

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под редакцией  
д-ра техн. наук, профессора В. Б. Арзамасова,  
канд. техн. наук А. А. Черепихина

## УЧЕБНИК

*Допущено*

*Учебно-методическим объединением по образованию в области  
автоматизированного машиностроения в качестве учебника для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки  
бакалавров и магистров «Технология, оборудование и автоматизация  
машиностроительных производств» и дипломированных специалистов  
«Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2007

УДК 620.22(075.8)  
ББК 30.3я73  
М341

Авторы:

В. Б. Арзамасов, А. Н. Волчков, В. А. Головин, В. А. Кузнецов, Э. Е. Смирнова,  
А. А. Черепашин, А. В. Шлыкова, Н. Ф. Шпунькин

Рецензенты:

зам. председателя УМО по образованию в области автоматизированного  
машиностроения, зав. кафедрой «Стандартизация и сертификационные  
испытания техники» МГТУ «Станкин», проф. *А. Г. Схиртладзе*;  
Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, д-р техн. наук,  
проф. *А. М. Дальский*

**Материаловедение** и технология конструкционных мате-  
риалов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / [В. Б. Арза-  
масов, А. Н. Волчков, В. А. Головин и др.] ; под ред. В. Б. Ар-  
замасова, А. А. Черепашина. — М. : Издательский центр «Ака-  
демия», 2007. — 448 с.

ISBN 978-5-7695-4186-5

Рассмотрены механические свойства и методы испытаний конструк-  
ционных металлических материалов. Изложены основы производства и  
особенности формирования структур сплавов на основе железа, а также  
цветных сплавов на основе алюминия, магния, меди, никеля и др. Опи-  
саны неметаллические композиционные и порошковые материалы. Изло-  
жены основы сварочного процесса и разных видов механической обра-  
ботки заготовок. Дан системный анализ методов изготовления деталей.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 620.22(075.8)  
ББК 30.3я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Коллектив авторов, 2007

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2007

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2007

ISBN 978-5-7695-4186-5

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
-------------------	---

## ЧАСТЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<b>Глава 1. Металлические материалы .....</b>	<b>5</b>
---	----------

1.1. Строение металлических материалов .....	7
--	---

1.2. Кристаллизация чистых металлов .....	21
---	----

1.3. Кристаллизация сплавов .....	28
-----------------------------------	----

<b>Глава 2. Механические свойства материалов и методы их испытаний .....</b>	<b>40</b>
--	-----------

2.1. Статические испытания .....	40
----------------------------------	----

2.2. Испытания на твердость .....	42
-----------------------------------	----

2.3. Динамические испытания .....	43
-----------------------------------	----

<b>Глава 3. Железо и сплавы на его основе .....</b>	<b>45</b>
---	-----------

3.1. Компоненты и фазы в системе железо — углерод .....	45
---	----

3.2. Диаграмма состояния железо — цементит .....	46
--	----

3.3. Эвтектоидные превращения сталей .....	48
--	----

3.4. Структурные превращения чугунов .....	49
--	----

3.5. Чугуны со свободным графитом .....	51
---	----

3.6. Влияние углерода и технологических примесей на свойства сталей .....	54
--	----

3.7. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства сталей .....	55
---	----

3.8. Влияние легирующих элементов на полиморфные превращения сталей .....	56
--	----

3.9. Влияние легирующих элементов на фазовые превращения сталей .....	57
--	----

3.10. Карбиды и интерметаллиды в легированных сталях .....	58
--	----

3.11. Классификация сталей по структуре .....	59
---	----

3.12. Влияние легирования на свойства феррита и аустенита .....	59
--	----

<b>Глава 4. Формирование структуры деформированных металлических материалов .....</b>	<b>62</b>
---	-----------

4.1. Механизм пластического деформирования металла .....	62
--	----

4.2. Изменение структуры металла при пластическом деформировании .....	65
---	----

4.3. Деформирование двухфазных сплавов .....	66
4.4. Наклеп и разрушение .....	67
4.5. Возврат и рекристаллизация .....	68
4.6. Холодная и горячая деформации. Сверхпластичность .....	71
<b>Глава 5. Термическая обработка сплавов .....</b>	<b>72</b>
5.1. Виды термической обработки сплавов .....	72
5.2. Основные фазовые превращения при термической обработке сталей .....	74
5.3. Основные виды термической обработки стальных полуфабрикатов и изделий .....	79
5.4. Технология термической обработки стальных полуфабрикатов и изделий .....	81
5.5. Влияние термической обработки на механические свойства стали .....	85
5.6. Закаливаемость и прокаливаемость сталей .....	86
<b>Глава 6. Химико-термическая обработка сплавов .....</b>	<b>88</b>
6.1. Диффузионное насыщение стали неметаллами .....	88
6.2. Диффузионное насыщение металлами .....	91
6.3. Циркуляционный метод и метод ионной химико-термической обработки изделий .....	93
<b>Глава 7. Классификация сталей .....</b>	<b>95</b>
7.1. Углеродистые стали обыкновенного качества .....	95
7.2. Углеродистые качественные и высококачественные стали .....	97
7.3. Легированные стали .....	99
7.4. Высоколегированные инструментальные стали .....	108
<b>Глава 8. Цветные металлы и сплавы .....</b>	<b>111</b>
8.1. Сплавы на основе алюминия .....	111
8.2. Сплавы на основе магния .....	115
8.3. Технический титан и титановые сплавы .....	116
8.4. Медь и ее сплавы .....	117
8.5. Сплавы на основе никеля .....	121
8.6. Тугоплавкие металлы и их сплавы .....	121
8.7. Антифрикционные сплавы .....	123
8.8. Биметаллы .....	125
<b>Глава 9. Неметаллические материалы .....</b>	<b>127</b>
9.1. Полимеры .....	127
9.2. Резиновые материалы .....	132
9.3. Клеи и герметики .....	133
9.4. Лакокрасочные материалы .....	135
9.5. Прокладочные материалы .....	136
<b>Глава 10. Композиционные и порошковые материалы .....</b>	<b>138</b>
10.1. Композиционные материалы с металлической матрицей .....	138
10.2. Композиционные материалы с неметаллической матрицей .....	141
10.3. Конструкционные порошковые материалы .....	142

## ЧАСТЬ II

# ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

<b>Глава 11. Металлургия</b> .....	144
11.1. Материалы для производства металлов и сплавов .....	145
11.2. Производство чугуна .....	146
11.3. Прямое восстановление железа .....	153
11.4. Производство стали .....	155
11.5. Производство цветных металлов .....	167
<b>Глава 12. Литейное производство</b> .....	173
12.1. Основы литейного производства .....	173
12.2. Способы литья .....	181
12.3. Изготовление отливок из разных сплавов .....	204
12.4. Технологичность конструкций литых деталей .....	211
<b>Глава 13. Обработка металлов давлением</b> .....	217
13.1. Физико-химические основы обработки металлов давлением .....	217
13.2. Процессы, завершающие металлургический цикл .....	228
13.3. Процессы производства заготовок и готовых деталей .....	239
13.4. Листовая штамповка .....	261
<b>Глава 14. Сварочное производство</b> .....	276
14.1. Физико-химические основы получения сварного соединения .....	276
14.2. Электрические виды сварки .....	283
14.3. Химические способы сварки .....	301
14.4. Лучевые виды сварки .....	305
14.5. Механические виды сварки .....	309
14.6. Электромеханические виды сварки .....	316
14.7. Технологические особенности сварки сталей и чугунов .....	324
14.8. Контроль сварных соединений .....	327
<b>Глава 15. Механическая обработка заготовок</b> .....	333
15.1. Физико-механические основы обработки материалов резанием .....	333
15.2. Точность и производительность обработки .....	343
15.3. Инструментальные материалы .....	344
15.4. Общие сведения о металлорежущих станках .....	347
15.5. Автоматизация производства в механообрабатывающих цехах .....	349
15.6. Лезвийная обработка деталей машин .....	351
15.7. Технологичность деталей машин .....	375
15.8. Абразивная обработка деталей машин, шлифование .....	380
15.9. Отделочная обработка деталей машин .....	386
<b>Глава 16. Обработка поверхностей заготовок без снятия стружки</b> .....	392
16.1. Классификация методов поверхностного пластического деформирования .....	392
16.2. Физические явления при поверхностном пластическом деформировании .....	396

