14).

Развертывание проводится, как правило, после зенкерования для получения высокой точности и качества поверхности.

Метчики (рис. 40.3, з) служат для нарезания резьбы в отверстиях. Метчик закрепляют в специальном патроне, чтобы нарезать правильную резьбу и избежать поломки инструмента.

В крупносерийном и массовом производствах широко применяют комбинированные инструменты (рис. 40.3, ж).

Для проведения обработки на расточных станках применяют расточные резцы, сверла, зенкеры, развертки, метчики, фрезы. Чаще всего используют расточные резцы: проходные, подрезные, канавочные и резьбовые, аналогичные рассмотренным ранее.

### 40.3. Методы обработки строганием

Методы механической обработки — строгание и долбление — находят применение в условиях единичного и мелкосерийного производства.

При строгании совершается два движения резания: поступательное движение резца или заготовки (главное движение) и прерывистое поступательное движение подачи. Движение подачи направлено перпендикулярно основному движению.

Резец и заготовка в процессе строгания находятся в прерывистом контакте, который происходит только при рабочем ходе, когда снимается слой металла заготовки. Таким образом, резец каждый раз врезается в заготовку с ударом. Чтобы противостоять динамическим нагрузкам и достичь заданной точности обработки, строгальные резцы делают более массивными.

Поперечно-строгальный станок (рис. 40.4, а) состоит из основания 1, станины 2, траверсы 3, которая движется по вертикальным направляющим станины, стола 4, установленного на траверсе консольно. По верхним горизонтальным направляющим станины перемещается ползун 7. Движение ползуну задают либо специальный кулисный механизм, либо гидропривод, размещаемые в станине станка. На торце ползуна смонтирован вертикальный суппорт 6, который может быть выставлен под углом. Резец закрепляют в откидном резцедержателе 5. Движения подачи на станке совершаются во время холостых ходов ползуна.

Продольно-строгальные станки (рис. 40.4, б) бывают одно- и двухстоечные. Станина 1 снабжена продольными направляющими, по которым стол 2 совершает возвратно-поступательные перемещения, которые задаются ему либо электродвигателем 13 через коробку скоростей 12 и ременную или червячную передачи, либо гидроцилиндром. Станок имеет жесткую конструкцию за счет левой 3 и правой 8 стоек, скрепленных наверху поперечиной 7. По вертикальным направляющим стоек передвигается траверса 5, на которой установлены два верхних суппорта 6 и 9.

Суппортам через коробку подачи 10 по направляющим траверсы задается горизонтальная (поперечная) подача. Боковые суппорты 4, 11 от индивидуальных коробок подачи имеют горизонтальную (поперечную) и вертикальную подачи. Все суппорты могут поворачиваться на требуемый угол при строгании наклонных плоскостей.

К специальным относятся кромкострогальные станки, предназначенные для подготовки кромок листов и полос под сварку.

Строгальные резцы (рис. 40.5, а) делают изогнутыми назад, чтобы режущие элементы воспринимали ударные нагрузки в начале рабочего хода. Расположение вершины на нейтральной линии (на расстоянии  $H/2$ ) уменьшает также изгиб и колебания стержня резца. По назначению резцы делят на проходные (рис. 40.5, а), подрезные (рис. 40.5, б), отрезные (рис. 40.5, в) и фасонные. Геометрия резцов: углы —

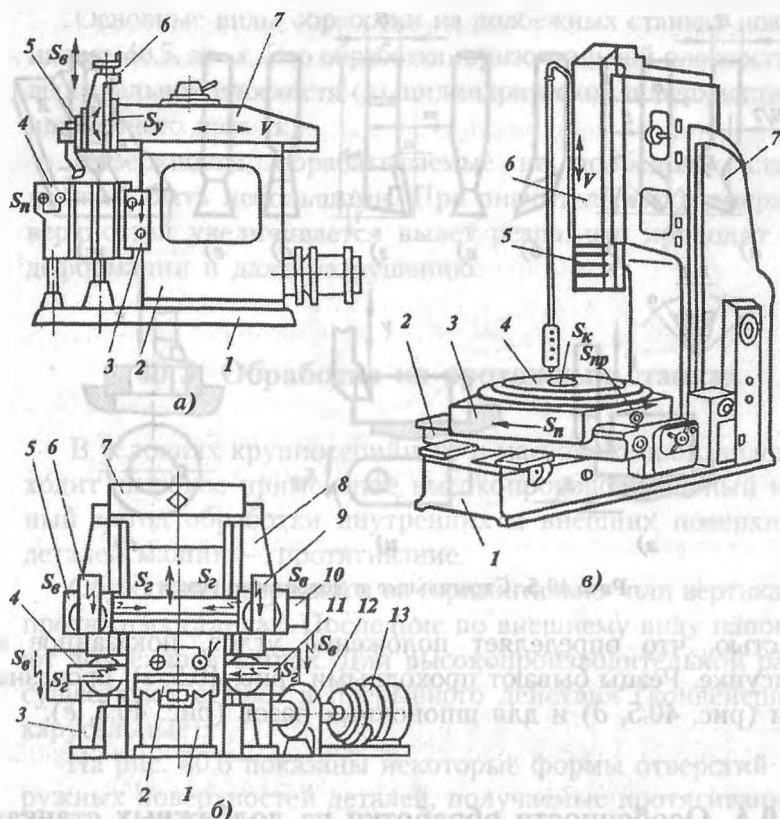


Рис. 40.4. Общие виды строгальных и долбежных станков: а — поперечно-строгальный; б — продольно-строгальный; в — долбежный

передний  $\gamma$  ( $12^\circ$ ) и задний  $\alpha$  ( $8^\circ$ ), главный угол в плане  $\phi$ , вспомогательный угол в плане  $\phi_1$  и угол наклона главной режущей кромки  $\lambda$ . Резцы оснащены пластинками из быстрорежущих сталей марок P12, P6M3, P9M4K8Ф и твердых сплавов марок BK6, BK8, T15K6 и др.

Долбежные резцы (рис. 40.5, з) выполняют изогнутыми вперед, так как они работают при вертикальном перемещении и деформируют срезаемый слой металла своей нижней



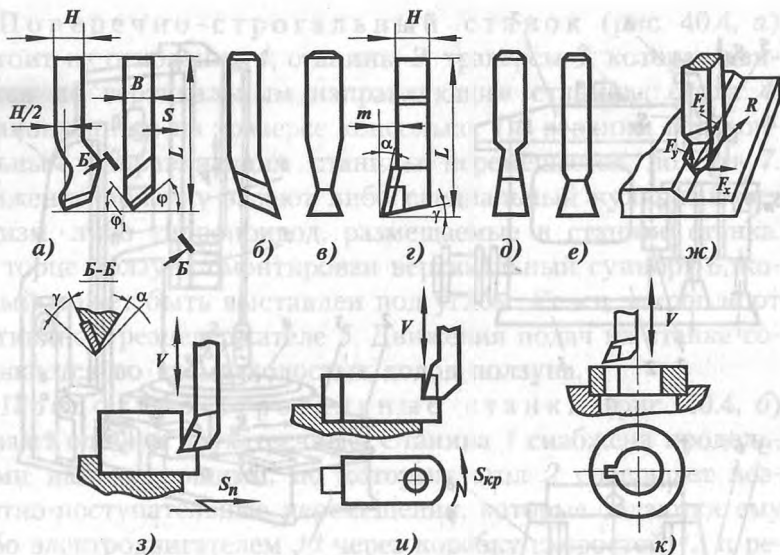


Рис. 40.5. Стругальные и долбежные резцы

частью, что определяет положение углов, показанное на рисунке. Резцы бывают проходными (рис. 40.5, г), прорезными (рис. 40.5, д) и для шпоночных пазов (рис. 40.5, е).

#### 40.4. Особенности обработки на долбежных станках

Обработку поверхностей заготовок на долбежных станках назначают при отсутствии фрезерных станков. Обработка несквозных (глухих) отверстий на долбежных станках является основным методом их получения.

Долбежный станок (см. рис. 40.4, в) в основании имеет станину 1 с направляющими для салазок 2, 3 стола 4. По направляющим стойки 7 перемещаются в вертикальном направлении ползун 6 с резцедержателем 5. Ползун может поворачиваться на 5, 10, 15 или 30°. Главное движение совершает ползун, а движения подачи (их три) — стол станка. Круговая подача столу задается червячной парой, а продольная и поперечная — винтовыми парами.

Основные виды обработки на долбежных станках показаны на рис. 40.5, *ж*—*к*. Это обработка горизонтальной плоскости (*ж*), вертикальной плоскости (*з*), цилиндрической поверхности (*и*) и шпоночного паза (*к*).

Поверхности, обрабатываемые на долбежных станках, должны быть небольшими. При значительных размерах поверхностей увеличивается вылет резца, что приводит к его деформации и даже разрушению.

### 40.5. Обработка на протяжных станках

В условиях крупносерийного и массового производств находит широкое применение высокопроизводительный и точный метод обработки внутренних и внешних поверхностей деталей машин — протягивание.

Обработка совершается на горизонтально- или вертикально-протяжных станках. Последние по внешнему виду напоминают долбежный станок. Для высокопроизводительной работы существуют станки непрерывного действия (конвейерные и карусельные).

