

Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

В. Б. АРЗАМАСОВ, А. А. ЧЕРЕПАХИН

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УЧЕБНИК

*Для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по машиностроительным направлениям*



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 620.22(075.8)
ББК 30.3я73
А809

Рецензенты:

профессор кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э.Баумана,
д-р техн. наук, Заслуженный работник высшей школы
Российской Федерации *Б. К. Ушаков*;
доцент кафедры «Порошковая металлургия и функциональные покрытия»
Национального исследовательского технологического университета
«МИСиС», д-р техн. наук *Ж. В. Еремеева*

Арзамасов В. Б.

А809 Материаловедение : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В. Б. Арзамасов, А. А. Черепяхин. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 176 с. — (Сер. Бакалавриат).

ISBN 978-5-7695-8835-8

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по машиностроительным направлениям подготовки (квалификация «бакалавр»).

Рассмотрено кристаллическое строение металла, процессы кристаллизации, пластической деформации и рекристаллизации. Изложены современные методы испытаний и критерии оценки конструктивной прочности материалов, определяющие надежность и долговечность изделий. Описаны фазы, образующиеся в сплавах, диаграммы состояния и современные конструкционные материалы. Большое внимание уделено теории и технологии термической обработки. Даны практические рекомендации по выбору способа и режима термической и химико-термической обработок.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

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*

© Арзамасов В. Б., Черепяхин А. А., 2013
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

ISBN 978-5-7695-8835-8

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 различного 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); *неметаллические 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 (таблицы) 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 H₂, кислород O₂, азот N₂, фтор F₂, хлор Cl₂; *жидкости* — бром Br₂; *твердые вещества* — иод I₂, углерод C, кремний Si, фосфор P 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°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 (примерно 1 %), магнием (примерно 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 водо-

рода, являющегося самым маленьким из атомов, имеющим $D_{ат} \approx \approx 0,1$ нм, т.е. $0,1 \cdot 10^{-10}$ 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 одинаковый 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 наноуровень). В соответствии с уровнем исследования детализируется и исследуемая структура.

Макроструктура — изучение объектов невооруженным глазом (увеличение $1\times$) или при небольших увеличениях ($20\times$) 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, фольгу. 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 α , β , γ 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 кристаллических 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

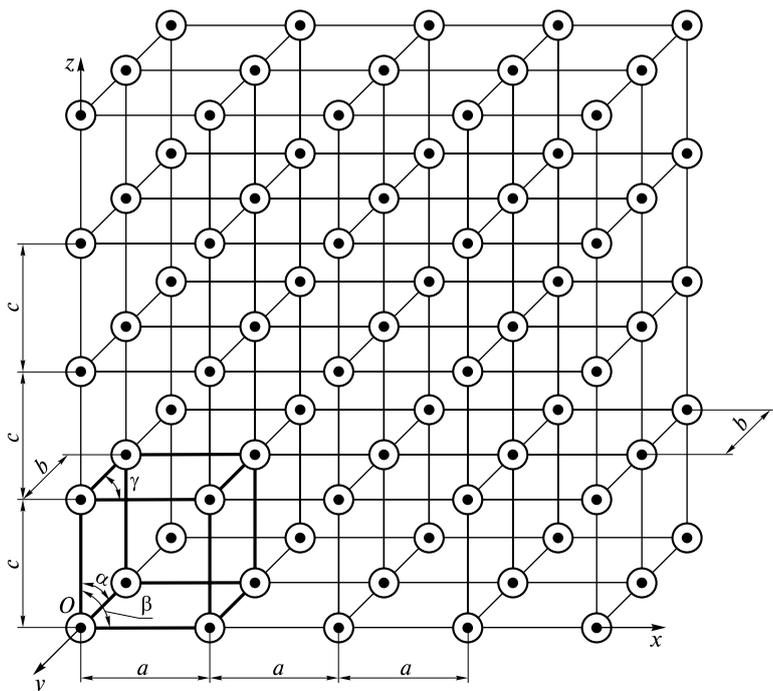


Рис. 1.1. Схема кристаллической решетки:

Ox , Oy , Oz — координатные оси; a , b , c — периоды решетки; α , β , γ — угловые характеристики решетки

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	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

кристаллические решетки трех типов: объемно-центрированная кубическая (ОЦК) (рис. 1.2, а) — К, Na, Li, Ti, Zr_β, W, Ta, Fe_α, Cr, V и др.; гранецентрированная кубическая (ГЦК) (рис. 1.2, б) — Fe_γ, Sr, Al, Pb, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Cu, Co_α и др.; гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (рис. 1.2, в) — Mg, Ti_α, Cd, Os, Zn, Co_β 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

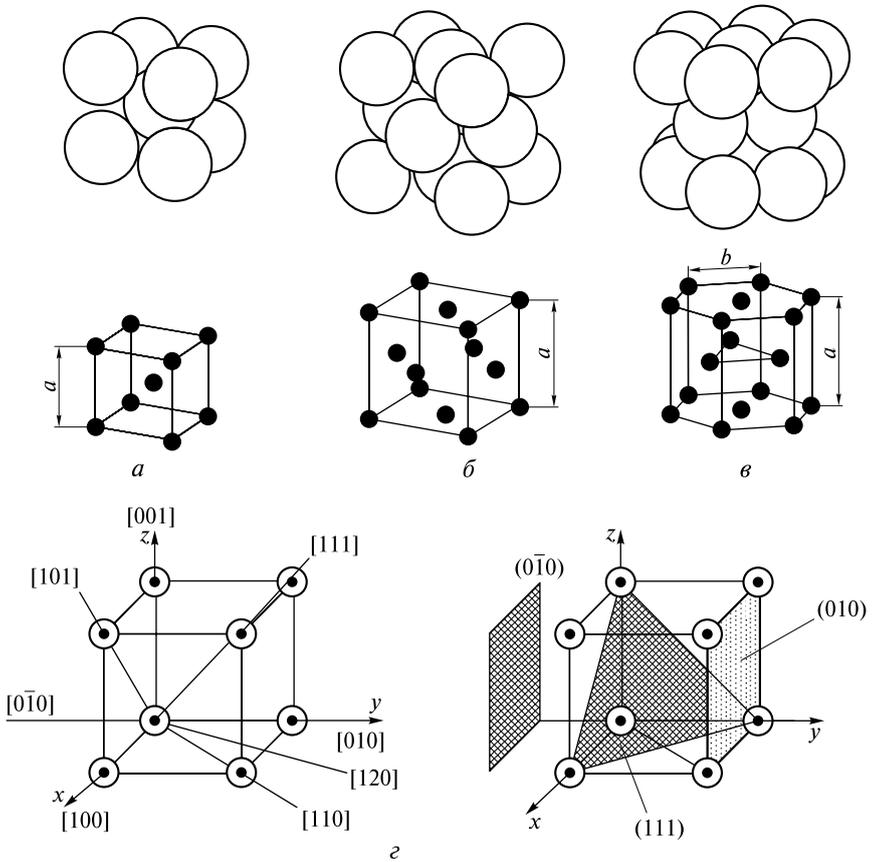


Рис. 1.2. Три типа пространственных кристаллических решеток металлов (а — в) и индексация узлов и плоскостей решетки (z):

а — объемно-центрированная кубическая; б — гранецентрированная кубическая; в — гексагональная плотноупакованная; z — кристаллографические индексы: направления $[001]$, $[111]$, $[010]$, $[110]$, $[100]$, $[0\bar{1}0]$ и др.) и плоскости (010) , $(0\bar{1}0)$, (111) ; а, b — периоды решетки; x, y, z — оси координат

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 приходится 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: $(3 + 12 \cdot 1/6 + 12 \cdot 1/2) = 6$.