<b>Глава 17. Методы электрофизической и электрохимической обработки поверхностей заготовок</b> .....	402
17.1. Электроэрозионная обработка .....	402
17.2. Электрохимическая обработка .....	405
17.3. Импульсно-механическая обработка .....	409
17.4. Лучевая обработка .....	410
17.5. Плазменная обработка .....	411
<b>Глава 18. Изготовление изделий из композиционных и порошковых материалов</b> .....	413
18.1. Изготовление изделий из композиционных материалов .....	413
18.2. Изготовление изделий из композиционных материалов с неметаллической матрицей .....	417
18.3. Изготовление изделий из порошковых материалов .....	420
<b>Глава 19. Системный анализ методов изготовления деталей</b> .....	426
19.1. Технологический процесс изготовления деталей — техническая система .....	426
19.2. Информационная модель метода изготовления деталей .....	431
19.3. Функциональная модель метода механической обработки .....	433
19.4. Логико-множественная модель метода механической обработки и технологических объектов, участвующих в процессе изготовления деталей .....	438
Список литературы .....	442

*Посвящается памяти д-ра техн. наук, профессора  
Владимира Александровича Белова (1920—2002 гг.),  
возглавлявшего кафедру «Технология конструкционных  
материалов» Московского государственного технического  
университета «МАМИ» в период 1974—1992 гг.*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Технология — это наука о методах, с помощью которых можно реализовать производственный процесс с целью получения готового изделия с параметрами качества, обеспечивающими требуемые его эксплуатационные свойства. Частью производственного процесса применительно к машиностроению является *технологический процесс*, или определенная последовательность действий, необходимая для получения конструкционных материалов, заготовок, деталей, комплектов, агрегатов и машин в целом с заданными параметрами качества.

Технологические процессы классифицируют по четырем признакам: формообразование, параметры качества, производительность изготовления изделия или партии изделий и себестоимость изготовления изделия.

По признаку «формообразование» вся технология конструкционных материалов делится на следующие этапы (передель): металлургия (производство металлов и сплавов); производство заготовок (литье, обработка давлением, сварка, методы порошковой металлургии); механическая обработка (методы резания, поверхностное пластическое деформирование); сборочное производство (создание подвижных и неподвижных соединений деталей механическими, электромеханическими способами или сваркой).

Признак «параметры качества» характеризуется группами качества, в числе которых химический состав, структура и физико-механические свойства основного объема заготовки или детали и их поверхностных слоев, геометрическая форма, точность размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, микрогеометрия поверхности. Разные методы изготовления позволяют получить или изменить только отдельные группы параметров качества. Например, металлургические процессы обеспечивают получение конструкционного материала с заданными химическим составом и физико-механическими свойствами; во время заготовительного передель можно получить заготовку с относительно низкими физико-химическими, геометрическими и точностными параметрами, на этапе механической обработки можно повысить точность параметров заготовки до требуемого уровня, а на этапе сборочного производства — получить изделие с заданными эксплуатацион-

ными свойствами. Именно этим объясняется многоэтапность технологии, когда на каждом из этапов формируется определенная группа параметров качества.

Признак «производительность изготовления изделия или партии изделий» характеризуется временем, необходимым для изготовления изделия или партии изделий. При этом в зависимости от производства (в единичном производстве одно изделие, а в мелко-, средне-, крупносерийном и массовом производстве одна партия изделий) величине изготавливаемой партии изделий должны соответствовать определенные требования к организации и составу технологического процесса изготовления. Вид производства определяет применяемую технологическую цепочку, переход от непоточного производства к поточному и далее к гибким производствам, используемые средства производства (от универсального до специализированного оборудования).

Характеристикой признака «себестоимость изготовления изделия» являются суммарные затраты на изготовление одного изделия.

Современная технология находится в поле жесткого критерия «при заданных качестве и производительности обеспечить минимальную себестоимость изделия». Согласно этому критерию отдельные этапы производства изделия необходимо рассматривать как единую технологическую структуру со взаимным влиянием одного этапа на другой. Например, параметры качества заготовки влияют на качество конечной детали или изделия; технические возможности отдельных элементов технологической цепочки (технологических операций) влияют на точностные параметры и конфигурацию как заготовки, так и изделия в целом.

Любой технологический процесс представляет собой совокупность отдельных технологических операций, выполняемых на одном рабочем месте и одном и том же оборудовании. Физическую суть операции определяют методы изготовления и обработки, которые также имеют единую технологическую структуру. Эта структура подробно описана в гл. 19 данного учебника.

Учебник создан коллективом преподавателей МГТУ Московский автомеханический институт («МАМИ»).

Главы 1 — 10 написал д-р техн. наук, проф. В. Б. Арзамасов; гл. 11 — канд. техн. наук. А. В. Шлыкова; гл. 12 — канд. техн. наук А. Н. Волчков; гл. 13 — д-р техн. наук, проф. В. А. Головин, канд. техн. наук, проф. Н. Ф. Шпунькин; гл. 14, 15 — канд. техн. наук А. А. Черепяхин; гл. 16, 19 — д-р техн. наук, проф. В. А. Кузнецов; гл. 17 — д-р техн. наук, проф. В. А. Кузнецов, канд. техн. наук А. А. Черепяхин; гл. 18 — канд. техн. наук Э. Е. Смирнова.



# ЧАСТЬ I

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

---

### ГЛАВА 1

#### МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Материаловедение — это комплексная наука, изучающая внутреннее строение и свойства материалов и закономерности их изменения под воздействием внешних факторов: тепловых, механических, химических, электромагнитных, радиоактивных с целью достижения заранее заданных свойств. Теоретической основой материаловедения являются соответствующие разделы физики и химии твердого тела, однако наука о материалах развивается в основном экспериментальным путем. К основным задачам материаловедения относятся создание и внедрение новой техники, новых материалов, новых малоотходных технологий, высокоэффективных методов обработки существующих материалов.

Условия работы современных изделий машиностроения часто требуют увеличения эксплуатационных характеристик материалов, что во многом определяется крупными достижениями в теории и практике материаловедения. В настоящее время широкое применение нашли новые высокопрочные металлические материалы разного назначения, композиционные материалы, материалы с особыми свойствами (полупроводники и жидкие кристаллы, сверхпроводники, аморфные сплавы), одновременно совершенствуются способы упрочнения деталей термической и химико-термической обработками.

Развитие материаловедения как науки о материалах и технологиях их получения и обработки связано с трудами очень многих ученых, среди которых значительный вес имеют работы отечественных ученых А. М. Бочвара, А. А. Байкова, Г. В. Курдюмова, В. Д. Садовского, В. А. Каргина и др.

Все конструкционные материалы можно подразделить на большие группы: *металлические материалы* — к ним относят металлы и сплавы, в свою очередь подразделяемые на черные (железо и его сплавы) и цветные (все остальные, кроме железа, металлы и сплавы на их основе); *нематаллические материалы* (резина, пластмассы, стекло, дерево и т. д.); *композиционные материалы* (могут быть на основе систем металл — металл, металл — неметалл, неметалл — неметалл).

Металлы и неметаллы — это понятия, которые используются для классификации, с одной стороны, химических элементов, а с другой стороны, веществ, обладающих рядом характерных физических свойств, обусловленных внутренним строением, т. е. строением атомов, из которых они образованы. Это могут быть как простые вещества, состоящие из атомов одного химического элемента, так и сложные, т. е. состоящие из атомов разных элементов.

*Неметаллы* — это более 20 химических элементов Периодической системы Д. И. Менделеева химических элементов, расположенные правее условной линии «бор — астат», находящиеся в природных условиях в разных агрегатных состояниях (*газы* — благородные He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn; водород H<sub>2</sub>, кислород O<sub>2</sub>, азот N<sub>2</sub>, фтор F<sub>2</sub>, хлор Cl<sub>2</sub>; *жидкости* — бром Br<sub>2</sub>; твердые вещества — иод I<sub>2</sub>, углерод С, кремний Si, фосфор Р и др.) и играющие в природе очень большую роль. На долю неметаллов приходится более 84 % массы почвы, 98,5 % массы растений. Неметаллы отличаются от металлов по химическим свойствам, так как в кристаллической решетке неметаллов, как правило, нет свободных электронов и между атомами неметаллов существуют ковалентные связи. Характерной для неметаллов является их способность присоединять электроны, т. е. неметаллы обладают окислительными свойствами, поэтому легко взаимодействуют с металлами.

Из 109 описанных в Периодической системе Д. И. Менделеева химических элементов более 80 являются металлами и обладают такими характерными для металлов свойствами, как высокая пластичность, ковкость, высокие тепло- и электропроводность, положительный температурный коэффициент электрического сопротивления (многие металлы обладают сверхпроводимостью при температурах близких к абсолютному нулю, т. е. в области температур  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), хорошая отражательная способность и, как следствие, характерный металлический блеск, непрозрачность, способность к термоэлектронной эмиссии (испускание электронов при нагревании). Все металлы, за исключением ртути, в обычных условиях твердые кристаллические вещества, являющиеся хорошими проводниками теплоты и электрического тока.

