



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

РЕДАКЦИОННЫЙ
С О В Е Т

Председатель
Л.А. ПУЧКОВ

Зам. председателя
Л.Х. ГИТИС

Члены редсовета
И.В. ДЕМЕНТЬЕВ

А.П. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

В.В. КУРЕХИН

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*ректор МГГУ,
чл.-корр. РАН*

*директор
Издательства МГГУ*

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

С.В. РЖЕВСКАЯ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*Издание 3-е, переработанное
и дополненное*

*Рекомендовано Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Горное дело»*

МОСКВА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2 0 0 3



УДК 622:620.2
ББК 30.3
Р 48

*Федеральная целевая программа
«Культура России»*

Рецензенты:

Б.А. Гурович — д-р техн. наук, проф., нач. лаборатории Российского научного центра «Курчатовский институт»

В.С. Соколов — канд. техн. наук, доц., и. о. зав. кафедрой «Материаловедение» Академии химического машиностроения

Ржевская С.В.

Р 48 **Материаловедение: Учеб. для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. — 456 с.**

ISBN 5-7418-0068-8 (в пер.)

Изложены на единой физической основе взаимосвязь состава, строения, структуры и свойств различных материалов, а также их изменение под воздействием внешних факторов. Представлены все виды материалов, использующихся в горно-добывающей промышленности, причем по конкретным материалам приведены сведения о составе, строении, структуре, основных физических и потребительских свойствах, классификации, маркировке и способах воздействия на свойства. Рассмотрены способы защиты материалов от коррозии и изнашивания.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Горное дело». Может быть полезна аспирантам и инженерам.

УДК 622:620.2
ББК 30.3

ISBN 5-7418-0068-8

© С.В. Ржевская, 2000, 2003

© Издательство МГГУ, 2000, 2003

© Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2003

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Материаловедение» является одной из основных дисциплин, определяющих уровень подготовки бакалавров во всех средних и высших учебных заведениях. Значение этой дисциплины определяется широким диапазоном материалов, используемых в практической деятельности во всех отраслях народного хозяйства. Достаточные знания, полученные в области материаловедения, должны обеспечивать в производственных процессах рациональное и эффективное использование материалов при соблюдении требований экономии, экологии и безопасности труда.

Изучение курса «Материаловедение» должно обеспечить решение следующих задач при подготовке бакалавров в области горного дела:

получить прочные знания об основных закономерностях, определяющих строение и свойства материалов, о методах их обработки, о поведении материалов в основных процессах эксплуатации или потребления;

научить выполнять наиболее широко применяемые в технике методы испытания качества материалов;

дать навыки самостоятельного пользования нормативной документацией (НД) и справочной литературой для выбора основных промышленных, а также новых перспективных материалов и эффективных методов их использования в зависимости от условий их применения.

Учебник поможет будущим инженерно-техническим работникам увязать свои теоретические знания с практической работой и облегчить понимание специальной литературы по материаловедению, а специалистам, имеющим практический опыт работы, — обновить теоретические знания.

Автор не претендует на исчерпывающую полноту изложения всех вопросов материаловедения, а стремится последовательно, на современном научном уровне, в доступной форме изложить необходимый объем знаний, предусмотренных программой дисциплины «Материаловедение» и учебными планами специальностей. Первая глава дает представление о взаимосвязях состава, строения и свойств различных материалов, способах воздействия на материалы для получения требуемого комплекса свойств. Каждая последующая глава объединяет информацию об определенной группе материалов, что позволяет выявить общие закономерности их структуры и свойств.

Более мелким шрифтом в учебнике приведены необходимые справочные и информационные сведения.

Во втором издании учебника учтены замечания, сделанные к первому изданию. Автор признателен коллегам за их замечания, которые способствовали совершенствованию учебника, и выражает глубокую благодарность проф., д-ру техн. наук Ю.А. Скакову, доц., канд. техн. наук К.И. Шаховой и доц., канд. техн. наук Н.Б. Шубиной за целый ряд ценных советов и замечаний.

ВВЕДЕНИЕ. Материаловедение: сущность, теория, практика

1. Основные понятия

В практической деятельности нас окружают вещества.

Вещество — вид материи, совокупность дискретных (прерывных) образований (атомы, молекулы и то, что из них построено), обладающих массой покоя.

Существование веществ в инженерной практике можно охарактеризовать некоторым жизненным циклом, включающим в себя следующие стадии:

- постановка задачи использования;
- научно-исследовательская работа;
- проектно- и опытно-конструкторские работы;
- технологическая подготовка производства;
- изготовление;
- испытание;
- эксплуатация или потребление, хранение, транспортирование, восстановление или ремонт и др.

В зависимости от стадии своего жизненного цикла вещество рассматривается как сырье, материал или изделие.

Сырье — вещество, предназначенное для дальнейшей переработки.

Материал — вещество, предназначенное для изготовления чего-нибудь.

В производственных процессах материалы рассматривают в зависимости от их роли как *основные* и *вспомогательные*.

Материалы основные — материалы, которые непосредственно расходуются на изготовление продукции и составляют ее главное вещественное содержание.

На предприятиях горно-добывающей промышленности к основным материалам по существу относятся только материалы, затрачиваемые на производство запасных частей, металлических изделий, тары и т. д. Принципиальное отличие горного дела от других отраслей заключается в том, что основным материалом для него являются полезные ископаемые.

Материалы вспомогательные — материалы, применяемые для производства, но не входящие в состав продукции.

На горных предприятиях к вспомогательным относятся почти все потребляемые материалы (лесные материалы, взрывчатые вещества, смазочные масла, топлива и др.).

Изделие (продукция) — конечный результат человеческого труда (обработки, переработки, исследования и т.п.).

Основным объектом дальнейшего изучения будут являться материалы, используемые в горно-добывающей промышленности.

2. Значение, цели и задачи дисциплины «Материаловедение» для подготовки бакалавров в области горного дела.

Взаимосвязь с другими дисциплинами

Материаловедение — наука, изучающая в общей связи состав, строение, структуру и свойства материалов, а также закономерности их изменения под тепловым, химическим, механическим и другими воздействиями.

Состав материала — количественная характеристика содержания в нем компонентов.

Составы различают по природе компонентов. Так, рассматривают химический, минеральный и другие составы.

Химический состав — количественная характеристика содержания в нем химических элементов или их соединений (например, оксидов).

Минеральный состав — количественная характеристика содержания минералов в каменном материале.

Минералом называют природное тело, однородное по химическому составу и физическим свойствам. Минерал является продуктом физико-химических процессов, происходящих в земной коре.

Строение материала — совокупность устойчивых связей вещества, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе, то есть сохранение основных свойств.

Структура материала — форма, размеры и характер взаимного расположения образующих его компонентов.

Свойство материала — признак, составляющий его отличительную особенность.

Задачами изучения «Материаловедения» являются установление связей состава, строения и структуры материалов с их свойствами и на этой основе формирование и сохранение необходимых свойств.

Основная практическая задача материаловедения в области горного дела — выбор материала, обладающего заданным комплексом свойств, и его рациональное использование для повышения эффективности технологических процессов горного производства.

Содержание дисциплины базируется на знании общетехнических дисциплин: химии, физики, термодинамики, физической химии, а также большого числа специальных дисциплин, например, термической обработки.

3. Общие требования, предъявляемые к материалам в зависимости от условий использования, применения или эксплуатации

Возможность использования материала определяется его составом, строением, структурой и, следовательно, свойствами. При этом требования, предъявляемые к материалам в промышленности в зависимости от условий их использования, эксплуатации или потребления, определяются понятием *«качество материала»*.

Качество материала — совокупность его свойств, обуславливающих пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением.

Во всех странах задача обеспечения качества, в том числе продукции, имеет важнейшее значение и рассматривается на государственном уровне. Существуют следующие виды обеспечения качества:

- научное;
- организационное;
- нормативно-техническое;
- метрологическое;
- информационное;
- правовое;
- материально-техническое.

Материаловедение дает возможность научного обеспечения качества веществ и материалов.

Организационное обеспечение решается органами Госстандарта России, в задачи которого входит руководство такими органами, как Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов.

Стандартные образцы веществ и материалов — осязаемые объекты. Во многих случаях это прототипы либо образцы коммерческих материалов — цемента, стали, стекла с аттестованным составом. Иногда это природные вещества, например, горные породы, почва или ткани растений.

Изначально стандартные образцы веществ и материалов применялись для контроля качества в промышленности, особенно в отраслях, связанных с металлообработкой. В ряде случаев стандартные образцы веществ и материалов помогали заключению торговых сделок. Пример такого рода — продажа железной руды, количество которой исчисляется миллионами тонн, а цена прямо связана с содержанием железа. Отклонение концентрации железа в руде примерно на 0,1 % увеличивает или уменьшает стоимость груза крупного рудовоза на тысячи у.е.

Надежные измерения химического состава стандартных образцов веществ и материалов способствуют принятию важных решений для случаев:

определения пригодных материалов и готовой продукции для производств, где химический состав продукции регламентирован;

контроля состояния здоровья и профилактики болезней, например при профессиональных заболеваниях;

выявления возможности нарушения закона, например, при анализе выхлопных газов автомобилей и сравнении результатов со стандартными образцами;

установления совершения преступления при судебной экспертизе.

Для регистрации стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, типы которых признаны в качестве межгосударственного стандартного образца (МСО) стран СНГ, предназначен Реестр МСО. Он является источником официальной информации о результатах создания и признания типов МСО.

Создание стандартных образцов веществ и материалов — дело дорогостоящее и к тому же требует широких технических знаний и большого опыта. Разработка новых стандартных образцов веществ и материалов почти всецело определяется рыночным спросом.

В мире 20 тыс. стандартных образцов веществ и материалов. Компьютерный банк данных «Кодекс образцовых веществ» (COMAR) содержит информацию о 12 тыс. стандартных образцов веществ и материалов из 20 стран. В базу данных включены: название и общее описание вещества, название и адрес изготовителя, форма вещества, аттестованные свойства, их значения и область применения. Центры кодирования COMAR действуют в 14 странах. Необходимую информацию можно получить на Web-сайте и в центральном секретариате COMAR.

