

А. М. АДАСКИН, В. М. ЗУЕВ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

(МЕТАЛЛООБРАБОТКА)

Допущено

*Экспертным советом по профессиональному образованию
в качестве учебного пособия для использования в учебном процессе
образовательных учреждений, реализующих программы
начального профессионального образования*

10-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 620.22(075.32)
ББК 20.4.7(26.8)
А28

Рецензенты:

начальник технологического отдела Технологического управления
АМО «ЗИЛ»,
Заслуженный технолог Российской Федерации *Б. М. Солоницын*;
главный научный сотрудник ФИРО *В. Н. Антонов*

Адаскин А. М.

А28 **Материаловедение (металлообработка) : учеб. пособие для нач. проф. образования / А. М. Адаскин, В. М. Зуев. — 10-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 288 с.**

ISBN 978-5-4468-0032-2

Рассмотрены металлические, неметаллические и композиционные материалы, используемые в качестве конструкционных и инструментальных, и даны рекомендации по их применению. Приведены методы исследования строения и свойств материалов. Представлены характеристики механических, физических и технологических свойств материалов. По результатам апробации внесен ряд изменений. Впервые рассмотрены технологические материалы, применяемые при сварке и пайке, глава «Инструментальные материалы» значительно расширена и дополнена практическими рекомендациями.

Учебное пособие может быть использовано при изучении общепрофессиональной дисциплины «Основы материаловедения» в соответствии с ФГОС НПО для профессий, связанных с металлообработкой.

Для учащихся учреждений начального профессионального образования. Может быть использовано при других формах обучения.

УДК 620.22(075.32)
ББК 20.4.7(26.8)

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

© Адаскин А. М., Зуев В. М., 2008

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012

ISBN 978-5-4468-0032-2 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Материаловедение — наука, изучающая строение и свойства материалов и устанавливающая связь между их составом, строением и свойствами.

Вся история человечества связана с применением различных материалов, именно они дали названия целым эпохам: каменный век, бронзовый век, железный век.

На ранней стадии развития человек использовал природные материалы — дерево, кость, камень. Особое место занял камень, из которого изготавливались орудия труда — каменные топоры, каменные ножи. Следует отметить, что именно с помощью камня около 500 тыс. лет назад люди научились добывать огонь. Использование огня для обжига глины при изготовлении предметов домашней утвари положило начало технологии изготовления керамики.

На следующем этапе развития человек стал использовать металлы. Естественно, что в первую очередь применялись те из них, которые встречаются в природе в чистом, самородном виде. Прежде всего это медь, начало ее применения относят к 7-му тысячелетию до н. э. В 4-м тысячелетии до н. э. начали использовать металлургические процессы получения сплавов. Преобладают уже металлические инструменты из бронзы — сплава меди с другими металлами, в первую очередь с оловом, имеющим лучшие свойства, чем чистая медь.

Важнейшим этапом развития стало использование железа и его сплавов. К середине XIX в. был освоен мартеновский метод производства стали, а к концу века — конвертерный. Сплавы на основе железа и в настоящее время являются основным конструкционным материалом.

Промышленное производство не может существовать без научной базы. Именно середину XIX в. следует считать временем зарождения металловедения — отрасли материаловедения — как науки. В ее развитие большой вклад внесли русские и советские ученые.

Остановимся на важнейших этапах развития науки. Основоположником металловедения является выдающийся русский ученый Д. К. Чернов (1839—1921). Работая на Обуховском заводе и занимаясь производством стали, он провел исследования превраще-

ний, происходящих при нагреве стали, результаты которых были опубликованы в 1868 г. В его работе было показано, что цвета каления стали, определенные визуально, соответствуют температурам, при которых происходят превращения в стали. Эти температуры были названы критическими точками (точками Чернова). Именно Д. К. Чернов впервые изобразил важнейшие линии диаграммы состояния железо — углерод. Французский исследователь Ф. Осмонд (1849—1912), воспользовавшись пирометром, изобретенным Ле-Шателье (1850—1936), определил температуры критических точек, описал характер превращений при этих температурах и дал названия основным структурам. Спустя 10 лет Д. К. Чернов изложил основы теории кристаллизации сплавов, развитые затем Г. Г. Тамманом (1861—1938), членом-корреспондентом Петербургской академии наук.

Основоположителем металлографии — важнейшего направления металловедения — был русский ученый-металлург П. П. Аносов (1799—1851), впервые применивший микроскоп для изучения структуры сплавов. На основании его работ А. Мартенс (1850—1914) и другие ученые разработали изображения микроструктур сплавов железа и углерода.

Важный вклад в теорию науки внес американец Д. Гиббс (1839—1903), который, используя принципы термодинамики, разработал теорию равновесия фаз. На основании этой теории, а также с помощью металлографического анализа рядом ученых — Н. Т. Гудцовым (1885—1957), А. А. Байковым (1870—1946) в России, Р. Аустеном (1843—1902) в Англии — было доказано наличие твердых растворов в металлических сплавах.

