



Г. А. Воробьева  
Е. Е. Складнова  
В. К. Ерофеев  
А. А. Устинова

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ



Электронный аналог печатного издания: Конструкционные стали и сплавы : учеб. пособие / Г. А. Воробьева, Е. Е. Складнова, В. К. Ерофеев, А. А. Устинова; под ред. Г. А. Воробьевой. — СПб.: Политехника, 2013. — 440 с.: ил.

УДК 669.018.29  
ББК 34.431  
К65



**ПОЛИТЕХНИКА**  
**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  
Санкт-Петербург 2013

[www.polytechnics.ru](http://www.polytechnics.ru)

**Издано при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России (2012–2018 годы)»**

**Рецензенты:** ректор БГТУ, проф., д-р техн. наук **К. М. Иванов**; зав. кафедрой «Триботехника» ПИМаш, проф., д-р техн. наук **М. А. Скотникова**

**К65**    **Конструкционные стали и сплавы : учеб. пособие / Г. А. Воробьева, Е. Е. Складнова, В. К. Ерофеев, А. А. Устинова; под ред. Г. А. Воробьевой. — СПб.: Политехника, 2013. — 440 с.: ил.**

**ISBN 978-5-7325-1010-2**

Изложены основы металловедения черных и цветных металлов и сплавов на их основе. Рассмотрены положения теории и технологии термической обработки сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов. Приведены закономерности формирования структуры и свойств основных промышленных сталей и сплавов, справочные данные по режимам их упрочнения.

Предназначено для студентов технических специальностей машиностроительных вузов, может быть полезно для студентов, обучающихся по смежным специальностям, а также аспирантов и инженерно-технических работников.

**УДК 669.018.29**

**ББК 34.431**

© Издательство «Политехника», 2013

© Воробьева Г. А., Складнова Е. Е.,

**ISBN 978-5-7325-1010-2**

Ерофеев В. К., Устинова А. А., 2013

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	8
РАЗДЕЛ I. ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	
<b>Глава 1. Кристаллическое строение металлов.....</b>	<b>11</b>
1.1. Общая характеристика металлов и сплавов.....	11
1.2. Кристаллическое строение металлов .....	12
1.3. Анизотропия свойств кристаллов.....	16
1.4. Дефекты строения кристаллических тел.....	17
<b>Глава 2. Кристаллизация металлов .....</b>	<b>25</b>
2.1. Первичная кристаллизация металлов.....	25
2.2. Строение металлического слитка .....	30
2.3. Полиморфные превращения .....	31
<b>Глава 3. Деформация и механические свойства металлов .....</b>	<b>32</b>
3.1. Свойства металлов и сплавов .....	32
3.2. Упругая и пластическая деформация .....	33
3.3. Хрупкое и вязкое разрушение .....	36
3.4. Деформация и разрушение металлов .....	37
3.5. Наклеп и рекристаллизация.....	42
<b>Глава 4. Методы исследований и испытаний материалов .....</b>	<b>49</b>
4.1. Металлографические методы исследования .....	49
4.2. Определение механических свойств.....	52
4.2.1. Статические испытания .....	53
4.2.2. Динамические испытания .....	59
4.2.3. Усталостные испытания.....	62
<b>Глава 5. Основы теории сплавов.....</b>	<b>64</b>
5.1. Характеристика основных фаз металлических сплавов	64
5.2. Структура сплавов .....	68
5.3. Высокопрочное состояние .....	70
5.4. Диаграммы состояния двойных сплавов и характер изменения свойств в зависимости от состава сплавов .....	73
<b>Глава 6. Диаграмма состояния системы железо—углерод.....</b>	<b>82</b>
6.1. Компоненты и фазы в сплавах железо—углерод .....	82
6.2. Диаграмма состояния системы железо—цементит .....	86
<b>Глава 7. Углеродистые стали.....</b>	<b>92</b>
7.1. Классификация углеродистых сталей .....	92
7.2. Влияние углерода на свойства стали .....	94
7.3. Влияние постоянных примесей на свойства сталей .....	95

7.4. Углеродистые конструкционные стали общего назначения (стали обыкновенного качества) .....	97
7.5. Углеродистые конструкционные качественные стали ...	98
7.6. Автоматные стали (стали с улучшенной обрабатываемостью резанием) .....	100
7.7. Углеродистые инструментальные стали .....	102
<b>Глава 8. Чугуны</b> .....	<b>104</b>
8.1. Разновидности чугунов .....	104
8.2. Графитизация чугунов .....	104
8.3. Структура, свойства и применение чугунов .....	106
<b>Глава 9. Термическая обработка стали</b> .....	<b>112</b>
9.1. Общие сведения .....	112
9.2. Классификация видов термической обработки стали ...	116
9.3. Превращения в стали при нагреве .....	118
9.4. Диффузионные превращения аустенита при охлаждении стали .....	122
9.5. Мартенситное превращение аустенита .....	127
9.6. Промежуточное (бейнитное) превращение аустенита ...	130
9.7. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении	132
9.8. Превращения при отпуске .....	134
9.9. Термомеханическая обработка .....	136
<b>Глава 10. Технология термической обработки</b> .....	<b>139</b>
10.1. Отжиг и нормализация .....	139
10.2. Закалка стали .....	146
10.2.1. Закаливаемость и прокаливаемость стали .....	149
10.2.2. Способы закалки стали .....	151
10.3. Отпуск стали .....	153
<b>Глава 11. Поверхностное упрочнение стальных изделий</b> .....	<b>156</b>
11.1. Упрочнение поверхности методом пластического деформирования .....	156
11.2. Поверхностная закалка .....	157
11.3. Химико-термическая обработка стали .....	162
11.3.1. Общие сведения .....	162
11.3.2. Цементация стали .....	163
11.3.3. Азотирование стали .....	166
11.3.4. Цианирование стали .....	168
11.3.5. Диффузионное насыщение металлами (металлизация) и неметаллами .....	169
<b>Глава 12. Легированные стали</b> .....	<b>171</b>
12.1. Влияние легирующих элементов на превращения в сталях и их свойства .....	171