Нормативно-техническое и метрологическое обеспечения качества также решаются государственной системой стандартизации на основе систем стандартов, среди которых:

государственная система стандартизации (ГСС);

система показателей качества (СПК);

государственная система обеспечения требуемой точности и единства измерений (ГСИ);

государственная система стандартных справочных данных (ГС ССД) и др.

ГСИ и ГС ССД используют образцовые вещества и химические эталоны, что формирует основу единства измерений и обеспечивает точность результатов, калибровку оборудования, мониторинг лабораторий и методов оценки, а также способствует сличению методов при использовании этих веществ в качестве эталонов сравнения. Они должны быть четко маркированы, что позволяет проводить их однозначную идентификацию со ссылкой на соответствующие сертификаты и другую документацию.

Обязательные требования к качеству продукции, в том числе веществ и материалов, базируются на показателях СПК. Они включены в государственные стандарты Российской Федерации — стандарты на продукцию, а именно:

стандарты общих технических условий, которые содержат общие требования к группам однородной продукции;

стандарты технических условий, которые содержат требования к конкретной продукции.

Стандарт общих технических условий в общем случае содержит следующие разделы:

классификацию, основные параметры и (или) размеры;

общие технические требования;

требования безопасности;

требования охраны окружающей среды;

методы контроля;

правила приемки;

транспортирование и хранение;

указания по эксплуатации (ремонту, утилизации);

гарантии изготовителя.

Номенклатуру, состав, содержание и наименование разделов (подразделов) определяют в соответствии с особенностями стандартизируемой продукции и характером предъявляемых к ней требований.

Стандарт технических условий устанавливает для одной или нескольких марок, сортов и т.п. продукции всесторонние требования, соблюдение которых должно обеспечиваться при производстве, поставке, потреблении (эксплуатации), ремонте и утилизации данной продукции.

Окончательная оценка пригодности тех или иных материалов для конкретного использования дается на основании натурных испытаний, установленных требованиями государственных стандартов.

Задачи информационного обеспечения качества веществ и материалов решает Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ Госстандарта России (ВНИЦ СМВ). ВНИЦ СМВ располагает информационным центром стандартов, который комплектуется таблицами рекомендуемых и стандартных данных по свойствам материалов и веществ, методиками ГС ССД, паспортами безопасности материалов и веществ, копиями аттестатов аккредитации органов по сертификации испытательных лабораторий (центров), государственными реестрами и копиями сертификатов соответствия (безопасности) на продукцию. Кроме того, в этом центре имеются авторские свидетельства об изобретении (разделы по материалам, веществам и методы их получения).

Правовое обеспечение качества гарантируется основными законами РФ и, в первую очередь, Законом о защите прав потребителей.

Материально-техническое обеспечение качества определяется условиями производства и обращения материалов.

4. Системный подход к изучению строения, структуры и свойств материалов

Различные материалы можно рассматривать по происхождению, виду сырья, способу получения, назначению, особым свойствам и другим признакам.

В настоящее время наибольшее распространение получила систематизация материалов, которую можно назвать «отраслевой», так как в ее основу положено наименование одной из отраслей народного хозяйства, непосредственно связанной с производством или применением данного материала:

- полезные ископаемые;
- нефтяные продукты;
- металлы;
- электротехнические материалы;
- стройматериалы;
- силикатно-керамические и углеродные материалы;
- лесоматериалы; целлюлоза, бумага, картон;
- химические продукты и резиноасбестовые изделия;
- химические волокна;
- текстильные и кожевенные материалы и др.

К сожалению, данная систематизация не только не позволяет установить взаимосвязи состава, строения, структуры и свойств материалов, но в ряде случаев даже однозначно отнести материал по принадлежности к той или иной группе.

Наибольшие возможности для решения задач материаловедения предоставляет систематизация веществ по их агрегатным состояниям в нормальных (по температуре и давлению) условиях. При этом внутри каждой группы (твердое, жидкое или газообразное вещество) есть возможность учесть вид образующих его частиц, состав, физическую природу, строение и структуру, а также происхождение.

Такая систематизация (рис. 1) позволяет решать главную задачу материаловедения — выбор материала с заданными свойствами для

Системное представление веществ:

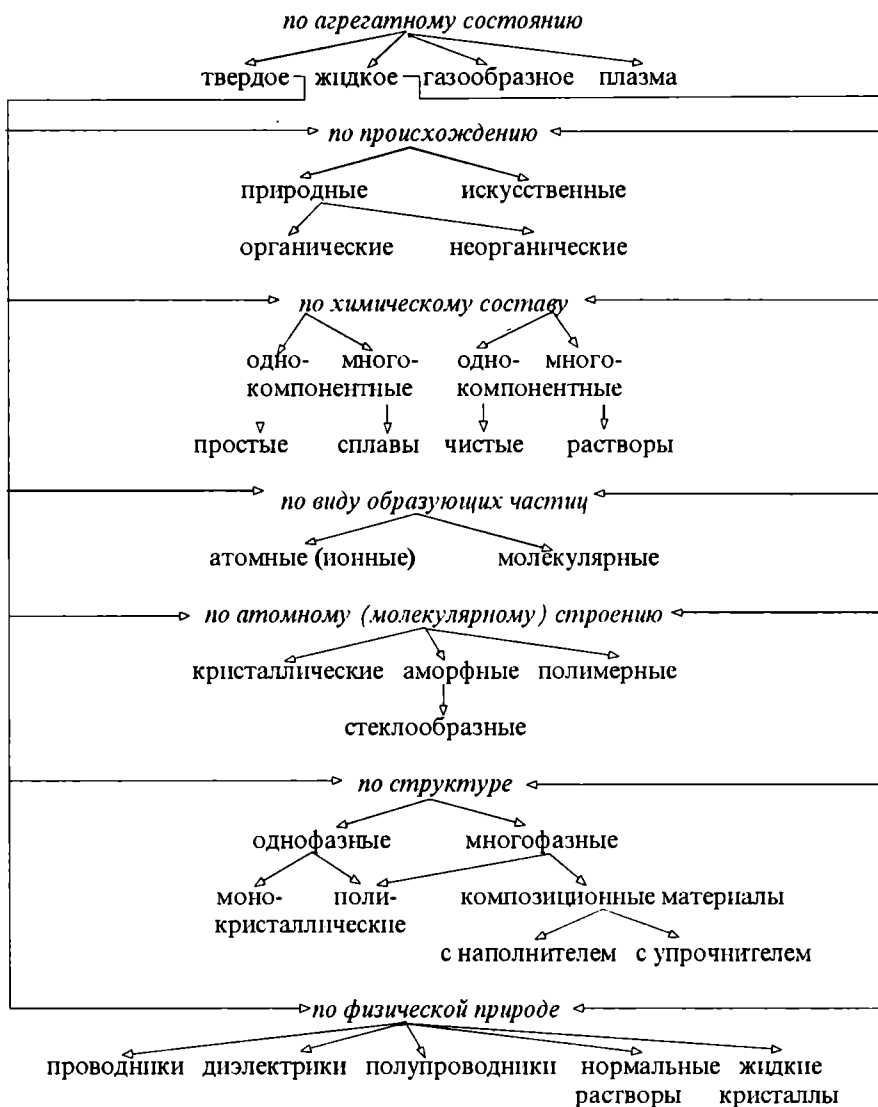


Рис. 1. Системное представление веществ по их происхождению и агрегатному состоянию

наиболее эффективного использования в инженерной практике, так как положение вещества в схеме не только однозначно отвечает на вопрос о свойствах, но и дает возможность получить рекомендации по улучшению этих свойств стандартным набором технологических операций.

Именно такое системное представление положено в основу настоящего учебника.

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О СТРОЕНИИ, СТРУКТУРЕ И СВОЙСТВАХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Агрегатные состояния веществ

1.1.1. Общие сведения

По происхождению (генезису) вещества и материалы рассматривают как *природные* и *искусственные*.

Генезис — происхождение, возникновение; в широком смысле — момент зарождения и последующий процесс развития, приведший к определенному состоянию, виду, явлению.

Природные материалы получают непосредственно из природного сырья путем механической обработки, но без изменения первоначального химического состава и структуры. Эти материалы сохраняют основные свойства исходного сырья. Например, природный песок, который перед употреблением только очищают от примесей и в отдельных случаях сортируют по размеру зерен.

Искусственные материалы, получаемые после специальной переработки природного или искусственного сырья, по физико-химическим свойствам значительно отличаются от исходного сырья. Так, из глины, легко размокающей в воде, получают после формования и обжига водостойкие керамические материалы (кирпич, облицовочные плитки).

По своему *агрегатному состоянию* все вещества и материалы существуют как твердые, жидкие и газообразные. Каждое агрегатное состояние характеризуется определенным строением вещества и соответственно определенными свойствами. Четвертым агрегатным состоянием часто считают плазму.

Агрегатные состояния вещества — состояния одного и того же вещества (вода, железо, сера и др.), переходы между которыми сопровождаются скачкообразным изменением ряда физических свойств (например, плотности).

Все вещества (за некоторым исключением) могут существовать в каждом из трех агрегатных состояний. Реализация того или иного агрегатного состояния вещества зависит от физических условий, в которых оно находится, главным образом, от температуры и давления. Так, дистиллированная вода при нормальном давлении $p = 101325$ Па и при температуре $t = 0^\circ\text{C}$ кристаллизуется в лед, а при 100°C кипит и превращается в пар.

Изменение агрегатных состояний сопровождается подводом или выделением энергии, что отвечает переходам соответственно к агрегатным состояниям с более высокой или более низкой температурой.

Твердое состояние вещества — агрегатное состояние вещества, характеризующееся стабильностью формы. Вещества в твердом состоянии называют *твердыми веществами*.

Твердые вещества по химическому составу рассматривают как *одно-* (простые) и *двух-* (и более) *компонентные сплавы*, а в зависимости от внутреннего строения все твердые вещества разделяют на *кристаллические* и *аморфные*.

Компонент — составная часть, элемент, в данном случае химический.

Кристаллические вещества — это вещества в твердом состоянии, для которых характерно *кристаллическое строение*, т.е. периодическое трехмерное расположение атомов (молекул).

Кристаллические вещества могут существовать в виде *кристаллов*, а также *поликристаллических (поликристаллов)*, *камневидных* и *разрыхленных агрегатов*.

Кристаллы — состояние твердых веществ, приобретающих при равновесных условиях образования естественную форму правильных многогранников, отражающую симметрию атомного строения и обладающих *анизотропией* физических свойств. Крупные одиночные кристаллы называются *монокристаллами*.

