

О. С. МОРЯКОВ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УЧЕБНИК

Рекомендовано

*Федеральным государственным учреждением
«Федеральный институт развития образования»
в качестве учебника для использования в учебном процессе
образовательных учреждений, реализующих программы
среднего профессионального образования*

*Регистрационный номер рецензии 355
от 22 июня 2009 г. ФГУ «ФИРО»*

5-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 620.22(075.32)
ББК 30.3я723
М809

Рецензенты:

преподаватель ГОУ СПО «Мытищинский машиностроительный техникум»
О. И. Калашникова;
руководитель метрологической службы ОАО «ЦНИИ «Циклон», канд. техн. наук,
доц. *В. С. Громов*

Моряков О. С.

М809 Материаловедение : учебник для студ. учреждений сред.
проф. образования / О. С. Моряков. — 5-е изд., стер. — М. :
Издательский центр «Академия», 2013. — 288 с.
ISBN 978-5-7695-9854-8

Изложены свойства современных конструкционных, инструментальных металлов и сплавов и неметаллических материалов, предназначенных для изготовления продукции машиностроения. Приведены способы механических и технологических испытаний металлов, их термической и химико-термической обработки. Описаны основные способы обработки материалов резанием, давлением, полимеризацией, вулканизацией, различные виды сварки (электронно-лучевая, плазменная, лазерная, аргонодуговая, ультразвуковая и др.).

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной дисциплины ОП.04 «Материаловедение» в соответствии с ФГОС СПО для специальности 151901 «Технология машиностроения».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 620.22(075.32)
ББК 30.3я723

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

© Моряков О. С., 2008
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012
ISBN 978-5-7695-9854-8

Уважаемый читатель!

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по специальности «Технология машиностроения».

Учебник предназначен для изучения общепрофессиональной дисциплины «Материаловедение».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают в себя традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включен терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Учебно-методический комплект по дисциплине «Материаловедение» включает в себя электронный образовательный ресурс «Материаловедение».

Учебно-методический комплект разработан на основании Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования с учетом его профиля.

Введение

Материаловедение — это наука, изучающая связь между составом, строением и свойствами материалов, закономерности их изменений при механических, тепловых и других видах внешних воздействий. При этом важными являются знания о поведении как обрабатываемого материала, так и материалов устройств (механизмов и машин) для данной обработки, например резанием, давлением, литьем и др.

Зная свойства машины или механизма и условия их работы, можно выбрать нужные материалы и обеспечить оптимальную долговечность эксплуатации этих устройств. На долю машиностроительных материалов приходится более четверти общего объема всей промышленной продукции.

Машиностроение — это комплекс отраслей обрабатывающей промышленности, изготавливающих орудия труда, предметы потребления и продукцию оборонного назначения. Наиболее важными отраслями являются станкостроение (производство металлорежущего, кузнечно-прессового, литейного оборудования и др.), транспортное машиностроение (наземное, воздушное, водное, космическое и другие транспортные средства), энергетическое машиностроение и др.

Основными машиностроительными материалами являются металлы и сплавы¹ — основа тяжелой индустрии, без них не может развиваться ни одна отрасль народного хозяйства. Однако необходимость рационального использования природных ресурсов привела к созданию конструкционных неметаллических материалов, они находят все возрастающее применение в разных отраслях техники. Примером могут быть пластмассы, которые обладают рядом свойств, превосходящих свойства традиционных материалов. Использование пластмасс решает многие технические

¹ Имеются в виду металлические сплавы — материалы, получаемые сплавлением при высокой температуре двух и более металлов или преимущественно металлов с неметаллами (при этом сплав обладает комплексом характерных металлических свойств, его название определено основным металлом).

проблемы в машиностроении, легкой и пищевой промышленности, строительстве, автомобиле-, самолето- и ракетостроении. Кроме того, без пластмасс немыслимо развитие телефонии, радиоэлектроники, электротехнической промышленности и многих других отраслей.

Современное развитие техники стимулирует создание новых материалов, свойства которых отвечают техническим требованиям. Так, с принципиально новым классом композиционных материалов ученые связывают дальнейший прогресс промышленности.

В области обработки материалов преимущественное развитие получило литейное производство металлов, пластмасс, керамики с использованием новейших способов переработки, а также обработки давлением и резанием с применением новейших сверхтвердых материалов в качестве инструмента. Литейный способ переработки материалов является самым экономичным, так как безвозвратные потери материалов при этом минимальны, а производительность высокая.