12.2. Влияние легирующих элементов на свойства феррита и аустенита.....	173
12.3. Классификация легированных сталей.....	174
12.4. Общие принципы обозначения конструкционных легированных сталей .....	175
12.5. Конструкционные стали .....	177
12.5.1. Общая характеристика .....	177
12.5.2. Низколегированные строительные стали.....	179
12.5.3. Стали для холодной штамповки .....	191
12.5.4. Цементируемые и нитроцементируемые стали ..	199
12.5.5. Улучшаемые стали.....	202
12.5.6. Высокопрочные стали .....	206
12.5.7. Рессорно-пружинные стали .....	209
12.5.8. Подшипниковые стали .....	212
12.5.9. Износостойкие стали.....	213
12.5.10. Судостроительные стали .....	214
<b>Глава 13. Инструментальные стали и сплавы.....</b>	<b>243</b>
13.1. Общие положения .....	243
13.2. Углеродистые стали .....	245
13.3. Легированные стали .....	246
13.4. Быстрорежущие стали .....	248
13.5. Металлокерамические твердые сплавы .....	255
13.6. Штамповые стали .....	260
13.6.1. Стали для штампов холодного деформирования...	260
13.6.2. Стали для штампов горячего деформирования...	263
<b>Глава 14. Коррозионно-стойкие стали и сплавы .....</b>	<b>265</b>
14.1. Общие сведения .....	265
14.2. Виды электрохимической коррозии .....	267
14.3. Коррозионно-стойкие стали .....	271
14.3.1. Хромистые коррозионно-стойкие стали .....	272
14.3.2. Хромоникелевые коррозионно-стойкие стали ..	273
14.3.3. Хромистые стали, легированные азотом .....	276
<b>Глава 15. Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы.....</b>	<b>283</b>
15.1. Жаростойкие стали.....	283
15.2. Критерии жаропрочности .....	284
15.3. Факторы, влияющие на жаропрочность .....	285
15.4. Жаропрочные стали и сплавы.....	287
<b>РАЗДЕЛ II. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ</b>	
<b>Глава 16. Алюминий и его сплавы .....</b>	<b>298</b>
16.1. Общие сведения .....	298
16.2. Классификация алюминиевых сплавов .....	298
16.3. Деформируемые алюминиевые сплавы.....	299
16.4. Литейные алюминиевые сплавы.....	310

<b>Глава 17. Титан и его сплавы</b> .....	314
17.1. Свойства титана .....	314
17.2. Фазовые превращения в титановых сплавах .....	315
17.3. Термическая обработка титановых сплавов.....	316
17.4. Титановые сплавы.....	318
<b>Глава 18. Магний и его сплавы</b> .....	322
18.1. Основные свойства магния.....	322
18.2. Классификация и характеристика магниевых сплавов... ..	322
18.3. Деформируемые магниевые сплавы .....	326
18.4. Литейные магниевые сплавы .....	328
18.5. Применение магниевых сплавов.....	329
<b>Глава 19. Медь и ее сплавы</b> .....	330
19.1. Основные свойства меди .....	330
19.2. Сплавы меди с цинком (латуни) .....	333
19.3. Бронзы .....	337
<b>Глава 20. Аморфные и нанокристаллические материалы</b> .....	341
20.1. Аморфные сплавы .....	341
20.2. Нанокристаллические материалы.....	344

РАЗДЕЛ III. АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА  
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

<b>Глава 21. Технологии аэротермоакустической обработки</b> .....	352
21.1. Экспериментальные данные о влиянии АТАО на структуру и свойства технического железа .....	355
21.2. Влияние АТАО на механические свойства конструкционных сталей .....	359
21.3. Формирование структуры и свойств чугунов при АТАО..	365
21.3.1. Влияние АТАО на свойства серых чугунов.....	365
21.3.2. Влияние АТАО на структуру и свойства ковких чугунов .....	369
21.4. Алюминиевые и титановые сплавы, влияние АТАО на их свойства.....	373
21.4.1. Литейные алюминиевые сплавы .....	373
21.4.2. Деформируемые алюминиевые сплавы .....	379
21.4.3. Титановые сплавы.....	383

РАЗДЕЛ IV. ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

<b>Глава 22. Технологии обработки поверхности чугунов, сталей и сплавов</b> .....	387
22.1. Лазерная и плазменная закалка.....	387
22.1.1. Лазерная закалка углеродистых и легированных инструментальных сталей.....	389

22.1.2. Термическая обработка плазмой (плазменная закалка) .....	391
22.2. Лазерная и плазменная химико-термическая обработка....	393
22.2.1. Лазерное легирование и азотирование конструкционных сталей .....	393
22.2.2. Лазерное легирование с использованием традиционных методов химико-термической обработки .....	396
22.3. Ионно-вакуумное азотирование и нитроцементация...	397
22.4. Лазерная обработка покрытий, полученных методами химического или физического осаждения .....	400
22.5. Многофункциональные тонкопленочные покрытия, наноструктурные защитные износ- и коррозионно-стойкие покрытия .....	401
<b>Глава 23. Технологии обработки поверхности сплавов на основе алюминия и титана .....</b>	<b>405</b>
23.1. Поверхностная закалка титановых и алюминиевых сплавов.....	405
23.2. Лазерная химико-термическая обработка титановых и алюминиевых сплавов.....	406
<b>Приложение 1. Принципы обозначения сталей и сплавов по евронормам (EU) .....</b>	<b>413</b>
Маркировка сталей по признаку физических, механических свойств или химического состава .....	414
Маркировка с использованием порядковых номеров.....	419
Системы маркировки сталей в США.....	419
Система обозначений AISI.....	422
Система обозначений ASTM .....	424
Системы маркировки сталей во Франции.....	425
Системы маркировки сталей во Германии.....	427
Системы маркировки сталей в Японии .....	429
Сравнительный перечень некоторых марок углеродистых сталей общего назначения и коррозионно-стойких сталей и их свойств по российским и зарубежным стандартам .....	430
<b>Приложение 2 .....</b>	<b>433</b>
Относительные цены на стальной прокат .....	433
Оценка экономической целесообразности использования некоторых легированных сталей .....	434
<b>Список литературы .....</b>	<b>436</b>

## ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### Глава 1

#### КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

##### 1.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Широкий диапазон механических, физико-химических и технологических свойств металлических материалов предопределяет их широкое применение в технике, несмотря на большое количество существующих и появляющихся новых полимерных материалов и керамики. Преобладающее применение металлов и сплавов в качестве основных конструкционных материалов, очевидно, сохранится и в ближайшем будущем, что в значительной степени определяется оптимальными соотношениями «цена—качество» и «прочность—пластичность».

Металлические материалы подразделяют на две большие группы: черные металлы и цветные. К наиболее типичным черным металлам относятся железо и сплавы на его основе, большинство остальных металлов — цветные.

