

СРЕДНЕЕ  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ  
ОБРАЗОВАНИЕ

В.В. Овчинников, М.А. Гуреева

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ДЛЯ АВТОРЕМОНТНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Рекомендовано  
Экспертным советом УМО в системе ВО и СПО  
в качестве **учебника** для специальностей  
«Техника и технологии наземного транспорта»  
среднего профессионального образования

*Рекомендовано для освоения профессий  
из списка ТОП-50 наиболее востребованных на рынке труда,  
новых и перспективных профессий*



КНОРУС • МОСКВА • 2025

УДК 620.22(075.32)

ББК 30.3я723

О-35

**Авторы:**

**В.В. Овчинников**, Московский политехнический университет,

**М.А. Гуреева**, Российский новый университет

**Овчинников, Виктор Васильевич.**

**О-35** Материаловедение: для авторемонтных специальностей : учебник / В.В. Овчинников, М.А. Гуреева. — Москва : КНОРУС, 2025. — 240 с. — (Среднее профессиональное образование).

**ISBN 978-5-406-13734-5**

Рассмотрены металлические и неметаллические конструкционные, инструментальные и композиционные материалы. Большое внимание уделено материалам, применяемым при изготовлении конструкций автомобилей. Даны информация об их строении, свойствах и области применения, характеристика механических, физических и технологических свойств, описаны методы их определения. Содержание ориентировано на требования Организации WorldSkills Russia владения профессиональными навыками по авторемонтным специальностям для участия в профессиональных конкурсах.

Соответствует ФГОС СПО последнего поколения.

**Рекомендовано для освоения профессий из списка ТОП-50 наиболее востребованных на рынке труда, новых и перспективных профессий.**

*Для студентов учреждений среднего профессионального образования авторемонтных специальностей.*

**Ключевые слова:** материаловедение для авторемонтных специальностей; авторемонт; сведения о металлах и сплавах; неметаллические конструкционные материалы; материаловедение.

**УДК 620.22(075.32)**

**ББК 30.3я723**

Овчинников Виктор Васильевич

Гуреева Марина Алексеевна

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**для авторемонтных специальностей**

Изд. № 699820. Формат 60×90/16. Гарнитура «Newton».

Усл. печ. л. 15,0. Уч.-изд. л. 14,0.

ООО «Издательство «КноРус».

117218, г. Москва, ул. Кедрова, д. 14, корп. 2.

Тел.: +7 (495) 741-46-28.

E-mail: welcome@knorus.ru www.knorus.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных материалов в ООО «Фотоэксперт».

109316, г. Москва, Волгоградский проспект,  
д. 42, корп. 5, эт. 1, пом. I, ком. 6.3-23Н

**ISBN 978-5-406-13734-5**

© Овчинников В.В., Гуреева М.А., 2025

© ООО «Издательство «КноРус», 2025

# Оглавление

Предисловие.....	5
<b>Глава 1. СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ. СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА И ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛОВ. СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ .....</b>	<b>7</b>
1.1. Классификация и строение металлов .....	7
1.2. Внутреннее строение металлов и сплавов .....	9
1.3. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов.....	18
1.4. Диаграмма состояния сплава «железо — углерод» .....	25
1.5. Чугун .....	33
1.6. Классификация сталей.....	40
1.7. Производство чугуна и стали.....	72
Контрольные вопросы и задания.....	84
<b>Глава 2. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ.....</b>	<b>85</b>
2.1. Медь и сплавы на медной основе.....	85
2.2. Легкие сплавы.....	97
2.2.1. Алюминий и его сплавы.....	97
2.2.2. Магний и его сплавы.....	111
2.2.3. Титан и титановые сплавы .....	114
2.3. Антифрикционные (подшипниковые) сплавы.....	117
2.4. Порошковые материалы.....	118
2.5. Коррозия металлов. Виды коррозии и методы защиты от нее .....	123
Контрольные вопросы.....	133
<b>Глава 3. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....</b>	<b>134</b>
3.1. Древесные материалы.....	134
3.2. Керамика. Режущая керамика.....	140
3.3. Пластмассы .....	149
3.4. Композиционные материалы .....	159
3.5. Фрикционные материалы.....	173
3.6. Прокладочные материалы.....	175
Контрольные вопросы и задания.....	176
<b>Глава 4. АВТОМОБИЛЬНЫЕ ТОПЛИВА, СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЖИДКОСТИ .....</b>	<b>178</b>
4.1. Бензины.....	178
4.2. Дизельные топлива.....	179
4.3. Газообразные топлива.....	181
4.4. Масла.....	186
4.5. Пластичные смазки.....	196