Современные достижения науки и техники базируются на трудах многих мастеров, инженеров и ученых. Гениальный русский ученый и мыслитель М. В. Ломоносов в своем труде «Первые основания металлургии и рудных дел», изданном в 1763 г., научно объяснил физическую и химическую природу металлургических процессов и дал ценнейшие практические указания по созданию технологических процессов выплавки и обработки металлов.

Идеи М. В. Ломоносова в области металлургии, опередившие на много лет теоретические разработки иностранных металлургов, легли в основу дальнейших исследований русских ученых и инженеров.

В начале XIX столетия творческая инициатива русских инженеров особенно широко развернулась на уральских и тульских заводах, изготавливавших оружие. Великий русский металлург П. П. Аносов на Златоустовском оружейном заводе открыл и обосновал способы изготовления и обработки высококачественной стали, в частности способ получения литейной стали непосредственной цементацией железа в тиглях, газовая цементация. В 1837 г. П. П. Аносов разработал способ получения стали из чугуна — на 30 лет раньше, чем этот способ был применен во Франции П. Мартеном. Труды П. П. Аносова по металловедению и термической обработке создали ему славу основоположника металлографии. Книга П. П. Аносова «О булатах» содержит ценнейшие указания по производству и исследованию стали.

Работы П. П. Аносова продолжил его ученик — талантливый инженер П. М. Обухов, основатель Обуховского завода в Петербурге. На Обуховском заводе работал знаменитый ученый Д. К. Чернов, труды которого по металловедению углубили знания по изучению металлов и сплавов, в частности позволили научно обосновать горячую механическую и термическую обработку стали.

Идеи Д. К. Чернова получили свое развитие в трудах академика Н. С. Курнакова, являющегося разработчиком физико-химического анализа металлов и сплавов, установивших зависимость между кристаллическим строением, структурой и свойствами сплавов.

Ученый-металлург А. А. Байков создал теорию металлургических процессов и методы исследования свойств и химического состава металлов и сплавов. Работы А. А. Байкова «Высококачественная сталь и ее характеристика», «Восстановление и окисление металлов» и многие другие внесли существенный вклад в развитие черной металлургии.

Большой вклад в развитие материаловедения внесли также зарубежные ученые Ю. А. Бринелль (Швеция), С. П. Роквелл (США), А. Мартенс (Германия) и др.

ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

I ЧАСТЬ

Глава 1. Общие сведения о материалах

Глава 2. Термическая, химико-термическая
обработка и методы испытания
материалов

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ

1.1. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И АМОРФНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Для характеристики технических материалов используют их физические, химические, технологические и механические **свойства**.

Физические свойства (плотность, теплоемкость, температура плавления, термическое расширение, магнитные характеристики, тепло-, электропроводность и др.) определяют поведение материалов в тепловых, гравитационных, электромагнитных и радиационных полях. **Химические свойства** определяют способность сопротивляться окислению, проникновению газов и взаимодействовать с другими веществами. **Технологические свойства** определяют способность подвергаться горячей и холодной обработке давлением, резанием, термической обработке. **Механические свойства** материалов характеризуют их поведение под воздействием разных нагрузок. Особенности строения материала, обнаруживаемые каким-либо методом исследования и определяемые агрегатным состоянием, называются структурой и характеризуют его конструктивную прочность.

При оценке структуры машиностроительных материалов исходят из **идеальных агрегатных состояний** вещества (твердого, жидкого, газообразного). Однако реальные материалы, как правило, имеют структурные состояния пограничного промежуточного типа между твердым и жидким, а именно **аморфное** (стеклообразное), **жидкокристаллическое**, **кристаллическое**. Формирование каждого из этих состояний происходит при определенных внешних физических условиях, называемых термодинамическими факторами — конкретных для каждого вещества температуре и давлении, когда микрочастицы, из которых состоит вещество (в зависимости от его природы это могут быть атомы, ионы или молекулы), занимают в объеме тела либо случайное беспоряд-

дочное положение (аморфное вещество), либо строго упорядоченное регулярное положение (кристаллическое вещество). Возможно промежуточное жидкокристаллическое состояние. Например, оно формируется из молекул некоторых органических веществ, имеющих удлинённую палочкообразную форму. Из таких молекул образуются жидкие кристаллы, так как они обладают основными свойствами и жидкости (текучесть), и кристаллического вещества (регулярная структура).