Кроме того, металлы делятся на следующие группы:

- ферромагнетики Fe, Co, Ni;
- тяжелые металлы Pb, Ag, Au, Pt, Ir, Os с плотностью, превышающей  $10 \text{ г/см}^3$ ;
- легкие металлы Li, Mg, Al, Be, Ti с плотностью, не превышающей  $5 \text{ г/см}^3$ ;
- тугоплавкие металлы Mo, W, Ta, Nb с температурой плавления существенно выше, чем у железа (более  $1536^\circ\text{C}$ );
- легкоплавкие металлы Sn, Pb, Zn с температурой плавления соответственно  $232$ ,  $327$ ,  $410^\circ\text{C}$ , а также кадмий (Cd), висмут (Bi), таллий (Tl), сурьма (Sb);
- благородные металлы Ag, Au, Pt (и металлы платиновой группы — палладий, иридий, родий, осмий, рутений) с высокой устойчивостью к коррозии;
- урановые металлы или актиноиды, используемые в сплавах для атомной техники;



- редкоземельные металлы (РЗМ) лантан, церий, неодим и др. — лантаноиды, применяемые для модифицирования стали в виде смешанного сплава (40...45 % Ce и 45...50 % всех остальных редкоземельных элементов);

- щелочные и щелочноземельные металлы Na, K, Li, Ca; в свободном состоянии применяются в качестве жидкометаллических теплоносителей в атомных реакторах, литий — для легирования легких алюминиевых сплавов.

Металлы при всем разнообразии свойств имеют и общие свойства:

- высокую тепло- и электропроводность;
- положительный температурный коэффициент электропроводности; с повышением температуры электропроводность чистых металлов возрастает; большое число металлов обладает сверхпроводимостью при температурах, близких к абсолютному нулю, электропроводность этих металлов падает практически до нуля;

- термоэлектронную эмиссию, т. е. способность испускать электроны при нагреве;

- хорошую отражательную способность: металлы непрозрачны и обладают металлическим блеском;

- повышенную способность к пластической деформации.

Основная доля в изготавливаемых и применяемых металлических материалов приходится на сплавы железа (стали). Сталь производится больше, чем всех остальных металлов вместе взятых (около 90 %). Стоимость цветных металлов и сплавов превышает стоимость сплавов на основе железа.

Все металлы и металлические сплавы тела кристаллические.

## 1.2. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

В металле атомы располагаются в пространстве закономер-но, образуя *кристаллическую решетку* — абстрактное геометрическое построение с ионами (атомами) в узлах, что соответствует минимальной энергии взаимодействия атомов.

Кристаллическая решетка может быть представлена изображением одной элементарной ячейки (ЭЯ), многократно повторяющейся во всех трех измерениях.

В кристалле элементарные частицы (атомы, ионы) сближены до соприкосновения. Для упрощения пространствен-

ное изображение заменяют схемами, где центры тяжести частиц представлены точками. В точках пересечения прямых линий располагаются атомы; они называются *узлами решетки*. Расстояния  $a$ ,  $b$  и  $c$  между центрами атомов (осевые единицы), находящихся в соседних узлах решетки, называют *параметрами*, или *периодами решетки*. Размеры их в металлах порядка  $0,2...0,7$  нм и определяются методами рентгеноструктурного анализа.

Для однозначного описания элементарной ячейки кристаллической решетки необходимо знание параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и углов между ними. На рис. 1.1 показаны три типа элементарных ячеек кристаллических решеток, наиболее характерных для металлов (из существующих семи типов простых кристаллических решеток).

В кубической гранецентрированной (ГЦК) и объемноцентрированной (ОЦК) решетках (рис. 1.1,  $a$  и  $b$ ) восемь атомов расположены в узлах решетки (вершинах куба), остальные атомы находятся в центре граней (шесть атомов в решетке ГЦК) или в центре объема куба (один атом на пересечении диагоналей в решетке ОЦК). Решетку ОЦК име-

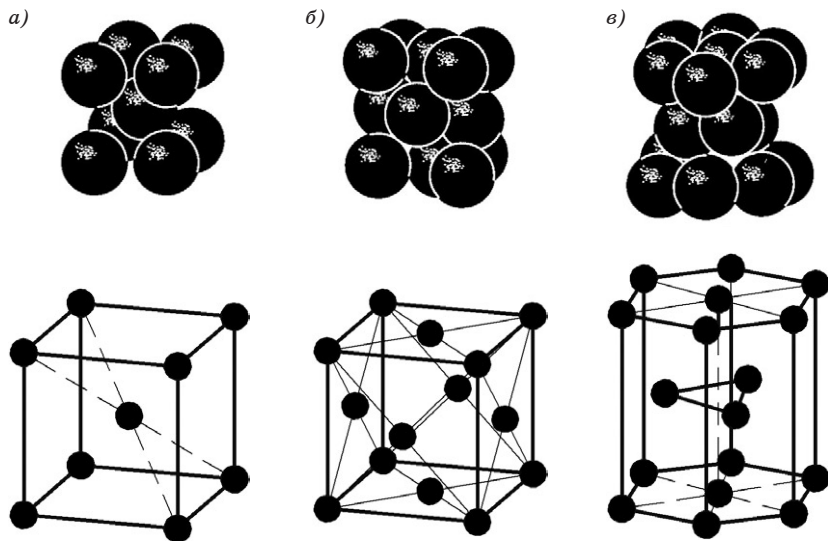


Рис. 1.1. Типы элементарных ячеек кристаллических решеток металлов и схемы упаковки в них атомов:  $a$  — объемно-центрированная кубическая;  $b$  — гранецентрированная кубическая;  $c$  — гексагональная плотноупакованная

ют следующие металлы: альфа-железо, хром, ванадий, молибден, вольфрам, бета-титан и др.; ГЦК — гамма-железо, алюминий, медь, никель, свинец, альфа-кобальт и др. В гексагональной плотноупакованной (ГП) решетке ячейка представляет собой шестигранную призму с центрированными основаниями, между которыми в средней плоскости призмы на определенном расстоянии от центров трех граней расположены еще три атома. ГП-решетку имеют альфа-титан, магний, цинк, кадмий, бериллий, бета-кобальт и др. Некоторые металлы имеют тетрагональную решетку (марганец-гамма).

Кристаллическая решетка характеризуется координационным числом и плотностью упаковки. Под *координационным числом* понимается число атомов, находящихся на равном и наименьшем расстояниях от данного (базисного) атома. Чем выше координационное число, тем выше плотность упаковки. Координационное число для решетки ОЦК соответствует 8 и обозначается К8. *Плотность упаковки* характеризуется коэффициентом компактности (коэффициентом заполнения ячейки), определяемым как отношение объема, занятого атомами, к объему ячейки. Для решетки ОЦК он соответствует 68 %. Координационное число для решетки ГЦК соответствует 12 (К12); коэффициент компактности равен 74 %. Решетка ГП имеет координационное число, равное 12 (Г12), у многих металлов, имеющих этот тип кристаллической решетки, отношение параметров  $c/a = 1,633$ , коэффициент компактности также равен 74 %. Кристаллическая решетка ГП с соотношением параметров  $c/a$ , значительно отличающимся от 1,633 (например, цинк, кадмий), имеет координационное число, равное 6, а коэффициент компактности равен 50 %. Компактность структуры является одним из факторов, уменьшающих свободную энергию твердого тела, т. е. обеспечивающих его равновесное состояние. Прочность металлов зависит от плотности упаковки его кристаллической решетки и особенностей строения его атомов. Решетки ГЦК и ГП наиболее плотноупакованные.