4.6. Специальные жидкости .....	199
Контрольные вопросы .....	205
<b>Глава 5. РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ И ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b> .....	<b>206</b>
5.1. Резиновые материалы .....	206
5.2. Вулканизирующие вещества .....	207
5.3. Ускорители и наполнители резины .....	208
5.4. Армирование резиновых изделий .....	209
5.5. Физико-механические свойства резины .....	209
5.6. Изменение свойств резины в зависимости от температуры .....	215
5.7. Изменение свойств резины в процессе старения .....	218
5.8. Пленкообразующие материалы .....	219
5.9. Основные сведения о лакокрасочных материалах и их маркировка .....	224
5.10. Технологический процесс нанесения лакокрасочных покрытий на металлы .....	225
Контрольные вопросы и задания .....	228
<b>Список литературы</b> .....	<b>229</b>

## Предисловие

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

Решение важнейших технических проблем, связанных с экономией материалов, уменьшением массы машин и приборов, повышением точности, надежности и работоспособности механизмов и приборов, во многом зависит от развития материаловедения. Непрерывный процесс создания новых материалов для современной техники обогащает науку о материалах, которая стимулирует появление новых технических идей. Революционную роль сыграли полупроводниковые материалы и жидкие кристаллы в электронике, композиционные материалы в авиации и ракетостроении, сверхпроводники и аморфные сплавы в электронике и радиотехнике и т.д. Теоретической основой материаловедения являются соответствующие разделы физики и химии, однако наука о материалах в основном развивается экспериментальным путем. Поэтому разработка новых методов исследования строения (структуры) и физико-механических свойств материалов способствует дальнейшему развитию материаловедения.

Электронная микроскопия тончайших металлических фаз и нейтронография позволяют изучать элементы кристаллической структуры, ее дефекты и закономерности превращений под воздействием внешних факторов (температура, давление и др.).

Изучение физических (плотность, электропроводимость, теплопроводность, магнитная проницаемость и др.), механических (прочность, пластичность, твердость, упругость и др.), технологических (свариваемость, жидкотекучесть, ковкость, обрабатываемость резанием и др.) и эксплуатационных свойств (сопротивление коррозии, изнашиванию и усталости, жаропрочность, хладостойкость и др.) позволяет определить области рационального использования различных материалов с учетом экономических требований.

Развитие техники требует материалов с новыми уникальными свойствами. Для атомной энергетики и космической техники необходимы материалы, которые могут работать при весьма высоких тем-

пературах. Компьютерные технологии стали возможными только при использовании материалов с особыми электрическими свойствами. Таким образом, материаловедение — одна из важнейших, приоритетных наук, определяющих технический прогресс.

В настоящем учебнике рассмотрены важнейшие металлические и неметаллические материалы: черные и цветные металлы, а также технология их термической обработки и свойства; неметаллические и композиционные материалы.

Освоив материал, изложенный в учебнике, учащиеся будут обладать следующими компетенциями:

***уметь:***

- выполнять механические испытания образцов материалов;
- использовать физико-химические методы исследования металлов;
- пользоваться справочными таблицами для определения свойств материалов;
- выбирать материалы для осуществления профессиональной деятельности;

***знать:***

- основные свойства и классификацию материалов, используемых в профессиональной деятельности;
- наименование, маркировку, свойства обрабатываемого материала;
- правила применения охлаждающих и смазывающих материалов;
- основные сведения о металлах и сплавах;
- основные сведения о неметаллических, прокладочных, уплотнительных и электротехнических материалах, стали, их классификацию.

# Глава 1

## СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ. СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА И ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛОВ. СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ

### 1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

В природе существуют две разновидности твердых тел, различающиеся по своим свойствам, — кристаллические и аморфные.

*Кристаллические* тела остаются твердыми, то есть сохраняют приданную им форму, до вполне определенной температуры, при которой они переходят в жидкое состояние. При охлаждении процесс идет в обратном направлении. Переход из одного состояния в другое протекает при определенной температуре плавления.

*Аморфные* тела при нагреве размягчаются в большом температурном интервале, становятся вязкими, а затем переходят в жидкое состояние. При охлаждении процесс идет в обратном направлении. Аморфные тела, в отличие от жидкостей, имеют пониженную подвижность частиц. Аморфное состояние можно зафиксировать ускоренным охлаждением из жидкого состояния. Однако при повторном нагреве, длительной выдержке при температурах 20—25 °С, а в некоторых случаях при деформации, нестабильность аморфного твердого тела проявляется в частичном или полном переходе в кристаллическое состояние.

Кристаллические тела характеризуются упорядоченным расположением в пространстве элементарных частиц, из которых они составлены (ионов, атомов, молекул). Свойства кристаллов зависят от электронного строения атомов и характера взаимодействия их в кристалле; от пространственного расположения элементарных частиц; химического состава, размера и формы кристаллов. Все эти детали строения кристаллов описывает понятие «структура».

Под *атомно-кристаллической структурой* понимают взаимное расположение атомов (ионов), существующее в реальном кристалле.

В зависимости от размеров структурных составляющих и применяемых методов их выявления используют следующие понятия: тонкая структура, микро- и макроструктура.