Обращаясь к материалам, имеющим кристаллическую структуру, важно определить их кристаллическую решетку — правильное расположение частиц (атомов, ионов или молекул) в кристалле. Положения каждой из частиц в твердом теле неизменны и соответствуют их постоянным тепловым колебаниям относительно некоторых точек равновесия. Такие точки рассматриваются как **узлы элементарных кристаллических ячеек**, при многократном повторении которых во всех трех измерениях можно полностью воспроизвести кристалл, построить его. Сближение частиц в такой ячейке ограничивается их взаимным отталкиванием, так как все частицы одного вещества имеют одноименные заряды, но каждая из частиц кристалла имеет соседей, положения которых по отношению к ней одинаковы, т.е. для твердого кристалла характерен **дальний порядок**, или **регулярная структура**.

Большинство твердых веществ являются кристаллическими. Типичные расстояния между частицами в кристалле 0,2...0,5 нм ($1 \text{ нм} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ мм}$, т.е. один нанометр в миллиард раз меньше одного метра и в миллион — миллиметра). Расстояния между центрами атомов, ионов или молекул, находящихся в соседних узлах кристаллической решетки в трех пространственных направлениях, называют **параметрами**, или **периодами решетки**, и обозначают латинскими буквами *a*, *b*, *c*. Периоды решетки, а также углы между ними используются как характеристика веществ при определении их свойств.

Твердое тело как кристалл существует пока есть дальний порядок расположения атомов, ионов или молекул элементарной решетки. При нарушении порядка равновесные расстояния между частицами изменяются (например, увеличиваются в процессе нагревания) и твердое тело (кристалл) либо плавится (превращается в жидкость), либо улетучивается (переходит в газообразное состояние). В твердом состоянии одно и то же вещество может видоизменяться, иметь разные свойства, но при этом его кристаллическая решетка также должна видоизмениться, приобрести

иную модификацию, другое аллотропное состояние. Многие вещества могут находиться в разных аллотропных формах. Рассмотрим для примера возможные модификации углерода в свободном состоянии — графит и алмаз. Трудно поверить, но графит (в природном виде мягкий минерал с очень низкой твердостью; в производстве получается в виде сажи, копоти, т.е. мягкого черного порошка при сжигании древесного или каменного угля, антрацита) и алмаз (прозрачный кристалл самой высокой твердости, после придания особой, бриллиантовой, огранки — это сверкающий драгоценный камень) — являются атомными кристаллами одного и того же элемента — углерода. Графит используется как огнеупорный материал для изготовления тиглей, работающих в условиях высоких температур; алмаз же легко сгорает в открытом пламени. Являясь неметаллом, графит проявляет некоторые признаки металлов (электропроводность). Структура графита состоит из параллельных слоев атомов углерода, находящихся в узлах правильных шестиугольников. Положение слоев повторяется через один, и каждый слой сдвинут относительно другого. Такая кристаллическая решетка называется **гексагональной**. Решетка прочного алмаза имеет вид куба ($a = 0,354$ нм), в центре каждой грани которого, как и в узлах куба, также находятся атомы углерода (такая решетка называется **гранецентрированной кубической**). Таким образом, свободный углерод как вещество может иметь атомную кристаллическую решетку двух видов.

Каждое кристаллическое вещество можно отличить от других по его кристаллической решетке. Все металлы и их сплавы имеют кристаллическую структуру с **металлической кристаллической решеткой**; ее особенность в том, что в узлах находятся положительно заряженные ионы (катионы) и отчасти свободные атомы, а в промежутках между узлами свободно перемещаются электроны, которые не находятся на внешних орбитах атомов, а принадлежат металлу в целом (являются как бы обобществленными электронами и определяют основные свойства металлов как класса веществ (в частности, высокие тепло-, электропроводность и др.).

Основные кристаллические решетки металлов, наиболее широко используемых в машиностроении, следующие: **объемно-центрированная кубическая** — ОЦК (рис. 1.1, а), в которой восемь атомов располагаются в вершинах куба и один — в центре (ее имеют, например, железо Fe при низкой температуре, т.е. α -железо, хром Cr, вольфрам W, молибден Mo); **гранецентрированная кубическая** — ГЦК (рис. 1.1, б) с атомами, расположенными,