Эти свойства обусловлены наличием свободно перемещающихся электронов в кристаллической решетке. Более высокими техническими свойствами обладают не чистые металлы, а их соединения с металлами и неметаллами — *сплавы*, которые по составу и строению бывают разными (в виде механической смеси кристаллов, в виде твердого раствора или интерметаллического соединения), но сохраняют важнейшие свойства металлов и называются *металлическими материалами*.

Примером широко используемых сплавов являются: *сталь* — сплав железа с углеродом (добавки: Mn, Cr, Ni, Si, P, S); *бронза* —

сплав меди с оловом (добавки: Zn, Pb, Al, Mn, P, Si); *латунь* — сплав меди с цинком (добавки: Sn, Mn, Al, Pb, Si); *мельхиор*, *нейзильбер* — сплавы меди с никелем; *дюралюминий* — сплав алюминия с медью (3...5%), марганцем (около 1%), магнием (около 1%); *амальгамы* — сплавы металлов, содержащих ртуть.

При описании каждого из этих сплавов, являющихся металлическими материалами, допустимо одновременное использование понятия «металл» (по металлу — основе, основные свойства которого наследуются или усиливаются).

### 1.1. Строение металлических материалов

Сила, удерживающая вместе микрочастицы, из которых состоит любое вещество, т.е. атомы, ионы, молекулы, называется химической связью. По природе это электростатическая сила притяжения между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженными ядрами. Величина этой силы зависит от электронной конфигурации внешней оболочки атомов. В металлах химическая связь представляет собой особый тип связи, обусловленный их строением. Исследования, проводимые с помощью рентгеновских лучей, показывают, что металлы в твердом состоянии существуют в форме кристаллов. Эти кристаллы состоят из положительных ионов, удерживаемых в определенных положениях кристаллической решетки свободно перемещающимся (делокализованным) «морем» электронов. Электроны, участвующие в образовании металлической связи, являются внешними, или валентными, электронами атомов металла. Наличие в металлах по крайней мере одного свободного электрона на каждый атом обусловлено волновым характером электронов, т.е. их поведением не как частицы, а как волны. Эти свободные электроны (электроны проводимости) образуются при сближении атомов настолько, что их внутренние заполненные оболочки соприкасаются, соседние ядра попадают в пределы области, занимаемой внешним электронным облаком, и в результате внешний электрон начнет притягиваться соседними ядрами. Энергия связи возрастает, одновременно увеличивается размер облака. Это обстоятельство позволяет электрону приближаться к более далеким соседям, которые еще больше «размазывают» электронное облако. В результате у металлов волновые функции внешних электронов распространяются на весь кристалл, как и размер электронного облака, т.е. эти электроны проводимости и образуют так называемый *электронный газ* в металлах.

Атомы большинства металлов имеют от 1 до 3 электронов на внешней электронной оболочке, их ионизационный потенциал невелик, так как по размерам атомы металлов являются большими (для примера, атом железа по диаметру в 2,75 раза больше

атома водорода, являющегося самым маленьким из атомов, имеющим  $D_{\text{ат}} \approx 0,1$  нм, т.е.  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м). Таким образом, для ионно-электронной системы решетки металла в твердом виде характерно устойчивое состояние, в котором ионы располагаются на расстояниях один от другого, соответствующих минимальной суммарной силе их взаимодействия, и образуют правильную кристаллическую решетку, соответствующую минимальной энергии взаимодействия.

В общем случае свойства кристаллов зависят от электронного строения составляющих их атомов, характера взаимодействия их в кристалле, а также от пространственного расположения атомов и химического состава. Из-за низкой прочности применение чистых металлов ограничено. В современной технике используются в основном сплавы, т.е. металлические материалы, получаемые сплавлением двух или более элементов, которые называются *компонентами* сплава.

Развитие материаловедения как науки связано с всесторонним изучением множества закономерностей, проявляющихся в поведении сплавов при их использовании, т.е. каждый сплав при изучении рассматривается как *система*. Взаимодействуя при высоких температурах нагрева компоненты образуют *фазы* — гомогенные части системы, т.е. части, имеющие одинаковые химический состав, физические свойства, в том числе агрегатное состояние, и отделенные от других фаз поверхностью раздела, при переходе через которую отмечается скачкообразное изменение свойств. Форма, размеры, характер взаимного расположения фаз в сплавах определяют структуру — внутреннее их строение. Главный интерес исследователей направлен на изучение дефектов структуры, определяющих основные эксплуатационные характеристики материалов. Современное материаловедение решает проблему «от дефектов структуры материала — к его свойствам».

Исследование структуры металлических материалов согласно представлениям, основанным на данных последнего времени, ведется на трех масштабных уровнях: макро-, мезо-, микроуровни (а также выделяется нануровень). В соответствии с уровнем исследования детализируется и исследуемая структура.

*Макроструктура* — изучение объектов невооруженным глазом (увеличение  $\times 1$ ) или при небольших увеличениях ( $\times 20$ ) с помощью лупы с целью выявления производственных дефектов (характер излома, усадочные раковины, поры, трещины, размеры и форма крупных зерен кристаллов — дендритов, включений). Используя специально подготовленные шлифованные и травленные образцы, определяют наличие трещин, химическую неоднородность (ликвацию), волокнистость. Наряду с визуальным методом применяют методы рентгеновской радиографии и ультразвуковой инспекции.

Несмотря на простоту, исследование макроструктуры дает общую картину кристаллического строения металла или сплава в больших объемах и позволяет выбрать характерные участки структуры для дальнейших более детальных исследований.

*Мезоструктура* — особенности структуры, размер которой находится на пределе возможностей невооруженного глаза. Введение этого уровня важно для композиционных материалов, характерный масштаб структуры которых определяется размером волокон, наполнителя, пор и т.д. Мезоструктурный уровень определяет качество адгезионной связи при склеивании или сваривании деталей. Предельное увеличение на этом уровне обеспечивается применением оптического и растрового электронного микроскопов, позволяющих изучать структуру внутри зерен, дислокации и их ансамбли, ячеистые субструктуры.

*Микроструктура* (иначе рентгеноструктура) — это точечные дефекты, дислоцированные ионы, примесные атомы, размеры и тип кристаллических решеток — изучаются с помощью просвечивающего электронного микроскопа, сканирующего туннельного микроскопа. Для исследования микроструктуры готовят специальные образцы — микрошлифы, фольги. Микроскопические методы дают возможность определять размеры и форму зерен (кристаллитов, т.е. реальных кристаллов неправильной формы), их распределение и относительные объемные количества, форму инородных включений и микропустот, ориентирование кристаллитов, выявлять кристаллографические признаки и другие особенности микроструктуры металлов и сплавов. Тонкую, т.е. атомную, структуру изучают с помощью дифракционных методов анализа (рентгенография, электронография, нейтронография). Анализируя дифракционную картину, полученную при воздействии на атомы кристаллита коротких волн ( $\lambda = 10^{-12} \dots 10^{-10}$  м) рентгеновского излучения (или при замедлении быстрых электронов, или тепловых нейтронов), получают информацию о расположении атомов в кристаллической решетке, расстояниях между ними, т.е. определяют тип кристаллической решетки материала, другими словами, изучают структуру внутри зерна, а также линейные дефекты (дислокации), точечные дефекты (0,1... 0,5 нм).

Большинство твердых тел имеют кристаллическую структуру с атомами, расположенными упорядоченным образом. У них присутствует так называемый дальний порядок, так как упорядоченность распространяется на весь кристалл. Расположение атомов вещества в последовательности, которая периодически повторяется в трех измерениях, называется *кристаллическим строением*. Это строение можно представить в виде кристаллической решетки, в узлах которой располагаются атомы (ионы), образующие твердое кристаллическое тело (рис. 1.1). Каждому кристаллическому веществу соответствует свой тип кристаллической

решетки. Для его определения в решетке любого кристалла можно выявить структурную единицу — элементарную ячейку, т. е. наименьшую повторяющуюся ячейку кристалла, содержащую все элементы его симметрии, или комплекс его атомов, при многократном повторении которого можно построить всю кристаллическую решетку.