Большой вклад в разработку научных основ металловедения внес Н. С. Курнаков (1860—1941), применивший методы физико-химического анализа для исследования сплавов и установивший закономерности изменения свойств сплавов в зависимости от их типа и химического состава.

Важнейший вклад в теорию упрочнения сплавов был внесен советскими учеными. В частности, Я. И. Френкель выполнил расчет теоретической прочности металлов, который стал побудительным мотивом изучения реальной прочности металлов, в результате чего были разработаны теории дислокаций, пластического течения металлов и способов упрочнения как создания препятствий перемещению дислокаций. Факты измельчения зерна в результате полиморфных превращений установил В. Д. Садовский, а сплавы цветных металлов, упрочняемые дисперсионным твердением, разработал И. Н. Фридляндер.

Двадцатый век также ознаменован разработкой и применением в металловедении новейших методов исследования структуры материалов — электронного и рентгеновского. Их применение во многом способствовало важнейшим достижениям в области со-

здания новых материалов. В 1960-х гг. был осуществлен промышленный синтез алмаза, а также созданы синтетические вещества, не встречающиеся в природе, в частности кубический нитрид бора, свойства которого близки к алмазу. В первой половине XX в. появились полимеры — новые материалы со свойствами, резко отличающимися от свойств металлов. Полимеры широко применяют в различных областях техники: машиностроении, химической и пищевой промышленности и ряде других областей. Полиэтилен называют полимером, который позволил выиграть войну, так как его высокие диэлектрические свойства во многом определили эффективность радара.

Развитие современной техники невозможно без использования материалов с новыми уникальными свойствами. Для атомной энергетики и космической техники необходимы материалы, которые могут работать как при весьма высоких температурах, так и при температурах, близких к абсолютному нулю. Компьютерные технологии стали возможными только благодаря использованию материалов с особыми электрическими свойствами. Таким образом, материаловедение — одна из важнейших, приоритетных наук, определяющих технический прогресс.

Задачей материаловедения является установление взаимосвязи между строением (структурой) материала и его свойствами. Поэтому при исследовании используют как методы изучения строения материала, так и методы, которые позволяют определить поведение материалов в условиях эксплуатации.

Книга, первое издание которой вышло в 2001 г., прошла апробацию в различных учреждениях начального профессионального образования. Учитывая направление учебного издания — материаловедение (металлообработка), — из книги была удалена глава, посвященная горюче-смазочным материалам. Глава «Инструментальные материалы» значительно расширена и дополнена рядом практических рекомендаций по применению материалов для изготовления режущего и штампового инструмента. В данном издании впервые рассмотрены технологические материалы, применяемые при сварке и пайке для получения неразъемных соединений.

ТИПЫ АТОМНЫХ СВЯЗЕЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

1.1. Межатомные силы притяжения и отталкивания

Между атомами в твердых телах действуют силы притяжения и отталкивания. Первые удерживают атомы вместе, обеспечивая целостность материала, вторые не дают атомам слиться. Твердые вещества существуют при равновесии сил притяжения и отталкивания.

Природа *сил отталкивания* одинакова во всех твердых веществах. Силы отталкивания возникают, когда атомы сближаются настолько, что орбиты их внешних электронов перекрываются. При этом положительные заряды ядер атомов уже не полностью экранируются электронами, вследствие чего между ними возникают силы отталкивания.

В отличие от сил отталкивания, имеющих одинаковую природу, природа *сил притяжения* различна, и именно она определяет свойства материала. Различают четыре вида связи, обусловленной силами притяжения: ионную, ковалентную, металлическую и силы Ван-дер-Ваальса.

1.2. Ионная связь

Ионная связь присуща соединениям, образованным различными атомами. Внешние электроны атомов одного элемента переходят на внешние орбиты атомов другого элемента, образуя *устойчивые электронные конфигурации*.

В качестве типичного примера вещества с ионным типом связи можно привести поваренную соль — NaCl.

Натрий принадлежит к первой группе Периодической системы, на его внешней орбите находится один электрон. Хлор — элемент седьмой группы, на его внешней орбите расположено семь электронов. Переход одного электрона натрия на орбиту хлора приводит к обра-

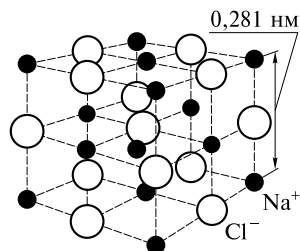


Рис. 1.1. Кристаллическая решетка NaCl

зованию двух разнозаряженных ионов с устойчивой конфигурацией.

Положительный ион натрия получает устойчивую конфигурацию неона; отрицательный ион хлора — устойчивую конфигурацию аргона. Межатомные силы притяжения — электростатические, поэтому ионная связь является сильной.