*Тонкая структура* определяется расположением элементарных частиц в кристалле и электронов в атоме. Изучается дифракционными методами (рентгенография, электронография, нейтронография). Анализируя дифракционную картину, можно получить обширную информацию о строении кристаллов.

Большинство материалов состоит из мелких кристалликов (зерен). Наблюдать такие мелкие структурные составляющие — *микроструктуру* возможно с помощью оптического или электронного микроскопа. Микроскопические методы дают возможность определить размеры и форму кристаллов, наличие различных по своей природе кристаллов, их распределение и относительные объемные количества, форму инородных включений и микропустот, ориентирование кристаллов, наличие специальных кристаллографических признаков (двойникование, линии скольжения и др.). Это далеко не полное перечисление характеризует обширность тех сведений, которые можно получить при помощи микроскопа.

Изучая строение кристаллов невооруженным глазом или при небольших увеличениях с помощью лупы — *макроструктуру*, можно выявить характер излома, усадочные раковины, поры, выявить размеры и форму крупных кристаллов. Используя специально приготовленные образцы (шлифованные и травленные), обнаруживают трещины, химическую неоднородность, волокнистость. Исследование макроструктуры, несмотря на свою простоту, является очень ценным методом изучения материалов.

Из всех известных в настоящее время элементов более половины являются металлами. **Металлы** — непрозрачные вещества, обладающие специфическим металлическим блеском, пластичностью, высокой теплопроводностью и электропроводностью.

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

Понятие «чистый металл» весьма условно. Любой чистый металл содержит примеси, а поэтому его следует рассматривать как сплав. Под термином «чистый металл» 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 существенное влияние на свойства металла.

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

Сплавы — твердые и жидкие вещества — получают сплавлением или спеканием двух или более металлов или металлов с неметаллами. Элементы, образующие сплав, называют *компонентами*. Сплавы могут состоять из двух или большего числа компонентов. Строение металлического сплава более сложное по сравнению с чистым металлом.

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

Фазой называется однородная часть системы (металла или сплава), имеющая границы раздела, при переходе через которые их свойства резко меняются. Например, жидкий металл является однофазной системой; смесь жидкого металла и твердых кристалликов — двухфазной системой, так как свойства жидкого металла значительно отличаются от свойств твердых кристалликов. Фазами могут быть отдельные металлы, их химические соединения, а также растворы на основе металлов.

Под *структурой* понимается строение металла, то есть взаимное расположение различных фаз, форма и размер составляющих их кристаллитов и пустот.

*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.

Одна из важнейших задач металловедения — определение связи между структурой и свойствами.

## 1.2. ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Каждый металл (вещество) может находиться в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом.

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

В жидком металле атомы (частицы) сохраняют лишь так называемый ближний порядок, то есть в объеме закономерно расположено небольшое количество атомов, а не атомы всего объема. Ближний порядок неустойчив и может либо исчезнуть, либо возникнуть под действием тепловых колебаний.

В твердых телах порядок расположения атомов строго определенный, закономерный, силы взаимодействия уравновешены, тело сохраняет свою форму. Правильное закономерное расположение атомов в пространстве характеризует кристаллическое состояние.

Закономерное расположение атомов (точнее, положительно заряженных ионов) приведено на рис. 1.1. Воображаемые линии, проведенные через центры атомов, расположенных в одной плоскости, образуют решетку, в узлах которой располагаются атомы. Такая конфигурация называется кристаллографической плоскостью.

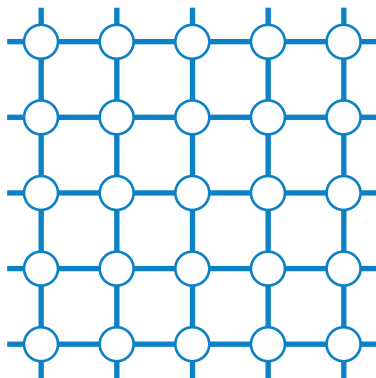
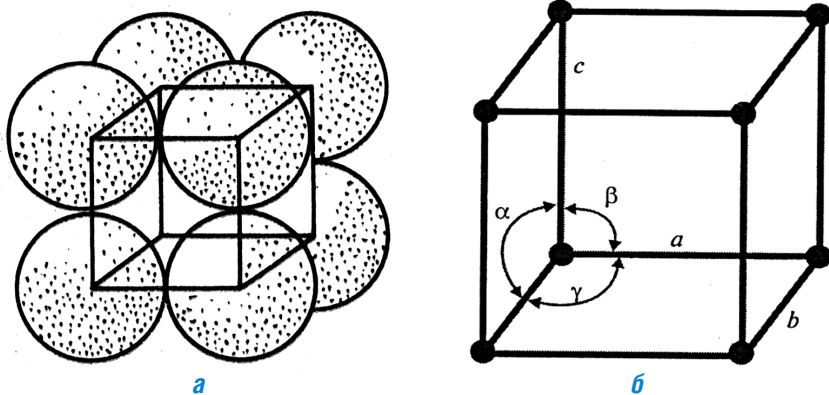