На рис. 40.6 показаны некоторые формы отверстий и наружных поверхностей деталей, получаемые протягиванием, а также схемы работы протяжек. Протяжку для внутреннего протягивания 4 (рис. 40.6, *б*) с помощью переднего хвостовика длиной  $l_1$  крепят в тяговом патроне 1 протяжного станка. Далее у протяжки предусмотрены шейка  $l_2$ , переходный конус  $l_3$ , передняя направляющая  $l_4$ , задняя направляющая  $l_7$  и задний хвостовик  $l_8$ . Перечисленные элементы являются крепежно-присоединительной частью протяжки. Ее рабочая часть состоит из режущих  $l_5$  и калибрующих  $l_6$  зубьев. На схеме 3 — обрабатываемая деталь, а 2 — опорная сферическая шайба. При протягивании осуществляется только главное движение, совершаемое протяжкой или заготовкой. Скорость резания при протягивании из-за высоких требований по шероховатости поверхности составляет  $V_p = 1\text{--}15$  м/мин. Дви-

жение подачи при протягивании отсутствует, так как подача заложена в конструкцию инструмента путем увеличения диаметра каждого последующего зуба протяжки на определенную величину, называемую подачей на зуб  $S_z$ .

На рис. 40.6, в показана схема работы инструмента при наружном протягивании.

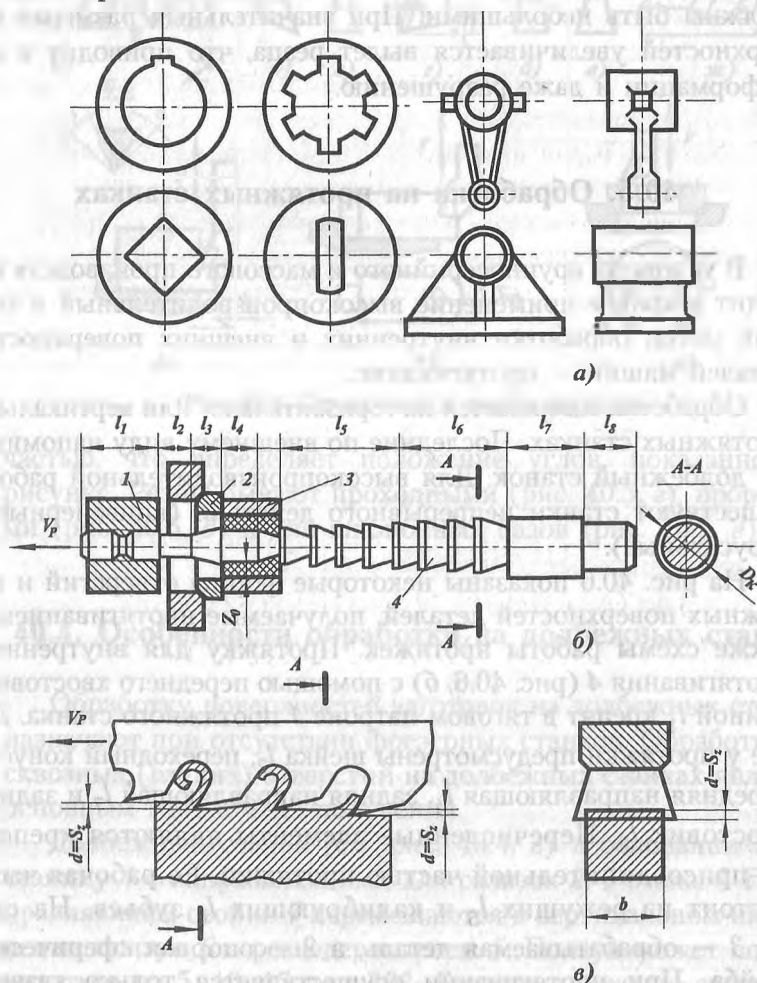


Рис. 40.6. Обработка на протяжных станках: а — поверхности, обрабатываемые протягиванием; б — внутреннее протягивание; в — наружное протягивание

Протяжки могут быть цельными, сборными или составными. Изготавливают их из легированных инструментальных сталей (например, из стали ХВГ), а также из быстрорежущих сталей P6M5, P9K5; могут быть оснащены пластинками из твердых сплавов BK8 и др.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Каково назначение сверлильных, расточных, долбежных и протяжных операций?*
- 2. Какова геометрия спирального сверла?*
- 3. Каково назначение зенкеров, разверток, метчиков?*
- 4. Назовите основные узлы строгальных и долбежных станков.*
- 5. Какие специфические наружные и внутренние поверхности получают обработкой на протяжных станках?*

## Глава 41

# ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ФРЕЗЕРНЫХ, ШЛИФОВАЛЬНЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ СТАНКАХ

### 41.1. Обработка заготовок на фрезерных станках

Фрезерование — метод обработки заготовок, при котором непрерывное главное вращательное движение совершает режущий инструмент — фреза, а заготовка совершает поступательное движение подачи. Отличительные черты фрезерования — высокая производительность и разноплановая, с точки зрения геометрических форм поверхностей, обработка.

Конструкция фрезы многолезвийного инструмента предопределяет характер процесса резания — это прерывистость

резания: каждый зуб фрезы находится в контакте с заготовкой только какую-то часть оборота. На рис. 41.1, *a—д* показаны схемы фрезерования. Направление вращения фрезы и направление подачи заготовки определяют метод обработки: встречное фрезерование (против подачи) — в этом случае направления вращения фрезы 2 и перемещения заготовки 1 не совпадают (*в*); попутное фрезерование (по подаче), когда направления вращения фрезы и перемещения заготовки совпадают (*a, д*).

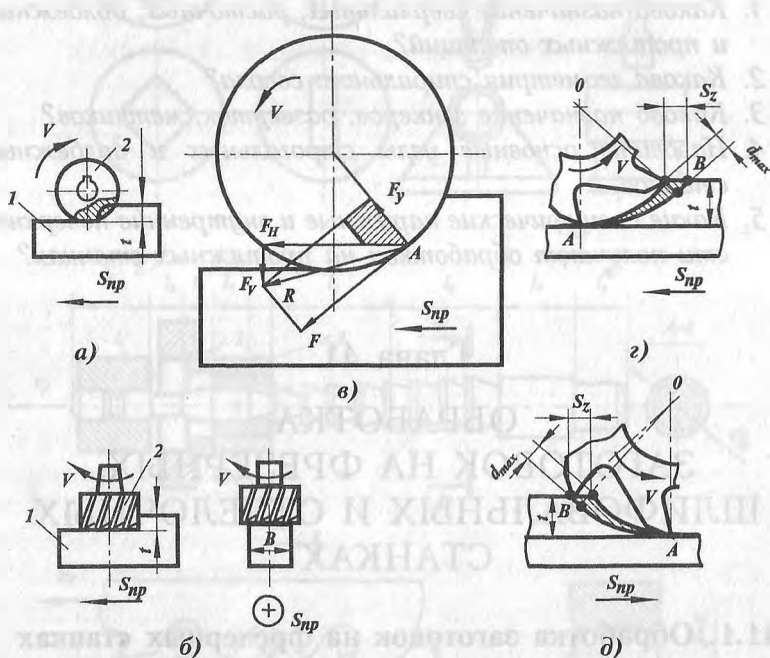


Рис. 41.1. Схемы фрезерования: *a, д* — попутное; *б* — торцевое; *в, з* — встречное

При встречном фрезеровании зуб фрезы снимает стружку толщиной от нулевого до максимального значений, возрастает нагрузка на зуб. Действующая на заготовку сила стремится оторвать ее от стола, вырвать из зажимного приспособления. Вследствие этого в технологической системе возникают вибрации, отрицательно сказывающиеся на обработке. Возмож-

ное скольжение зуба по поверхности металла, упрочненного предыдущим зубом, приводит к повышенному износу фрезы. Попутное фрезерование более благоприятно. Зуб фрезы сначала снимает слой металла наибольшей толщины, таким образом нагрузка на зуб изменяется от максимального до нулевого значений. Возникающая сила прижимает заготовку к столу, вибрации минимальны, проскальзывания зубьев нет, что приводит к уменьшению шероховатости поверхности и износа инструмента, несмотря на то что он начинает обработку с загрязненной корки заготовки.

Торцевое фрезерование (рис. 41.1, б) еще более благоприятно, так как торцевая фреза лучше закреплена в шпинделе станка и обеспечивает более плавную работу за счет введения в действие большого числа зубьев.

## 41.2. Типы фрезерных станков

Горизонтально-фрезерный консольный станок (рис. 41.2, а) имеет шпиндель 2 с горизонтальной осью вращения, смонтированный в станине 1. На верхней части станины находится хобот 3, по направляющим которого перемещаются подвески 4, поддерживающие правый конец инструментальной оправки. На консоли 8 установлены поперечные салазки 7. По продольным направляющим салазок перемещается стол 6 с поворотной частью 5. Движения подачи следующие: продольная — за счет перемещения стола по направляющим салазок; поперечная — вследствие перемещения салазок по поперечным направляющим станины; вертикальная — в результате перемещения консоли по вертикальным направляющим станины. Станки применяют в единичном и мелкосерийном производствах.