В кристаллической решетке на рис. 1.1 выделена элементарная ячейка в виде параллелепипеда. Для описания любой элементарной ячейки кристаллических решеток используют три расстояния ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) между ближайшими соседними атомами в направлении осей координат (*периоды*, или постоянные решетки) и три угла  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  между ними. Существует всего семь типов кристаллографических систем (сингоний) (табл. 1.1). Кроме того, существует еще семь типов вложенных (взаимопроникающих) ячеек, в которых вершина одной ячейки совпадает с пространственным центром другой ячейки. В итоге всего существует 14 способов построения периодической решетки, определяющих 14 типов кристалличес-

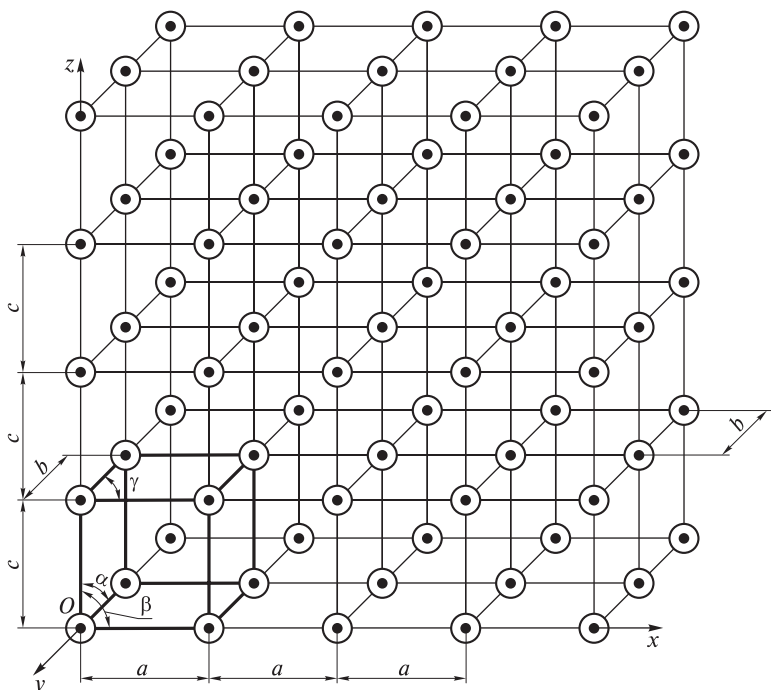
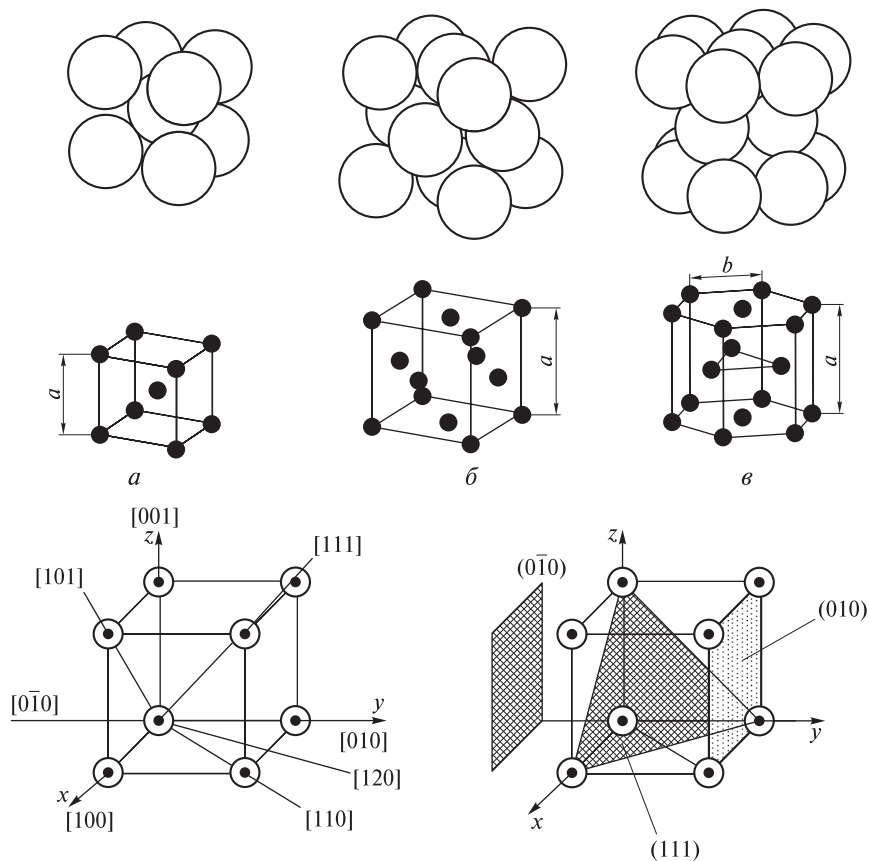


Рис. 1.1. Схема кристаллической решетки:

$Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  — координатные оси;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — периоды решетки;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — угловые характеристики решетки

ких решеток (*решетки Бравэ*), с помощью которых можно описать все многообразие кристаллических веществ в природе.

Металлы также можно охарактеризовать по типу кристаллической решетки. Для большинства металлов характерны пространственные кристаллические решетки трех типов: объемно-центрированная кубическая (ОЦК) (рис. 1.2, *а*) — К, Na, Li, Ti, Zr<sub>β</sub>, W, Ta, Fe<sub>α</sub>, Cr, V и др.; гранецентрированная кубическая (ГЦК) (рис. 1.2, *б*) — Fe<sub>γ</sub>, Sr, Al, Pb, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Cu, Co<sub>α</sub> и др.;



2

Рис. 1.2. Три типа пространственных кристаллических решеток металлов (*а—в*) и индексация узлов и плоскостей решетки (*г*):

*а* — объемно-центрированная кубическая; *б* — гранецентрированная кубическая; *в* — гексагональная плотноупакованная; *г* — кристаллографические индексы: направления ([001], [111], [010], [110], [100], [010] и др.) и плоскости ((010), (010), (111)); *a*, *b* — периоды решетки; *x*, *y*, *z* — оси координат

гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (рис. 1.2, в) — Mg, Ti<sub>α</sub>, Cd, Os, Zn, Co<sub>β</sub> и др.

Размеры кристаллической решетки характеризуются величиной периодов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — расстоянием между ближайшими соседними атомами в элементарной ячейке, измеряется в нанометрах ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Для простой кубической решетки из восьми атомов в вершинах куба на элементарную ячейку приходится всего один атом, так как каждый из атомов в восьми вершинах куба принадлежит одновременно восьми соседним ячейкам. Таким образом, от каждого атома на долю каждой элементарной ячейки приходится  $1/8$  его объема, на всю ячейку —  $(1/8) \cdot 8 = 1$  атом. Кристаллические решетки большинства металлических материалов — ОЦК, ГЦК, ГПУ, т. е. их строение более сложное, чем у простого куба, и ионы не только образуют остов решетки, т. е. располагаются не только в ее узлах (вершинах), но и на гранях (ГЦК, ГПУ) или в центре (ОЦК) решетки. В результате на одну элементарную ячейку ОЦК приходится два атома — один в центре, другой в вершинах куба:  $(1 + 8 \cdot 1/8) = 2$ ; на элементарную ячейку ГЦК приходятся четыре атома — один в вершинах куба и три на его гранях,  $(8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2) = 4$ ; на элементарную ячейку ГПУ приходится шесть атомов:  $(3 + 12 \cdot 1/6 + 12 \cdot 1/2) = 6$ .

Таблица 1.1

**Кристаллографические системы и параметры пространственных кристаллических решеток**

Сингония	Тип пространственной решетки	Соотношение параметров элементарной ячейки	
		Ребра	Углы
Триклинная	Простая	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Моноклинная	Простая Базоцентрированная	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ$ , $\beta \neq 90^\circ$
Ромбическая	Простая Базоцентрированная Объемно-центрированная Гранецентрированная	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ромбоэдрическая (тригональная)	Ромбоэдрическая	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ , $\gamma < 120^\circ$
Гексагональная	Простая Плотнупакованная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ , $\gamma = 120^\circ$
Тетрагональная	Простая Объемно-центрированная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Кубическая	Простая Объемно-центрированная Гранецентрированная	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



Основные характеристики кристаллической решетки (тип, период, число атомов в элементарной ячейке) определяются расположением атомов в кристалле. Плотность кристаллической решетки характеризуется координационным числом, которое обозначается буквами «К» для кубической и «Г» для гексагональной решеток. Оно равно числу ближайших равноудаленных соседей. В элементарной ячейке ОЦК расстояние между атомами равно  $0,5\sqrt{3}a$  и координационное число равно восьми, т.е. К8, для ГЦК — К12 и для ГПУ — Г12. Отношение объема всех атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку, ко всему ее объему определяет коэффициент компактности, он равен 0,68 для ОЦК, 0,74 для ГЦК и ГПУ.