Рис. 1.1. Размещение атомов в кристаллографической плоскости

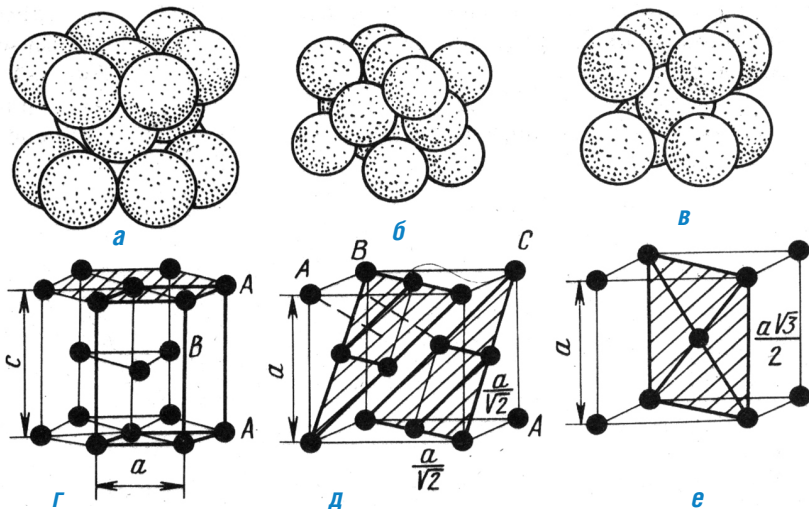
Множественное повторение кристаллографических плоскостей в пространстве позволяет получить пространственную кристаллическую решетку (рис. 1.2а). Пространственная кристаллическая решетка сложна в изображении, поэтому представление об атомном строении кристаллов дается в виде кристаллических ячеек. Под элементарной кристаллической ячейкой понимают минимальный объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме.

Простейшим типом кристаллического строения является кубическая решетка (рис. 1.2б). В простой кубической решетке атомы уложены (упакованы) недостаточно плотно. Поэтому стремление атомов занять места, наиболее близкие друг к другу, приводит к образованию новых типов решеток (рис. 1.3).



**Рис. 1.2.** Расположение элементарных частиц в кристалле: *а* — пространственное изображение; *б* — схема элементарной кристаллической ячейки (простая кубическая)

Кристаллические решетки характеризуют следующие основные параметры: период решетки, координационное число, атомный радиус, энергия решетки, базис и коэффициент компактности решетки. *Периодом решетки* называется расстояние ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) между центрами двух соседних частиц (атомов, ионов) в элементарной ячейке решетки (см. рис. 1.2б).



**Рис. 1.3.** Элементарные ячейки кристаллических решеток: *а, с* — ГПУ; *б, д* — ГЦК; *в, е* — ОЦК

**Координационное число  $K$**  показывает количество атомов, находящихся на наиболее близком и равном 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.

*Коэффициент компактности  $\eta$*  решетки — отношение объема  $V_a$ , занимаемого атомами, ко всему объему решетки  $V_p$ . Для большинства металлов характерны следующие типы кристаллических решеток.

Кубическая объемно-центрированная решетка (ОЦК) имеет период решетки  $a$ , координационное число  $K = 8$ . Коэффициент компактности  $\eta = 68\%$ . Данный тип решетки имеют металлы К, Na, Li, Та, W, Мо, Fe, Cr, Nb.

Кубическая гранецентрированная решетка (ГЦК) характеризуется периодом  $a$ , координационным числом  $K = 12$ , коэффициентом компактности  $\eta = 74\%$ . Кубическую гранецентрированную решетку имеют следующие металлы: Ca, Pb, Ni, Ag, Au, Pt.

Гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ) имеет периоды  $a$  и  $c$ , причем  $c/a = 1,633$ , координационное число  $K = 12$ , коэффициент компактности  $\eta = 74\%$ . Такую решетку имеют металлы: Ru, Cd. Если  $c/a \neq 1,633$ , то получаем гексагональную решетку, характерную для Mg, Zn.

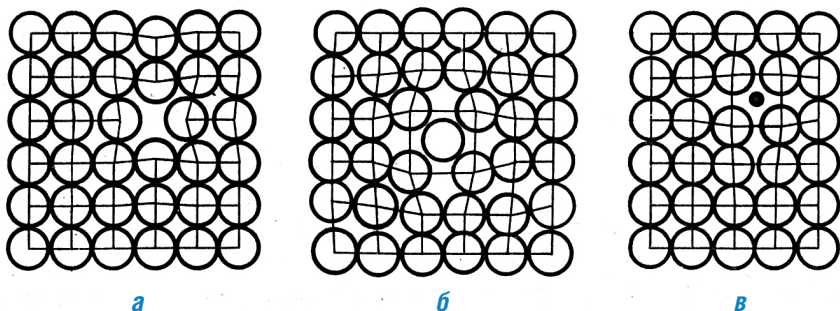
Многие металлы при разных температурах имеют неодинаковые кристаллические решетки. Это явление называется *полиморфизмом*.