Анизотропия — различие значений свойств (деформационных, электрических, магнитных, тепловых, оптических и др.) в материале по разным направлениям.

Поликристаллы — агрегаты из большого числа отдельных беспорядочно ориентированных мелких кристаллов (кристаллитов), связанных между собой силами сцепления, которые обычно слабее внуткристаллических. Большинство твердых материалов являются поликристаллами. Таковы, например, технические металлы и сплавы, многие материалы из горных пород.

Камневидные агрегаты — это агрегаты из большого числа отдельных беспорядочно ориентированных мелких кристаллов, связь между которыми осуществляется вяжущим (цементирующим) веществом.

Поликристаллы и камневидные агрегаты в целом изотропны по физическим свойствам.

Разрыхленные (раздельно-зернистые, дисперсные) агрегаты — механическая смесь частиц (кусков, зерен), не связанных между собой. Примером разрыхленных агрегатов являются песок, гравий, цемент.

Разрыхленные агрегаты образуются в результате разрушения (разрыхления, дробления, измельчения) поликристаллических или камневидных агрегатов. Разрыхление, дробление и измельчение характеризуют стадии разрушения по крупности получаемых агрегатов. При этом измельчение (диспергирование) твердого тела по существу представляет собой поверхностное явление, так как выражается в создании новой поверхности раздела. При достаточно большой суммарной поверхности в измельченных материалах процессы растворения, коррозии, испарения, конденсации, кристаллизации определяются величиной и свойствами этой поверхности.

Дисперсность — характеристика размера частиц (степени измельчения) какого-либо тела в дисперсных агрегатах. Мера дисперсности — отношение общей поверхности всех частиц к их суммарному объему.

При размерах частиц 1...100 нм (ультрадисперсное состояние) обнаруживаются все особенности поверхностных состояний, так как в данном случае теряется понятие объема. Ультрадисперсное состояние является неравновесным. Дисперсные частицы могут образовывать хлопья и сгустки, на их поверхности часто происходят химические превращения. Так, диспергирование применяют, например, при подготовке материалов для изготовления изделий по порошковой технологии, в производстве минеральных вяжущих веществ, пигментов, наполнителей полимерных материалов и др.

Аморфные вещества — это вещества в твердом состоянии, строение которых обуславливает изотропию физических свойств и отсутствие точки плавления (переход из твердого состояния в жидкое происходит постепенно).

В природе аморфное строение вещества менее распространено, чем кристаллическое. Аморфное строение характерно, например, для опала, обсидиана, янтаря, смолы, битума и полимеров.

Кристаллическое строение вещества может быть переведено в аморфное строение различными видами физического и химического воздействий. Из раствора кристаллического вещества можно получить высушенный гель, из расплава — стекло, из пара — аморфный осадок и т. п. Так, с аморфным строением искусственно получен ряд металлов (металлическое стекло), а также полупроводники (аморфные полупроводники).

Особым видом состояния твердых веществ с аморфным строением является *стеклообразное состояние*.

Стеклообразное состояние вещества — агрегатное состояние вещества с аморфным строением, формирующееся при затвердевании переохлажденного расплава и обладающее в результате постепенного увеличения вязкости механическими свойствами твердых тел. Переход из стеклообразного состояния в расплав и из расплава в стеклообразное состояние характеризуется температурным интервалом. Обратимость этого перехода является особенностью, которая отличает стеклообразное состояние от других аморфных.

В стеклообразном состоянии может находиться значительное число простых веществ (S, Se, As, P); оксидов (B_2O_5 , SiO_2 , GeO_2); водных растворов H_2O_2 , H_2SO_4 , H_3PO_4 ; халькогенидов ряда элементов (As, Ge, P); некоторых галогенидов и карбонатов. Многие из этих веществ составляют основу сложных по составу неорганических стекол.

Жидкое состояние вещества (жидкость) — агрегатное состояние вещества, обладающее свойством течь и принимать форму сосуда, в котором оно находится.

Жидкостям присущи некоторые черты твердых (они сохраняют свой объем, образуют поверхность, обладают определенной прочностью на разрыв) и газообразных (принимают форму сосуда, в котором находятся; могут непрерывно переходить в газ) веществ; в то же время они обладают рядом только им присущих особенностей, из которых наиболее характерная — текучесть.

Жидкости можно классифицировать *по химическому составу и физической природе*.

По химическому составу различают *однокомпонентные жидкости* — *чистые жидкости* и *двух- или многокомпонентные жидкие смеси* — *растворы*.

Практически все жидкости, встречающиеся в природе, представляют собой растворы.

Растворимость — способность вещества в смеси с одним или несколькими другими веществами образовывать однородные системы — растворы.

Растворимость одного компонента в другом происходит в некоторых пределах изменения концентраций. Твердые вещества растворяются в жидкостях только до определенной концентрации, зависящей от температуры и называющейся концентрацией насыщения. Жидкости также могут смешиваться между собой, но не все жидкости растворимы друг в друге и не смешиваются друг с другом неограниченно.

Растворы по концентрации растворенного вещества подразделяются на *насыщенные*, *ненасыщенные* и *пересыщенные*. В зависимости от величины частиц растворенного компонента различают *истинные растворы* и *дисперсные системы*.

Истинный раствор — однородные смеси двух или большего числа веществ (компонентов), которые равномерно распределены в растворе в виде отдельных атомов, ионов или молекул. Частицы растворенного вещества перемещаются с молекулами *растворителя* самопроизвольно в результате диффузии. Истинные растворы всегда прозрачны и устойчивы в течение длительного времени.

Растворители — неорганические (главным образом, вода) или органические (бензол, хлороформ, ацетон, спирты и др.) соединения, а также смеси (например, бензин), способные растворять различные вещества. Основные требования к растворителям — химическая инертность по отношению к растворяемому веществу, доступность и дешевизна.

Дисперсные системы — это смеси, состоящие из множества мелких частиц (дисперсная фаза, растворенное вещество) какого-либо вещества, находящихся в однородной среде другого вещества (дисперсионная среда, растворитель). Дисперсные системы характеризуются сильно развитой поверхностью раздела между частицами.

Дисперсные системы называются по-разному в зависимости от агрегатного состояния растворенного вещества и растворителя. Так, если в твердом растворителе агрегатное состояние растворенного вещества твердое, жидкое или газообразное, то такие системы соответственно называются *золем*, *гелем* (*пастой*) или *пемзой*. Для жидкого растворителя аналогичные агрегатные состояния растворенного вещества называются *суспензией*, *эмульсией*, *пенной*. Для газообразного растворителя смеси с растворенным веществом в твердом или жидком состояниях называются *аэрозолями*.

По величине частиц (дисперсности) различают *грубодисперсные* и *тонкодисперсные* (коллоидные) системы.

В грубодисперсных системах размеры частиц достаточно велики (их можно видеть под микроскопом); состояние грубодисперсной системы нестабильно: происходит разделение частиц в основном под действием силы тяжести.

Коллоидными системами называются тонкодисперсные смеси молекул растворителя (дисперсионная среда) с частицами растворенного вещества размером $10^{-6} \dots 10^{-4}$ мм.

Коллоидные системы занимают промежуточное положение между истинными растворами и дисперсными системами. Для коллоидных систем в отличие от дисперсных характерно интенсивное бро-

уновское движение частиц дисперсной фазы. Коллоидные системы способны к набуханию, при этом они увеличиваются в объеме.

По физической природе все жидкости делятся на *нормальные жидкости* и *жидкие кристаллы*.

Нормальные жидкости (чистые и растворы) макроскопически однородны и изотропны при отсутствии внешнего воздействия. Их свойства (теплопроводность, вязкость, самодиффузия и др.) при нагревании или уменьшении плотности, как правило, меняются в сторону сближения со свойствами газов. Вблизи же температуры кристаллизации большинство свойств нормальных жидкостей (плотность, сжимаемость, теплоемкость, электропроводность и др.) близки к таким же свойствам соответствующих твердых веществ.

Жидкие кристаллы — особое состояние жидкости с упорядоченным молекулярным строением, характеризующееся анизотропией ряда физических свойств, характерной для твердых кристаллов. Число химических соединений, для которых найдены жидкие кристаллы, составляет несколько тысяч. Жидкие кристаллы образуются также при нагревании некоторых твердых веществ до начала их плавления.

Жидкие кристаллы обладают анизотропией упругости, электропроводности, магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости, оптической анизотропией, сегнетоэлектрическими свойствами и др.

Анизотропию создает *ориентационный порядок* в расположении молекул. Ориентационная упорядоченность в жидком кристалле зависит от состояния поверхности и легко изменяется под действием давления, механических нагрузок, электрических и механических полей, нагрева.

Практическое применение находят электрооптические свойства жидких кристаллов. Они применяются в буквенно-цифровых индикаторах (электронные часы, калькуляторы и др.), в различного рода управляемых экранах и оптических электронных приборах.

Газообразное состояние вещества (газ) — агрегатное состояние вещества, в котором его частицы не связаны или весьма слабо связаны силами взаимодействия и движутся свободно, равномерно заполняя в отсутствие внешних полей весь предоставленный им объем.

В газообразное состояние можно перевести любое вещество надлежащим подбором давления и температуры. Прямое превращение вещества из твердого состояния в газообразное называется *сублимацией (возгонкой)*.

Плазма — частично или полностью ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически равны. Ионизация газа может быть вызвана температурным воздействием, электромагнитным излучением или бомбардировкой заряженными частицами. Низкотемпературная плазма ($T \sim 10^6 \dots 10^8 \text{ K}$)

используется в различных газоразрядных приборах (газовых лазерах, ионных приборах и т.д.), а также в технике (например, плазменных двигателях).

1.1.2. Строение однородных веществ в различных агрегатных состояниях

Строение веществ определяется характером сил взаимодействия между составляющими его структурными частицами (атомами, молекулами или ионами).

Силы взаимодействия представляют собой равнодействующую сил отталкивания и притяжения, компенсирующих друг друга при нормальном равновесном расстоянии между частицами. Радиус действия этих сил не превышает 10 нм. Изменение характера и величины этих сил приводит вещество к различным агрегатным состояниям, например, образованию расплава из твердого вещества или существованию кристаллического кварца и различных его полиморфных форм. В случае твердых веществ эти силы определяют объем физического тела.