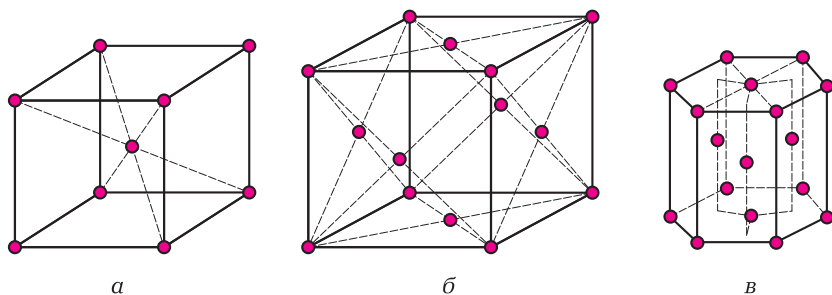


Рис. 1.1. Типы основных кристаллических решеток:

а — объемно-центрированная кубическая; *б* — гранецентрированная кубическая; *в* — гексагональная

как и в алмазе, в вершинах куба и в центре каждой из граней (она характерна для алюминия Al, меди Cu, золота Au, γ -железа); **гексагональная** (рис. 1.1, *в*) в виде шестигранной призмы (ее имеют, например, цинк Zn и магний Mg).

Кристаллическую структуру металлы, сплавы металлов с металлами и неметаллами приобретают в процессе перехода из расплавленного (жидкого) состояния в твердое по мере охлаждения. Некоторые металлы (например, железо, кобальт) при разных температурах в твердом состоянии претерпевают аллотропное превращение, в процессе которого кубическая решетка перестраивается в гексагональную. Например, железо при охлаждении ниже 1400°C (рис. 1.2) может находиться в двух модификациях: γ -железо (ГЦК-решетка) и α -железо (ОЦК-решетка) после аллотропных превращений соответственно при 1392°C и 768°C .

На кривой охлаждения видно, что α -железо термодинамически устойчиво при температуре ниже 911°C , а также выше 1392°C до температуры плавления (1539°C). В интервале температур $911 \dots 1392^{\circ}\text{C}$ устойчиво γ -железо. Температурная ступенька при 768°C на кривой охлаждения указывает на границу магнитных свойств железа: выше этой температуры оно немагнитно, а ниже — проявляет ярко выраженные магнитные свойства.

Немагнитное α -железо, т.е. в интервале температур $911 \dots 768^{\circ}\text{C}$, иногда называют β -железом, а высокотемпературную его модификацию при температуре в интервале $1539 \dots 1392^{\circ}\text{C}$, — δ -железом (решетка объемно-центрированная кубическая).

При охлаждении расплава одновременно во многих центрах, в которых произошло образование зародышей кристаллов, начинается развитие кристаллизации. По мере роста многочисленных кри-