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 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, z) 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, z . 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, z). 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. При-

мером 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 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

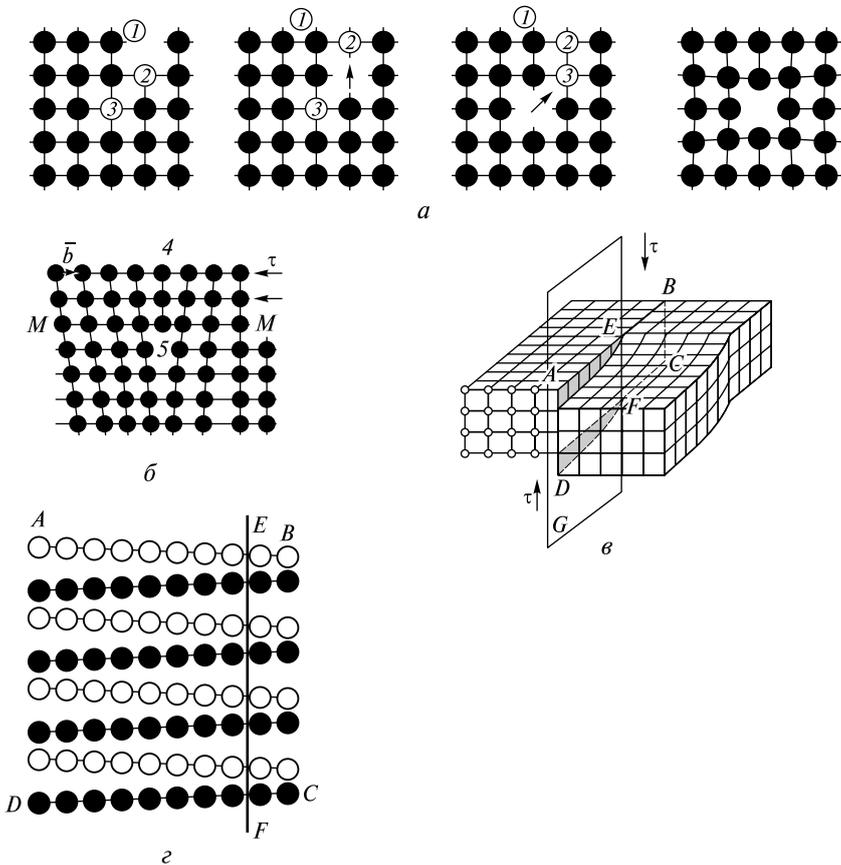


Рис. 1.3. Точечные и линейные дефекты кристаллической решетки металлов:

a — механизм образования точечных дефектов; *b* — краевая дислокация; *в* — пространственная модель образования винтовой дислокации; *г* — 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 Бюргера; τ — напряжение сдвига

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 вакансий достигает 1...2% числа атомов в кристаллическом теле. Также вакансии могут образоваться в результате пластической деформации, рекри-

сталлизации, 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* \bar{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 *ММ* на одно межатомное расстояние относительно нижней части под действием приложенного сдвигающего напряжения τ . 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 τ 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 искажена, поэтому они служат местом концентрации примесных атомов, в частности примесей внедрения, которые мешают движению дислокаций и тем самым упрочняют металл. Повышение прочности воз-

можно также путем обеспечения получения бездефектной кристаллической решетки (прочность «усов»).