Для определения положения атомных плоскостей, проходящих через атомы в кристаллической решетке, пользуются *индексами Миллера*, которое обозначаются  $hkl$  и представляют собой три целых рациональных числа, являющихся величинами, обратными осевым отрезкам, отсекаемым данной плоскостью на осях координат. Единицы длины вдоль этих осей выбирают равными длинам ребер элементарной

ячейки. Каждая плоскость куба пересекает только одну ось (рис. 1.2, а), при этом отрезки будут равны  $(1, \infty, \infty)$ ,  $(\infty, 1, \infty)$ ,  $(\infty, \infty, 1)$ . Обратные величины отсекаемых отрезков будут соответственно равны  $1, 0, 0$ ;  $0, 1, 0$ ;  $0, 0, 1$ . Индексы плоскостей обычно записывают в скобках и обозначают  $(100)$ ;  $(010)$ ;  $(001)$ . В кубической решетке, кроме плоскостей куба (рис. 1.2, а), различают плоскости  $(110)$  и  $(111)$  соответственно (рис. 1.2, б и в). Индексы характеризуют не одну какую-либо плоскость, а целую группу параллельных плоскостей, и тогда их заключают в фигурные скобки, например  $\{111\}$ .

Кристаллографическими направлениями являются прямые или лучи, выходящие от точки отсчета (например, вершины куба), вдоль которых на определенном расстоянии располагаются атомы. Для определения следует найти координаты ближайшего к точке отсчета атома, лежащего на

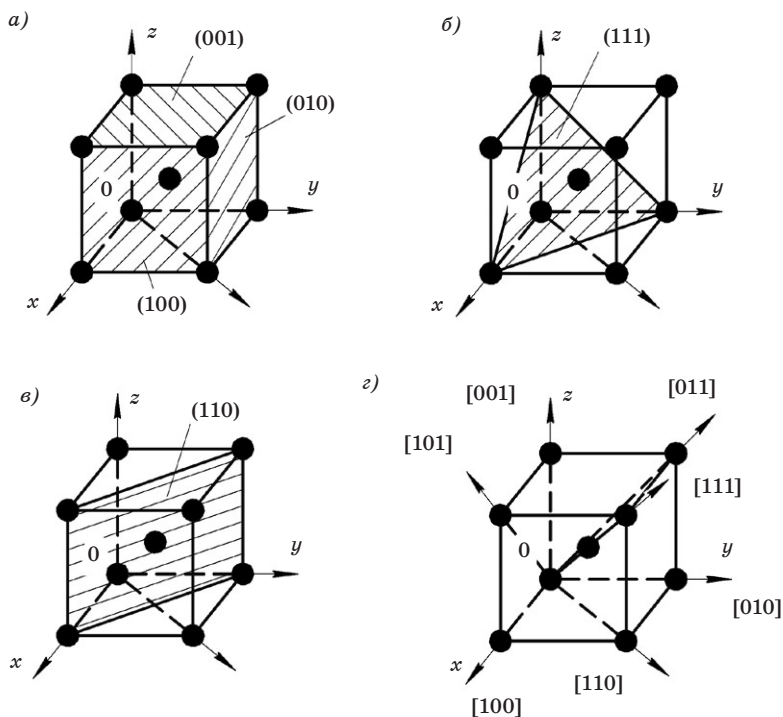


Рис. 1.2. Индексы кристаллографических плоскостей и направлений в ОЦК-решетке

этом направлении, выраженные через параметр решетки. Эти цифры, заключенные в квадратные скобки  $[uvw]$ , являются индексом данного направления и всех параллельных направлений. Координаты ближайшего атома, лежащего на оси  $Ox$ , выразятся через 100, следовательно, индексы осей решетки  $Ox$  —  $[100]$ ,  $Oy$  —  $[010]$ ,  $Oz$  —  $[001]$ ; индексы пространственной диагонали —  $[111]$  (рис. 1.2,  $z$ ).

### 1.3. АНИЗОТРОПИЯ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ

Плотность расположения атомов по различным плоскостям неодинакова. Так, в решетке ОЦК плоскости  $(100)$  принадлежит 1 атом, а плоскости  $(110)$  — вертикальной диагональной плоскости куба — 2 атома.

Вследствие неодинаковой плотности расположения атомов в различных плоскостях и направлениях решетки многие свойства (химические, физические, механические) каждого кристалла зависят от направления решетки. Неодинаковость свойств монокристаллов в разных кристаллографических направлениях называется *анизотропией*. Свойства аморфных тел, характеризующихся хаотическим расположением атомов, не зависят от направления, т. е. анизотропия является результатом закономерного расположения атомов в кристаллических телах. Разница в физико-химических и механических свойствах может быть весьма существенна. Температурный коэффициент линейного расширения в двух взаимно перпендикулярных направлениях может отличаться в 3–4 раза. Так, медный шар, изготовленный из монокристалла, при нагреве утратит правильную геометрическую форму и превратится в эллипсоид. Не всем свойствам кристаллических тел характерно явление анизотропии. Такое свойство, как теплоемкость от направления не зависит.

Технические металлы являются поликристаллами, состоящими из большого количества анизотропных кристаллов, статистически неупорядоченно ориентированных друг к другу. Поэтому во всех направлениях свойства примерно одинаковы, т. е. поликристаллические металлы изотропны. Но так как их изотропность является не истинной, а усредненной, то их принято называть *квазиизотропными телами*. Изотропность не будет наблюдаться, если кристаллы имеют одинаковую преимущественную ориентировку в каких-то направлениях. В этом случае поликристаллический металл приобретает анизотропию.

#### 1.4. ДЕФЕКТЫ СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

Реальные металлы содержат большое количество дефектов строения, нарушающих периодичность расположения атомов в кристаллической решетке. Эти дефекты оказывают существенное влияние на свойства материала.

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

*Точечные дефекты* (рис. 1.3) имеют малые размеры во всех трех измерениях. Их размеры не превышают нескольких атомных диаметров. К точечным дефектам относятся: а) свободные места в узлах кристаллической решетки (вакансии); б) атомы, сместившиеся из узлов кристаллической решетки в межузельные промежутки (дислоцированные атомы); в) атомы других элементов, находящиеся как в узлах, так и в межузлиях кристаллической решетки (примесные атомы).

*Линейные дефекты* имеют малые размеры в двух измерениях, но значительную протяженность в третьем измерении. Наиболее важный вид линейных дефектов — дислокации. Теория дислокаций была впервые применена в середине 30-х гг. XX в. физиками Орована, Поляни и Тейлором для описания пластической деформации кристаллических тел. Она объясняет природу прочности и пластичности металлов, а также огромную разницу между теоретической и практической прочностью металлов. Экспериментально дислокации были обнаружены лишь с помощью электронного микроскопа благодаря сопутствующим деформациям или искажениям кристаллической решетки. При прохождении пучка электронов через такие искажения происходит дифракция электронов, подобная дифракции рентгеновских лучей.