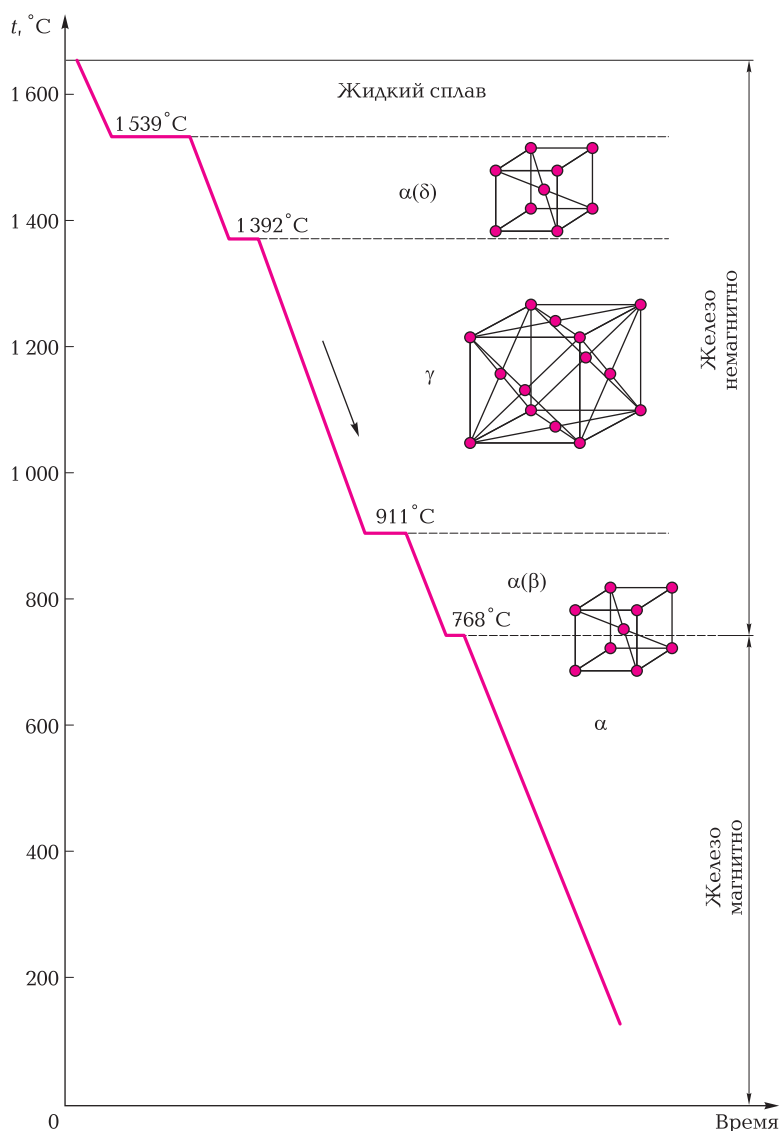


Рис. 1.2. Кривая охлаждения железа:

$\alpha(\delta)$, γ , α — аллотропные изменения кристаллической решетки железа; $\longrightarrow$ — процесс охлаждения

сталлов наступает момент, когда одни кристаллы начинают мешать другим, в результате в таких условиях конкурирующего роста вместо геометрически правильных многогранных кристаллов выраста-

ют деформированные образования неправильной искаженной формы, которые материаловеды называют кристаллитами или зернами. Металлическую структуру из большого числа кристаллитов называют поликристаллической. На полированном срезе под микроскопом она имеет вид зерен неправильной формы, размер зерен может быть разным (например, от 0,1 до 1,0 мм).

Если физические свойства кристаллического вещества оказываются в разных направлениях неодинаковыми, вещества называются **анизотропными**. При химической обработке анизотропные вещества травятся с разной скоростью, механические свойства их также оказываются неодинаковыми. Если же материалы обладают одинаковыми физическими свойствами во всех направлениях, то их называют **изотропными**. В поликристаллических структурах анизотропия сказывается меньше, чем в кристаллических, так как зерна металла более однородны, мельче и по своим свойствам ближе к изотропным материалам.

В реальных кристаллах всегда имеются **дефекты строения**. Не совершенства строения кристаллов связаны с нарушениями строгого периодического расположения частиц в кристаллической решетке. Дефекты в кристаллах подразделяют на четыре группы: точечные (нуль-мерные), линейные (одномерные), поверхностные (двухмерные) и объемные (трехмерные). **Точечные дефекты** весьма малы во всех измерениях, не более нескольких атомных диаметров. К ним относятся вакансии, межузельные атомы, атомы примеси и их комплексы. **Линейные дефекты** имеют атомные размеры в двух измерениях, а в третьем могут быть соизмеримы с длиной кристалла. Это так называемые дислокации. **Поверхностные дефекты** (границы зерен) малы лишь в одном измерении, они отражают несовершенство упаковки атомов. **Объемные дефекты** (пороки кристаллов) — это трещины, включения с другим типом решетки, поры, раковины.

Дефекты в кристаллах сильно влияют на механические свойства материалов (разрушение, пластическую деформацию, рекристаллизацию, старение и др.), а также на физические свойства кристаллов (в полупроводниковой технике).

Аморфное состояние — физическое состояние твердого вещества, в котором в отличие от кристаллического его частицы расположены беспорядочно и вещество обладает изотропией, т. е. имеет одинаковые физические свойства по всем направлениям. Аморфные вещества не имеют определенной температуры плавления, они бывают природными (янтарь, смолы) и искусственными (стекло, пластмассы, клей).

По своему строению аморфные твердые вещества и жидкости занимают промежуточное положение между твердым телом и газообразным, не имеют кристаллической структуры, в них наблюдается ближний порядок (согласованность в расположении только соседних частиц). Подобно частицам твердого тела, частицы аморфного вещества совершают тепловые колебания около некоторых положений равновесия, но если в твердом теле они неизменны, в аморфном по истечении некоторого времени частица перескакивает в новое положение, определяя вязкость и текучесть аморфного вещества. Одно и то же вещество может встречаться как в кристаллическом, так и в аморфном виде, причем из аморфного состояния оно сравнительно легко переходит в кристаллическое (например, стекло). Такой переход зависит от скорости охлаждения и вязкости вещества.