1.1.2.1. Взаимодействие структурных частиц вещества

Взаимодействие структурных частиц вещества, обуславливающее его внутреннее строение, называется связью. Различают *химическую* и *молекулярную* связи.

Химическая связь — взаимодействие атомов (ионов), обусловленное силами, которые имеют в основном электрическую природу и возникают в результате либо переноса электрона с одного атома на другой, либо обобществления электронов парой (или группой) атомов. Равновесное состояние между атомами при химической связи обычно достигается на расстоянии 1,5...4 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$). Энергия химической связи имеет величину от 8...10 до 1000 кДж/моль.

Химические связи классифицируют по характеру распределения электронной плотности между атомами, в частности, по симметрии ее распределения и другим признакам. Основные виды химической связи: *ковалентная*, *ионная*, *металлическая* и *водородная*.

Ковалентная связь — вид химической связи; осуществляется парой электронов, находящихся в общем владении двух атомов, образующих связь.

Ковалентная связь может реализоваться в виде одинарной ($\text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2$), двойной ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$) или тройной ($\text{HC}\equiv\text{CH}$) связи. Атомы, различающиеся по электроотрицательности, образуют так называемую полярную кова-

лептную связь (HCl , $\text{H}_3\text{C}-\text{Cl}$). Ковалентная связь лежит в основе существования простых газов (H_2 , Cl_2 и др.), различных соединений (H_2O , NH_3 и др.), многочисленных органических молекул (CH_4 , $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$ и др.), а также атомных кристаллов (различные модификации фосфора и серы, углерода и другие элементы IV, V и VI подгруппы 6 периодической системы).

Ионная связь — вид химической связи, основанной на электростатическом взаимодействии между противоположно заряженными ионами.

Ионная связь характерна для соединений металлов с наиболее типичными металлоидами (например, NaCl , CaCl_2 , Al_2O_3), а также для ионных кристаллов (NaCl , CsCl и др.), в которых взаимодействие носит и частично ковалентный характер.

Металлическая связь — вид химической связи атомов в веществах, вызываемой наличием свободных движущихся валентных электронов, которые осуществляют коллективное взаимодействие атомов и удерживают их на определенных расстояниях друг от друга.

Это взаимодействие характерно для чистых металлов и их соединений между собой. Валентные электроны при этом образуют общий электронный «газ». Металлическая связь, в отличие от ковалентной и ионной, является ненаправленной и делокализованной.

Водородная связь — вид химической связи двух атомов (A и B) при участии атома водорода, т.е. $\text{A}-\text{H}\cdots\text{B}$, где B — электроотрицательные элементы: O, N, F и др. Атомы A и B могут принадлежать как одной, так и разным молекулам.

Водородная связь приводит к ассоциации одинаковых или различных молекул в комплексы (H-комплексы). Водородная связь во многом определяет свойства воды и льда, молекулярных кристаллов, структуру и свойства многих искусственных (капрон) и природных полимеров (белки, нуклеиновые кислоты) и других соединений.

Молекулярная связь — взаимодействие нейтральных молекул (или атомов) на основе слабых электростатических сил — *ван-дер-ваальсова взаимодействия*, которое складывается из сил притяжения (*ориентационных, индукционных и дисперсионных*) и сил отталкивания, обусловленных перекрыванием электронных оболочек атомов.

Ориентационные силы притяжения действуют между полярными молекулами, дисперсионные силы притяжения — между неполярными молекулами, а индукционные силы притяжения — между полярной и неполярной молекулами.

Молекулярная связь характерна для атомов с относительно легко деформируемыми электронными оболочками и для объединившихся в молекулы атомов, также способных к деформации внешних объединенных оболочек. Это взаимодействие определяет отклонение свойств реальных газов от идеальных, структуру и свойства молекулярных кристаллов и жидкостей и др. Молекулярная связь менее прочна, чем рассмотренная выше химическая, и вещества с этой связью имеют более низкие температуры плавления и сублимации.

В кристаллических веществах взаимодействие между структурными частицами определяет их принадлежность к одной из четырех основных групп — *ковалентные, ионные, металлические (металлы) или молекулярные кристаллы.*

К ковалентным кристаллам относятся многие простые и сложные кристаллические вещества, например, алмаз, карбид кремния, нитрид алюминия и др. Ковалентные кристаллы имеют высокую температуру плавления и твердость, малую электропроводность, большие показатели преломления.

Ионные кристаллы имеют высокую температуру плавления и испарения, высокий модуль упругости и низкие коэффициенты сжимаемости и теплового расширения, что объясняется достаточно большой величиной энергии ионной связи. Направленность связи приводит к высокой твердости и отсутствию пластичности. Ионный кристалл при испарении распадается на молекулы, а при растворении — на ионы.

Металлы по сравнению с ковалентными кристаллами имеют более низкие температуры плавления, испарения, модуль упругости, но более высокий коэффициент теплового расширения, что объясняется тем, что энергия металлической связи несколько меньше, чем ковалентной. Металлы более пластичны и менее тверды, чем ковалентные кристаллы, так как их кристаллическая решетка более плотная. Они обладают хорошей электропроводностью. Металлы не прозрачны для электромагнитных волн. Они хорошо отражают излучение, т.е. обладают блеском.

Молекулярные кристаллы имеют низкие температуры плавления и испарения, так как энергия связи невелика. Они — диэлектрики, так как построены из электрически нейтральных атомов (молекул). Такие кристаллы в отличие от металлов прозрачны для электромагнитного излучения. Малая энергия связи определяет также низкий модуль упругости кристаллов и небольшие коэффициенты теплового расширения. Механические характеристики их низки.

Во многих кристаллических веществах (графит, MoS_2 и др.) между их частицами сосуществуют связи различных типов (*гетеродесмическое строение*). Так, в кристаллах полупроводников (Ge , GaAs) связь в основном ковалентная, но с примесью ионной и металлической.

Для гетеродесмического строения веществ характерно наличие фрагментов, внутри которых атомы соединены более прочными (обычно ковалентными) связями. Эти фрагменты могут представлять собой отдельные области («острова»), цепи, слои, каркасы. Островные структуры типичны для молекулярных кристаллов; цепочечное строение имеют полимеры; слоистое строение характерно для BN , MoS_2 и многих силикатов. Для некоторых соединений характерно наличие устойчивых структурных группировок, сочетающихся в них по-разному. Так, в силикатах основной структурный элемент строения — тетраэдрическая группировка SiO_4 может выступать либо изолированной, либо образовывать пары, кольца, цепочки, слои и др.

Химическая и (или) молекулярная связи определяют взаимодействие между поверхностными слоями одинаковых тел — когезию, и взаимодействие между поверхностными слоями различных тел — адгезию.

Когезия — сцепление (притяжение) молекул (атомов, ионов) в однородном физическом теле. Когезия наблюдается у твердых и жидких тел, а при очень низких температурах или больших давлениях — и в газах.

Адгезия — сцепление (прилипание) приведенных в контакт разнородных физических тел (фаз). Адгезия возникает между твердыми, твердыми и жидкими, а также между твердыми и газообразными телами. Одна из важнейших характеристик адгезии — адгезионная прочность, характеризующая удельное усилие разрушения адгезионного контакта и используемая в технике для оценки свойств клеев, лакокрасочных покрытий и других поверхностных изделий. Адгезия оказывает решающее влияние на механические свойства композиционных материалов. С ней связано склеивание, нанесение покрытий, спекание и многие другие, практически важные технологические процессы.

1.1.2.2. Самоорганизация структурных частиц вещества

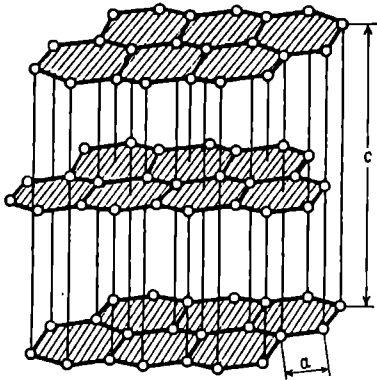
Общим для строения всех веществ является стремление к *самоорганизации* (порядку в расположении всех частиц), что является прямым следствием основного закона природы: **устойчивым является такое состояние системы, при которой ее энергия будет минимальна**. Образование кристаллов или молекул из изолированных атомов или многоатомных групп связано с понижением энергии системы и, следовательно, повышением ее устойчивости. Этот процесс достаточно подробно описан в термодинамике.

Изучением процессов самоорганизации структурных частиц вещества в неравновесных условиях занимается *синергетика*. Ведущий принцип синергетики — **«неравновесность — источник упорядоченности»**.

Материаловедение изобилует множеством примеров самоорганизации строения веществ.

Прекрасной иллюстрацией самоорганизации вещества является *углерод*. Он известен в виде кристаллических, аморфных и частично кристаллических переходных углеродных веществ, что объясняется способностью углерода образовывать 4 равнозначные валентные связи с другими атомами углерода. Это позволяет строить углеродные скелеты различных типов (линейные, разветвленные, циклические). Углерод — редкий случай, когда изменения физических и физико-химических свойств зависят только от строения, а не от состава, как это обычно наблюдается для многокомпонентных систем.

К кристаллическим формам углерода относятся *алмаз, графит, карбин, фуллерен и лонсдейлит*. К аморфным и частично кристаллическим переходным формам углерода относятся *пироуглерод, пирографит, стеклоуглерод, сажи, кокс, волокна, пленки* и др.



Алмаз представляет собой пространственный полимер с тетраэдрическим расположением валентных связей. Макромолекула алмаза — в высшей степени регулярный, почти идеально построенный трехмерный полимер.

Графит является «паркетным» полимером. Он имеет гексагональное строение (рис. 2). В плоскостях слоев между атомами действуют ковалентные связи, а между слоями — ван-дер-ваальсово взаимодействие,

что предопределяет сильную анизотропию свойств вдоль параллельных и перпендикулярных направлений к плоскостям слоев.

Карбин — углеродный полимер с линейной структурой. В молекулу карбина входит до 2000 атомов. Длина полимерных нитей колеблется от 50 до 250 нм. Плотность карбина 1900...3200 кг/м³. Карбин химически инертен; он обладает полупроводниковыми свойствами: при облучении светом его проводимость резко возрастает.