Твердое вещество с ионной связью характеризуется тем, что рядом с каждым положительным ионом находятся только отрицательные ионы, и наоборот (рис. 1.1). Таким образом, атомы в веществе располагаются строго упорядоченно.

Ионный тип связи характерен для *химических соединений*. Наиболее известный и широко распространенный материал с ионным типом связи — стекло, основой которого являются оксиды различных элементов.

1.3. Ковалентная связь

Ковалентная связь устанавливается в результате образования устойчивых соединений путем *обобществления* атомами нескольких электронов. Примером такой связи может служить молекула хлора, образованная двумя атомами, каждый из которых имеет по семь электронов на внешней орбите. Устойчивая конфигурация, для которой характерно наличие восьми атомов на внешней орбите, образуется в результате обобществления одного электрона (рис. 1.2).

Образование устойчивых конфигураций определяется правилом $8 - N$, где N — число электронов на внешней орбите. Так, при образовании молекулы кислорода обобществляются два электрона, потому что на внешней орбите атома кислорода находятся шесть электронов.

Ковалентная связь характерна для многих *кристаллических твердых тел*. Примером может служить алмаз — кристаллическая модификация углерода с ковалентной связью. Углерод имеет четыре валентных электрона. Образование алмаза происходит при обобществлении по одному электрону каждого из четырех атомов.

Механическая прочность ковалентной связи обычно достаточно велика вследствие ее направленного характера. Собственно сила связи зависит от природы вещества. Так, она весьма велика у алмаза и значительно, на несколько порядков, слабее у полимеров, для которых характерны ковалентные связи.

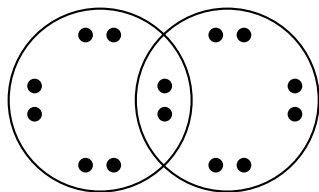


Рис. 1.2. Молекула хлора

1.4. Металлическая связь

Атомы *металлов* имеют небольшое количество (один или два) внешних (валентных) электронов, которые слабо связаны с ядром. При сближении атомов электроны, находящиеся на внешних орбитах, теряют связь со своими атомами и коллективизируются, т.е. становятся достоянием всех атомов данного металла, образуя *электронный газ*. Положительно заряженные ионы располагаются на таком расстоянии друг от друга, что силы притяжения между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженными ионами уравновешиваются силами отталкивания между ионами.

Наличие электронного газа определяет свойства металла: высокие тепло- и электропроводность. Отсутствие сильных направленных связей между атомами, характерных для ионного и ковалентного типов связи, определяет одно из важнейших свойств металлов — их пластичность, т.е. способность изменять форму без разрушения. Поэтому при изготовлении металлопродукции широко применяют методы пластического деформирования — ковку, прокат, волочение.

1.5. Силы Ван-дер-Ваальса

Происхождение этих сил связано с тем, что атомы являются малыми *диполями*. В среднем по времени электроны в атоме симметрично распределены в пространстве относительно ядер, но в каждый конкретный момент центр отрицательных зарядов может не совпадать с ядром, имеющим положительный заряд, так и образуется диполь. Взаимодействие диполей приводит к появлению сил притяжения. Это взаимодействие несколько усиливается вследствие того, что наличие диполя, образованного одним атомом, способствует появлению диполя у соседнего атома.

Силы Ван-дер-Ваальса существуют между всеми атомами. Они слабы и приобретают значение только при отсутствии более сильных связей других типов, рассмотренных выше. Эти силы существенно влияют только на взаимодействие больших *органических молекул*, являющихся основой полимеров.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Охарактеризуйте типы атомных связей.
2. Для каких веществ основным является ионный тип связи?
3. Для каких веществ основным является ковалентный тип связи?
4. Для каких веществ основным является металлический тип связи?
5. В каком случае следует учитывать силы Ван-дер-Ваальса?

СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ**2.1. Понятие о металлах и сплавах**

Из всех известных в настоящее время элементов более половины являются металлами. *Металлы* — непрозрачные вещества, обладающие специфическим металлическим блеском, пластичностью, высокой тепло- и электропроводностью. По последнему свойству металлы легко отличить от других веществ (дерево, стекло и т. д.).

Все металлы и образованные из них сплавы делят на *черные*, к которым относят железо и сплавы на его основе (на их долю приходится около 95 % производимой в мире металлопродукции), и *цветные*. В технике принята условная классификация, по которой цветные металлы делят на группы: легкие (Al, Mg), тяжелые (Cu, Pb), тугоплавкие (W, Mo), благородные (Au, Pt), рассеянные (Gd, In), редкоземельные (Sc, Y), радиоактивные (Ra, U).