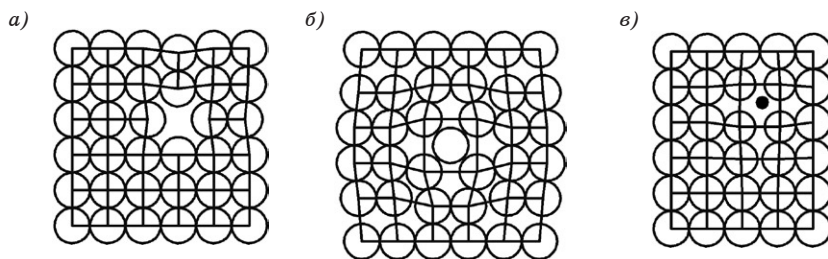


Рис. 1.3. Точечные дефекты в кристаллической решетке: а — вакансия; б — дислоцированный атом; в — примесный атом

Наиболее простой способ образования дислокаций в кристалле — сдвиг. Если верхнюю часть кристалла сдвинуть относительно нижней на одно межатомное расстояние, при том что сдвиг охватил не всю плоскость скольжения, а только ее часть  $ABCD$ , то граница  $AB$  между участком  $ABCD$  и ненарушенным участком в плоскости скольжения и будет краевой дислокацией (рис. 1.4,  $a$ ). Если «лишняя» атомная полуплоскость — экстраплоскость — находится в верхней части кристалла, то дислокацию называют положительной и обозначают знаком « $\uparrow$ », если в нижней — то отрицательной и обозначают знаком « $\downarrow$ ». Нижний край экстраплоскости называют линией дислокации. Различие между дислокациями чисто условное. Перевернув кристалл, мы превращаем положительную дислокацию в отрицательную. Знак дислокации позволяет оценить результат их взаимодействия. Дислокации одного знака отталкиваются, а противоположного — притягиваются. Из приведенных далее схем видно, что атомы над краевой дислокацией испытывают сжатие, а нижние атомы — растяжение. Дислокации выявляются также с помощью травления химическими реактивами. В местах выхода дислокаций на полированную поверхность

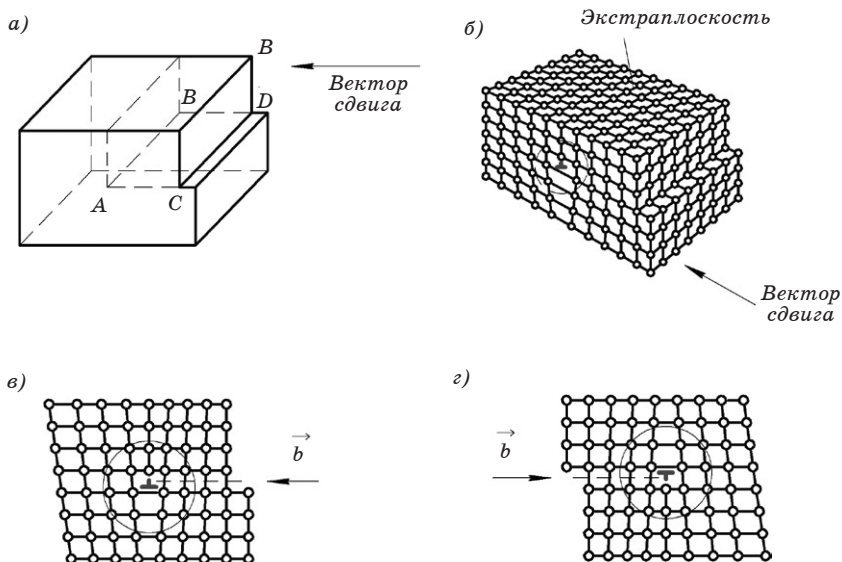


Рис. 1.4. Краевые дислокации:  $a$  — сдвиг, создавший краевую дислокацию;  $б$  — пространственная схема краевой дислокации;  $в, г$  — схемы расположения атомов у дислокации

металла скорость химического травления выше.

Помимо краевых дислокаций в кристаллах могут образовываться и винтовые дислокации (рис. 1.5). Винтовые дислокации могут быть получены путем частичного сдвига атомных слоев по плоскости  $Q$ , при этом нарушается параллельность атомных слоев. Кристалл как бы закручивается винтом вокруг линии  $EF$ . Линия  $EF$  является линией дислокации. Она отделяет ту часть, где сдвиг еще не происходил. Винтовая дислокация, образованная вращением по часовой стрелке, называется правой, а против часовой стрелки — левой. Вокруг дислокации на протяжении нескольких межатомных расстояний решетка искажена, что вызывает появление поля напряжений. Критерием энергии искажения кристаллической решетки служит вектор Бюргерса.

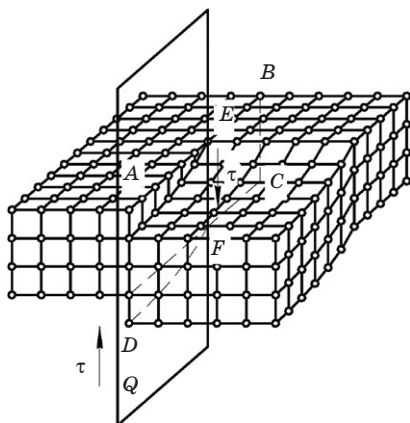


Рис. 1.5. Винтовая дислокация

Для определения вектора Бюргерса краевой дислокации (рис. 1.6) вокруг нее проводят контур  $ABCDE$ , равномерно откладывая против часовой стрелки от точки  $A$  по шесть

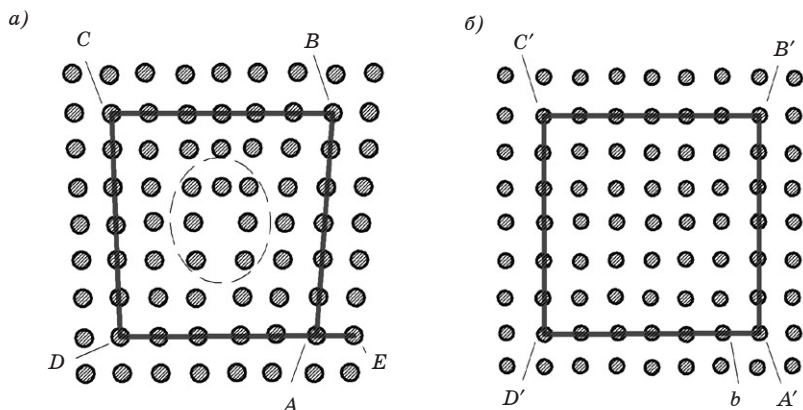


Рис. 1.6. Схема определения вектора Бюргерса для линейной дислокации:  $a$  — схема плоскости реального кристалла;  $b$  — то же совершенного кристалла



атомных расстояний: снизу вверх  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$ ,  $DE$ . Контур замкнется на участке  $DA$ , который будет состоять из пяти отрезков. При отсутствии дислокаций в кристалле этот участок состоял из шести отрезков. Разность протяженности контуров  $AE$  называется вектором Бюргерса, который имеет величину порядка межатомных расстояний. Если вектором Бюргерса охватывается несколько дислокаций, то величина его соответствует геометрической сумме векторов отдельных дислокаций. Вектор Бюргерса позволяет найти силы, требуемые для перемещения дислокации, силы взаимодействия и энергию дислокаций.