Фуллерен — гипермолекула (*кластер*) углерода C₆₀. Структура C₆₀ — полный усеченный икосаэдр (рис. 3), в котором имеются 20 шестиугольников и 12 пятиугольников с атомами в вершинах. Плотность 1300...1650 кг/м³. Фуллерен обладает высокой термодинамической стабильностью и уникальными свойствами: сверхпроводимостью, радиационной стойкостью, твердостью и др. Название «фуллерены» получили также стабильные кластеры углерода C₆₀, C₁₂₀, C₇₆, C₈₄. Строение фуллеренов представлено на рис. 3.

Кластером в синергетике называют систему, состоящую из большого числа атомов или молекул, которые внутри этой системы сохраняют свою индивидуальность.

Лонсдейлит обнаружен в метеоритах и получен искусственно; его структура и свойства окончательно не установлены.

К основным элементам строения аморфного углерода и углерода переходных форм относятся базисные ленты, турбостратные пакеты, наборы гибридных форм и падатомные образования высшего порядка. Базисные ленты по строению аналогичны графитовым плоскостям. Турбостратные пакеты образованы параллельным соединением определенного числа графитовых плоскостей без их взаимной ориентации. Так как в каждой плоскости пакета атомы углерода расположены в строгом порядке, то каждый пакет является как бы двухмерным кристаллом.

Строение **пироуглерода** — графитовые сетки, объединенные по несколько штук в пакеты или кристаллы и расположенные параллельно поверхности осаждения. При нагреве выше 1800°C наблюдается упорядочение турбостратного строения с образованием графита, и свыше 2400°C образуется материал — пирографит.

Стекловидный углерод (стеклоуглерод) — сетчатый полимер углерода, имеющий надмолекулярное строение в виде клубков (глобул). При этом глобулы представляют собой беспорядочное переплетение лентовидных молекул.

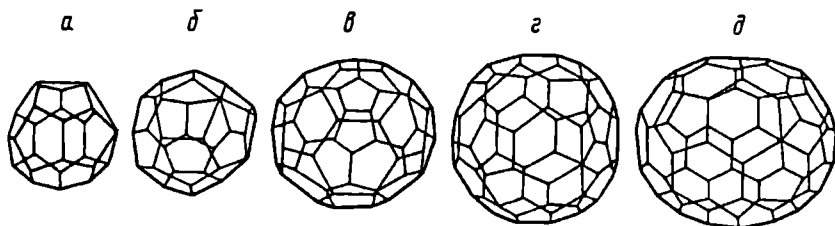
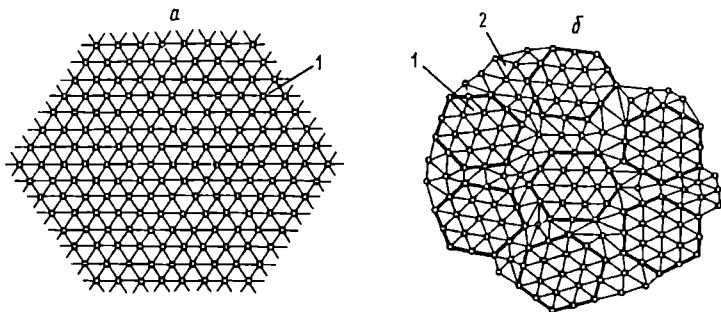


Рис. 3. Строение фуллеренов при различном числе атомов углерода:
а — 28; б — 32; в — 50; г — 60; д — 70

Рис. 4. Схемы размещения атомов при дальнем (а) и ближнем (б) порядке:

1 — элемент с упорядоченным расположением частиц вещества; 2 — беспорядочное расположение частиц



Самоорганизация вещества может быть представлена как упорядочение любых его структурных элементов. Упорядоченное строение вещества реализуется как на уровне его структурных частиц (молекул, атомов и др.), так и на уровне образующих их элементов (например, электронов), а также в пространственной ориентации тех и других.

Упорядочение на расстояниях, сравнимых с межатомными, называется *ближним*, а упорядочение, распространяющееся на неограниченно большие расстояния, — *дальним порядком*.

Наличие дальнего или ближнего упорядочений в расположении атомов для одного и того же вещества (рис. 4) обусловлено силами межатомного взаимодействия.

Дальний порядок существует в кристаллических веществах, где правильное чередование частиц на одних и тех же расстояниях друг от друга повторяется для сколь угодно отдаленных частиц. Основным признаком дальнего порядка является анизотропия свойств.

При дальнем порядке структура металлических сплавов при определенных условиях характеризуется возможностью разделения кристаллической решетки на совокупность подрешеток, каждая из которых в идеальном случае связана только с одним сортом атомов.

Ближний порядок реализуется в жидких и аморфных веществах, где некоторая закономерность существует только в расположении соседних частиц. Однако ближний порядок при аморфном и кристаллическом строениях вещества принципиально различен. В

аморфном веществе ближний порядок является поликластерным (например, политетраэдрическим), а для кристаллического строения характерно пространственное рассредоточение кластеров в трех измерениях.

Ближний порядок является характеристикой *топологического* (расположение атомов в пространстве независимо от их сорта) и *композиционного* (распределение атомов разного сорта в многокомпонентных системах) *упорядочений*. Оно может проявляться как стремление атомов одного сорта окружить себя преимущественно атомами иного сорта (*отрицательный ближний порядок*) или атомами того же сорта (*положительный ближний порядок*).

Дальний и ближний порядки могут реализовываться в ориентации молекул (*ориентационный порядок*), магнитных моментов (*магнитное упорядочение*), дипольных электрических моментов. Упорядочение электронного газа (*Вигнеровская кристаллизация* — образование периодической пространственной структуры электронного газа при низких температурах) используется при интерпретации фазовых превращений металл — диэлектрик, в теории сильно легированных полупроводников, при описании свойств поверхности твердых тел и др.

В нормальных жидкостях однородность и изотропность объясняются отсутствием у них дальнего порядка во взаимных положениях и ориентации молекул. Положения и ориентации двух и более молекул, расположенных далеко друг от друга, оказываются статистически независимыми. В жидких кристаллах дальний порядок наблюдается лишь в ориентации молекул, но отсутствует в расположении их центров масс. Ближний порядок в жидких кристаллах наблюдается в определенных областях — доменах, размеры которых $\sim 10^{-2} \dots 10^{-1}$ мм.

В газообразном веществе упорядочение в расположении частиц полностью отсутствует. Газ в молекулярно-кинетической теории рассматривается как совокупность слабо взаимодействующих частиц, находящихся в непрерывном хаотическом тепловом движении. Микрообъемы с правильным расположением атомов, возникнув, могут существовать некоторое время, затем рассасываться и возникать вновь в другом элементарном объеме.

1.1.3. Фазы и фазовые превращения

Рассмотрение веществ по их агрегатным состояниям не позволяет учитывать *полиморфизм*, который является частным случаем *аллотропии*.

Аллотропия — существование химических элементов в виде двух или более простых веществ. Аллотропия может быть обусловлена образованием молекул с различным числом атомов (например, кислород O_2 и озон O_3).

Полиморфизм — способность одного и того вещества иметь различное кристаллическое строение. Каждое такое кристаллическое строение называют *полиморфной модификацией* вещества. Она устойчива только в области определенных температур и давлений, вне которой — неустойчива и должна претерпевать *полиморфное превращение*. Полиморфную модификацию, устойчивую при более низкой температуре, принято обозначать буквой α , а при более высокой — β , затем γ и др. Полиморфные превращения могут также вызываться радиоактивным облучением, механическим воздействием, в частности, ударным и др. Различие в строении полиморфных модификаций обуславливает и различие в их свойствах. Полиморфные превращения наблюдаются у неметаллов (например, у кварца) и примерно у тридцати металлов.

Для однозначной характеристики вещества с учетом его возможных полиморфных модификаций необходимо описывать особенности его атомного (молекулярного) строения. Такую возможность дает использование для описания веществ более широкого понятия — *фаза*.

Фаза — термодинамически равновесное состояние вещества, характеризующееся агрегатным состоянием, атомным (молекулярным) составом и строением, а также отделенное пространственными границами от других возможных равновесных состояний (фаз) того же вещества. Термодинамически неравновесное состояние вещества называется *метастабильной фазой*.

Каждое вещество может состоять из одной или более фаз (твердых, жидких и газообразных) и однозначно характеризоваться *фазовым составом*.

Формирование реального строения и структуры веществ происходит в условиях, далеких от равновесных. Все материалы представляют собой открытые системы, то есть такие, которые обмениваются с окружающей средой веществом, а также энергией и импульсом, что может привести к *фазовым превращениям веществ*.

Фазовое превращение — это превращение вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий (температуры, давления, магнитных и электрических полей и др.). Значение физической величины, при котором происходит фазовое превращение, называется *точкой фазового превращения*.

Фазовые превращения в твердом состоянии описываются как результат образования новых фаз, имеющих состав и строение, отличные от существовавших в старой фазе. В кристаллических веществах при фазовом превращении решетка новой фазы стремится так ориентироваться по отношению к решетке исходной фазы, чтобы энергия межфазной границы была минимальна, а это обеспечивается максимальным сходством в расположении атомов и соприкасающихся граней новой и старой фаз (*принцип структурного соответствия* Данкова — Конобесовского).

Фазовые превращения рассматриваются по характеру их протекания как *превращения первого и второго родов*.

Фазовые превращения первого рода — фазовые превращения, при которых некоторые физические величины (например, плотность вещества) или термодинамические характеристики меняются скачком и при этом выделяется или поглощается теплота фазового превращения.

К фазовым превращениям первого рода относятся: испарение и конденсация, плавление и затвердевание, сублимация и конденсация в твердую фазу, некоторые структурные переходы в твердых телах (например, образование мартенсита в системе железо — углерод, и др.).

Для фазового превращения первого рода характерно существование области метастабильного состояния вблизи точки фазового превращения, например, жидкость можно нагреть до температуры выше точки кипения или переохладить ниже точки замерзания.

Фазовые превращения второго рода — фазовые превращения, при которых плотность вещества, энтропия и термодинамические потенциалы не испытывают скачкообразных изменений, а теплоемкость, сжимаемость, коэффициент термического расширения фаз меняются скачком.