Понятие «чистый металл» условно, любой чистый металл содержит примеси. Под этим термином понимается металл, содержащий 0,010...0,001 % примесей. Современная металлургия позволяет получать металлы высокой чистоты (99,999 %). Однако примеси, даже в малых количествах, могут оказывать влияние на свойства металла.

Чистые металлы обладают низкой прочностью, поэтому их применение в технике в качестве конструкционных материалов ограничено. Наиболее широко применяют сплавы, которые по сравнению с чистыми металлами обладают более высокой прочностью и твердостью.

Сплавы — это сложные вещества, получаемые сплавлением или спеканием двух или более компонентов. *Компоненты* — простые вещества (часто это химические элементы), образующие сплав. При сплавлении все компоненты сплава первоначально находятся в жидком состоянии; при спекании, по крайней мере, один из компонентов находится в твердом состоянии. Сплавы могут состоять только из металлов, например латуни — это сплавы двух металлов: меди и цинка, или металлов и неметаллов, так, наиболее распространенные в технике материалы — стали и чугуны являются сплавами железа и углерода. Строение металлического сплава более сложное, чем у чистого металла.

Для рассмотрения строения, превращений и свойств металлов и сплавов введем понятия «фаза» и «структура».

Фазой называется однородная часть сплава, обладающая одинаковым химическим составом, строением и имеющая границы раздела с другими фазами, при переходе через которые свойства сплава резко меняются. Например, жидкий металл является однофазной системой. В процессе кристаллизации система состоит уже из двух фаз: жидкой и твердой. При этом свойства фаз значительно различаются. Фазами могут быть отдельные металлы или неметаллы, химические и другие соединения.

Под *структурой* понимается строение металла, т. е. количество фаз, их форма и размер, а также взаимное расположение. *Структурными составляющими сплава* называются обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями. Структурные составляющие могут состоять из одной, двух или более фаз.

2.2. Атомно-кристаллическое строение металлов

Общие сведения. Каждый металл (вещество) может находиться в четырех агрегатных состояниях: газообразном, жидком, твердом и в виде плазмы.

В *газообразном состоянии* расстояние между атомами (частицами) велико, силы взаимодействия малы и атомы хаотично перемещаются в пространстве, отталкиваясь друг от друга. Атомы газообразного вещества обладают большой кинетической энергией.

В *жидком металле* атомы сохраняют лишь ближний порядок, т. е. в небольшом объеме упорядоченно и закономерно расположено небольшое количество атомов. Ближний порядок неустойчив, он может возникать и исчезать под действием тепловых колебаний.

В металлах, находящихся *в твердом состоянии*, порядок расположения атомов строго определен и закономерен, силы взаимодействия уравновешены, тело сохраняет свою форму. Металлы имеют кристаллическое строение с правильным закономерным расположением атомов в пространстве.

Закономерное расположение атомов (точнее, положительно заряженных ионов) приведено на рис. 2.1. Воображаемые линии, проведенные через центры атомов, расположенных в одной плоскости, образуют решетку, в узлах которой располагаются атомы. Такая конфигурация называется *кристаллографической плоскостью*.

Многочисленное повторение кристаллографических плоскостей в пространстве позволяет получить *пространственную кристаллическую решетку* (рис. 2.2). Пространственная кристаллическая ре-

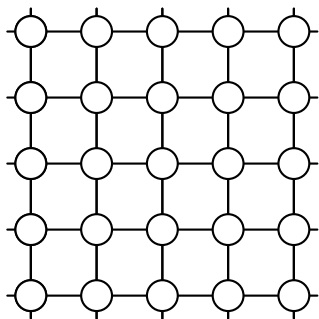


Рис. 2.1. Кристаллографическая атомная плоскость

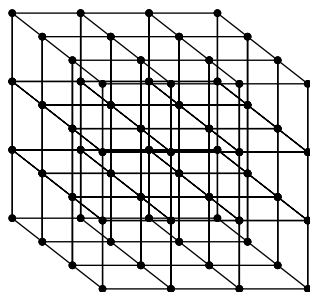


Рис. 2.2. Пространственная кристаллическая решетка

сетка сложна в изображении, поэтому представление об атомном строении кристаллов дается в виде элементарных кристаллических ячеек. Под **элементарной кристаллической ячейкой** понимают минимальный объем, дающий представление об атомной структуре металла в целом, его повторение в пространстве образует кристаллическую решетку.

Элементарные кристаллические ячейки характеризуются следующими основными параметрами: периодом решетки, координационным числом, атомным радиусом, базисом (атомной плотностью).

Периодом решетки называется расстояние между центрами двух соседних частиц (атомов, ионов) в элементарной ячейке решетки (рис. 2.3).

Периоды решетки измеряют в нанометрах (нм) или пикометрах (пм).

Координационное число K показывает количество атомов, находящихся на самом близком расстоянии от любого выбранного атома в решетке.

Под *атомным радиусом* понимают половину межатомного расстояния между центрами ближайших атомов в кристаллической решетке элемента при равновесных условиях.