Сроки самопроизвольного перехода из одного состояния в другое разные — от нескольких месяцев (сахар, стекло) до миллионов лет (камни).

Аморфных твердых металлов не бывает. Даже ртуть, которая в обычных условиях находится в жидком состоянии, на морозе -40°C затвердевает и становится кристаллической.

1.2. СТРОЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Твердые тела и связи

Твердые тела существуют за счет взаимодействия отрицательных (электронов) и положительных (ядер атомов) зарядов. Возникающие при этом **силы притяжения** сближают между собой указанные частицы (электроны и ядра). Наряду с силами притяжения действуют **силы отталкивания**, препятствующие частицам соединяться. Силы отталкивания возникают при сближении одноименно заряженных частиц на определенные расстояния. Образование сил отталкивания одинаково для всех твердых тел, а сил притяжения — различно и зависит от природы происхождения твердого тела. Силы притяжения образуют ионные, ковалентные и металлические связи, а также силы межмолекулярного взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса).

Ионный тип связи является одним из видов химической связи и образуется при взаимодействии разнородных веществ, при-
сущ химическим соединениям и создает при этом сильное соеди-

нение ионов. Наиболее известными твердыми телами с ионной связью являются стекло, состоящее из оксидов различных элементов, а также поваренная соль.

Ковалентный тип связи — вид прочной химической связи, осуществляемой парой электронов, общих для двух атомов. При этом могут быть связаны одинаковые атомы (например, в молекулах водорода, хлора, кристаллах алмаза) или разные (в молекулах воды, кристаллах карборунда и др.). Почти все основные связи в молекулах органических соединений являются ковалентными. Кристаллы с атомной решеткой и ковалентной связью образуют тугоплавкие с высокой твердостью и износостойкостью материалы (например, боразон).

Силы межмолекулярного взаимодействия образуются в результате электростатического взаимодействия диполей. Диполем называют совокупность двух точечных электрических зарядов, равных по величине, но противоположных по знаку заряда. Эти силы слабее ковалентных, но проявляются на больших расстояниях. Если вещество состоит из полярных молекул (вода), то они ориентируются друг относительно друга своими разноименно заряженными концами, в результате чего взаимно притягиваются. Если вещество состоит из неполярных, но способных к поляризации молекул (диоксид углерода), то возникают индуцированные диполи. Молекулы поляризуются и образовавшийся индуцированный диполь в свою очередь поляризует соседние молекулы: происходит взаимное притяжение молекул друг к другу.

Механическая связь присуща более 80 % химических элементов и множеству металлических сплавов, которые обладают в обычных условиях высокими тепло- и электропроводностью, ковкостью, пластичностью, металлическим блеском и другими характерными свойствами. Такие свойства металлов обусловлены наличием в их кристаллической решетке большого количества (10^{22} — 10^{23} в 1 см^3) слабо связанных с атомными ядрами подвижных электронов.

Структуры сплавов

Существует большое разнообразие сплавов, удовлетворяющих требованиям современной науки и техники. Сплавы могут быть мягкими, твердыми, с низким или высоким электрическим сопротивлением, магнитными и немагнитными, кислотоупорными, жаропрочными, легкими, тяжелыми и др. Общим для всех сплавов

является их разделение на механические смеси, твердые растворы и химические соединения (рис. 1.3).

Смеси (механические смеси) образуют компоненты, которые при затвердевании из жидкого состояния не растворяются друг в друге и не взаимодействуют. Каждый компонент смеси сохраняет свои свойства и кристаллическую решетку, неравномерные распределения по объему этих компонентов. В подобных смесях образуются твердые растворы внедрения и в меньшей мере твердые растворы замещения (рис. 1.3, *а*). Изменяя количественные соотношения компонентов, можно получать различные свойства механических смесей. Иногда механические смеси называют псевдосплавами.