Дислокации образуются уже при кристаллизации металлов, а также в ходе пластической деформации и фазовых превращений. Плотность дислокаций может достигать большого значения. Под плотностью дислокаций  $\rho$  обычно понимают суммарную длину дислокаций  $\Sigma l$ , приходящуюся на единицу объема  $V$  кристалла:  $\rho = \Sigma l/V$ . Таким образом, плотность дислокаций  $\rho$  выражается в  $\text{см}/\text{см}^3$  или  $\text{см}^{-2}$ . Для отожженных металлов плотность дислокаций составляет  $10^3 \dots 10^6 \text{ см}^{-2}$ , после холодной деформации она увеличивается до  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , что соответствует примерно 1 млн км дислокаций в  $1 \text{ см}^3$ .

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

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

Использование теории дислокаций позволило объяснить большое расхождение между *теоретической* и *фактической прочностью* металлов. Теоретическая прочность должна быть пропорциональна произведению сил межатомной связи на число атомов в сечении кристалла.

Расчетное усилие для смещения одной части кристалла относительно другой оказалось на два-три порядка выше

фактически затрачиваемого при пластической деформации металла. Так, теоретическая прочность железа составляет около 13 000 МПа, а фактическая — всего 250 МПа. Такое расхождение теоретической и фактической прочности объясняется тем, что деформация происходит не путем одновременного смещения целых атомных плоскостей, а за счет постепенного перемещения дислокаций. Влияние дислокаций на пластическую деформацию на примере краевых дислокаций показано на рис. 1.7. Пластический сдвиг является следствием постепенного перемещения дислокаций в плоскости сдвига. Распространение скольжения по плоскости скольжения происходит последовательно. Каждый элементарный акт перемещения дислокации из одного положения в другое совершается путем разрыва лишь одной вертикальной атомной плоскости. Для перемещения дислокаций требуется значительно меньшее усилие, чем для жесткого смещения одной части кристалла относительно другой в плоскости сдвига. При движении дислокации вдоль направления сдвига через весь кристалл происходит смещение верхней и нижней его частей на одно межатомное расстояние. В результате пере-

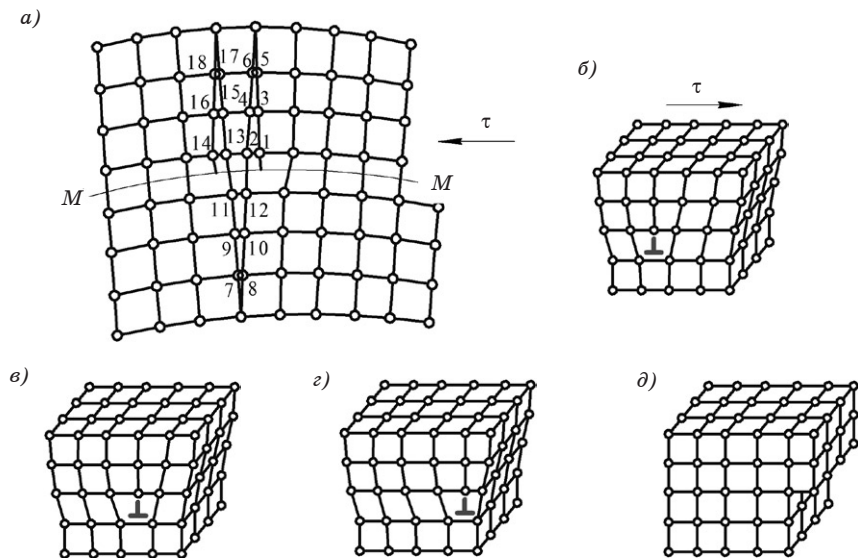


Рис. 1.7. Движение краевой дислокации, приводящее к образованию ступеньки единичного сдвига на поверхности кристалла: а — расположение дислокаций; б–д — этапы передвижения дислокации и выхода ее на поверхность;  $\tau$  — напряжение сдвига; М–М плоскость сдвига

мещения дислокация выходит на поверхность кристалла и исчезает. На поверхности остается ступенька скольжения.

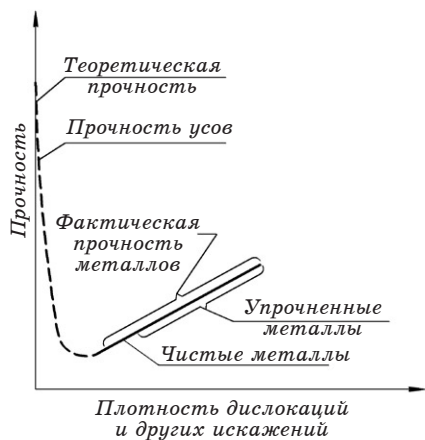
Дислокации легко перемещаются в направлении, перпендикулярном к экстраплоскости. Чем легче перемещаются дислокации, тем ниже прочность металла, тем легче идет пластическая деформация. Пластическая деформация кристаллических тел связана с количеством дислокаций, их шириной, подвижностью, степенью взаимодействия с дефектами решетки и т. д. Характер связи между атомами влияет на пластичность кристаллов.

Таким образом, причиной низкой прочности реальных металлов является наличие в структуре материала дислокаций и других несовершенств кристаллического строения. Получение бездислокационных кристаллов приводит к резкому повышению прочности материалов (рис. 1.8). Левая ветвь кривой соответствует созданию совершенных бездислокационных нитевидных кристаллов (так называемых усов), прочность которых близка к теоретической.

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

С ростом напряжений возрастает число источников, генерирующих дислокации в металле (источники Франка—Рида), и их плотность увеличивается. Помимо параллельных дислокаций возникают дислокации в разных плоскостях

и направлениях. Дислокации воздействуют друг на друга, мешают друг другу перемещаться, происходит их аннигиляция (взаимное уничтожение) и т. д. С повышением плотности дислокаций их движение становится все более затрудненным, что требует увеличения прилагаемой нагрузки для продолжения деформации. В результате металл упрочняется, что соответствует правой ветви кривой рис. 1.8.