Базисом решетки называется количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки.

Простейшим типом кристаллического строения является кубическая решетка, в которой атомы расположены в углах куба (см. рис. 2.3). На ее примере покажем основные параметры решетки:

- период решетки равен a ;
- координационное число $K = 6$;

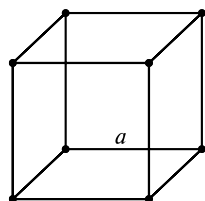


Рис. 2.3. Простая кубическая кристаллическая решетка

- базис решетки равен $1 \left((1/8) \cdot 8 = 1 \right)$, каждый из атомов, расположенных в углах куба, принадлежит одной из восьми элементарных ячеек, т.е. на одну ячейку приходится $1/8$ атома).

В простой кубической решетке атомы уложены (упакованы) недостаточно плотно. Стремление атомов занять места, наиболее близкие друг к другу, приводит к образованию новых типов решеток.

Для большинства металлов характерны следующие типы кристаллических решеток: объемно-центрированная кубическая (ОЦК); гранецентрированная кубическая (ГЦК); гексагональная плотноупакованная (ГПУ). Основные типы кристаллических решеток представлены на рис. 2.4.

В *объемно-центрированной кубической решетке* (рис. 2.4, а) атомы расположены в углах и центре куба. Период решетки равен a , координационное число $K = 8$, базис решетки равен $2 \left((1/8) \cdot 8 + 1 = 2 \right)$; 8 атомов расположены в углах куба, 1 атом в центре куба принадлежит только одной ячейке). Данный тип решетки имеют металлы К, Na, Li, Та, W, Мо, Fe_α, Cr, Nb и др.

В *гранецентрированной кубической решетке* (рис. 2.4, б) атомы расположены в углах куба и центрах его граней. Эта решетка характеризуется периодом a , координационным числом $K = 12$, базисом, равным $4 \left((1/8) \cdot 8 + 1/2 \cdot 6 = 4 \right)$; 8 атомов в углах куба и 6 атомов в центрах граней, каждый из которых принадлежит двум элемен-

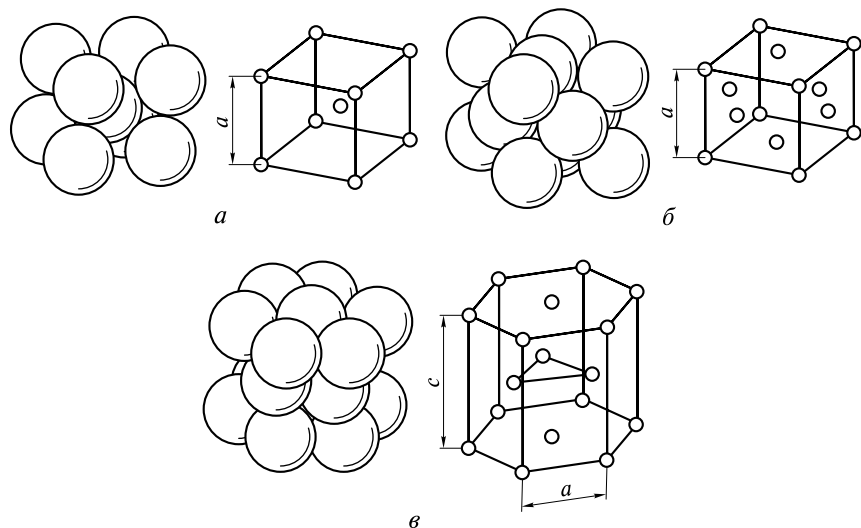


Рис. 2.4. Типы кристаллических решеток и схемы упаковки в них атомов: а — объемно-центрированная кубическая; б — гранецентрированная кубическая; в — гексагональная плотноупакованная

тарным ячейкам. Кубическую гранецентрированную решетку имеют следующие металлы: Ca, Pb, Ni, Ag, Au, Pt, Fe, и др.

В *гексагональной плотноупакованной решетке* (рис. 2.4, в) атомы расположены в вершинах и центрах шестигранных оснований призмы, кроме того, три атома находятся в средней плоскости призмы. Периоды решетки — a и c , причем $c/a > 1$ (например, $c/a = 1,633$ для Ru, Cd и $c/a > 1,633$ для Mg, Zn), координационное число $K = 12$, базис решетки равен 6.

Полиморфные превращения в металлах. Для ряда металлов характерно явление *полиморфизма*. Этим термином называют способность вещества формировать различные типы кристаллических решеток. Так, при разных температурах железо может иметь ОЦК или ГЦК решетку, кобальт — ГЦК или ГПУ решетку. Полиморфизм характерен и для других металлов.