**Кристаллографические индексы.** Для определения свойств реальных кристаллов важно кристаллографическое изучение положения атомов в пространственной решетке и в элементарной ее ячейке в трех измерениях. Для удобства используют систему координат с началом в одном из узлов ячейки, из которого проводят оси  $x, y, z$  (рис. 1.2, з) параллельно ребрам этой ячейки. В рассматриваемом случае кубической системы изображена элементарная ячейка — куб, для которого периоды  $a = b = c$ , т.е. все ребра куба равны. Периоды решетки принимаются за единицу измерения вдоль соответствующей оси.

Для описания важно выделить имеющие значение атомные плоскости (т.е. плоскости, пересекающие атом), обозначить их, определить направление расположения ряда атомов и также обозначить их. При определении индексов направления расположения ряда атомов в кристаллической решетке из семейства параллельных прямых выбирается одно направление, которое проходит через произвольно выбранный узел решетки и служит началом координат. Координаты узла кристаллической решетки выражают целыми числами  $A, B, C$  в единицах отрезков  $a, b, c$  (величины, обратные числам отношения), заключают в квадратные скобки  $[A, B, C]$  и называют *индексами направления*. Например, направления  $[111], [010], [110]$ . Если плоскость отсекает отрезок на отрицательной оси, то над индексом ставят знак «-». Например, направление  $[0\bar{1}0]$  на рис. 1.2, з. Положение плоскостей в пространстве определяется отрезками, отсекаемыми плоскостью по координатным осям. Эти отрезки выражаются целыми числами  $m, n, p$  в единицах отрезков  $a, b, c$ . *Индексами плоскостей* будут обратные числа  $h = 1/m; k = 1/n; l = 1/p$ , которые заключают в круглые скобки  $(h, k, l)$  (например, плоскости  $(111)$  или  $(010)$  на рис. 1.2, з). Если плоскость отсекает по осям отрицательные отрезки, то над соответствующим индексом ставят знак «-» (например, плоскость  $(0\bar{1}0)$ ).

**Анизотропия.** Если в кристалле расстояния между атомами в разных кристаллографических направлениях неодинаковы, т.е. если симметрия кристалла отсутствует, то и ряд свойств его в разных

направлениях будет различаться — имеет место их анизотропия. Примером анизотропного вещества может быть графит, который проводит электрический ток только в одном направлении своей решетки — вдоль ее слоев.

В отличие от монокристаллов технические металлы являются поликристаллами, состоящими из множества по-разному ориентированных анизотропных кристаллов. Однако в целом анизотропия не проявляется, так как среднестатистическое расстояние между атомами по всем направлениям оказывается примерно одинаковым, и поликристаллическое тело является *изотропным*. В то же время в процессе обработки давлением поликристалла достигается преимущественная ориентировка кристаллографических индексов в направлении, например, прокатки, т.е. поликристаллическая структура становится текстурованной и анизотропной.

**Дефекты кристаллической решетки.** Реальный кристалл отличается от идеального наличием разного рода структурных несовершенств — дефектов, которые классифицируются как точечные, линейные, поверхностные, объемные. Размеры точечных дефектов близки к межатомному расстоянию. У линейных дефектов длина на несколько порядков больше ширины, поверхностные дефекты характеризуются малой толщиной, а ширина и длина дефекта больше его толщины на несколько порядков. Объемные дефекты (поры, трещины) имеют значительные размеры во всех трех направлениях.

*Точечные дефекты* — вакансии, межузельные атомы основного вещества, чужеродные примесные атомы внедрения и замещения. Если вакансия — это отсутствие атома (иона) в узле кристаллической решетки, то межузельный атом (ион) — это дислоцированный атом (ион), т.е. частица, смещенная из узловой позиции в пространство между узлами. Атом примеси, находящийся в решетке кристалла между его узлами или на ребрах решетки, называют внедренным, а в случае расположения атома примеси в свободном (вакансионном) узле кристаллической решетки он является атомом замещения.

Рассмотрим механизм образования вакансий в кристалле. Узлы любой кристаллической решетки — это те условные точки термодинамического равновесия, в которых находятся атомы (ионы), совершающие бесконечные тепловые колебательные движения. Чем выше температура тела, тем больше энергия атомов и амплитуда их колебаний относительно равновесной позиции. Энергия и амплитуда колебаний отдельных атомов реального тела по разным причинам может оказаться настолько выше среднего уровня, что такие атомы (рис. 1.3, *a*, атом *1*) теряют свое узловое место в кристаллической решетке, смещаясь в межузельное пространство. В результате нарушается динамическое равновесие в системе решетки и начнется миграция, перемещение, например, атома *2* на

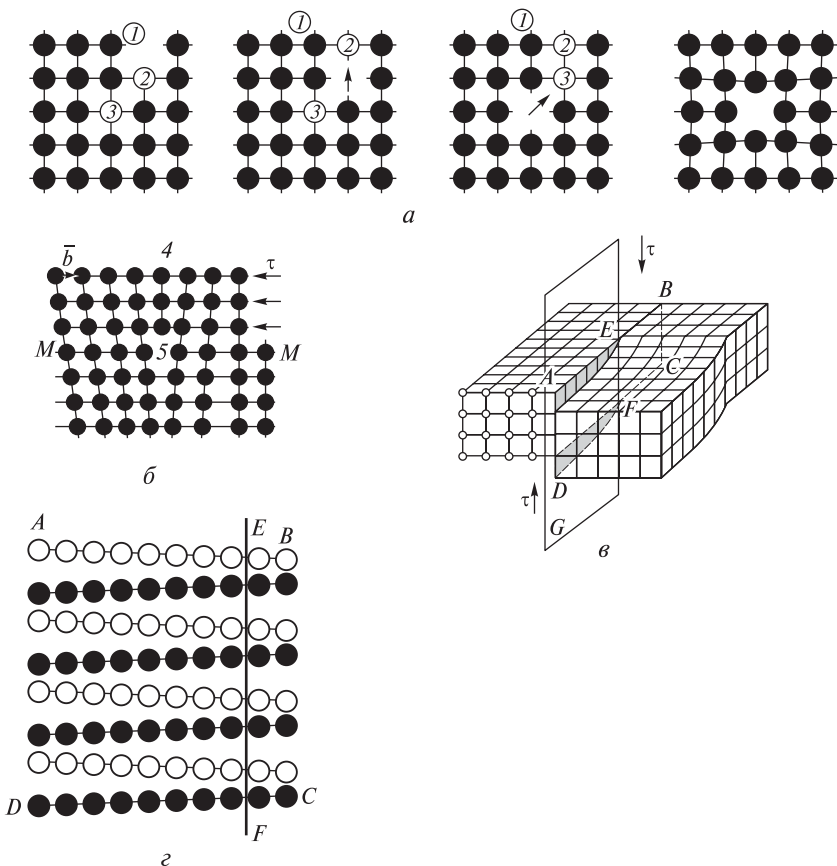


Рис. 1.3. Точечные и линейные дефекты кристаллической решетки металлов:

*a* — механизм образования точечных дефектов; *б* — краевая дислокация; *в* — пространственная модель образования винтовой дислокации; *z* — расположение атомов в области винтовой дислокации; *1* — дислоцированный атом; *2, 3* — перемещающиеся атомы; *4–5* — экстраплоскость; *MM* — плоскость скольжения; *G* — плоскость сдвига кристалла; *AB* — сдвинутая часть кристалла; *CD* — несдвинутая часть кристалла; *EF* — линия винтовой дислокации;  $\bar{b}$  — вектор Бюргерса;  $\tau$  — напряжение сдвига

освободившееся место, т. е. вакансию в узловой точке займет атом из более глубоких слоев, а, в свою очередь, на его место переместится атом *3* и т. д. Таким образом, вакансия продвигается в глубь кристалла, приводя при этом к искажению кристаллической решетки.

Источником тепловых вакансий являются свободные поверхности, границы и субграницы кристаллов, пустоты и трещины. При температурах, близких к температуре плавления, число ва-

кансий достигает 1...2 % числа атомов в кристаллическом теле. Также вакансии могут образоваться в результате пластической деформации, рекристаллизации, облучения (бомбардировка металла атомами или частицами высоких энергий).

Вакансии не остаются неподвижными. Перемещаясь, они объединяются в группы, образуя большие *линейные дефекты* — дислокации, т. е. линейные несовершенства кристалла, простирающиеся на расстояния, много большие периода решетки, вблизи которого нарушено правильное расположение атомных плоскостей. Основными геометрическими свойствами дислокаций являются *вектор Бюргерса  $\vec{b}$*  (мера искаженности кристаллической решетки дислокацией, характеризует направление и величину сдвига, энергию дислокации, вызванные ею упругие напряжения, т. е. подвижность дислокаций) и *направление линии дислокации* в каждой точке (единичный вектор, направленный по касательной к линии из этой точки). Данные свойства определяют плоскость скольжения в кристалле, а угол между вектором Бюргерса и направлением линии дислокации позволяет судить о характере дислокационной линии, а следовательно, и о виде дислокации, которая может быть краевой и винтовой.