Твердые растворы — это однородные кристаллические или аморфные вещества, состоящие из нескольких компонентов и

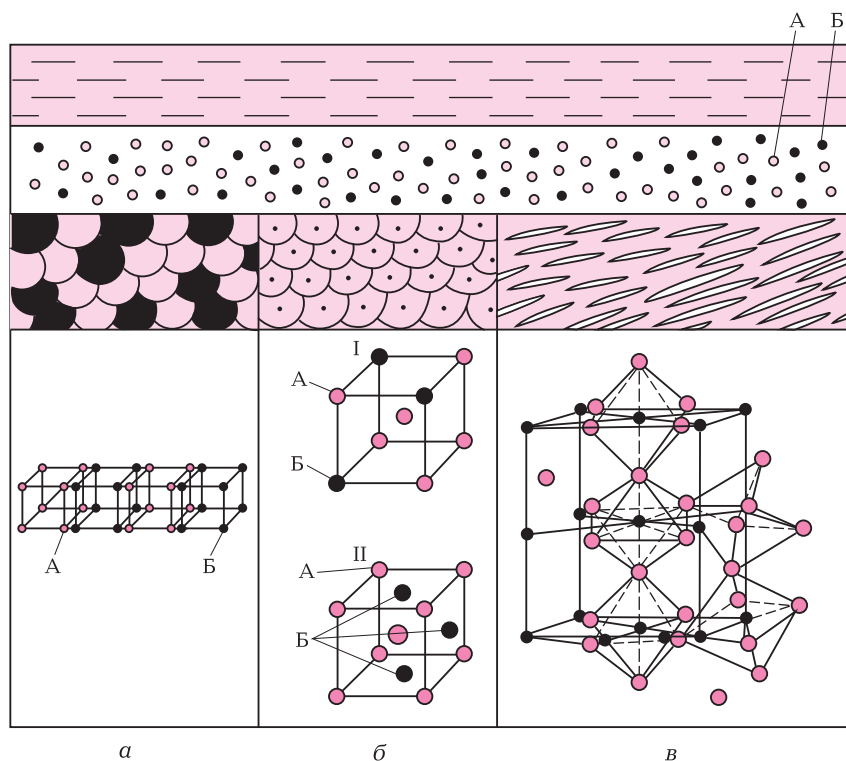


Рис. 1.3. Структуры сплавов:

а — механическая смесь; *б* — твердый раствор; *в* — химическое соединение; А, Б — сплавляемые компоненты; I — раствор замещения; II — раствор внедрения

сохраняющие свою однородность при изменении их соотношения. Твердые растворы образуются тогда, когда один компонент (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку, а другой располагает в ней свои атомы. Если атомы компонента частично замещаются атомами кристаллической решетки растворителя, то такой раствор называют **твердым раствором замещения**, если атомы компонента частично размещаются внутри кристаллической решетки — то **твердым раствором внедрения** (рис. 1.3, б).

Например, в твердом растворе замещения, образованном медью и никелем, атомы никеля размещаются в узлах кристаллической решетки меди. В твердых растворах внедрения атомы неметаллов обычно располагаются в промежутках между атомами металла. Типичным примером твердого раствора внедрения является твердый раствор углерода в железе. Твердыми растворами являются сталь, бронза, большинство стекол, минералы — полевые шпаты и др.

Химические соединения образуют элементы с различным строением кристаллических решеток и их атомов. Химические соединения могут образовывать металл с металлом и металл с неметаллом. Созданные сплавы характеризуются тем, что имеют постоянную температуру плавления, высокую твердость и хрупкость, собственную кристаллическую решетку и отличительные от составляющих их компонентов свойства. Химическое соединение металла с металлом имеет металлический тип связи и называется интерметаллидом, а химическое соединение металла с неметаллом — ионный тип связи и называется по виду неметалла, например оксид, нитрид, карбид и др. Атомно-кристаллическая решетка химического соединения углерода с железом показана на рис. 1.3, в.

В реальных сплавах микроструктура представляет собой комбинацию нескольких типов соединений, например механическая смесь химического соединения и твердого раствора.

Кристаллизация металлов

На кристаллизацию жидкого металла существенное влияние оказывает скорость охлаждения и количество примесей в расплаве. В местах наибольшего охлаждения образуются **дендриты** — древовидные кристаллы. Такой кристалл формируется постепенно. Сначала вырастает основная ось с отростками в виде крестов,

расположенных перпендикулярно к ней. На этой оси и отроостках кристаллизуется металл, находящийся в жидком состоянии, заполняет пустоты, постепенно охлаждается и в результате получается один большой кристалл.

Соприкасаясь со стенками изложницы, металл быстро охлаждается, образуя корку, состоящую из мелких кристаллов, поскольку из-за большой скорости охлаждения они не успевают вырасти до больших размеров (первая зона кристаллизации). По направлению к оси изложницы охлаждение расплава происходит медленнее, в результате появляются крупные столбчатые (радиальные) кристаллы, формируемые правильно ориентированными, перпендикулярно к стенке изложницы. Желательно, чтобы таких кристаллов было как можно меньше, поскольку при дальнейшей обработке слитка (ковки и прокатке) вдоль их плоскостей соприкосновения образуются трещины в металле. На этом заканчивается вторая зона кристаллизации.