Различные кристаллические формы одного и того же вещества называются *полиморфными* или *аллотропными модификациями*. Низкотемпературную модификацию называют α , а высокотемпературные модификации — β , γ , δ и т.д. Превращение одной модификации в другую с изменением кристаллической решетки называется *полиморфным превращением*. Полиморфное превращение происходит в результате нагрева или охлаждения: в чистых металлах при постоянной температуре, а в сплавах — в интервале температур.

Анизотропия кристаллов и изотропия кристаллических тел. В кристаллических решетках атомная плотность по различным плоскостям неодинакова — на единицу площади разных атомных плоскостей приходится неодинаковое количество атомов. Сравним, например, для ОЦК решетки количество атомов в плоскости, совпадающей с гранью, и диагональной. Вследствие этого свойства в различных плоскостях и направлениях кристаллической решетки будут неодинаковыми. Различие свойств по разным кристаллографическим направлениям называется *анизотропией* кристалла.

2.3. Строение реальных металлов

Реальное строение металлов значительно отличается от идеального. При *идеальном строении* кристаллов (металлов) все атомы теоретически должны находиться строго в узлах кристаллической решетки. Теоретическая прочность такого металла чрезвычайно высока. Так, теоретическая прочность при сдвиге (под действием касательных напряжений) $\tau_{сдв} = G/(2\pi)$, где G — модуль сдвига (модуль Юнга). В соответствии с этой формулой теоретический предел прочности железа должен составлять примерно 13 000 МПа, при такой прочности проволока диаметром 1 мм выдержала бы груз массой более тонны (для железа $G = 80$ ГПа).

В действительности же, прочность железа примерно в 100 раз меньше — 150 МПа. Такое несоответствие объясняется различием идеального и реального строения металлов.

Во-первых, технические металлы состоят из большого количества кристаллов (зерен), т. е. являются **поликристаллическими веществами**. При этом кристаллы (зерна) в реальном металле не имеют правильной формы и идеально упорядоченного расположения атомов. Во-вторых, даже в самих поликристаллах имеются различного рода **несовершенства (дефекты)**. Различают точечные, линейные и поверхностные несовершенства кристаллического строения.

Точечные дефекты малы во всех трех измерениях. К ним относят *вакансии* и *междоузельные (дислоцированные) атомы* (рис. 2.5). Образование точечных дефектов связано с диффузионным перемещением атомов под действием тепловых колебаний. С повышением температуры металла число вакансий растет.

Точечные дефекты оказывают влияние на некоторые физические свойства металлов (электропроводность, магнитные свойства и т. д.) и фазовые превращения в металлах и сплавах.

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении. Эти несовершенства называются **дислокациями**. Дислокации образуются в процессе кристаллизации и главным образом при деформации металла. Различают краевые, винтовые и смешанные дислокации.

Рассмотрим краевую дислокацию — она представляет собой искажение строения в виде лишней полуплоскости атомов (экстраплоскости) в верхней части кристаллической решетки (рис. 2.6). Краевая дислокация простирается в длину на тысячи атомных рядов; она может быть прямой, а также изгибаться в ту или другую сторону. Наличие дислокаций главным образом и определяет прочность металлов. В идеальном металле для

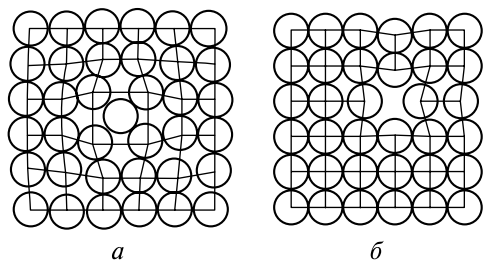


Рис. 2.5. Схема точечных дефектов:

а — дислоцированный атом; б — вакансия

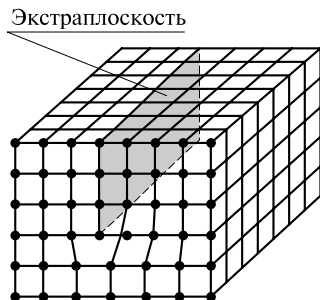


Рис. 2.6. Линейный дефект кристаллической решетки — краевая дислокация

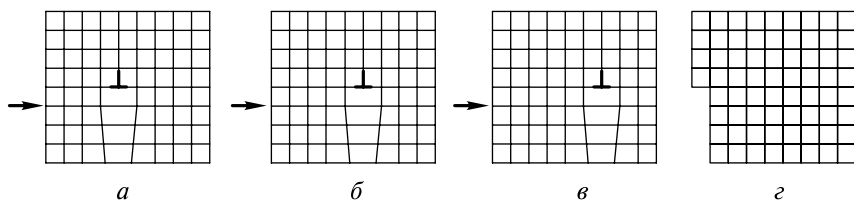


Рис. 2.7. Схема скольжения краевой дислокации:

a—г — этапы перемещения дислокации

сдвига одной его части относительно другой необходимо одновременно разрушить (разорвать) все межатомные связи. При наличии дислокаций это достигается не одновременным разрушением всех межатомных связей, а последовательным — одна за другой, — при этом происходит перемещение дислокации (рис. 2.7). Естественно, что для этого требуется приложение значительно меньших усилий. Дислокации могут перемещаться при очень малых напряжениях — меньше 10^4 Па.