Вертикально-фрезерные консольные станки. Универсальный и с ЧПУ показаны на рис. 41.2, б, в. По вертикальным направляющим станины 1 может перемещаться вверх-вниз консоль 2. Это установочное движение осуществляют вручную. На консоли смонтированы поперечные салазки 3 и продольный стол 5, а на продольном столе — поворотная

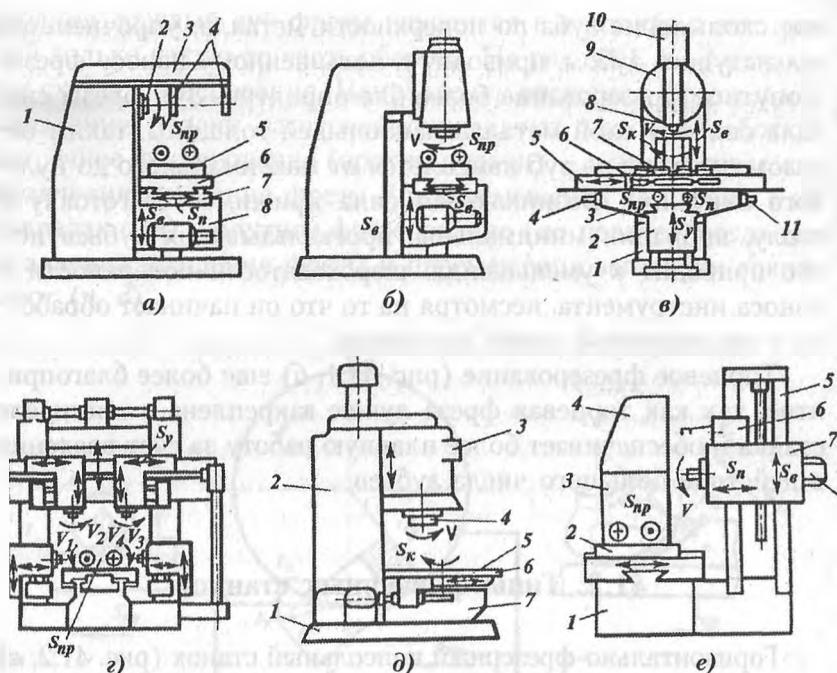


Рис. 41.2. Типы фрезерных станков: а — горизонтально-фрезерный; б, в — вертикально-фрезерный; г — продольно-фрезерный; д — карусельно-фрезерный; е — копировально-фрезерный

планшайба 7, на которой устанавливают обрабатываемую заготовку. Шаговые электродвигатели и гидроусилители моментов 11, 4 и 6 обеспечивают программированные перемещения поперечных салазок, продольного стола и программированный поворот планшайбы. Привод 10 дает возможность перемещаться с вертикальной подачей шпинделю 8, установленному во фрезерной головке 9.

Обработку заготовок (массой до 30 т) в условиях серийного производства проводят на продольно-фрезерных станках (рис. 41.2, г). На этих станках (одно- или двухстоечных) одновременно обрабатывают одну или несколько заготовок.

В массовом производстве применяют карусельно-фрезерные станки (рис. 41.2, д), у которых на основа-

нии 1 крепят стойку 2; по ее вертикальным направляющим совершает установочные перемещения фрезерная головка 3 с двумя шпинделями 4. Салазки 5 имеют установочные перемещения по поперечным направляющим станины 6. На салазках установлен поворотный стол (карусель) 7. Станки относятся к группе станков непрерывного фрезерования; в эту же группу входят и барабанно-фрезерные станки, у которых барабан (стол) имеет горизонтальную ось поворота барабана при круговой подаче.

Заготовки деталей сложных форм фрезеруют на копировально-фрезерных станках (рис. 41.2, *е*): универсальных — для производства штампов, пресс-форм и других изделий и специализированных — для обработки конкретной детали типа шаблонов, лопаток турбин и др. Станок имеет станину 1, по направляющим которой перемещается стол 2. На столе установлены стойка 3 для закрепления заготовки и стойка 4 для закрепления шаблона.

Справа на станине расположена неподвижная стойка 5, по ее направляющим вертикально передвигается поперечина 8. Горизонтальные направляющие поперечины служат для перемещений шпиндельной коробки 7 и жестко связанного с ней щупа 6. Станок работает в полуавтоматическом режиме.

### 41.3. Виды фрез

В основу классификации фрез заложены технологические (обработка плоскостей, пазов, фасонных поверхностей, зубчатых колес и резьб и т. д.) и конструктивные (расположение зубьев на исходном цилиндре, конструкция зубьев, направление зуба и т. д.) признаки.

На рис. 41.3, *а—ф* показаны основные виды фрез и варианты заготовок.

Горизонтальные плоскости (*а, б*) обрабатывают цилиндрическими (шириной до 120 мм) и торцевыми фрезами. Вертикальные плоскости фрезеруют торцевыми (*в*) и концевыми



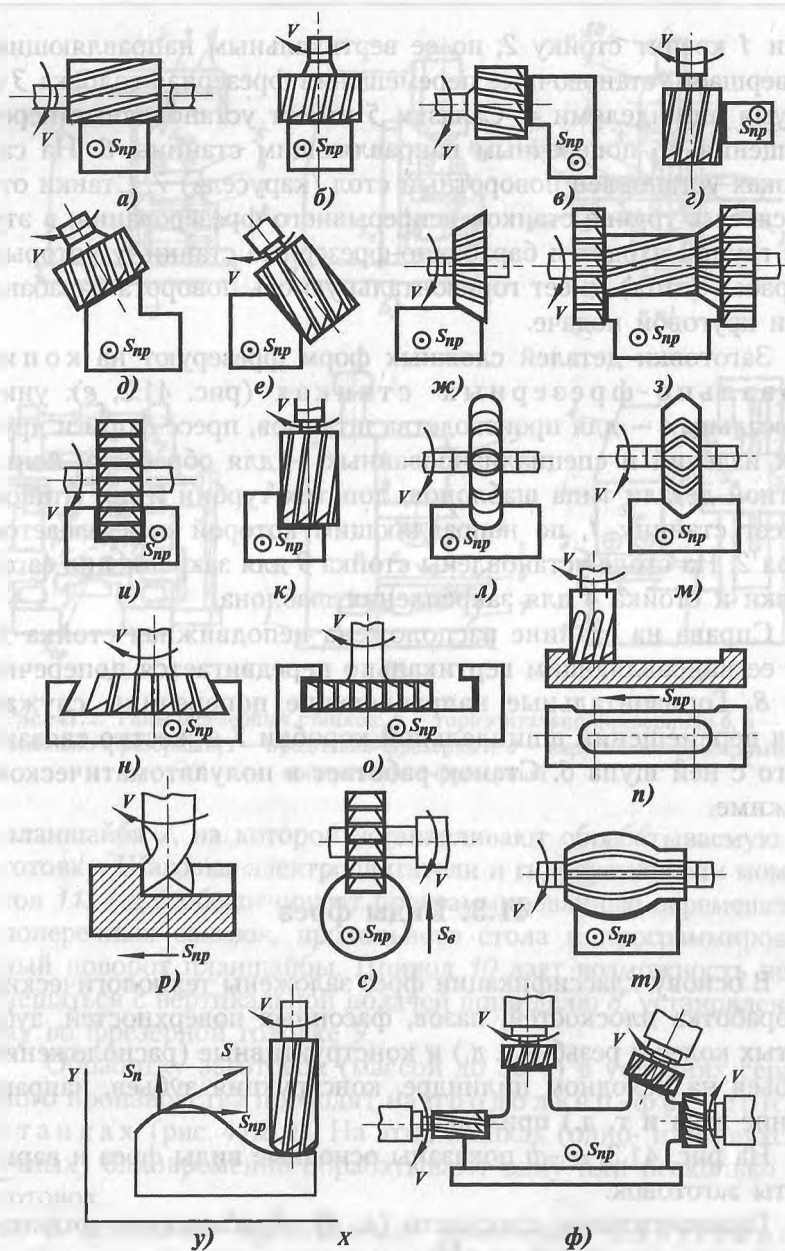


Рис. 41.3. Основные виды фрез

(*з*) фрезами. Наклонные плоскости и скосы фрезеруют торцевыми (*д*), концевыми (*е*) и угловыми (*ж*) фрезами. Комбинированные поверхности обрабатывают комбинированными фрезами (*з*). Для изготовления пазов и уступов применяют дисковые (*и*), фасонные (*л*), угловые (*м*) и концевые (*к*) фрезы. Открытые пазы типа «ласточкин хвост» и Т-образные обрабатывают следующим образом: сначала прорезают паз прямоугольного профиля концевой фрезой, а затем его обрабатывают концевой одноугловой (*н*) фрезой или фрезой для Т-образных пазов (*о*). Шпоночные пазы фрезеруют концевыми (*п*), шпоночными (*р*) или дисковыми (*с*) фрезами. Фасонные поверхности обрабатывают фасонными (*т*) фрезами на горизонтально- или вертикально-фрезерных станках. Обрабатывают их также и на копировально-фрезерных станках (*у*). Одновременная обработка различных плоскостей концевыми и торцевыми фрезами на продольно-фрезерном станке показана на схеме (*ф*).

#### 41.4. Элементы и геометрия цилиндрической и торцевой фрез

Элементами цилиндрической фрезы (рис. 41.4, *а*) являются корпус 6 и режущие зубья 7. Каждый зуб имеет переднюю 1 и заднюю 4 поверхности, режущую кромку 2, ленточку 3 и спинку зуба 5.