При фазовом превращении второго рода некоторая физическая величина, равная нулю с одной стороны от точки превращения, постепенно растет при удалении от этой точки, при этом плотность изменяется непрерывно, теплота не выделяется. К фазовым превращениям второго рода относятся:

превращение парамагнетик — ферромагнетик, сопровождающееся появлением антиферромагнитного упорядочения;

превращение параэлектрик — сегнетоэлектрик с появлением спонтанной (самопроизвольной) поляризации вещества;

переход металлов и сплавов из нормального состояния в сверхпроводящее состояние;

переход гелия в сверхтекучее состояние и др.

Около точки фазового превращения второго рода состояние вещества можно характеризовать величиной, играющей роль параметра упорядочения (порядка).

Фазовый состав материала и фазовые превращения оказывают существенное влияние на все свойства и поведение материала при эксплуатации.

Изучение фаз и фазовых превращений на высоком уровне осуществляется в таких фундаментальных науках, как физическая химия и термодинамика.

Применительно к задачам материаловедения уточним некоторые важные понятия этих наук.

Термодинамика — наука о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

Термодинамическая система — это отделенная от внешней среды реальными или воображаемыми границами и заполненная веществом часть пространства, внутри которой между составляющими систему материальными объектами возможен обмен энергией и веществом.

Термодинамическое равновесие — состояние термодинамической системы, в которое она самопроизвольно приходит через достаточно большой промежуток времени (время релаксации) в условиях изоляции от внешней

среды и которое характеризуется неизменностью термодинамических параметров системы и отсутствием в ней потоков энергии и вещества. Процесс установления термодинамического равновесия (полного или частичного) в физической системе, состоящей из большого числа частиц, называется релаксацией.

Фазовое равновесие — состояние термодинамического равновесия многофазной системы.

Метастабильное состояние — это состояние неустойчивого равновесия физической макроскопической системы, в котором система может находиться длительное время, не переходя в более устойчивое (при данных условиях) состояние (фазу). Фактором, способствующим сохранению метастабильного состояния, может быть высокая вязкость вещества, препятствующая, например, установлению упорядоченного расположения молекул в аморфных веществах.

Гомогенная система — однородная термодинамическая система, свойства которой (состав, плотность, давление и др.) изменяются в пространстве непрерывно. Различают физически однородные и неоднородные гомогенные системы. У однородных гомогенных систем свойства в различных частях системы одинаковы, а у неоднородных гомогенных систем — различны. Однородными гомогенными могут быть газовые смеси, жидкие и твердые растворы и другие системы. Примером физически неоднородной гомогенной системы может служить диффузионный слой при *химико-термической обработке* поверхности материала.

Гетерогенная система — макроскопически неоднородная термодинамическая система, состоящая из различных по физическим свойствам или химическому составу частей (фаз). Смежные фазы гетерогенной системы отделены друг от друга физическими поверхностями раздела, на которых скачком изменяется одно или несколько свойств системы (состав, плотность, кристаллическое строение, электрические и магнитные свойства и др.). Примером гетерогенной системы являются композиционные материалы, в которых компоненты отличны по составу, строению, свойствам. Различие между гетерогенной и гомогенной (однородной) системами не всегда четко выражено. Так, переходную область между гетерогенными механическими смесями (взвесьями) и гомогенными (молекулярными) растворами занимают коллоидные растворы, в которых частицы растворенного вещества столь малы, что к ним неприменимо понятие фазы.

Равновесный процесс — бесконечно медленный процесс, в котором термодинамическая система проходит через ряд бесконечно близких друг к другу равновесных состояний. Равновесный процесс — это *обратимый процесс*, например, кристаллизация.

Необратимый процесс — физический процесс (диффузия, теплопроводность, вязкое течение жидкости и др.), который может самопроизвольно протекать только в одном направлении пространственно-временных координат.

1.1.4. Характеристика основных фазовых превращений

1.1.4.1. Фазовое превращение:

газообразное состояние — жидкое состояние

Фазовое превращение жидкого состояния в газообразное (*парообразование*) и обратное (*конденсация*) происходит при определенной для данного вещества сильно зависящей от давления температуре $t_{\text{кип}}$.

Теплота парообразования равна теплоте конденсации.

Жидкость может переходить в газообразное состояние и при температурах ниже точки кипения. Такой процесс называется *испарением*. Теплота испарения соответствует теплоте парообразования, а ее источником обычно служит внутренняя энергия самой жидкости, которая в результате испарения охлаждается.

1.1.4.2. Фазовое превращение:

жидкое состояние — твердое состояние

Фазовые превращения кристаллических веществ.

Твердое вещество образуется из его жидкого или газообразного состояния по мере понижения температуры путем сближения атомов (молекул) и их группировки в кристаллик — *центр кристаллизации*. Он может возникнуть только в тех микрообъемах, состав и строение которых соответствуют составу и строению вновь образующегося твердого вещества. Скорость охлаждения, количество центров кристаллизации и скорость роста вновь образующихся кристалликов определяют строение твердого вещества: кристаллическое, аморфное или стеклообразное.

Фазовое превращение из жидкого (газообразного) состояния в кристаллическое вещество называется *кристаллизацией*.

Кристаллизация — процесс образования кристаллов. При этом кристаллизация из паров, растворов и расплавов рассматривается как *первичная*, а из твердого вещества в другое кристаллическое или аморфное состояние — как *вторичная*.

а) Первичная кристаллизация

Фазовое превращение кристаллического вещества в жидкое (*плавление*) и обратное (*затвердевание*) происходит при определенной для данного вещества зависящей от давления температуре $t_{\text{пл}}$. Температура плавления совпадает с температурой твердения (*температурой первичной кристаллизации*).

Плавление и твердение сопровождаются соответственно поглощением или выделением определенной теплоты плавления $Q_{\text{пл}}$. Теплота плавления равна теплоте твердения. Температура тела в процессе плавления или твердения не меняется, так как теплота процесса идет не на нагрев или охлаждение тела, а на разрыв или образование межатомных связей, то есть разрушение или создание дальнего порядка.

Кристаллизация начинается при достижении некоторого предельного условия, например, *переохлаждения* жидкости или пресыщения пара, когда практически мгновенно возникает множество кристалликов — центров кристаллизации.

Переохлаждение – охлаждение вещества ниже температуры его равновесного перехода в другое агрегатное состояние.

Кристаллики растут, присоединяя атомы или молекулы из жидкости или пара. Зависимость скорости роста кристалликов от условий кристаллизации приводит к разнообразию их форм роста и структуры (многогранные, пластинчатые, игольчатые, дендритные и другие формы, карандашные структуры и т. д.). В процессе кристаллизации неизбежно возникают различные дефекты.

Источником образования кристалликов часто являются всевозможные твердые частицы (примеси), играющие роль готовых центров кристаллизации. Примеси, практически не изменяя химического состава, могут вызывать уменьшение размеров зерен, так как чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации. Использование специально вводимых примесей (*модификаторов*) для получения мелкого зерна называется *модифицированием*.

Скорость процесса первичной кристаллизации и характер формирования структуры материала при прочих равных условиях зависят от числа центров кристаллизации, возникающих в единицу времени и в единице объема, и скорости их роста, то есть от скорости увеличения линейных размеров растущего кристаллика в единицу времени. Чем больше скорость образования центров кристаллизации и меньше скорость их роста, тем меньше размер зерна (кристаллика), выросшего из одного центра и, следовательно, тем более мелкозернистой будет структура материала.

Крупные совершенные монокристаллы выращивают из пересыщенных растворов и перегретых расплавов, вводя в них небольшие затравочные кристаллики, не допуская самопроизвольного зарождения.

Большинство твердых материалов являются поликристаллическими; они состоят из множества отдельных беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен. Таковы, например, многие технические металлы и сплавы (рис. 5, е), природные строительные материалы и др. Поперечные размеры зерен — 0,001...0,1 мм. Размер зерна сильно влияет на физико-химические, особенно на механические свойства материалов (более мелкое зерно обеспечивает их большую вязкость и пластичность).

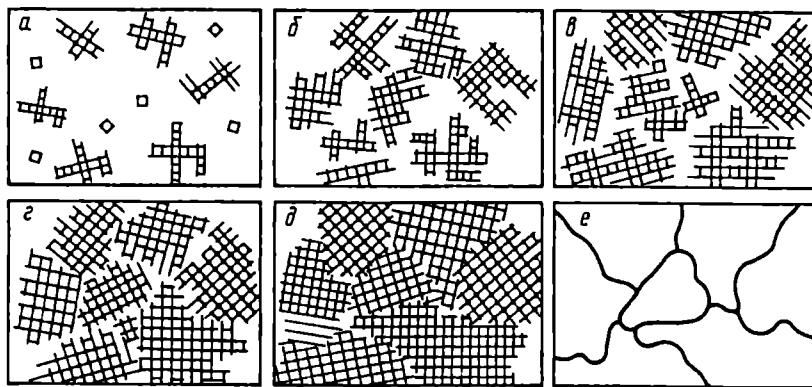


Рис. 5. Схемы (а — е) процесса кристаллизации металла

б) Вторичная кристаллизация

Вторичная кристаллизация как изменение кристаллического строения в твердом состоянии возможна, например, для веществ, обладающих полиморфными свойствами. Вторичную кристаллизацию называют также перекристаллизацией, так как зародыши новой структуры часто возникают на границах зерен исходных кристаллитов и растут, «поедая» их.

Рост зародышей новой фазы происходит неупорядоченным переходом атомов путем диффузии через границу раздела из исходной фазы во вновь образуемую фазу. Если строения исходной и новой фаз структурно соответствуют друг другу (имеют *когерентность*), то новая фаза располагается строго определенным образом (например, в металлах образуется *структура*, называемая *видманштеттовой*, в виде пластин или игл). Если новая фаза по составу и строению сильно отличается от исходной, то нередко она играет роль промежуточной (метастабильной) и может переходить в стабильную при определенных условиях. Переход метастабильной фазы в стабильную обычно ведет к нарушению когерентности между исходной и новой фазами и образованию обычной межфазной границы.

Скорость процесса вторичной кристаллизации и характер образования структуры материала при прочих равных условиях подчиняются тем же закономерностям, что и при первичной кристаллизации.