Поскольку пластическая деформация облегчается за счет скольжения дислокаций, то повышение прочности может быть достигнуто либо получением металла идеального строения, либо за счет создания препятствий на пути движения дислокаций. Препятствиями могут служить другие дислокации, атомы примесей, границы зерен, т.е. дефекты строения решетки (рис. 2.8).

Прочность, близкую к теоретической, имеют очень тонкие бездислокационные кристаллы, получившие название *усы*; для реальных деталей ее получить пока невозможно. Поэтому увеличить прочность удается за счет повышения плотности дефектов с помощью различных механизмов упрочнения (наклепа, дисперсионного твердения и др.).

Поверхностные дефекты малы только в одном измерении. К ним относятся *поверхности раздела между отдельными зернами*. Граница между зернами представляет собой переходную область шириной до 10 межатомных расстояний, в которой решетка одного зерна, имеющего определенную кристаллографическую ориентацию, переходит в решетку другого зерна с иной кристаллографической ориентацией. Пере-

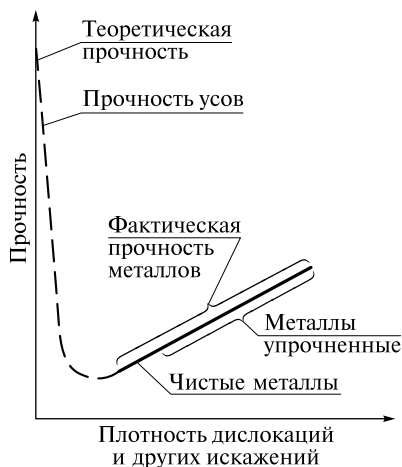


Рис. 2.8. Зависимость прочности металла от искажений кристаллической решетки

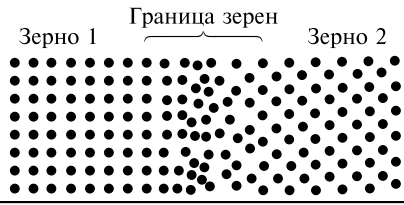


Рис. 2.9. Размещение атомов внутри зерна и на границе между зёрнами

ходный слой имеет сложное строение: в нем нарушено правильное расположение атомов (рис. 2.9), повышена концентрация примесей, имеются скопления дислокаций.

Границы зерен препятствуют перемещению дислокаций. Дислокация не может перейти границу зерна, так как в новом зерне плоскость скольжения не совпадает с плоскостью движения этой дислокации.

Протяженность границ тем больше, чем меньше величина зерен. Поскольку увеличение протяженности границ создает больше барьеров перемещению дислокаций, измельчение зерна приводит к повышению пределов прочности и текучести металлических материалов. Зависимость предела текучести от величины зерна следующая:

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-1/2},$$

где σ_0 и k — константы материала; d — размер зерна.

2.4. Кристаллизация металлов

Переход металла из жидкого состояния в твердое называется *первичной кристаллизацией*. Она протекает вследствие перехода системы из неустойчивого термодинамического состояния в устойчивое, т.е. из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией.

Проиллюстрируем этот процесс с помощью схемы, изображенной на рис. 2.10. Шарик из положения 1 стремится занять более устойчивое положение 2, так как его потенциальная энергия в положении 2 меньше, чем в положении 1.

Одной из характеристик энергетического состояния системы является свободная энергия. *Свободной энергией* называется часть полной энергии вещества, которая обратимо изменяется при изменении температуры, полиморфных превращениях, плавлении и т.д. С повышением температуры величина свободной энергии уменьшается. Изменение свободной энергии жидкого и твердого вещества показано на рис. 2.11.

При равновесной температуре T_S величины свободных энергий металла в жидком и твердом состояниях равны. При температуре выше T_S более устойчиво жидкое состояние, а при температуре ниже T_S — твердое.

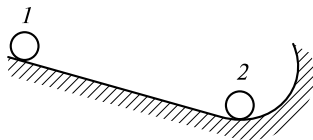


Рис. 2.10. Стремление системы к уменьшению свободной энергии

чив жидкий металл, имеющий меньший запас свободной энергии, а ниже этой температуры более устойчив твердый металл. Процесс кристаллизации будет развиваться лишь в том случае, если жидкий металл охладить ниже T_S .

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

Разность между температурами T_S и T_k называется *степенью переохлаждения*:

$$\Delta T = T_S - T_k.$$

Процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое можно описать с помощью кривых охлаждения в координатах время τ — температура T .