Геометрические параметры цилиндрической фрезы с винтовым зубом характеризуются тремя углами: передним углом, который измеряется в главной секущей плоскости; главным задним углом в той же плоскости; углом наклона винтовой линии. Винтовые зубья обеспечивают более спокойную работу фрезы, так как зуб фрезы входит в контакт с заготовкой и выходит из него постепенно. Стандартные фрезы имеют следующие значения углов:

$$\gamma = 15^\circ; \alpha = 16^\circ; \omega = 30-40^\circ.$$

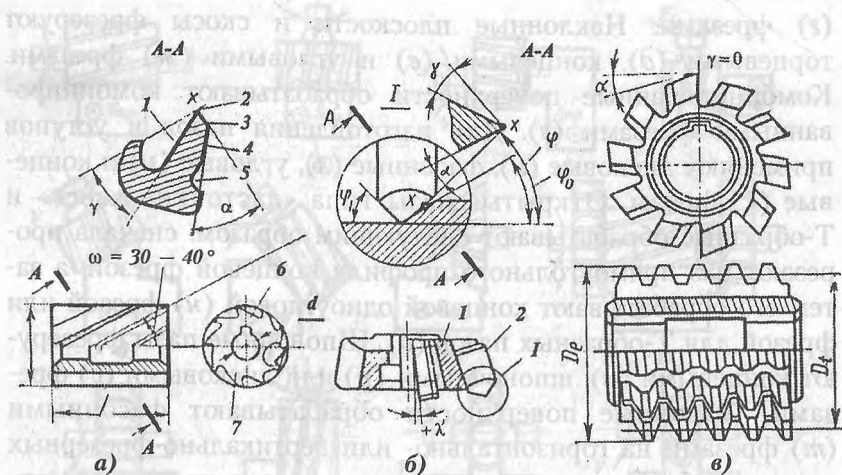


Рис. 41.4. Элементы и геометрия фрез: а — цилиндрических; б — торцевых; в — червячных

Торцевая фреза (рис. 41.4, б) состоит из следующих элементов: корпуса 1 и отдельных резцов-ножей 2. Каждый режущий зуб характеризуется элементами, аналогичными элементам проходного токарного резца.

К геометрическим параметрам резца-ножа торцевой фрезы относятся главный угол в плане  $\phi$ , вспомогательный угол в плане  $\phi_1$  и угол переходной кромки в плане  $\phi_0$ . Передний угол в точке  $x$  находится в плоскости  $A-A$ , проходящей перпендикулярно проекции главной режущей кромки. Главный задний угол лежит в той же плоскости.

Заготовки на фрезерных станках устанавливают с помощью универсальных и специальных приспособлений. Принадлежностью фрезерных станков является делительная головка, предназначенная для деления окружности заготовки на равные или неравные части, нарезания винтовых поверхностей разной крутизны и обработки кулачков.

### 41.5. Обработка заготовок на шлифовальных и отделочных станках

Шлифование — распространенный вид чистовой и тонкой обработок деталей машин. Часто шлифование является окончательной обработкой. Процесс резания материала заготовки абразивными зернами — это сущность шлифования. Абразивные зерна с помощью различных связующих веществ образуют шлифовальные круги — инструменты для обработки шлифованием, работающие на больших скоростях ( $V_k > 15$  м/с). Вращение шлифовального круга является главным движением резания.

Абразивные зерна осуществляют силовое воздействие на заготовку, что приводит к поверхностному пластическому деформированию материала. Поверхностный слой упрочняется, но эффект упрочнения из-за высоких температур (процесс рекристаллизации) значительно меньше, чем при обработке лезвийным инструментом.

Схемы шлифования представлены на рис. 41.5.

Возвратно-поступательное перемещение заготовки при плоском шлифовании (рис. 41.5, а) является продольной подачей (м/мин). Круг или заготовка должны совершать поперечную прерывистую подачу (мм/дв.ход). Вертикальная подача (мм) на глубину резания также совершается прерывисто.

Возвратно-поступательное перемещение заготовки (рис. 41.5, б) при круглом шлифовании представляет собой продольную подачу (мм/об); вращение заготовки — круговую подачу (м/мин). Поперечная подача на глубину резания осуществляется при крайних положениях заготовки (мм/дв.ход или мм/ход).

Движения резания при внутреннем шлифовании по аналогии с рассмотренными схемами шлифования показаны на рис. 41.5, в. Главное движение резания  $V_k$  при бесцентровом шлифовании (рис. 41.5, г) совершает рабочий круг 4. Заготовку 2 устанавливают на поддерживающий нож 3, справа от за-

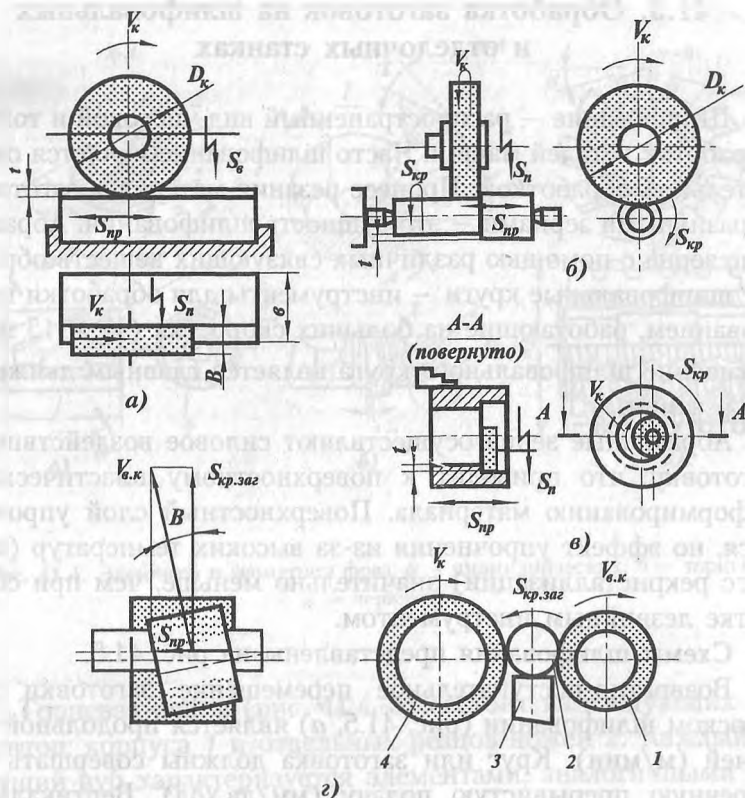


Рис. 41.5. Основные схемы шлифования: а — плоское; б — круглое; в — внутреннее; г — бесцентровое

готовки располагают ведущий круг 1, вращающийся со скоростью  $V_{в.к}$ . Так как трение между ведущим кругом и заготовкой больше, чем между рабочим кругом и заготовкой, то заготовка вращается со скоростью, близкой к скорости  $V_{в.к}$ . Перед обработкой ведущий круг устанавливают под углом  $1-7^\circ$ , благодаря чему вектор  $V_{в.к}$  раскладывается на составляющие  $S_{кр.заг}$  и  $S_{пр}$ . Продольная подача обеспечивает шлифование заготовки на всю ее длину.

## 41.6. Шлифовальные круги

Шлифовальные инструменты отличаются большим многообразием, так как ими обрабатывают различные материалы и поверхности. Наибольшее распространение получили шлифовальные круги. Круги имеют разные формы: колец, тарелок, чашек и т. д. Чтобы отличать круги, введена маркировка: ПП — круг абразивный плоский прямого профиля; АПП — алмазный круг плоский прямого профиля. *Абразивный* шлифовальный круг характеризуется видом абразивного материала, размером режущего зерна (или зернистостью), твердостью и структурой, материалом связки, классом круга по неуравновешенности и др.

Вслед за характеристикой круга (форма и размер) указывают его маркировку. Например, 24А40СМ17К5: 24А означает вид абразивного материала — белый электрокорунд; число зернистости 40 указывает на условный размер зерна — 400 мкм; твердость круга, т. е. способность его связки удерживать абразивные зерна, — СМ1 (среднемягкая); структура круга — 7 (средняя); К5 показывает, что связка круга керамическая 5 (смесь глины, полевого шпата, кварца и др.). Помимо керамической в шлифовальных кругах применяют бакелитовую (искусственная смола) или вулканитовую (искусственный каучук) связки.

*Алмазные* круги маркируют по-другому. Например, марка круга АСО125/100ТО2100 % означает: материал шлифующих зерен — АСО; зернистость круга — от 100 до 125 мкм; связка — ТО2 и концентрация алмаза в объеме рабочего слоя — 100 %.

Маркировка эльборового круга Л16КБ100 % означает: материал зерна и его зернистость — Л16; связка — КБ и концентрация эльбора — 100 %.

В процессе работы шлифовальные круги изнашиваются, кромки сыплются, вырабатываются части режущей поверхности круга, затупляются режущие грани отдельных зерен и поры круга забиваются отходами шлифования. В результате воз-

растает шероховатость обрабатываемых поверхностей, увеличиваются силы и температуры резания, уменьшается точность, появляются вибрации.

Шлифовальные круги обладают свойством самозатачивания, выражающимся в постепенном скалывании или удалении затупившихся зерен. Но этого недостаточно, поэтому производят правку круга, снимая с него отработавший слой толщиной 0,05—0,07 мм. Правку производят шлифовальными кругами из карбида кремния, алмазно-металлическими роликами, алмазными карандашами, иглами, дисками и рамками из твердых сплавов. Правку круга в зависимости от условий шлифования производят через 5—60 мин.

Кроме кругов для шлифования применяют следующие инструменты: шлифовальные головки (в основном для ручных шлифовальных машин); шлифовальные сегменты различной формы, предназначенные для сборных кругов; шлифовальные бруски круглого, прямоугольного и других сечений для слесарно-лекальных и отделочных станочных работ; шлифовальные ленты, применяемые для обработки сложных профилей и снятия заусенца.