Свойства кристаллической решетки в разных направлениях также разные, это объясняется тем, что в разных кристаллографических плоскостях решетки располагается неодинаковое количество атомов (сравним, например, для кубической решетки количество атомов в плоскости, совпадающей с гранью, и диагональной). Различие свойств по разным направлениям называется *анизотропией*.

Строение реальных кристаллов отличается от идеальных. В реальных кристаллах всегда содержатся дефекты, а поэтому нет идеально правильного расположения атомов во всем объеме кристалла.

Дефекты кристаллов подразделяют на точечные, линейные, поверхностные и объемные. Размеры точечного дефекта близки к межатомному расстоянию. У линейных дефектов длина на несколько порядков больше ширины; у поверхностных дефектов мала толщина, а ширина и длина больше ее на несколько порядков. Объемные дефекты (поры, трещины) имеют значительные размеры во всех трех направлениях.

**Точечные дефекты.** К самым простым точечным дефектам относятся вакансии, межузельные атомы основного вещества, чужеродные атомы внедрения (рис. 1.4).



**Рис. 1.4.** Точечные дефекты в кристаллической решетке:  
*а* — вакансия; *б* — межузельный атом; *в* — примесный атом внедрения

*Вакансией* называется пустой узел кристаллической решетки; межузельным атомом называется атом, перемещенный из узла в позицию между узлами.

Вакансии и межузельные атомы появляются в кристаллах при любой температуре выше абсолютного нуля из-за тепловых колебаний атомов. Каждой температуре соответствует равновесная концентрация вакансий, а также межузельных атомов. Например, в меди при температуре 20–25 °С содержится  $10^{-13}$  ат. % вакансий, а вблизи точки плавления — уже 0,01 ат. % (одна вакансия приходится на  $10^4$  атомов).

Пересыщение точечными дефектами достигается при резком охлаждении после высокотемпературного нагрева, при пластическом деформировании и при облучении нейтронами. В последнем случае концентрация вакансий и межузельных атомов одинакова: выбитые из узлов решетки атомы становятся межузельными атомами, а освободившиеся узлы становятся вакансиями. С течением времени избыток вакансий сверх равновесной концентрации уничтожается на свободных поверхностях кристалла, порах, границах зерен и других дефектах решетки. Места, где исчезают вакансии, называются стоками вакансий. Убыль вакансий объясняется их подвижностью и непрерывным перемещением в решетке. Соседний с вакансией атом может занять ее место и оставить свободным свой узел, в который затем переходит другой атом.

Чем выше температура, тем больше концентрация вакансий и тем чаще они переходят от узла к узлу. Вакансии являются самой важной

разновидностью точечных дефектов; они ускоряют все процессы, связанные с перемещениями атомов: диффузия, спекание порошков и т.д.

В ионных и ковалентных кристаллах вакансии и другие точечные дефекты электрически активны и могут быть как донорами, так и акцепторами. Это создает в кристаллах преобладание определенного типа проводимости. В ионных кристаллах электрическая нейтральность кристалла сохраняется благодаря образованию пары точечных дефектов: вакансия — ион, у которых электрические заряды имеют противоположные знаки.

Все виды точечных дефектов искажают кристаллическую решетку и в определенной мере влияют на физические свойства. В технически чистых металлах точечные дефекты повышают электросопротивление, а на механические свойства почти не влияют. Лишь при больших концентрациях дефектов в облученных металлах понижается пластичность, и заметно изменяются другие свойства.

**Линейные дефекты.** Важнейшие виды линейных несовершенств — краевые и винтовые дислокации (рис. 1.5). *Краевая дислокация* в сечении представляет собой край «лишней» полуплоскости в решетке (рис. 1.5а). Вокруг дислокаций решетка упруго искажена.

Винтовые дислокации (рис. 1.5б) могут быть правовинтовые и левовинтовые. При образовании винтовой дислокации сдвиг кристалла вдоль линии дислокации осуществляется вверх или вниз на одно межатомное расстояние.