На рис. 2.12 показаны кривые охлаждения, характеризующие кристаллизацию чистых металлов при охлаждении с разной скоростью (v_1, v_2, v_3). Кристаллизация происходит при постоянной температуре, поэтому на кривой охлаждения появляется горизонтальная площадка (остановка в падении температуры), образование которой объясняется выделением *скрытой теплоты кристаллизации*. Во время плавления происходит поглощение теплоты, которая расходуется на повышение энергии атомов, т.е. на разрушение кристаллической решетки металла. Эта теплота называется скрытой. В процессе кристаллизации происходит обратное явление, а именно выделение энергии в виде скрытой теплоты кристаллизации, которая задерживает падение температуры.

При очень медленном охлаждении степень переохлаждения мала и кристаллизация происходит при температуре, близкой к равновесной. С увеличением скорости охлаждения степень переохлаждения возрастает (кривые, соответствующие скоростям охлаждения v_2 и v_3), и процесс кристаллизации протекает при температурах значительно

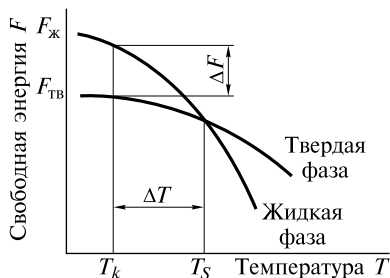


Рис. 2.11. Изменение свободной энергии (F) жидкого ($F_{ж}$) и твердого ($F_{тв}$) металла в зависимости от температуры:

$$\Delta F = F_{ж} - F_{тв}$$

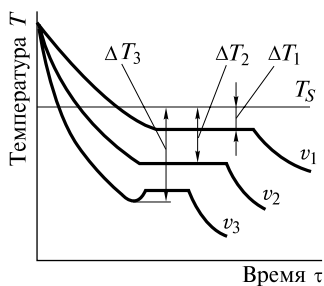


Рис. 2.12. Кривые охлаждения чистого металла:

$\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ — степени переохлаждения при скоростях охлаждения v_1, v_2, v_3 соответственно ($v_1 < v_2 < v_3$)

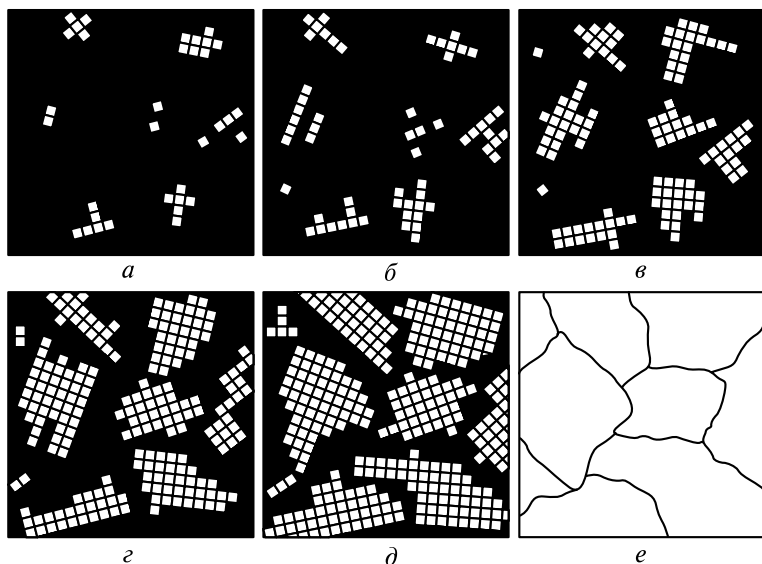


Рис. 2.13. Схема процесса кристаллизации:
a—e — этапы кристаллизации

более низких, чем равновесная температура кристаллизации.

Необходимая для кристаллизации степень переохлаждения зависит от природы и чистоты металла. Чем чище металл, тем большее переохлаждение требуется для возникновения зародышей твердых кристаллов.

Схематически процесс кристаллизации показан на рис. 2.13. В начале во многих участках жидкого сплава образуются **центры кристаллизации** (*зародыши кристаллов*). Пока их окружает жидкость, кристаллы растут свободно и могут иметь правильную геометрическую форму. Однако при столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается, так как на участках контактов (границах) их рост прекращается. Кристалл растет лишь в том направлении, где он соприкасается с жидкостью. В результате после окончательного затвердевания кристаллы имеют несимметричную (неправильную) форму. Их называют *зернами* или *кристаллитами*.

Скорость процесса кристаллизации определяется двумя величинами: скоростью зарождения центров кристаллизации и скоростью роста кристаллов.

Под *скоростью зарождения центров кристаллизации* понимают число зародышей, возникающих за единицу времени в единице объема. Под *скоростью роста кристаллов* понимают скорость увеличения линейных размеров кристалла за единицу времени.