### 41.7. Типы шлифовальных станков

Основные типы шлифовальных станков представлены на рис. 41.6, *а—в*. Круглошлифовальные станки бывают универсальными (рис. 41.6, *а*), простыми и врезными. На станине 1 круглошлифовального станка располагают стол 2, который с помощью гидропривода 6 совершает возвратно-поступательные перемещения относительно шлифовального круга. Передняя 3 и шлифовальная 4 бабки универсального станка могут поворачиваться вокруг вертикальной оси. В передней бабке расположена коробка скоростей, с помощью которой заготовке сообщается круговая подача. Шлифовальная бабка может перемещаться по своим направляющим для обеспечения поперечной подачи, необходимой для установления глубины резания. На столе установлена задняя

бабка 5, задний центр которой поддерживает оправку с закрепленной на ней заготовкой. Простые круглошлифовальные станки имеют неповоротные бабки, а врезные — характеризуются отсутствием продольной подачи.

Плоскошлифовальный станок (рис. 41.6, б) состоит из станины 4, прямоугольного стола 3, продольная подача которого осуществляется гидроприводом 5. По вертикальным направляющим стойки 2 передвигается шлифовальная бабка 1. Кроме того, сама стойка имеет возможность перемещаться по направляющим станины. Этим обеспечивается поперечная подача шлифовального круга. Плоскошлифовальные станки могут иметь круглые столы с вертикальным вращением шлифовального круга. Заготовки на станках закрепляют с помощью магнитных плит или в зажимных приспособлениях.

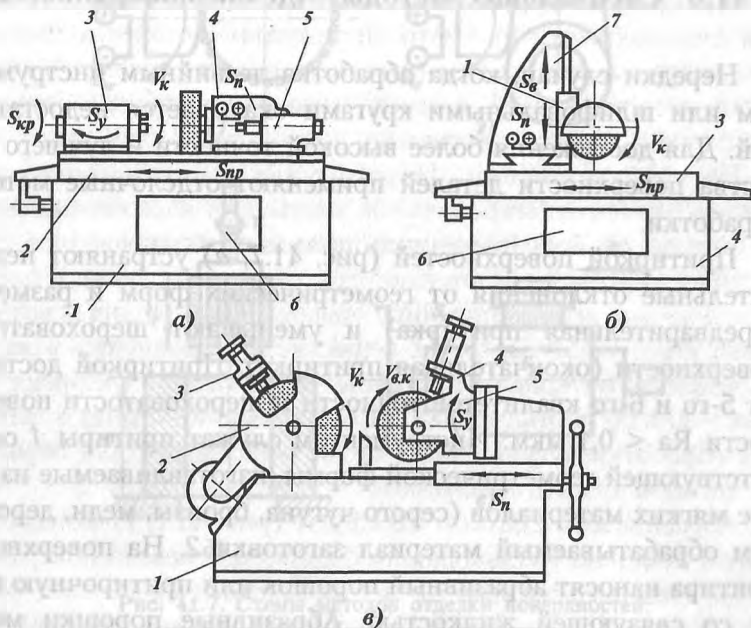


Рис. 41.6. Общие виды шлифовальных станков: а — круглошлифовальный; б — плоскошлифовальный; в — бесцентрово-шлифовальный



Бесцентрово-шлифовальные станки (рис. 41.6, в) характеризуются высокой производительностью. На станине 1 установлены шлифующий (на бабке 2) и ведущий (на бабке 5) круги. Круги правят с помощью приспособлений 3 и 4; подобные устройства имеются у всех шлифовальных станков. Для обеспечения продольной подачи заготовки ведущий круг поворачивается на некоторый угол (установочное движение).

Применяют также внутришлифовальные, заточные и специализированные шлифовальные станки.

Шлифовальные станки хорошо автоматизированы, они оснащены системами программного управления.

#### 41.8. Специальные методы отделки поверхностей

Нередки случаи, когда обработка лезвийным инструментом или шлифовальными кругами оказывается недостаточной. Для достижения более высокой точности и лучшего качества поверхности деталей применяют отделочные методы обработки.

Притиркой поверхностей (рис. 41.7, а) устраняют незначительные отклонения от геометрических форм и размеров (предварительная притирка) и уменьшают шероховатость поверхности (окончательная притирка). Притиркой достигают 5-го и 6-го квалитетов точности и шероховатости поверхности  $Ra < 0,1$  мкм. Инструментом служат притиры 1 соответствующей геометрической формы, изготавливаемые из более мягких материалов (серого чугуна, бронзы, меди, дерева), чем обрабатываемый материал заготовки 2. На поверхность притира наносят абразивный порошок или притирочную пасту со связующей жидкостью. Абразивные порошки могут быть из электрокорунда, карбида кремния, карбида бора, оксида хрома и др. Притирочные пасты состоят из абразивных порошков и химически активных веществ. Связующими жид-

костями служат машинное масло, керосин, стеарин, вазелин. Абразив внедряется в поверхность притира и удерживается в ней.

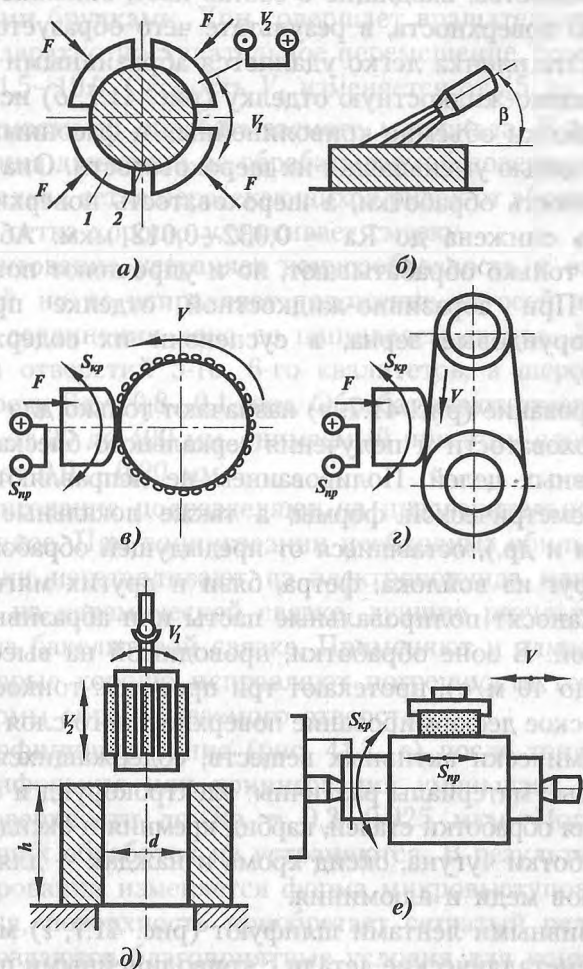


Рис. 41.7. Схемы методов отделки поверхностей:  
 а — притирка; б — абразивно-жидкостная; в — полирование; г — абразивной лентой; д — хонингование; е — суперфиниширование

Микронеровности поверхности при притирке сглаживаются за счет совокупного воздействия на заготовку абразивных зерен и химически активных веществ. Химически активные вещества, входящие в состав паст, окисляют обрабатываемую поверхность, в результате чего образуется мягкая пленка. Эта пленка легко удаляется абразивными зернами.

Абразивно-жидкостную отделку (рис. 41.7, б) используют для обработки объемно-криволинейных и фасонных поверхностей с целью уменьшения их шероховатости. Она не повышает точность обработки, а шероховатость поверхности может быть снижена до  $Ra = 0,032-0,012$  мкм. Абразивные зерна не только обрабатывают, но и упрочняют поверхность детали. При абразивно-жидкостной отделке применяют электрокорундовые зерна, в суспензии их содержится до 30–35 %.

Полирование (рис. 41.7, в) назначают только для уменьшения шероховатости и получения зеркального блеска или для декоративных целей. Полированием не исправляют погрешности геометрической формы, а также локальные дефекты (вмятины и др.), оставшиеся от предыдущей обработки.

На круг из войлока, фетра, бязи и других мягких материалов наносят полировальные пасты или абразивные зерна со смазкой. В зоне обработки, проводимой на высоких скоростях (до 40 м/с), протекают три процесса: тонкое резание, пластическое деформирование поверхностного слоя и воздействие химически активных веществ, содержащихся в пасте. Абразивные материалы различны: электрокорунд и оксид железа — для обработки сталей, карбид кремния и оксид железа — для обработки чугуна, оксид хрома и наждак — для обработки сплавов меди и алюминия.

Абразивными лентами шлифуют (рис. 41.7, г) металлические и неметаллические детали с криволинейными поверхностями. Рабочая поверхность ленты намного превышает рабочую поверхность полировального круга. Благодаря этому облегчается отвод теплоты из зоны обработки. Отделяют поверхности абразивной лентой после чистовой обработки, при этом повышается точность и уменьшается шероховатость.

Хонингование (рис. 41.7, *д*) применяют для изготовления отверстий с высокой точностью и малой шероховатостью. Хонингуют специальными инструментами — хонами — с равномерно раздвигающимися в радиальном направлении абразивными брусками. Хон совершает вращательное движение и возвратно-поступательное перемещение, соотношение  $V_1/V_2 = 1,5-10,0$ . Скорость  $V_1$  изменяется от 45 до 75 м/мин в зависимости от обрабатываемого материала. В результате совмещения движений на обрабатываемой поверхности образуется мелкая сетка пересекающихся рисок от абразивных зерен. Эта сетка хорошо удерживает смазку.