Новая фаза в случае полиморфных превращений может образовываться не только путем диффузии, но и путем сдвига, так, например, при переохлаждении высокотемпературная модификация переходит в низкотемпературную. Такое превращение называется *мартенситным*, а образующаяся новая фаза — *мартенситом*.

Мартенситное превращение — полиморфное превращение при охлаждении, при котором изменение взаимного расположения составляющих кристалл атомов (или молекул) происходит путем их упорядоченного перемещения (сдвига), причем смещения атомов малы по сравнению с межатомными расстояниями. Мартенситное превращение в сплавах происходит без изменения концентрации фаз.

В основе мартенситного превращения лежит кооперативное и закономерное перемещение атомов, когда они сохраняют своих «соседей» и смещаются только по отношению друг к другу на расстояния, меньшие межатомных. Новая фаза когерентно связана с исходной фазой, и при нарушении когерентности рост кристаллов новой фазы прекращается. В этом случае полиморфное превращение развивается за счет образования и роста новых кристаллов, когерентно связанных с исходной фазой. Рост кристаллов новой фазы протекает с очень большой скоростью ($\sim 10^3$ м/с).

С мартенситным превращением связаны такие явления, как закалка стали, «эффект памяти» и др.

Мартенсит — структурная составляющая кристаллических твердых тел, возникающая в результате мартенситного превращения.

Фазовые превращения аморфных веществ. Аморфное вещество характеризуется отсутствием точки плавления.

При нагреве стекло плавится в некотором температурном интервале, который зависит от состава. На рис. 6 показана температура стеклования $t_{ст}$ ($\theta = 10^{12}$ Па·с), ниже которой стекло приобретает хрупкость, то есть переходит в стеклообразное состояние.

Для промышленных силикатных стекол $t_{ст} = 425...600^\circ\text{C}$; температура размягчения t_p лежит в пределах $600...800^\circ\text{C}$ ($\theta = 10^8$ Па·с). В интервале температур между $t_{ст}$ и t_p стекла находятся в высоковязком пластическом состоянии. При температуре выше t_p ($1000...1100^\circ\text{C}$) проводятся все технологические процессы переработки стекломассы в изделия.

Фазовые превращения полимерных веществ

Полимеры могут существовать только в твердом и жидком состояниях. Они не могут быть в газообразном состоянии,

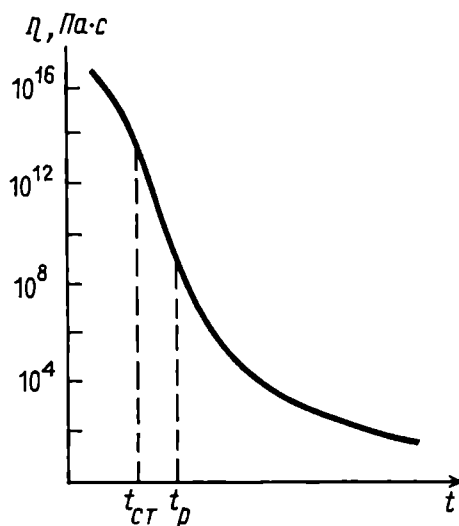


Рис. 6. Зависимость вязкости стекла η от температуры t

так как испарению полимера обязательно предшествует его деструкция с разрывом прочных ковалентных связей.

При понижении температуры чаще всего жидкие полимеры при твердении сохраняют аморфное строение переохлажденной жидкости и так же, как аморфные вещества, переходят из высоковязкого состояния в стеклообразное. Отличительной особенностью полимеров при этом переходе является наличие области особого высокоэластичного состояния, обусловленного их уникальным строением (гибкостью их огромных молекул).

Расплавы некоторых полимеров при охлаждении могут кристаллизоваться, и полимерные кристаллы плавятся при нагреве. Процесс кристаллизации полимера может происходить при определенных условиях его строения. При этом области высоковязкого и высокоэластичного состояний обязательно сохраняются.

Полимерные кристаллы не имеют постоянной температуры плавления и плавятся в интервале температур. Чем меньше скорость кристаллизации, тем выше температура начала плавления.

1.2. Строение кристаллических веществ на атомной (ионной) основе

1.2.1. Кристаллическая решетка

Каждому кристаллическому веществу, находящемуся в твердом состоянии при заданных термодинамических условиях, соответствует определенное кристаллическое строение, приводящее к определенной симметрии внешней формы и физических свойств. Кристаллическое строение веществ и материалов описывается *кристаллической решеткой*, являющейся геометрическим образом представления о кристаллическом строении.

Кристаллическая решетка — пространственное периодическое расположение атомов (ионов, молекул) в кристаллическом веществе.

Точки кристаллической решетки, в которых расположены атомы или ионы, называются **узлами кристаллической решетки**.

Направления, проходящие через два узла кристаллической решетки, называются **кристаллографическими направлениями**, а плоскости, проходящие через три узла, — **кристаллографическими (атомными) плоскостями**.

Изменение плотности атомов в различных плоскостях и направлениях кристаллической решетки определяет неодинаковость свойств монокристалла в зависимости от кристаллографических направлений (анизотропию).

Наиболее удобный способ единообразного описания пространственного расположения кристаллографических плоскостей и направлений заключается в приписывании им определенных индексов (*индицировании*).

Кристаллографическое направление характеризуется индексами вектора, выходящего из начала принятой в кристаллической решетке системы координат, то есть тремя целыми, взаимно простыми числами u , v и w , пропорциональными координатам любого узла кристаллической решетки, лежащего на этом направлении. Индексы направления записывают в одинарных квадратных скобках $[uvw]$ и называют *символом направления*.

Каждая кристаллографическая (атомная) плоскость в кристалле отсекает на осях координат целые числа периодов решетки, а обратные им целые числа h , k и l используются для описания положения рассматриваемой кристаллографической плоскости и называются ее индексами (индексы Миллера). *Символом плоскости* служат индексы кристаллографической плоскости, заключенные в круглые скобки: (hkl) .

Для описания кристаллической решетки в целом достаточно описать ее *элементарную ячейку*.

Элементарная ячейка — параллелепипед, построенный на узлах кристаллической решетки и представляющий собой минимальный объем, отражающий все особенности кристаллического вещества, параллельные переносы (*трансляции*) которого в трех измерениях позволяют построить всю кристаллическую решетку.

Для однозначной характеристики элементарной ячейки необходимо знать ее *параметры*: величины образующих ее ребер — a , b и c (*периоды ячейки*) и три угла между ними — α , β и γ . Размеры ребер и углы между ними — основные кристаллографические константы вещества.

Полное описание кристаллической решетки дается параметрами элементарной ячейки, координатами атомов в ней и *пространственной группой симметрии*, которая содержит как *операции трансляций* (переносов), так и *операции трансляционной симметрии* (повороты, отражения, инверсии). Возможные типы трансляционной симметрии кристаллической решетки определяют четырнадцать трехмерных геометрических решеток, так называемых *решеток Браве*, которые по признаку симметрии в свою очередь делятся на *сингонии*.

Сингония кристаллов — совокупность кристаллов, элементарные ячейки которых характеризуются одинаковыми кристаллографической системой осей координат и симметрией. Элементарные ячейки по признаку симметрии делятся на семь сингоний, каждая из которых характеризуется определенным соотношением между длинами ребер и углами между ними.

Решетка Браве — совокупность узлов кристаллической решетки, которые расположены в вершинах элементарных ячеек кристалла и могут быть совмещены друг с другом путем трансляций.

Различают *примитивные решетки Браве*, в которых узлы расположены только в вершинах элементарных параллелепипедов, *гранецентрированные* (узлы расположены в вершинах и в центрах всех граней), *объемно-центрированные* (узлы в вершинах и в центре параллелепипедов) и *базоцентрированные* (узлы в вершинах и в центрах двух противоположных граней).

В элементарной ячейке может размещаться от одного атома (химические элементы) до 10^2 (химические соединения) и $10^3...10^6$ атомов (например, белки). Сложное кристаллическое строение любой элементарной ячейки, в которой содержится сколько угодно атомов, можно описывать как несколько решеток Браве, «вставленных» одна в другую.

В металлах и сплавах наиболее распространены следующие кристаллические решетки: объемно-центрированная кубическая (ОЦК); гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГПУ). В ячейке с ОЦК решеткой атомы расположены в вершинах кубической элементарной ячейки и один — в ее центре. Такую решетку имеют железо при температуре до 910°C и выше 1390°C , хром, вольфрам, ванадий и др. (рис. 7, а). В ячейке ГЦК решетки атомы расположены в вершинах кубической элементарной

ячейки и по одному — в центре каждой ее грани. Такую решетку имеют железо при температуре $910...1390^\circ\text{C}$, медь, никель, алюминий и др. (рис. 7, б). В ячейке ГПУ решетки, имеющей форму призмы с углами в основании 60 и 120° , атомы располагаются в вершинах призмы и один — в ее центре. ГПУ решетка имеется у магния, цинка и ряда других металлов (рис. 7, в).

Периоды решетки для большинства металлов находятся в пределах $0,1...0,7$ нм.

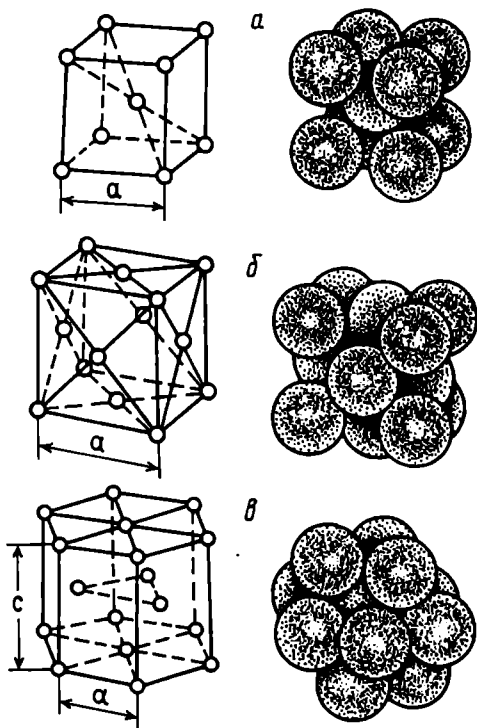


Рис. 7. Кристаллические решетки

1.2.2. Дефекты кристаллической решетки

Дефекты кристаллической решетки — это любое отклонение в ней от идеального периодического атомного (ионного) строения.