На рис. 1.4 показана зависимость предела текучести σ_T от плотности ρ дислокаций, которая определяется как суммарная их длина, см, в 1 см^3 , т.е. выражается в см^{-2} . Теоретически рассчитанная прочность идеального кристалла в 10^3 раз выше экспериментально определенных 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.) удается 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 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 электронной микроскопии во второй половине XX в. появилась возможность изучать



Рис. 1.4. Зависимость предела текучести σ_T от плотности ρ дислокаций

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, представляющий собой набор краевых или винтовых дислокаций, стенки

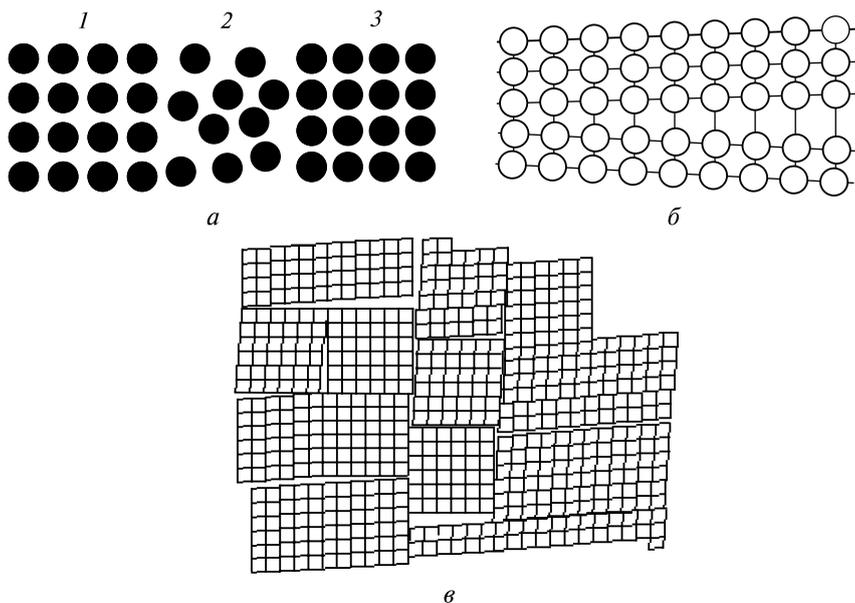


Рис. 1.5. Строение границ и блочной (мозаичной) структуры кристаллов: а — схема размещения атомов в области большеугловых границ зерен металла: 1, 3 — зерна; 2 — граничная область между зернами 1 и 3; б — малоугловая граница (субграница); в — блочная структура кристалла

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^3 металла может находиться 10^{12} блоков.

Предел текучести σ_T эмпирически связан с размером зерна d структуры следующей зависимостью: $\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-1/2}$, где σ_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, *a*) 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, з) 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 « $-$ » 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 описывается экспоненциальным уравнением $D = D_0 e^{-Q/RT}$, где D_0 — множитель, m^2/c , величина которого определяется типом кристаллической решетки; R — газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/(моль·К);

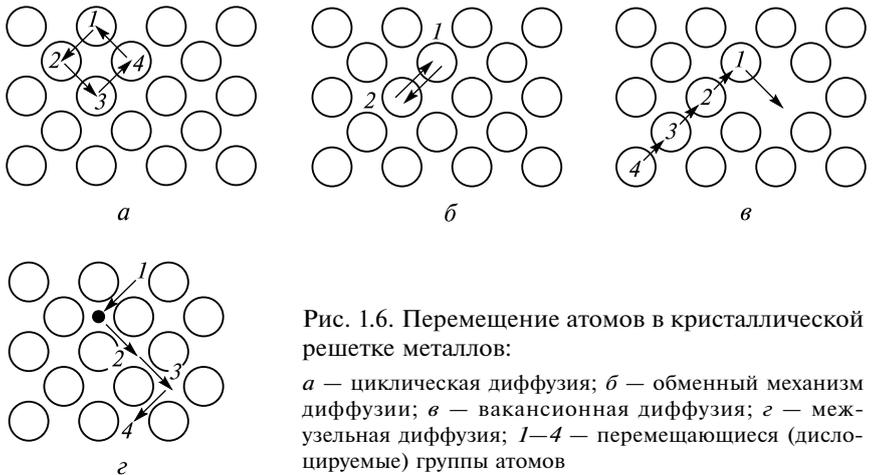


Рис. 1.6. Перемещение атомов в кристаллической решетке металлов:

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