Хонингование устраняет конусообразность и овальность отверстий, но не исправляет положение их осей из-за шарнирного соединения хона со шпинделем станка. Достигают точности отверстий 5-го, 6-го квалитетов, а шероховатость поверхности  $Ra = 0,8-0,1$  мкм. Обрабатывают отверстия диаметрами от 20 до 400 мм, снимаемый при этом слой металла составляет 0,01—0,20 мм.

Хонингование подразделяют на предварительное, чистовое и тонкое. При хонинговании необходима обильная смазка. Бруски изготавливают из электрокорунда или карбида кремния на керамической связке, лучшие результаты дают бруски на бакелитовой связке. Применяют и алмазные бруски, которые хорошо исправляют погрешности геометрической формы обрабатываемого отверстия.

Суперфиниширование (рис. 41.7, *е*) после тонкого точения, шлифования или хонингования уменьшает шероховатость поверхности до  $Ra = 0,2-0,025$  мкм. Погрешности предыдущих обработок не устраняются. В результате суперфиниширования изменяется форма микровыступов, они округляются, поверхность приобретает сетчатый рельеф. Тем самым создаются благоприятные условия для контакта трущихся поверхностей. Абразивные бруски устанавливают в специальной головке. Брускам задают специальные колебательные движения с амплитудой 1,5—6,0 мм и частотой 400—1200 колебаний в минуту. При этом они поджимаются к обрабатываемой поверхности с малыми усилиями.

Смазка при суперфинишировании играет важную роль. В начале обработки острые микровыступы поверхности прорывают масляную пленку и контактируют с брусками. Давление на выступах велико, что создает условия для их пластического деформирования. Далее масляную пленку прорывает все большее количество выступов, при этом давление снижается; в какой-то момент давление брусков уже не может прорвать масляную пленку, которая закрывает выровненные микровыступы. В момент создания жидкостного трения процесс суперфиниширования прекращается автоматически.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Какие способы по направлению движения инструмента и заготовки различают при фрезеровании?*
2. *Назовите основные типы фрезерных станков и виды фрез.*
3. *Каково назначение шлифования и какие при этом используют схемы?*
4. *Перечислите основные типы шлифовальных станков.*
5. *Какими методами обработки поверхностей достигается повышенная точность и чистота?*

## Глава 42

# ОСНОВЫ МЕХАНИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### 42.1. Станки с программным управлением

Наиболее перспективным направлением автоматизации производства в машиностроении и других отраслях промыш-

ленности является создание комплексно-автоматизированных гибких технологических систем. Универсальные металлорежущие полуавтоматы и автоматы надежны в работе. Но они, работая по жестко установленной программе, обладают серьезным недостатком: не реагируют на отклонения качества деталей в ходе обработки. Это связано с трудностью корректировки программы простыми средствами, а при их разработке невозможно предвидеть в совокупности изменений такие факторы, как износ инструмента, колебания температуры, непостоянство припуска, силы трения и жесткость станка, инерционность и быстроедействие механизмов и т. п. Поэтому необходимы постоянное наблюдение за их работой и периодические подналадки.

Станки с программным управлением отличаются высокой производительностью, присущей специальным станкам, и гибкостью (прежде всего простотой переналадки), характерной для универсального оборудования. Эти станки можно применять практически в любых условиях производства.

Металлорежущие станки снабжают цикловым (ЦПУ) или числовым (ЧПУ) видами программного управления.

Станки с ЦПУ используют, например, при обработке ступенчатых валов. Станки с ЦПУ просты и дешевы, но их переналадка достаточно трудоемка.

Системы с ЧПУ значительно расширяют технологические возможности станков, так как они производят перемещения рабочих органов станка по одной, двум или трем координатам. Кроме того, на носителе программы может быть зафиксировано практически неограниченное число команд по последовательности и величинам перемещений подвижных элементов рабочих органов станка.

На рис. 42.1 приведена классификация системы ЧПУ станка. В ее состав входят: источники информации по объему управления (измерительные датчики параметров технологического процесса 9 и сигнальные датчики фиксированных положений рабочих органов станка 10); исполнительные устройства (блок управления двигателями подач 4, двигатели приводов подач и привода главного движения 5, измеритель-

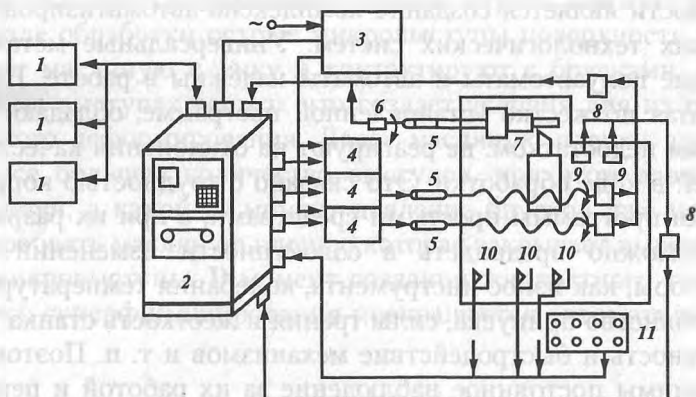


Рис. 42.1. Структура системы ЧПУ

ные преобразователи перемещений рабочих органов станка 6); вычислительно-управляющее устройство численного управления УЧПУ 2; внешние согласующие устройства УЧПУ с источниками информации и исполнительными устройствами (нормирующие и согласующие блоки измерительных каналов 8); внешние устройства обмена информацией УЧПУ—оператор, УЧПУ—ЭВМ (или локальная сеть ЭВМ) высших рангов (аппаратура связи с ЭВМ высшего ранга, периферийные устройства ввода-вывода данных 1); вспомогательные блоки 11 и устройства 3.

Станки с ЧПУ позволяют проводить обработку со все большей точностью в зависимости от характера системы управления. При прямой системе (рис. 42.2, а) сигнал  $X$  от программносителя 1 считывается в устройстве 2, преобразовывается в распределительно-усиливающем устройстве 3, после чего передается на исполнительный механизм (например, шаговый двигатель) 4, который задает подачу  $S$  рабочему органу станка 5.

В этой системе возможна и значительная накопленная ошибка. В системе с обратной связью (рис. 42.2, б) устанавливают дополнительное измерительное устройство 6. Оно измеряет величину подачи  $S$  на выходе и сравнивает ее с задан-

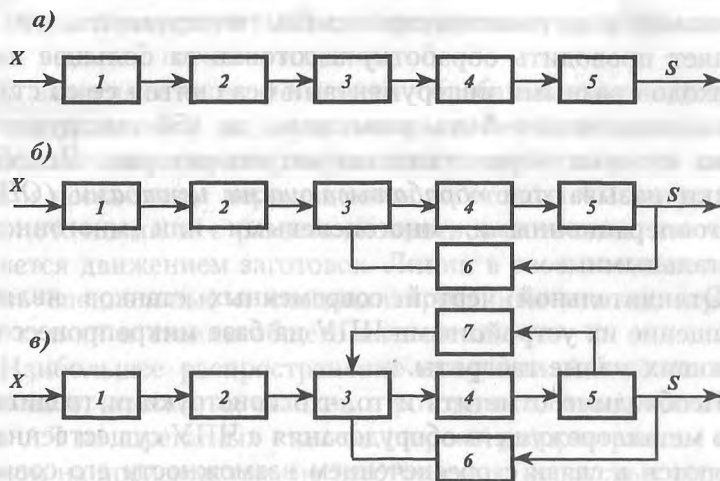


Рис. 42.2. Схемы систем управления металлорежущими станками

ным значением в устройстве 3, за счет чего обеспечивается автоматическая подналадка с целью поддержания подачи на одном заданном уровне. Это существенно повышает точность обработки. Самая высокая точность достигается в системе с адаптивным управлением (рис. 42.2, в), где добавляется еще одно дополнительное устройство 7, которое автоматически учитывает изменение режима обработки. Адаптивные системы являются самонастраивающимися, самоорганизующимися и самообучающимися системами. Они характеризуются нежестким циклом обработки. При этом значительно упрощается и процесс программирования, так как технолог только приближенно решает задачу, а система с помощью специальных датчиков условий обработки сама изменяет ее и доводит до оптимального решения.

Существуют адаптивные системы, вводящие соответствующие коррективы от деформаций станка, температуры, деформации и износа инструмента и т. д. Это обеспечивает автоматизацию технологической наладки станка.

Последующий этап автоматизации металлорежущих станков — оснащение их устройствами для размещения (ма-



газинами) и автоматической смены инструмента, что позволяет проводить обработку заготовки за большое число переходов разными инструментами без снятия ее со станка. В магазине может быть размещено до 150 инструментов, смена которых осуществляется автооператором. Подобные станки называются *обрабатывающими центрами (ОЦ)* — многооперационными, многоцелевыми или многоинструментальными.

Отличительной чертой современных станков является оснащение их устройствами ЧПУ на базе микропроцессоров, имеющих малые габариты.

Необходимо отметить и то, что конструкции традиционного металлорежущего оборудования с ЧПУ существенно изменяются в связи с обеспечением возможности его совместной работы с автоматическим транспортом, промышленными роботами, координатными измерительными машинами и другим оборудованием в условиях автоматизированного производства.

## **42.2. Автоматические линии и комплексная автоматизация производства**

Современные автоматические линии (АЛ) выполняют, помимо операций обработки резанием, и такие операции механосборочного производства, как мойка заготовок, сортировка, сборка соединений, контроль качества обработки, упаковка без вмешательства рабочего оператора.