Краевой дислокацией является нижняя граница дефектной неполной атомной плоскости 4—5 (рис. 1.3, б), называемой экстраплоскостью. Из рисунка видно, что большая часть искажений кристалла сконцентрирована около края экстраплоскости (поэтому и название дислокации — краевая). Она может возникнуть при сдвиге верхней части кристалла влево по плоскости *MM* на одно межатомное расстояние относительно нижней части под действием приложенного сдвигающего напряжения  $\tau$ . Расклинивающее действие атомов экстраплоскости распространяется вглубь по линии дислокации, перпендикулярной направлению сдвига кристалла. Линейная краевая дислокация может достигать многих тысяч межатомных расстояний.

Для того чтобы получить *винтовую дислокацию*, необходимо, сделав надрез в кристалле по плоскости *G* (рис. 1.3, в), сместить под действием  $\tau$  к верхней и нижней граням кристалла края надреза на одно межатомное расстояние в направлении, параллельном дислокационной линии *EF* (линия винтовой дислокации). Атомные плоскости, перпендикулярные дислокационной линии *EF*, преобразуются в винтовую поверхность, закручивающуюся вокруг этой линии. На рис. 1.3, г белыми кружками обозначены атомы, испытавшие сдвиг в отличие от атомов в виде черных кружков. Вокруг линии *EF* развивается винтовая дислокация, подобная винтовой лестнице, т. е. кристалл состоит из как бы закрученных по винтовой линии кристаллографических плоскостей.

В реальных условиях кристаллизации образуются дислокации смешанного типа. Вокруг дислокаций любых видов решетка иска-

жена, поэтому они служат местом концентрации примесных атомов, в частности примесей внедрения, которые мешают движению дислокаций и тем самым упрочняют металл. Повышение прочности возможно также путем обеспечения получения бездефектной кристаллической решетки (прочность «усов»).

На рис. 1.4 показана зависимость предела текучести  $\sigma_T$  от плотности  $\rho$  дислокаций, которая определяется как суммарная их длина, см, в  $1 \text{ см}^3$ , т.е. выражается в  $\text{см}^{-2}$ . Теоретически рассчитанная прочность идеального кристалла в  $10^3$  раз выше экспериментальных значений для реального кристалла. К теоретической прочности приближается прочность практически бездефектных кристаллов — нитевидных кристаллов, или усов. Наименьшими значениями прочности обладают отожженные металлы (плотность дислокаций  $10^3 \dots 10^6 \text{ см}^{-2}$ ). При увеличении плотности дислокаций и уменьшении их подвижности путем разных видов обработки (давлением, термическим путем и т.д.) удастся увеличивать прочность в несколько раз. Например, после холодной деформации плотность дислокаций  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , это примерно 1 млн км дислокаций в  $1 \text{ см}^3$ .

*Поверхностные дефекты* — границы зерен, субзерен, фрагментов, ячеек, блоков — двумерны, имеют малые размеры по толщине и значительные по поверхности. Наряду с линейными дефектами поверхностные дефекты приводят к появлению внутренних напряжений.

Структура металлических материалов создается в процессах кристаллизации, а далее возможно ее видоизменение под воздействием многих условий, приводящих к ее рекристаллизации. Реальные металлические сплавы имеют поликристаллическое строение и состоят из множества анизотропных кристаллов, соприкасающихся между собой, а потому приобретающих неправильную форму и имеющих в металловедении название кристаллитов или зерен.

Как указывалось ранее, изучение структуры на уровне зерна дает представление о мезоструктуре материала и о дефектах (точечных и линейных). С развитием метода просвечивающей элект-



Рис. 1.4. Зависимость предела текучести  $\sigma_T$  от плотности  $\rho$  дислокаций

ронной микроскопии во второй половине XX в. появилась возможность изучать внутризеренные структурные подразделения, получившие название субзерен, имеющих соответствующие субграницы, в пределах которых также наблюдаются разориентированные области (фрагменты, блоки, полигоны), разделенные малоугловыми границами дислокационной природы. Главное отличие этих понятий в их происхождении (например, фрагменты возникают при развитой пластической деформации металла в холодном состоянии, а блоки — продукт кристаллизации, полигоны — результат процесса перестройки при нагреве после или во время деформации). Субзерна — это внутризеренные подразделения. Важнейшей характеристикой структурных элементов является угол их разориентации: для зерен (средний размер  $1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$  см) угол разориентации может составлять  $0 \dots 180^\circ$ ; для субзерен ( $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-2}$  см) —  $1 \dots 5^\circ$ ; для фрагментов, блоков, полигонов ( $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-4}$  см) —  $20 \dots 60'$ . Этот показатель используется как классификационный признак при изучении и описании кристаллической структуры.

*Межзеренные границы* — это по сути двухмерный, или поверхностный, дефект кристаллического строения, т.е. дефект, пред-

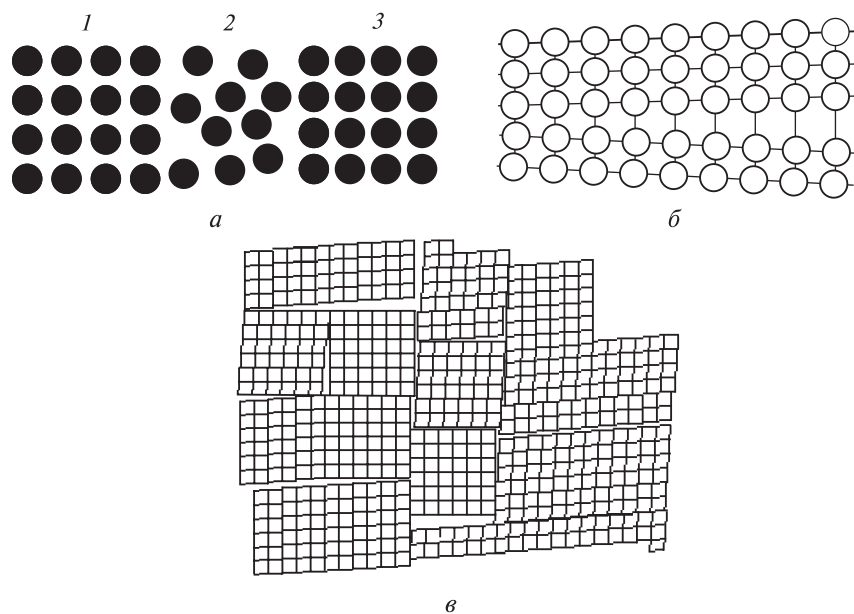


Рис. 1.5. Строение границ (а, б) и блочной (мозаичной) структуры (в) кристаллов:

а — схема размещения атомов в области большеугловых границ зерен металла: 1, 3 — зерна; 2 — граничная область между зернами 1 и 3; б — малоугловая граница (субграница); в — блочная структура кристалла

ставляющий собой набор краевых или винтовых дислокаций, стенки дислокаций. В данной переходной области шириной 3—4 межатомных расстояний (рис. 1.5, *a*, область 2) решетка одного кристаллита (зерно 1) переходит в решетку другого, имеющего иную кристаллографическую ориентацию (зерно 3). Образующиеся большеугловые границы зерен имеют углы разориентировки до 180°. Субзерна внутри каждого зерна представляют собой часть кристалла относительно правильного строения, а их границы — это также стенки дислокаций. Так как угол взаимной разориентации соседних субзерен невелик (менее 5°), они называются малоугловыми или субграницами (рис. 1.5, *б*). Таким образом, сложная (мозаичная, блочная или фрагментарная) дислокационная структура реального металла и определяет его свойства. Размеры, например, блоков 0,1... 10 мкм, и в 1 мм<sup>3</sup> металла может находиться 10<sup>12</sup> блоков.

Предел текучести  $\sigma_T$  эмпирически связан с размером зерна  $d$  структуры следующей зависимостью:  $\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-1/2}$ , где  $\sigma_0$ ,  $k$  — постоянные для данного металлического материала. Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Так как под влиянием внешних факторов (механических нагрузок, теплового воздействия) меняются число и плотность дефектов, это широко используется на практике как метод воздействия на свойства металлических материалов.