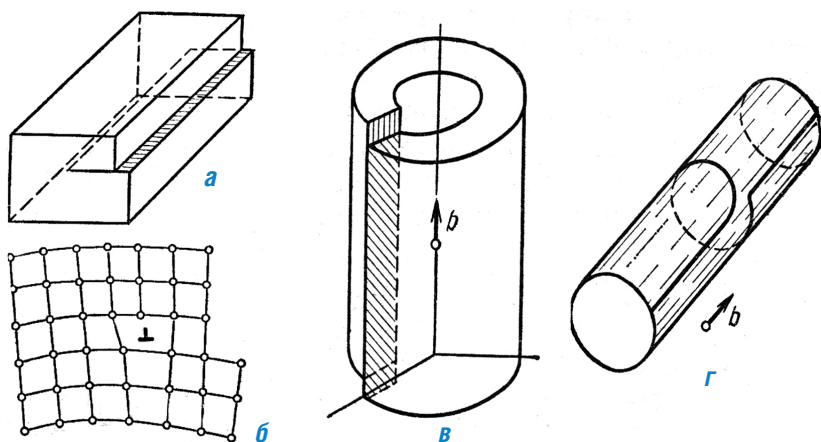


Рис. 1.5. Схемы краевой (а, б), винтовой (в) и геликоидальной (г) дислокации

Мерой искажения служит так называемый вектор Бюргерса. Он получается, если обойти замкнутый контур в идеальном кристалле (рис. 1.6а), переходя от узла к узлу, а затем этот же путь повторить в реальном кристалле, заключив дислокацию внутрь контура. Как видно из рис. 1.6б, в реальном кристалле контур окажется незамкнутым. Вектор, который нужен для замыкания контура, называется вектором Бюргерса. У краевой дислокации вектор Бюргерса равен межатомному расстоянию и перпендикулярен дислокационной линии, у винтовой дислокации — параллелен ей.

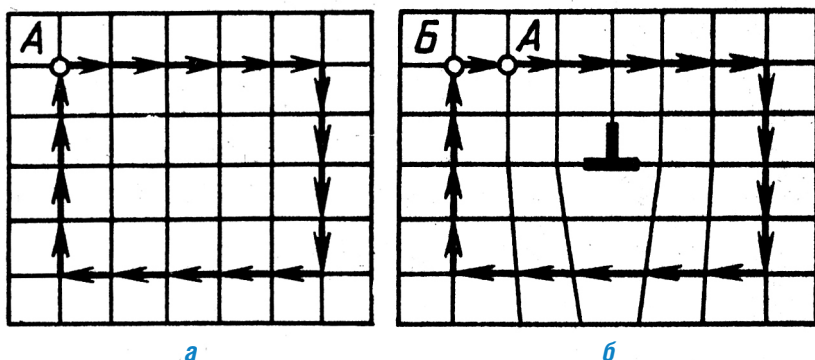
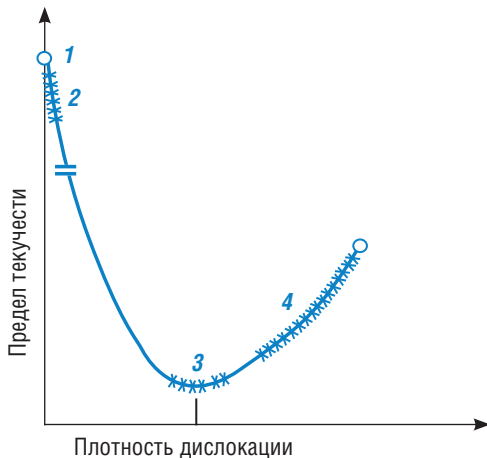


Рис. 1.6. Определение вектора Бюргерса БА

*Плотность дислокаций* — суммарная длина всех линий дислокаций в единице объема. У отожженных металлов плотность дислокаций составляет  $10^6$ – $10^8$  см<sup>-2</sup>. При холодном пластическом деформировании плотность дислокаций возрастает до  $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Попытка увеличить плотность свыше  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> быстро приводит к появлению трещин и разрушению металла. Дислокации появляются при кристаллизации, плотность их большая, поэтому они значительно влияют на свойства материалов. Дислокации наряду с другими дефектами участвуют в фазовых превращениях, рекристаллизации, служат готовыми центрами при выпадении второй фазы из твердого раствора. Вдоль дислокаций скорость диффузии на несколько порядков выше, чем через кристаллическую решетку без дефектов.

Дислокации служат местом концентрации примесных атомов, в особенности примесей внедрения, так как это уменьшает искажения решетки. Примесные атомы образуют вокруг дислокации зону повышенной концентрации — так называемую атмосферу Коттрелла, которая мешает движению дислокаций и упрочняет металл.

Особенно велико влияние дислокаций на прочность кристаллов. Благодаря подвижным дислокациям экспериментально определенный предел текучести металлов в 1000 раз меньше теоретического значения. При значительном увеличении плотности дислокаций и уменьшении их подвижности прочность увеличивается в несколько раз по сравнению с отожженным состоянием. Прочность бездефектных участков (в том числе длинных и тонких «усов», полученных кристаллизацией из газовой фазы) приближается к теоретической (рис. 1.7).