В основу классификации АЛ положен ряд признаков. В машиностроении находят применение АЛ с поштучным вводом заготовки и поштучной выдачей обработанной детали. Эти линии, в свою очередь, делятся на синхронные (жесткие) и несинхронные (гибкие). На жесткой АЛ заготовка сразу же передается на следующую позицию, неисправность оборудования на одной позиции в этом случае приводит к остановке всей линии. На гибких АЛ создаются многопозиционные заделы заготовок, что дает возможность работать

без сбоев. Существуют АЛ с непрерывными подачей материала и выдачей готовых изделий.

В зависимости от установки обрабатываемых заготовок АЛ подразделяют на спутниковые и беспутниковые, а по расположению транспортирующего устройства — со сквозным и несквозным перемещением заготовок. АЛ могут быть однопоточными и с разветвляющимися потоками, что определяется движением заготовок. Линии в своем составе могут иметь специальные и специализированные станки, агрегатные станки и станки общего назначения.

Наибольшее распространение получили АЛ из станков-автоматов, агрегатных станков и роторные автоматические линии. АЛ из агрегатных станков широко распространены в основном на производствах по изготовлению корпусных изделий, шатунов, коленчатых валов и т. д. Перестройка на выпуск новой продукции сравнительно легко осуществляется на АЛ из переналаживаемых агрегатных станков.

АЛ из агрегатных станков характеризуются следующими показателями: использование при компоновке на 65–70 % унифицированных и нормализованных узлов и деталей; применение типового привода подачи; контроль усилий на режущий инструмент; подача заготовок с транспортеров с помощью автооператоров; применение систем ЧПУ; возможность управления линией ЭВМ.

Требованиям гибкого оборудования наиболее полно отвечают металлорежущие станки с ЧПУ, обрабатывающие центры (ОЦ), промышленные роботы (ПР) и другие виды оборудования. Еще большей оперативностью обладают системы из гибких элементов, управляемые ЭВМ. Благодаря применению ЭВМ станки и роботы легко и быстро переналаживаются с одного вида продукции на другую. Кроме того, ЭВМ обеспечивает сложные способы управления; при этом в случае необходимости протекает процесс обучения, поднастройки и разбора сложных ситуаций. С помощью ЭВМ можно автоматизировать сложные, многэтапные и выполняемые с применением большого количества оборудования технологические процессы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что лежит в основе построения гибких производственных систем?
2. Что отличает станки с программным управлением от обычных станков?
3. Какова структура управления станка с числовым программным управлением?
4. Какие технологические операции осуществляются на автоматических линиях и в условиях комплексной автоматизации производства?

## Глава 43

# ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

## 43.1. Электрофизические методы обработки

Электрофизические методы обработки заготовок приобретают все большее значение, так как они пригодны для обработки прочных, хрупких, очень вязких и других материалов.

Электрофизическая обработка называется также электроэрозионной, так как она основана на эрозии (разрушении) электродов из токопроводящих материалов при пропускании между ними импульсного электрического тока. При достижении определенной разности потенциалов на электродах в межэлектродной среде (газовой или — лучше — жидкостной) за счет ионизации образуется канал проводимости, по которому осуществляется импульсный искровой или дуговой разряд. Плотность тока в канале проводимости достигает больших значений — до  $8000\text{--}10\,000\text{ А/мм}^2$ , а время разряда всего  $10^{-15}\text{--}10^{-16}$  с. При этих условиях на поверхности электрода-заготовки температура возрастает до  $10\,000\text{--}12\,000\text{ }^\circ\text{C}$ , что приводит к расплавлению и испарению элементарного объема металла. На обрабатываемой поверхности

появляется лунка. Так продолжается до тех пор, пока не снимается слой металла и пока между электродами возможен электрический пробой при заданном напряжении импульса. Расстояние между электродами при обработке растет, и наступает момент прекращения обработки. Поэтому для продолжения обработки электроды необходимо сближать. На заготовку действуют электростатические и электродинамические силы, а также давление жидкости вследствие возникающей при импульсных разрядах кавитации.

Электрофизическая обработка имеет четыре разновидности: электроискровая, электроимпульсная, электроконтактная и анодно-механическая.

Электроискровая обработка (рис. 43.1, *а*) основана на использовании импульсного искрового разряда между заготовкой (анод) и инструментом (катод); длительность разряда 20—200 мкс. Обработка ведется в среде диэлектрической жидкости (керосина или минерального масла), которая охлаждает продукты эрозии, препятствует нагреву электродов, уменьшает боковые разряды между инструментом и заготовкой. Для сохранения постоянного зазора станки для электроискровой обработки снабжают следящими системами и механизмом автоматической подачи инструмента.

Источниками электроэнергии служат машинные, электронные, тиратронные, ламповые и транзисторные генераторы импульсов моделей МГИ-2М, МГИ-3М, ВГ-3В и др. Электроды-инструменты изготавливаются из латуни, меди, алюминия, медно- или углеграфитовой массы.

Электроискровую обработку широко применяют для прорезки пазов, вырезки по контуру, для изготовления штампов, пресс-форм, фильер, режущих инструментов. Хорошо обрабатываются твердые сплавы, тантал, вольфрам, молибден и др. К недостаткам процесса относят сравнительно низкую производительность обработки, большой износ электродов и образование на деталях дефектного слоя толщиной 0,05—0,5 мм.

Электроимпульсная обработка (рис. 43.1, *б*) заключается в использовании электрических импульсов большой длительности — от 500 до 10 000 мкс. Происходит мощный дуговой разряд между поверхностями инструмента

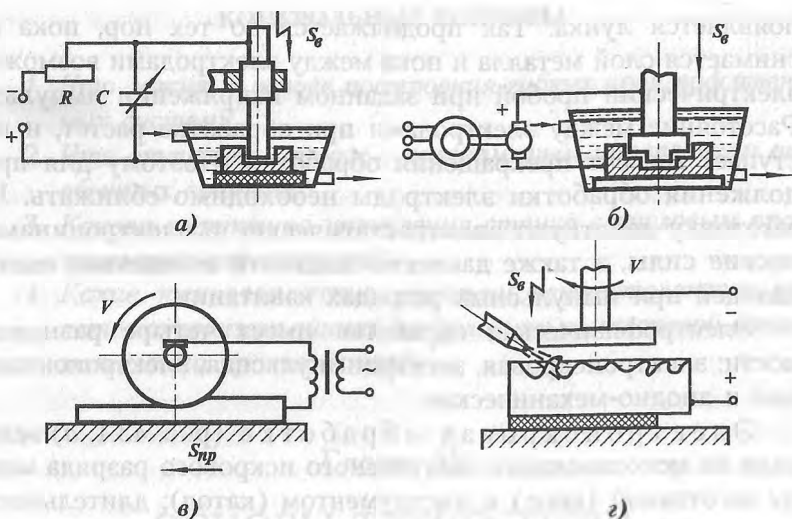


Рис. 43.1. Схемы электрофизической обработки: а — электроискровая; б — электроимпульсная; в — электроконтактная; г — анодно-механическая

и заготовки; при этом быстрее разрушается катод. Поэтому при электроимпульсной обработке применяют обратную полярность включения электродов (в отличие от электроискровой обработки): заготовка — катод, а инструмент — анод. При этом методе обработки износ инструментов-электродов значительно меньше, чем при электроискровой обработке. Большие мощности импульсов приводят к высокой производительности процесса: съём металла в единицу времени в 8—10 раз больше, чем при электроискровой обработке.

Обработку ведут в жидком диэлектрике; инструмент автоматически подается в направлении обработки, что обеспечивает постоянство зазора.

Рассматриваемый способ часто используют для предварительной обработки фасонных поверхностей штампов, лопаток, инструментов. Применяют его и для обработки твердых, нержавеющей и жаропрочных сплавов.

При электроконтактной обработке (рис. 43.1, в) используют локальный нагрев заготовки в месте ее контакта с электродом-инструментом. Источником образования тепло-

ты в зоне обработки служат импульсные дуговые разряды, возникающие в результате быстрого перемещения инструмента относительно заготовки. Соприкосновение под небольшим давлением двух металлических электродов приводит в месте контакта к повышенному электросопротивлению, разогреву, размягчению и плавлению материала заготовки. Затем разогретый или расплавленный металл удаляется из зоны обработки механическим путем за счет движения заготовки относительно инструмента. Рабочий инструмент, обычно в виде диска, не расплавляется из-за быстрого перемещения (скорость вращения диска — 30–80 м/с) или охлаждения.

Электроконтактная обработка не обеспечивает высоких точности и чистоты качества поверхности, но позволяет получить высокую производительность процесса обработки вследствие значительного съема металла. Применяют ее для резки заготовок, обдирки отливок, заточки инструмента, плоского шлифования, прошивки отверстий, очистки от окалины, обработки криволинейных поверхностей и т. д. Рекомендуются для обработки углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных сплавов, тугоплавких, труднообрабатываемых и специальных сплавов.

Анодно-механическая обработка (рис. 43.1, з) характеризуется протеканием в месте обработки нескольких процессов. Анодом служит заготовка, а катодом — инструмент. В качестве инструмента выступают диски, цилиндры, ленты, проволока. Заготовке и инструменту сообщаются движения, аналогичные движениям при обработке резанием. В зону обработки подают электролит, которым чаще всего является водный раствор жидкого натриевого стекла.

Пропускание постоянного тока через зону обработки приводит к анодному растворению, характерному для электрохимической обработки. В моменты соприкосновения микронеровностей обрабатываемой поверхности заготовки с инструментом возникают электродуговые разряды, приводящие к электроэрозии, характерной для электроискровой обработки. И, наконец, при контакте заготовки с инструментом за счет появления кратковременных дуговых разрядов происхо-

дит процесс разогрева металла в локальных зонах, характерных для электроконтактной обработки. Размягченный металл и продукты анодного растворения и электроэрозии удаляют из зоны обработки.