**Диффузия.** Под диффузией понимают перемещения атомов в кристаллическом теле на расстояния больше средних межатомных для данного вещества. Процесс перемещения атомов одного рода в чистых металлах или атомов основного компонента в сплавах, не связанный с изменением концентрации в разных объемах тела, называется *самодиффузией*. Перенос разнородных атомов в сплавах или в металлах с повышенным содержанием примесей, сопровождающийся изменением концентрации, называется *диффузией* или гетеродиффузией. Диффузионный процесс переноса вещества приводит к выравниванию концентраций, так как обусловленное тепловым движением атомов (ионов) распространение вещества в любой среде протекает в направлении убывания его концентрации.

В основе процесса диффузии в кристаллах лежит атомный механизм, согласно которому каждый атом, находясь в состоянии термодинамического равновесия, совершает малые тепловые колебания вокруг равновесных положений. При любых нарушениях равновесного состояния — наличие дырок, примесных атомов, вакансий, а также градиентов параметров состояния — начинается необратимый процесс их перераспределения. Для описания процесса диффузии в твердом кристаллическом теле предложено несколько возможных механизмов: циклический, обменный, вакансионный и межузельный.

При *циклической* диффузии (рис. 1.6, *а*) должны совместно перемещаться группы атомов 1—4. Такая диффузия, хотя и не требует больших затрат энергии, маловероятна. По *обменному* механизму диффузии (рис. 1.6, *б*) атомы 1 и 2 меняются местами. В металлах и сплавах диффузия преимущественно осуществляется по *вакансионному* механизму (рис. 1.6, *в*) с последовательным замещением вакансии атомами 1—4, т.е. вакансия при этом перемещается в глубь металла. При диффузии в металле атомов элементов (углерод, азот, водород, кислород) с малым атомным радиусом по сравнению с атомами металла основы процесс развивается по *межузельному* механизму, когда диффундирующий атом 1 (рис. 1.6, *г*) движется по пути 2—3—4.

Наиболее легко диффузия протекает по поверхности и границам зерен, где сосредоточены дефекты кристаллического строения (вакансии, дислокации). Скорость диффузии определяется массой  $m$  вещества, продиффундировавшего через единицу площади поверхности раздела за единицу времени. Величина  $m$  зависит от градиента концентраций  $dc/dx$  элемента в направлении, нормальном к поверхности раздела, и пропорциональна коэффициенту диффузии  $D$ ,  $m^2/c$ . Таким образом,  $m = -DdC/dx$ , где  $dC$  — концентрация;  $dx$  — минимальное расстояние изменения концентрации в выбранном направлении. Знак « $\rightarrow$ » указывает на то, что диффузия или самодиффузия протекает в направлении выравнивания концентрации от объемов с большей концентрацией к объемам с меньшей концентрацией. Коэффициент  $D$  диффузии, т.е. количество вещества, продиффундировавшего за единицу времени, при перепаде концентраций, равном единице, зависит от природы сплава, размеров зерна и особенно сильно от температуры. Температурная зависимость коэффициента диффузии описывает-



Рис. 1.6. Перемещение атомов в кристаллической решетке металлов:

*а* — циклическая диффузия; *б* — обменный механизм диффузии; *в* — вакансионная диффузия; *г* — межузельная диффузия; 1—4 — перемещающиеся (дислоцируемые) группы атомов



ся экспоненциальным уравнением:  $D = D_0 e^{-Q/RT}$ , где  $D_0$  — множитель,  $\text{м}^2/\text{с}$ , величина которого определяется типом кристаллической решетки;  $R$  — газовая постоянная,  $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  $T$  — температура,  $\text{К}$ ;  $Q$  — энергия активации диффузии,  $\text{Дж}/\text{моль}$ . Энергия активации диффузии характеризует энергию связи атомов в кристаллической решетке и в очень сильной степени влияет на коэффициент диффузии.

Явление диффузии лежит в основе большинства фундаментальных процессов, протекающих в металлах и сплавах, таких как кристаллизация, фазовые превращения, рекристаллизация, деформация, химико-термическая обработка и др.

## 1.2. Кристаллизация чистых металлов

Переход металла из жидкого или парообразного состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется *первичной кристаллизацией*. Образование новых кристаллов в твердом кристаллическом теле называется *вторичной кристаллизацией*. Кристаллы могут как самопроизвольно зарождаться — гомогенная кристаллизация, так и расти на уже существующих центрах кристаллизации — гетерогенная кристаллизация.

**Гомогенная кристаллизация.** В условиях, когда расплав переходит к термодинамически более устойчивому состоянию с меньшей свободной энергией, характеризуемой термодинамическим потенциалом  $G$ , происходит самопроизвольная гомогенная кристаллизация. С повышением температуры термодинамические потенциалы металла в твердом ( $G_T$ ) и жидком ( $G_J$ ) состояниях уменьшаются, и при определенной температуре  $T_n$  равновесной кристаллизации (рис. 1.7, а) они становятся равными, т. е. при равновесной температуре  $T_n$  жидкая и твердая фазы существуют одновременно,  $G_J = G_T$ . Кристаллизация протекает в том случае, когда термодинамический потенциал металла в твердом состоянии будет меньше термодинамического потенциала металла в жидком состоянии, т. е. при переохлаждении металла ниже равновесной температуры  $T_n$ . Величина  $\Delta T = T_n - T_k$  (где  $T_k$  — температура начала кристаллизации), называемая *степенью переохлаждения*, зависит от природы металла, она возрастает с повышением чистоты металла и увеличением скорости охлаждения.

**Плавление** — процесс, обратный кристаллизации, — протекает при температуре выше равновесной температуры  $T_n$ , т. е. при перегреве. Разность реальной температуры кристаллизации и температуры плавления называется *температурным гистерезисом*. Термические кривые, характеризующие процесс кристаллизации чистых металлов при охлаждении с разными скоростями, приведены на рис. 1.7, б ( $v_1 < v_2 < v_3$ ). Температура жидкого металла при охлаждении уменьшается плавно. При достижении реальных тем-

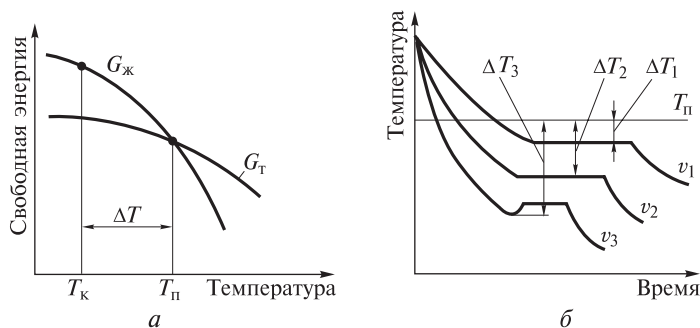


Рис. 1.7. Термодинамические потенциалы при охлаждении расплава и характеристика начала кристаллизации:

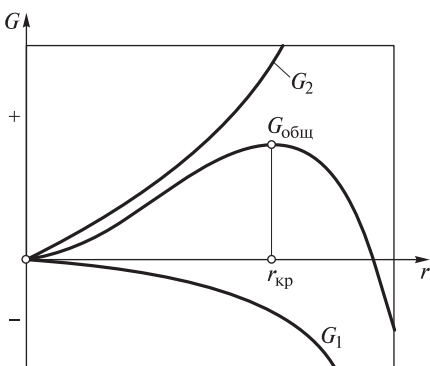
*a* — температурное изменение свободной энергии в жидком ( $G_{ж}$ ) и твердом ( $G_{т}$ ) состояниях; *б* — кривые охлаждения металлов при кристаллизации;  $T_k$  — температура начала кристаллизации;  $T_n$  — температура, при которой жидкая и твердая фазы существуют одновременно;  $\Delta T$  — степень переохлаждения;  $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$  — степень переохлаждения при скорости охлаждения соответственно  $v_1, v_2, v_3$

ператур кристаллизации ( $T_1, T_2, T_3$ ) на кривых охлаждения появляются горизонтальные площадки, так как отвод теплоты в окружающую среду компенсируется выделяющейся скрытой теплотой кристаллизации. По окончании кристаллизации температура закристаллизовавшегося металла опять плавно понижается до окончательного затвердевания и охлаждения. При медленном охлаждении со скоростью  $v_1$  степень переохлаждения  $\Delta T_1$  мала и кристаллизация протекает при температуре, близкой к равновесной. С увеличением скоростей охлаждения кристаллизация протекает при более низких, чем в случае с  $v_1$ , температурах, при этом степень переохлаждения возрастает.