**Рис. 1.8.** Влияние искажений кристаллической решетки на прочность кристаллов

Упрочнению способствуют и другие несовершенства кристаллического строения,

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

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

*Поверхностные дефекты* имеют малую толщину и значительные размеры в двух других измерениях. Обычно это места стыка двух разориентированных участков кристаллической решетки. Ими могут быть границы зерен, границы фрагментов внутри зерна, границы блоков внутри фрагментов. Соседние зерна по своему кристаллическому строению имеют неодинаковую пространственную ориентировку решеток. Блоки повернуты по отношению друг к другу на угол от нескольких секунд до нескольких минут, их размер около  $10^{-5}$  см. Фрагменты имеют угол разориентировки не более  $5^\circ$ . Если угловая разориентировка решеток соседних зерен меньше  $5^\circ$ , то такие границы называются малоугловыми границами (рис. 1.9).

Все границы фрагментов и блоков малоугловые. Граница между зернами представляет собой узкую переходную зону шириной 5–10 атомных расстояний. Разориентация зерен достигает нескольких десятков градусов (большеугловые границы). В граничной

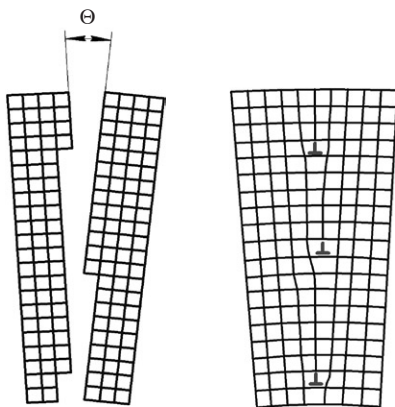


Рис. 1.9. Малоугловая граница

зоне кристаллическая решетка одного зерна переходит в кристаллическую решетку другого, в этой зоне наблюдаются повышенные скопления дислокаций и концентрация примесей. Плоскости и направления скольжения в соседних зернах не совпадают. Скольжение первоначально развивается в наиболее благоприятно ориентированных зернах. Разная ориентировка систем скольжения не позволяет дислокациям переходить в соседние зерна, и, достигнув границы зерен, они останавливаются. Напряжения от скопления дислокаций у границ одних зерен упруго распространяются через границы в соседние зерна, в результате чего в них приводятся в действие источники образования новых дислокаций (источники Франка—Рида). Происходит передача деформации от одних зерен к другим. Границы зерен препятствуют перемещению дислокаций и являются местом повышенной концентрации примесей, оказывая существенное влияние на механические свойства металла. Под размером зерна принято понимать его средний диаметр в поперечном сечении. Это определение условно, так как действительная форма зерна в металлах меняется в широких пределах — от нескольких микрометров до миллиметров. Средний размер зерна оценивается по специальной стандартизованной 10-балльной шкале и характеризуется числом зерен, приходящихся на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности шлифа при увеличении в 100 раз.

Пластическое течение, а следовательно, и предел текучести зависят от длины свободного пробега дислокаций до границ зерен металла. Предел текучести  $\sigma_T$  связан с размером зерна  $d$  уравнением Холла—Петча:  $\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-1/2}$ , где  $\sigma_0$  и  $k$  — постоянные для данного металла;  $\sigma_0$  — прочность монокристалла. Чем мельче зерно, тем выше предел текучести и прочность металла. При измельчении зерна увеличиваются предел текучести, прочность и одновременно пластичность и вязкость металла. Последнее особенно важно для металлических изделий, работающих при низких температурах. Повышенная пластичность и вязкость обусловлены более однородным составом и строением мелкозернистого металла, отсутствием в нем крупных скоплений, структурных несовершенств, способствующих образованию трещин. Помимо перечисленных дефектов в металле имеются макродефекты объемного характера: поры, газовые пузыри, неметаллические включения, микротрещины, снижающие прочность металла.

## КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

## 2.1. ПЕРВИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Все вещества могут находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном, переходы между которыми сопровождаются скачкообразными изменениями свободной энергии  $F$ . Свободная энергия изменяется при изменении температуры, плавлении, полиморфных превращениях и т. д.:  $F = U - TS$ , где  $F$  — свободная энергия;  $U$  — полная внутренняя энергия системы;  $T$  — температура;  $S$  — энтропия.

Согласно второму закону термодинамики всякая система стремится к минимальному значению свободной энергии. Любой самопроизвольно текущий процесс идет только в том случае, если новое состояние более устойчиво, т. е. обладает меньшим запасом свободной энергии.

**Условия кристаллизации.** Переход из жидкого состояния в твердое — кристаллическое — называется *кристаллизацией*. Этот переход возможен при определенных условиях — температуре и давлении. При атмосферном давлении, характерном для большинства производственных процессов, основным параметром перехода является температура.

В газах отсутствует закономерность в расположении частиц, частицы движутся хаотически, причем газ стремится занять возможно больший объем. Твердые кристаллические тела имеют правильное строение, при котором атомы и ионы находятся в узлах кристаллических решеток (так называемый дальний порядок). В жидкостях определенная ориентировка распространяется не на весь объем, а лишь на небольшое число атомов, образующих сравнительно устойчивые группировки, или флуктуации (ближний порядок).

По мере увеличения температуры твердого тела растет подвижность атомов в узлах решетки, амплитуда колебаний увеличивается и при достижении определенной температуры, называемой *температурой плавления*, закономерное расположение атомов нарушается, решетка разрушается с образованием жидкой фазы. Температура плавления — важная константа. Так, температура плавления ртути —  $38,9^{\circ}\text{C}$ , олова —  $232^{\circ}\text{C}$ , цинка —  $419^{\circ}\text{C}$ , алюминия —  $660^{\circ}\text{C}$ ,

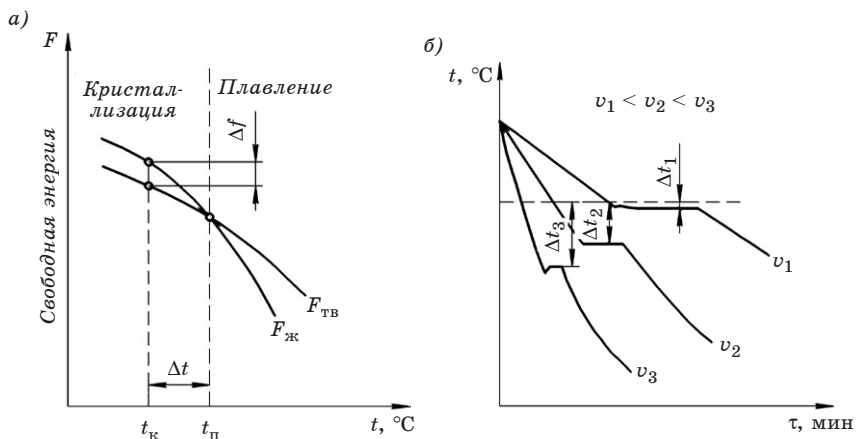
меди — 1083 °С, железа — 1536 °С и т. д. до температуры плавления вольфрама — 3410 °С.