**Рис. 1.7.** Зависимость предела текучести от плотности дефектов:

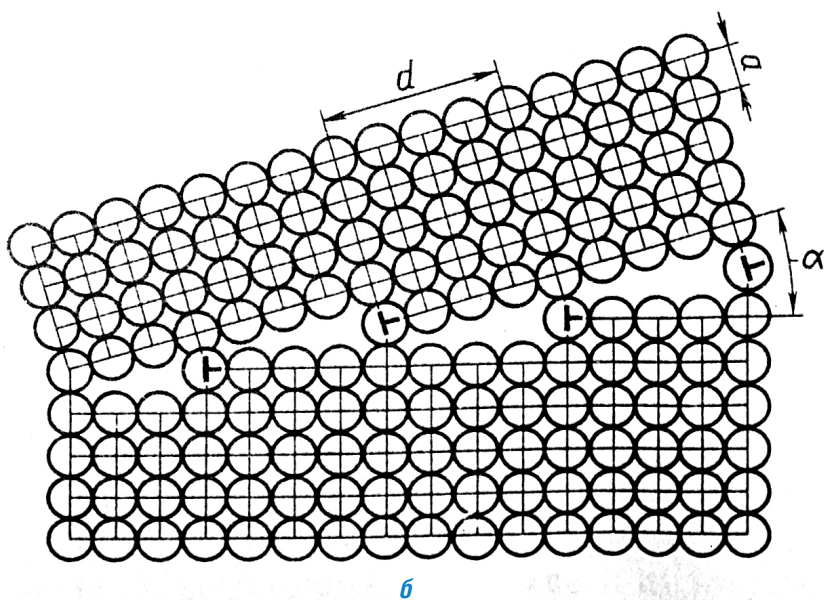
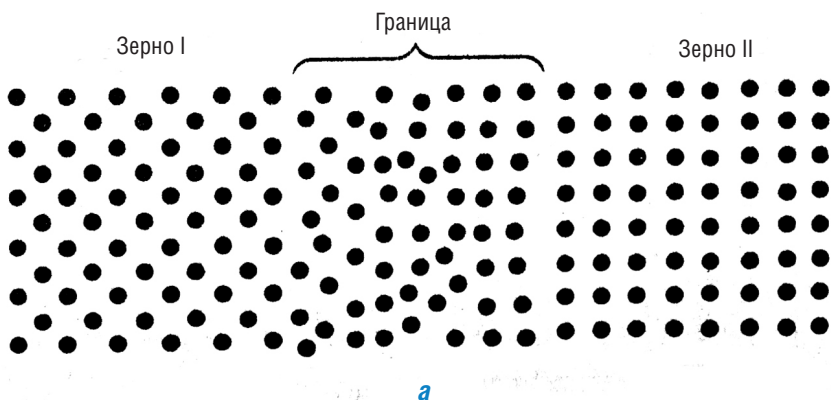
- 1 — идеальный кристалл без дефектов; 2 — бездефектные кристаллы «усы»;
- 3 — отожженные металлы; 4 — металлы с увеличенной плотностью дефектов после обработки

**Поверхностные дефекты.** Наиболее важными поверхностными дефектами являются большеугловые и малоугловые границы, дефекты упаковки, границы двойников.

В промышленности применяют как поликристаллические, так и монокристаллические материалы. Поликристаллический сплав содержит огромное число мелких зерен. В соседних зернах решетки ориентированы различно (рис. 1.8), и граница между зернами представляет собой переходный слой шириной 1—5 нм. В нем нарушена правильность расположения атомов, имеются скопления дислокаций, повышена концентрация примесей.

Границы между зернами называются большеугловыми, так как соответственные кристаллографические направления в соседних зернах образуют углы в десятки градусов (рис. 1.8a). Каждое зерно, в свою очередь, состоит из субзерен или блоков.





**Рис. 1.8.** Схемы строения большеугловых (а) и малоугловых (б) границ

Субзерно представляет собой часть кристалла относительно правильного строения. Границы субзерен представляют собой стенки дислокаций, которые разделяют зерно на отдельные субзерна или блоки (рис. 1.8б). Угол взаимной разориентации между соседними субзернами невелик (не более пяти градусов), поэтому такие границы называются малоугловыми. На малоугловых границах также скапливаются примеси.

Дефект упаковки представляет собой часть атомной плоскости, ограниченную дислокациями, в пределах которой нарушен нормальный порядок чередования атомных слоев. Например, в сплавах с ГЦК решеткой чередуются плотноупакованные слои *ABCABCAB...*, а при прохождении через дефект упаковки слои чередуются в последовательности *ABC BC ABC...* Чередование слоев *BCBC...* типично для кристаллов с ГПУ решеткой, и, таким образом, дефект упаковки представляет собой как бы тонкую пластинку с ГПУ решеткой в ГЦК решетке.

Поверхностные дефекты влияют на механические и физические свойства материалов. Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Аналогично, но более слабо влияет на механические свойства размер субзерен.

Вдоль границ зерен и субзерен быстро протекает диффузия (во много раз быстрее, чем сквозь кристалл), особенно при нагреве. Взаимодействие между дефектами, перемещения их в кристаллах, изменение концентрации дефектов — все это отражается на свойствах и имеет большое практическое значение.

Двойником называется часть кристалла, в которой кристаллическое строение является зеркальным отражением остальной части кристалла.