Далее металл кристаллизуется в осевой части слитка (третья зона кристаллизации). Образуются крупные равноосные беспорядочно расположенные кристаллы. Причиной этого является снижение скорости охлаждения и изменение направленности отвода теплоты.

При кристаллизации металл уменьшается в объеме, образуется усадка, в результате которой толщина отвердевшего слоя металла увеличивается, а количество жидкого в середине слитка уменьшается. В верхней части слитка появляется **усадочная раковина**, являющаяся отходом.

К дефектам слитков относят усадочные и **газовые раковины** (пустоты, пузыри), неметаллические включения и ликвацию. Газовые раковины могут образовываться при поглощении атмосферы печи жидким металлом, реакциях в толще металла, в захвате воздуха кипящим металлом и другими причинами. Неметаллические включения могут оказаться в толще металла (стали) при раскислении его оксидами марганца, алюминия и диоксидом кремния, когда они не успевают всплыть к поверхности расплава. **Ликвация (сегрегация)** — это неоднородный состав металла в отливке. Образованию ликвации способствует наличие серы, фосфора и углерода в период затвердевания слитка. Уменьшают ликвацию выплавкой и разливом металла в вакууме.

Каждому веществу (металлу) при определенных термодинамических условиях соответствует атомно-кристаллическая структура. Некоторые вещества, например железо, углерод, кварц, в разных интервалах температур и давлений имеют в равновесном

состоянии различную кристаллическую структуру. Способность твердого тела существовать в двух- или нескольких кристаллических структурах называется **полиморфизмом (аллотропией)**. Примером полиморфизма могут служить алмаз и графит, вещества, состоящие из углерода, но имеющие различные кристаллические решетки и резко отличающиеся своими свойствами. Кристаллизация является примером фазового перехода вещества и сопровождается выделением теплоты. Кристаллизация начинается при достижении определенного условия — переохлаждения расплава, когда мгновенно образуется множество мелких кристаллов — центров кристаллизации (рис. 1.4, *а—г*). Кристаллы растут, присоединяя все новые атомы из расплава. Рост граней кристаллов происходит послойно. Зависимость кристаллизации от условий роста, скорости охлаждения приводит к разнообразию форм и структуры кристаллов (многогранные, пластинчатые, игольчатые, дендритные и др.). Когда кристаллы начинают соприкасаться друг с другом в ограниченном пространстве, их форма искажается (рис. 1.4, *г*). Последней стадией кристаллизации является образование зерен, или кристаллитов (рис. 1.4, *е*).

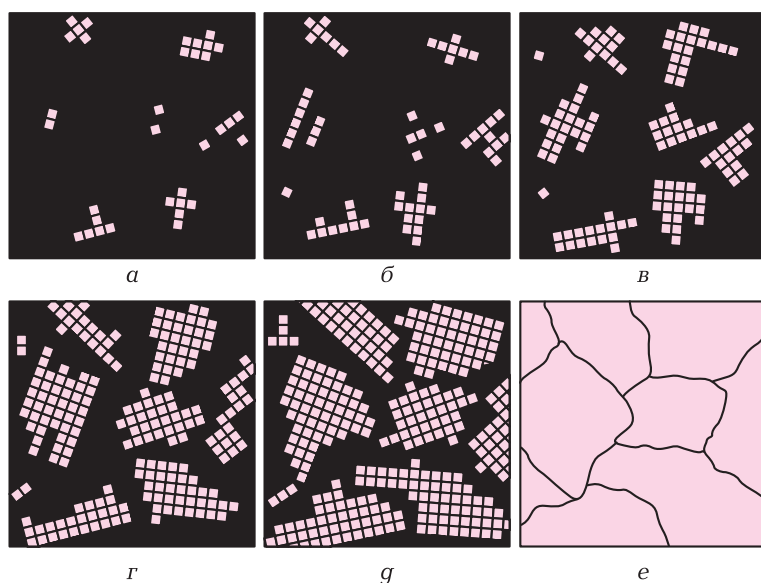


Рис. 1.4. Схема кристаллизации:

а—г — образование мелких кристаллов и центров кристаллизации; *д* — искажения формы кристаллов; *е* — образование зерна