Вблизи температуры плавления существуют группировки атомов (кластеры), в которых атомы расположены так же, как в кристаллах (ближний порядок). Эти группировки являются центрами кристаллизации, или зародышами, из которых впоследствии растут кристаллы. При достижении температуры затвердевания вновь образуется кристаллическая решетка, и металл переходит в твердое состояние.

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

Кристаллизация и плавление, как все самопроизвольно протекающие процессы, обусловлены тем, что новое состояние в конкретных условиях обладает меньшим запасом энергии. Металл затвердевает, если меньшей свободной энергией обладает твердое состояние, и плавится в том случае, когда меньшей свободной энергией обладает жидкое состояние.

Изменение свободной энергии жидкого и твердого состояний при изменении температуры показано на рис. 2.1, а.



**Рис. 2.1.** Изменение свободной энергии жидкого и твердого состояний при изменении температуры: а — влияние температуры на изменение энергии  $F$  (свободная энергия) жидкого и твердого металла; б — термические кривые охлаждения при кристаллизации чистых металлов с разной скоростью

С повышением температуры свободная энергия обоих состояний уменьшается, но закон изменения свободной энергии различен для жидкого и твердого состояний вещества.

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

Термические кривые, характеризующие охлаждение с различными скоростями, приведены на рис. 2.1, б.

При медленном охлаждении, соответствующем кривой  $\nu_1$  степень переохлаждения невелика и кристаллизация протекает при температуре, близкой к равновесной. Горизонтальная площадка на термической кривой объясняется выделением скрытой теплоты кристаллизации, которая компенсирует отвод теплоты. С ростом скорости охлаждения (кривые  $\nu_2, \nu_3$ ) степень переохлаждения растет и кристаллизация протекает при все более понижающейся температуре. Помимо скорости охлаждения степень переохлаждения зависит от чистоты металла. Чем чище металл, тем больше степень переохлаждения.

Подобно тому как при затвердевании необходимо переохлаждение до фактической температуры кристаллизации, так и при плавлении происходит перегрев до достижения реальной температуры плавления.

**Механизм кристаллизации.** Кристаллизация состоит из двух элементарных процессов:

- 1) зарождения центров кристаллизации;
- 2) роста кристаллов из этих центров.

При температурах, близких к температуре затвердевания, в жидком металле существуют центры кристаллизации, в которых атомы расположены так же, как в твердых



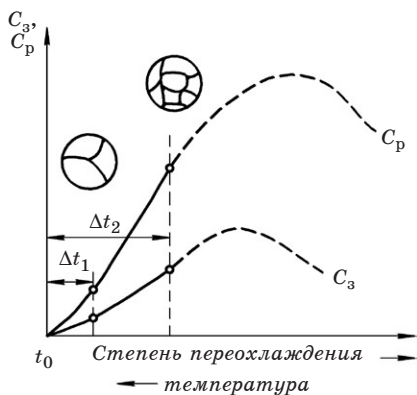


Рис. 2.2. Влияние степени переохлаждения на скорости зарождения и роста кристаллов

кристаллах. С увеличением степени переохлаждения возрастает число центров кристаллизации, образующихся в единицу времени. Одновременно с ростом кристаллов в жидкой фазе образуются новые центры кристаллизации. Кристаллы растут до взаимного столкновения, этим объясняется неправильная форма зерен. Реальные твердые кристаллы неправильной формы называются *кристаллитами*.

Суммарная скорость кристаллизации зависит от хода

обоих элементарных процессов. Она определяется скоростью зарождения центров кристаллизации ( $C_з$ ) и скоростью роста кристаллов из этих центров  $C_р$  (рис. 2.2). Величины  $C_з$  и  $C_р$  зависят от степени переохлаждения. При равновесной температуре  $T = 0$  и  $C_з = 0$ ,  $C_р = 0$ . С увеличением  $T$  растет разность свободных энергий  $\Delta F = F_ж - F_{ТВ}$ , и при достаточной подвижности атомов  $C_з$  и  $C_р$  растут и достигают максимума. Последующее уменьшение  $C_з$  и  $C_р$  объясняется снижением подвижности атомов при снижении температуры, что затрудняет перестройку атомов из хаотического расположения в жидкости в кристаллическую решетку твердого тела. При очень сильном переохлаждении  $C_з$  и  $C_р$  равны нулю и жидкость не кристаллизуется, а превращается в аморфное тело.

Для реальных металлов, как правило, реализуются лишь восходящие ветви кривых  $C_з$  и  $C_р$ , и с их ростом увеличиваются скорости обоих процессов.

Если раньше аморфное состояние достигалось лишь для солей, силикатов, органических веществ, то в настоящее время с использованием специальных приемов достигаются высокая скорость охлаждения (более  $10^6$  °C/c) и стеклообразное состояние металла. Металлы в стеклообразном состоянии характеризуются особыми физико-механическими свойствами. Зародышами кристаллизации могут быть флуктуации атомов основного металла, примеси, различные твердые частицы.

В первом случае образуются гомогенные зародыши, в других — гетерогенные. Зарождение гомогенных центров кристаллизации требует значительного расхода энергии. Для того чтобы зародыш обладал достаточной термодинамической и физической прочностью, он должен достичь соответствующего критического размера  $r_K$ . Изменение свободной энергии при гомогенном зарождении центров кристаллизации включает затраты на возникновение зародыша и образование поверхности раздела.

Изменение энергии отрицательно, если кристаллизация происходит при уменьшении свободной энергии, и положительно, если энергия системы увеличивается.

Отсюда следует, что при  $r < r_K$  зародыши не образуются, потому что  $\Delta F$  положительна и ее значение растет; когда  $r = r_K$ , появление зародыша маловероятно, так как все еще  $\Delta F > 0$ . Когда размер зародыша  $r > r_K$ , его роль в кристаллизации становится определяющей, поскольку в этот момент  $\Delta F < 0$ . Это означает начало самопроизвольной кристаллизации.

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

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

Размер зерна определяется не только степенью переохлаждения. Важную роль играют температура нагрева и разливки металла, его химический состав и особенно присутствие посторонних примесей. В реальных условиях самопроизвольное зарождение кристаллов в жидком металле затруднено. Источником образования зародышей служат различные твердые частицы — неметаллические, тугоплавкие включения. Чем больше примесей, тем больше центров, тем мельче зерна. Иногда в металл специально вводят вещества, которые при кристаллизации способствуют измельчению зерна. Эту операцию называют *модифицированием*. Модификаторами для стали являются алюминий, ванадий, титан, для чугуна — магний.