## 43.2. Электрохимические методы обработки

В основу электрохимических методов обработки заготовок положен принцип анодного растворения, имеющий место при электролизе. При подаче постоянного тока в место обработки на поверхности заготовки (аноде) происходят химические реакции, превращая слой металла в химические соединения. Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим путем. К методам, получившим наибольшее распространение в промышленности, относят электрохимическое полирование, электрохимическую размерную обработку, электроабразивную и электроалмазную обработки.

Электрохимическое полирование (рис. 43.2, а) проводят в ванне, заполненной электролитом, которым являются растворы кислот или щелочей (в зависимости от материала обрабатываемой заготовки). Катодами при обработке служат металлические пластины. При подаче напряжения начинается процесс избирательного растворения металла поверхности заготовки. Вследствие большей плотности тока интенсивнее растворяются микровыступы. Так осуществляют сглаживание поверхности.

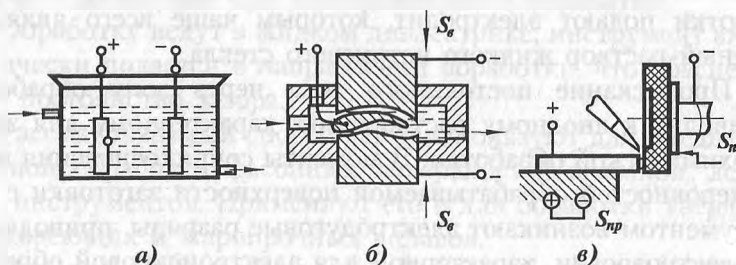


Рис. 43.2. Схемы электрохимической обработки: а — полирование; б — размерная; в — электроабразивная и электроалмазная

Электрохимическую размерную обработку проводят с прокачкой электролита под давлением между заготовкой и инструментом. Вновь поступивший свежий электролит способствует лучшему растворению металла поверхности заготовки и удалению продуктов анодного растворения. Прокачка предупреждает также осаждение металла на инструменте, что сохраняет его форму и размеры и таким образом увеличивает время его эксплуатации.

Съём металла проводят по всей поверхности заготовки, расположенной под инструментом. Участки заготовки, где не снимается металл, изолируют. Электрохимическую размерную обработку применяют при изготовлении деталей сложных форм (лопатки турбин и др.), для прошивки отверстий, оформления полостей штампов и т. п. (рис. 43.2, б).

При электроабразивной и электроалмазной обработке инструментами-электродами являются электропроводящие шлифовальные круги. Между заготовкой-анодом и инструментом-катодом за счет выступающих из связки зерен образуется межэлектродный зазор, куда подается электролит. Заготовка и шлифовальный круг совершают такие же движения, что и при механическом шлифовании. В итоге большая часть припуска удаляется в результате анодного растворения (до 90 % при электроабразивной и 75 % — при электроалмазной обработке), оставшаяся часть — за счет механического воздействия абразивных или алмазных зерен. Применяют эти разновидности электрохимической обработки для отделки труднообрабатываемых и нежестких деталей (рис. 43.2, в).

### 43.3. Ультразвуковой и лучевой методы обработки

При ультразвуковой обработке происходит направленное разрушение материала абразивными зёрнами под ударами инструмента (латунь, медь, чугун), который колеблется с ультразвуковой частотой. Под ударами зерен абразива скалываются мелкие частицы материала с поверхности заготовки. Точность обработки и шероховатость поверхности такие



же, как и при шлифовании. Схема установки для ультразвуковой обработки аналогична показанной на рис. 36.2. Различие состоит в том, что при ультразвуковой обработке используют инструмент-пуансон, закрепленный на волноводе; обрабатываемую заготовку помещают в ванну с абразивной суспензией; магнитострикционный вибратор на станке устанавливают вертикально. Абразивная суспензия содержит воду и абразивные зерна из карбида бора, карбида кремния или электрокорунда. Инструмент поджимается к заготовке с силой от 1 до 60 Н.

Ультразвуковую обработку применяют для прошивки отверстий различных сечений, узких пазов и изготовления деталей трудной конфигурации. Обработке подвергают заготовки из хрупких твердых материалов: керамики, стекла, кремния, кварца, ферритов, драгоценных минералов и др. Электронно-лучевой и лазерный методы — это разновидности лучевых методов формообразования поверхностей заготовок. Принципиальная схема электронно-лучевой установки показана на рис. 43.3, а.

Необходимое для обработки перемещение электронного луча по поверхности заготовки осуществляется с помощью отклоняющей системы. Кроме этого, в специальных электронно-лучевых установках предусмотрены продольные и поперечные перемещения.

Все перемещения, а также продолжительность импульсов и интервалы между ними задаются системой программного управления.

Электронно-лучевая обработка обладает преимуществом создания локальной концентрации высокой энергии, широким регулированием и управлением тепловыми процессами. Эта обработка весьма эффективна при получении отверстий малых диаметров (от 1 мм до 10 мкм), прорезании узких пазов, резке заготовок и т. п. Таким методом можно обрабатывать заготовки из различных труднообрабатываемых материалов: вольфрама, тантала, циркония, рубина, кварца, керамики и др.

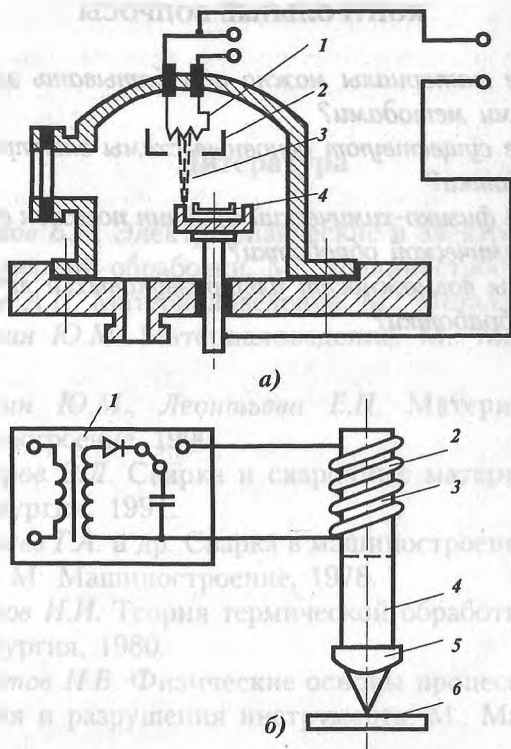


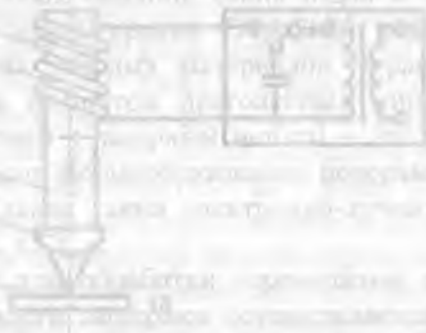
Рис. 43.3. Схема электронно-лучевой (а) и лазерной (б) установки: а: 1 — катод; 2 — анод; 3 — электронный луч; 4 — обрабатываемая деталь; б: 1 — источник питания; 2 — лампа накачки; 3 — рубиновый стержень; 4 — луч света, 5 — фокусирующая линза; 6 — деталь

Схема светолучевой (лазерной) установки показана на рис. 43.3, б. Механическую обработку проводят твердотельными лазерами. Ее применяют для обработки систем отверстий в электродах газоразрядных приборов, в деталях авиационной техники, для вырезки отверстий и щелей произвольной формы в керамических платах деталей микроэлектроники, обработки сложных профилей алмазных волок, профилирования многогранного инструмента из искусственных сверхтвердых материалов (эльбор, композиты).

Диаметр обрабатываемых отверстий — от 50 до 300 мкм, максимальная глубина отверстий — до 10 мм.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы можно обрабатывать электрофизическими методами?
2. Какие существуют основные схемы электрофизической обработки?
3. Какой физико-химический принцип положен в основу электрохимической обработки?
4. Каковы возможности ультразвуковых и лучевых методов обработки?



---

## Литература

1. Бирюков Б.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки. М.: Машиностроение, 1981.
2. Гуляев А.П. Материаловедение. М.: Металлургия, 2000.
3. Лахтин Ю.М. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1993.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева Е.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990.
5. Макаров Э.Л. Сварка и сварочные материалы: В 3 т. М.: Металлургия, 1991.
6. Николаев Г.А. и др. Сварка в машиностроении: Справочник: В 4 т. М.: Машиностроение, 1978.
7. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1980.
8. Талантов Н.В. Физические основы процессов резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992.
9. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. и др. Материаловедение и технология металлов. М.: Высшая школа, 2005.

**Фетисов Г. П.**

**Ф45 Материаловедение и технология металлов: Учебник / Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифуллин. — М.: Издательство Оникс, 2007. — 624 с.: ил.**

ISBN 978-5-488-00930-1

В учебнике рассмотрены структура, строение и свойства металлических и неметаллических материалов, механические характеристики этих материалов и методы их оценки, термической и химико-термической обработки; изложены основы теории и технологии получения заготовок литьем, давлением, механической обработкой, сваркой и пайкой.

Учебник предназначен для студентов учреждений среднего технического образования, может быть использован инженерно-техническими работниками.

**УДК 620**

**ББК 30.3;34**