Еще одним видом плоских дефектов являются дислокационные стенки. *Дислокационная стенка* — это скопление дислокаций одного знака в плоскости (плоская стенка) или вдоль определенной поверхности (так называемые границы кручения).

### 1.3. ПЛАВЛЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Переход металла из жидкого состояния в твердое называется первичной кристаллизацией. Она протекает вследствие перехода системы из термодинамически неустойчивого состояния в термодинамически устойчивое состояние, то есть из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией.

Энергетическое состояние системы принято характеризовать свободной энергией. Свободной энергией называется часть полной энергии вещества, которая обратимо изменяет свою величину при изменении температуры, полиморфных превращений, плавлении и т.д. С повышением температуры величина свободной энергии уменьшается.

При равновесной температуре  $T_S$  величины свободных энергий металла в жидком и твердом состояниях равны; металл в обоих состояниях находится в равновесии. При температуре выше  $T_S$  более устойчив

жидкий металл, имеющий меньший запас свободной энергии, а ниже этой температуры устойчив твердый металл. Процесс кристаллизации будет развиваться, если жидкий металл охладить ниже  $T_S$ .

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

$$\Delta T = T_S - T_k, \quad (1.1)$$

Процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое можно описать с помощью кривых в координатах «температура — время». На рис. 1.9 показаны кривые охлаждения, характеризующие процесс кристаллизации чистых металлов при охлаждении с разной скоростью  $V$ . При очень медленном охлаждении степень переохлаждения мала, и при температуре кристаллизации на кривой появляется горизонтальная площадка (остановка в падении температуры), образование которой объясняется выделением *скрытой теплоты кристаллизации*.

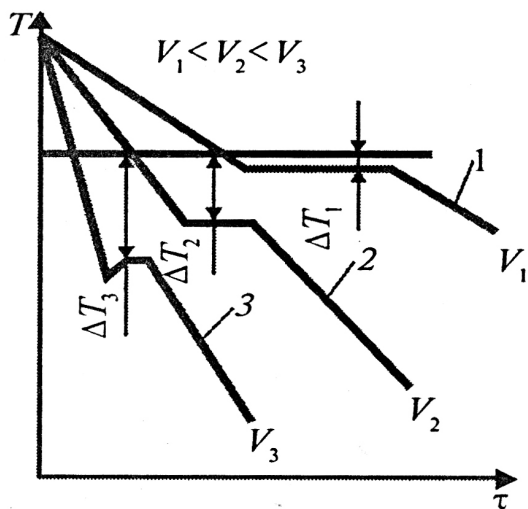


Рис. 1.9. Кривые охлаждения чистого металла

Во время плавления происходит поглощение теплоты, которая расходуется на повышение энергии атомов, то есть на «разрушение» кристаллической решетки металла. Эта теплота называется *скрытой*. В процессе кристаллизации происходит обратное выделение энергии в виде *скрытой теплоты кристаллизации*. Она компенсирует тепло, которое отводится в окружающую среду, и задерживает падение температуры.

С увеличением скорости охлаждения степень переохлаждения возрастает (кривые 2 и 3) и процесс кристаллизации протекает при температурах, значительно более низких, чем равновесная температура кристаллизации.

Степень переохлаждения зависит от природы и чистоты металла. Чем чище металл, тем при большей степени переохлаждения возникают зародыши твердых кристаллов.

Схематически процесс кристаллизации показан на рис. 1.10. Вначале во многих участках жидкого сплава образуются кристаллические зародыши. 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 контактируемых участках рост граней прекращается. Кристалл растет лишь в том направлении, где он соприкасается с жидкостью. В результате растущие кристаллы, имеющие сначала геометрически правильную форму, после затвердевания получают неправильную внешнюю форму. Их называют *зернами*, или *кристаллитами*.

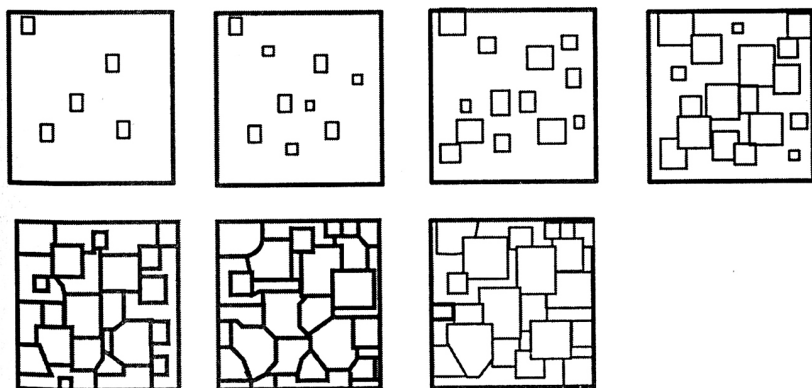


Рис. 1.10. Схема процесса кристаллизации металла

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

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