В случае гомогенной кристаллизации атомы металла, находящегося в жидком состоянии, совершают беспорядочные тепловые свободные колебания. При температурах, близких к температуре затвердевания, в жидком металле образуются микрообъемы, в пределах которых расположение атомов металла аналогично их расположению в решетке кристалла, т.е. возникают *фазовые флуктуации*. Этот процесс неустойчивый, и фазовые флуктуации могут исчезать или возникать в другом элементарном объеме жидкости. При переохлаждении жидкого металла наиболее крупные из фазовых флуктуаций становятся устойчивыми и способными к росту. Такие устойчивые группировки атомов становятся *центрами кристаллизации*, т.е. зародышами кристаллов. Размер возникших зародышей может быть разным, рост их возможен только при условии, если они достигли определенного критического размера ( $r_{кр}$ ), начиная с которого рост зародыша ведет к уменьшению его свободной энергии Гиббса (рис. 1.8).

Рис. 1.8. Изменение термодинамического потенциала (свободная энергия Гиббса) при образовании и росте зародышей:

$G$  — термодинамический потенциал;  $r$  — размер зародыша;  $r_{кр}$  — критический размер зародыша;  $G_{общ}$  — потенциал системы;  $G_1$  — уменьшение энергии Гиббса за счет перехода части жидкого объема металла в твердый;  $G_2$  — избыточная поверхностная энергия



Процесс роста кристалла заключается в присоединении к его зародышу все новых атомов металла из жидкой фазы. Скорость процесса кристаллизации и окончательный размер кристаллов при затвердевании жидкого металла определяется соотношением между скоростью образования центров кристаллизации, которая измеряется числом зародышей, образующихся в единицу времени в единице объема, и скоростью увеличения линейного размера растущего кристалла в единицу времени. Чем больше скорости образования зародышей и их роста, тем быстрее протекает процесс кристаллизации. Наступает момент равновесной температуры кристаллизации ( $T_n$ ), когда равновероятно существование металла как в жидком, так и в твердом состояниях, т.е. число зародышей и скорость их роста равны нулю, и кристаллизация не происходит (рис. 1.9, а). Чтобы кристаллизация продолжилась, необходимо переохладение. При увеличении степени переохладения ско-

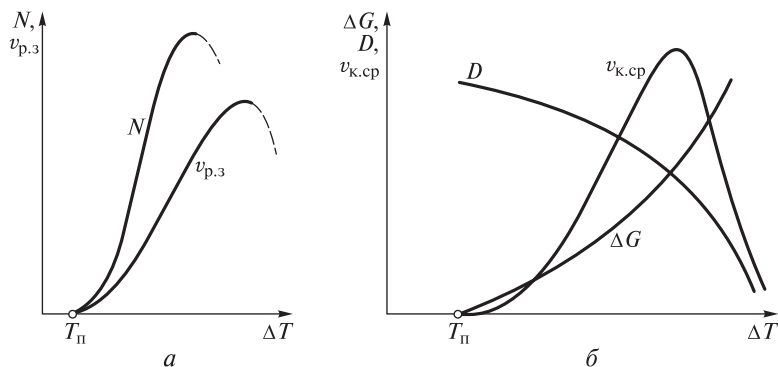


Рис. 1.9. Зависимость числа зародышей  $N$ , скорости роста зародышей  $v_{р.з.}$ , разности свободных энергий  $\Delta G$  жидкой и твердой фаз, коэффициента  $D$  диффузии и средней скорости кристаллизации  $v_{к.ср.}$  от степени переохладения  $\Delta T$ :

$T_n$  — равновесная температура кристаллизации

рость образования зародышей и скорость их роста возрастают до определенного максимума, а затем наступает спад. Это объясняется тем, что с повышением степени переохлаждения разность ( $\Delta G$ ) термодинамических потенциалов жидкого и твердого металлов возрастает, что приводит к увеличению числа  $N$  зародышей и скорости их роста ( $v_{p,з}$ ). Но при этом также требуется диффузия атомов металла к центрам кристаллизации. При небольших степенях  $\Delta T$  переохлаждения диффузия протекает интенсивно, размер кристаллических зародышей велик, скорость их образования мала и при затвердевании формируется крупнокристаллическая структура. При больших степенях переохлаждения диффузия атомов (коэффициент диффузии  $D$ ) уменьшается, и образование зародышей, как и их рост, затруднено (рис. 1.9, б), но поскольку скорость образования зародышей увеличивается более интенсивно, чем скорость их роста, при затвердевании формируется мелкозернистая структура.

Размер зерна металла сильно влияет на его свойства и зависит от степени переохлаждения, температур нагрева и разливки жидкого металла, его химического состава и особенно от чистоты металла, т. е. наличия в нем посторонних примесей. Как правило, чем мельче зерно, тем выше механические свойства материала и особенно выше характеристики прочности и пластичности.

**Гетерогенная кристаллизация.** Гомогенное, или самопроизвольное, образование зародышей на основе фазовых и энергетических флуктуаций может происходить только в высокочистом жидком металле. В технических металлах и в сплавах процессы кристаллизации и характер образующейся структуры в значительной мере зависят от числа уже имеющихся в жидком растворе готовых центров кристаллизации. Такими центрами являются частицы тугоплавких соединений (оксиды, нитриды, карбиды и т. д.), образуемых примесями. Чем больше частиц тугоплавких соединений в жидком металле, тем больше центров кристаллизации (зародышей) и тем мельче образующиеся кристаллиты (зерна структуры). Такая кристаллизация называется несамопроизвольной или гетерогенной.

Измельчение структуры способствует улучшению механических свойств металла. С целью регулирования размера зерен широко применяют искусственное введение в расплав перед разливкой специальных добавок — модификаторов, создающих дополнительные центры кристаллизации. В качестве модификаторов используют поверхностно-активные вещества (бор, магний, церий и другие), а также элементы, образующие тугоплавкие соединения (карбиды, оксиды, нитриды, интерметаллиды и т. д.). Перегрев жидкого металла приводит к растворению или дезактивации примесей, играющих роль дополнительных центров кристаллизации, т. е. способствует образованию крупнозернистой структуры. Для ее измельчения проводят «подстуживание» перегретого расплава и

выдержку при температуре чуть выше температуры плавления. При этом из жидкого металлического раствора выделяются примеси, которые становятся дополнительными центрами кристаллизации, т. е. зерно измельчается.

**Строение металлического слитка.** Температура жидкого металла, скорость его охлаждения, направление отвода теплоты, содержание примесей — все эти факторы оказывают определяющее влияние на форму и размер зерен, образующихся при кристаллизации. В большинстве случаев на практике обеспечивают протекание кристаллизации металлов с большой скоростью (кристаллизация при разливке жидкого металла в изложницы, способ литья в металлические формы, непрерывная разливка). При ускоренном охлаждении металлического расплава кристаллы растут неравномерно. Рост зародышей по одной из осей в направлении наибольшего градиента температур значительно опережает рост по другим осям, т. е. происходит так называемая *дендритная кристаллизация*. Российский ученый Д. К. Чернов в конце XIX в. дал описание роста дендритного кристалла, ввел понятие «порядок осей кристаллизации».

После образования зародыша (рис. 1.10, *а*) его развитие в первую очередь идет в направлении плоскостей с наиболее плотной упаковкой, а также наибольшего градиента температур, при этом формируется первичная ось кристаллизации (ось первого порядка) (рис. 1.10, *б*). Увеличение размеров оси первого порядка происходит как в длину, так и в ширину. Далее от оси первого порядка под определенными углами начинается рост вторичной, третичной осей и других осей, называемых осями второго, третьего и более высоких порядков. По мере их роста постепенно тело кристалла заполняет все пространства, ранее занятые жидким металлом, и дендритная кристаллизация замедляется. Дендритная кристаллизация отчетливо выражена при недостатке жидкого металла для заполнения межосных пространств (на поверхности слитка

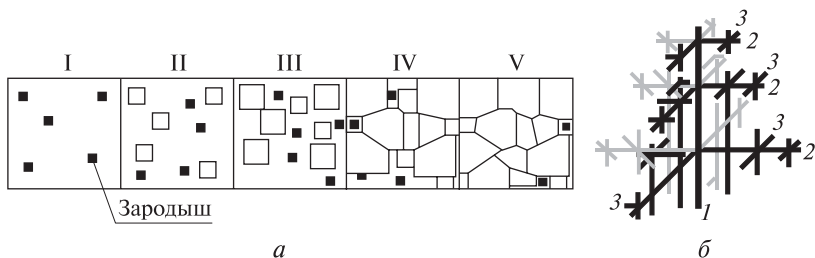


Рис. 1.10. Кристаллизация металла:

*а* — схема последовательного (I—V) роста кристаллов, начиная с образования зародыша; *б* — схема дендритного кристалла; 1, 2, 3 — первичная, вторичная и третичная оси кристаллизации