Дефекты кристаллической решетки образуются: в процессе кристаллизации, при наличии примесей, под влиянием тепловых, механических и электрических воздействий, а также под действием различного рода облучения (нейтронами, электронами, рентгеновскими лучами). Дефекты в кристаллических веществах вызывают упругие искажения кристаллической решетки, обуславливающие появление внутренних механических напряжений.

По геометрическим признакам различают следующие виды дефектов кристаллической решетки: *точечные, линейные, поверхностные и объемные.*

Точечные дефекты

Размеры точечных дефектов сравнимы с атомными размерами. Источниками точечных дефектов могут являться:

чужеродные атомы, замещающие основные атомы или внедряющиеся между ними (рис. 8);

собственные атомы, сместившиеся из нормальных положений (*дислоцированные атомы*). Дислоцированные атомы очень подвижны, они активно мигрируют по кристаллографическим плоскостям и могут выходить на границы зерен;

вакансии — узлы кристаллической решетки, в которых отсутствуют атомы (или ионы). Вакансии чаще всего образуются в результате перехода атомов из узла решетки на поверхность или полного испарения с поверхности кристалла и реже в результате их перехода в межузлие.

Вакансии и *межузельные* (чужеродные и собственные) атомы искажают кристаллическую решетку вокруг себя на расстоянии, много большем, чем расстояние между ее соседними узлами.

Вакансии находятся в термодинамическом равновесии с кристаллической решеткой, возникают и исчезают в результате теплового движения атомов. Они беспорядочно перемещаются в кристалле, обмениваясь местами с соседними атомами. Несмотря на малую концентрацию (вблизи от температуры плавления — 1...2% от числа атомов) вакансии существенно влияют на физические свойства кристалла: понижают его плотность, увеличивают электросопротивление и др. Движение вакансий является главной причиной диффузии атомов в кристаллах. Вакансии также оказывают решающее влияние на ползучесть, графитизацию и другие процессы, связанные с переносом атомов в материалах.

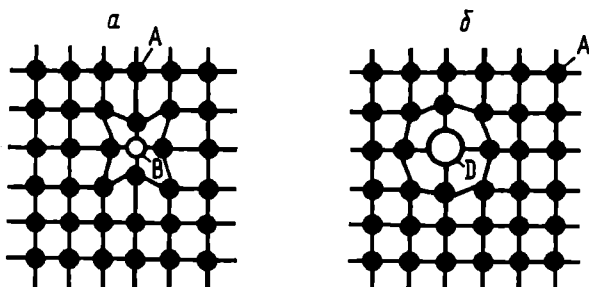


Рис. 8. Точечные дефекты кристаллической решетки, вызванные чужеродными атомами (B , D), замещающими собственные (A) при соотношении радиусов атомов:

$a \rightarrow r_A > r_B$; $b \rightarrow r_A < r_D$

В ионных кристаллах точечные дефекты возникают парами: две вакансии противоположного знака — *дефект Шоттки*; межузельный ион и оставленная им вакансия — *дефект Френкеля*.

Линейные дефекты

В реальном кристалле атомы располагаются правильно лишь в пределах **блоков** — небольших участков в каждом из зерен (кристаллитов). Блоки внутри зерна повернуты относительно друг друга на небольшие углы (от нескольких долей до единиц градусов). Они обычно имеют размеры $0,1 \dots 1$ мкм, что в $1 \dots 3$ раза меньше размеров зерен, и состоят из $2000 \dots 10\,000$ атомов.

Размеры блоков и углы их разориентации определяют *блочную структуру* кристаллического вещества. На границах блоков (малоугловые границы) возникают нарушения в правильности расположения атомов, обладающие сечением порядка атомного и одним протяженным размером, то есть образуются линейные дефекты кристаллической решетки, называемые *системой дислокаций*.

Дислокация — сгущение в расположении атомов или ионов на определенном участке кристаллографического направления, нарушающее правильное чередование атомных плоскостей.

Различают два предельных вида дислокаций: *краевые* и *винтовые*.

Краевые дислокации могут быть образованы цепочкой вакансий или межузельных атомов и характеризуются появлением незавершенной добавочной атомной плоскости (*экстраплоскости*). Наиболее простой и наглядный способ образования краевой дислокации в кристалле — сдвиг (рис. 9). Край экстраплоскости AB представляет собой линию краевой дислокации (*дислокационную линию*), которая простирается вдоль плоскости скольжения перпендикулярно к вектору сдвига τ через всю толщу кристалла. Дислокационные линии не обрываются внутри кристалла, они выходят на его поверхность, заканчиваются на других дислокациях или образуют замкнутые дислокационные петли.

При образовании краевых дислокаций наиболее существенное нарушение в периодичности и расположении атомов отмечается в поперечном сечении дефекта, но его размеры невелики и не превышают периода решетки кристалла более чем в $3 \dots 5$ раз.

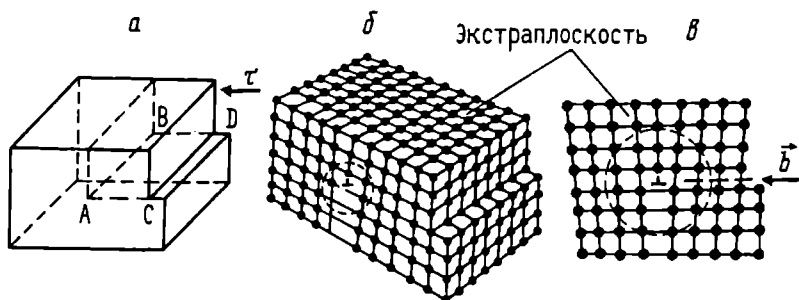


Рис. 9. Схемы расположения атомов у дислокации (а, в) и модель сдвига (б); τ — вектор сдвига, создающего краевую дислокацию

В случае винтовой дислокации искажение структуры обусловлено смещением атомов путем скручивания с тех мест, которые они занимают в идеальной кристаллической решетке; линия искажения является винтовой.

Основной количественной характеристикой дислокаций является **вектор Бюргерса**, описывающий величину и направление взаимного смещения областей кристалла. Вектор Бюргерса b определяют путем сравнения контура вокруг дислокации с соответствующим контуром в идеальной части решетки. При сближении двух дислокаций с одинаковыми векторами b упругие напряжения около дислокаций увеличиваются и дислокации отталкиваются. При сближении дислокаций с противоположными векторами Бюргерса их упругие поля взаимно компенсируются; дислокации притягиваются и аннигилируют.

Дислокации в кристаллических веществах легко перемещаются, так как при их перемещении в плоскости скольжения в каждый данный момент разрываются и присоединяются связи не между всеми атомами, а только между теми, которые находятся у линии дислокации. При этом экстраплоскость путем незначительного смещения может переходить в полную плоскость, а ее функции передаются соседней полной плоскости.

Дислокации в реальных кристаллах образуются в процессах кристаллизации, фазовых превращений, пластической деформации и др. С уменьшением величины блоков и увеличением угла разориентации между ними плотность дислокаций повышается. Значительное число дислокаций (плотность — $10^6 \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$), характер их распределения в объеме кристалла, подвижность и способность к размножению оказывают существенное влияние на свойства металлов. Так, дислокации играют главную роль в процессах пластической деформации и в значительной мере определяют реальную прочность кристаллических веществ.

Поверхностные дефекты

К *поверхностным дефектам* причисляют границы зерен и блоков, свободные поверхности кристаллов и др. Они имеют только один малый размер — толщину.

Источниками поверхностных дефектов выступают:

границы между разориентированными участками зерна (кристаллита), например, дефекты упаковки, то есть нарушения последовательности застройки атомными плоскостями отдельных участков кристалла — *двойники*;

границы доменов (магнитных, сегнетоэлектриков);

границы включений и др.

Многие из поверхностных дефектов представляют собой ряды и сетки дислокаций.

Поверхностные дефекты, особенно границы между разориентированными участками зерна, влияют на физические свойства. Так, чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Вдоль границ зерен и блоков быстрее протекает диффузия, особенно при нагреве.

Объемные дефекты

Объемными дефектами кристаллической решетки являются скопления вакансий, образующих *поры* (или каналы), а также включения посторонних фаз, скопления примесей на дислокациях и др.

Дефекты кристаллической структуры веществ возникают уже в процессе их кристаллизации. Взаимодействие дефектов между собой приводит к образованию новых несовершенств. Нарушение правильности кристаллической решетки приводит к изменению свойств материала.

Все дефекты, встречающиеся в твердых веществах, не являются независимыми. Перемещаясь, они сталкиваются друг с другом; дефекты одного типа или их совокупность при определенных условиях могут превратиться в дефекты другого типа: совокупность вакансий, например, переходит в дислокацию или пору, а пора может стать источником вакансий; совокупность дислокаций превращается в трещину; совокупность множества микроскопических пор - в одну макроскопическую пору.

Свойства веществ определяются видом и количеством дефектов, например, при увеличении числа объемных дислокаций растет количество мест скопления примесей и снижается пластичность материала; дислокационные линии обладают повышенной диффузионной проводимостью и др.

1.3. Металлические сплавы

1.3.1. Общие сведения

Сплавы — макроскопически однородные системы, полученные из двух или более сортов атомов (молекул) металлов, неметаллов, оксидов, органических веществ и др. Химические элементы, образующие сплав, называют компонентами. В общем случае сплавы не являются механической смесью компонентов.

Классификацию сплавов проводят *по химическому составу, числу компонентов, числу фаз и способу получения.*

По числу компонентов сплавы могут быть *двойные, тройные* и т. д.

По числу фаз различают *однофазные* и *многофазные* сплавы.

По способу получения сплавы классифицируются следующим образом: *полученные кристаллизацией из расплава, металллокерамическим способом, конденсацией из паров, электроосаждением из растворов, диффузионным насыщением* и др.

Особенно важную роль в технике, как основной вид конструкционных материалов, играют *металлические сплавы.*

Металлические сплавы — макроскопически однородные системы, состоящие из двух или более сортов атомов металлов (реже неметаллов), в которых доминирующими являются атомы металла и которые обладают металлическими свойствами.

Металлические сплавы традиционно классифицируются по химическому составу с указанием главного компонента сплава (например, медь — медные сплавы, алюминий — алюминиевые сплавы и т. п.). Внутри классов, определенных по главному компоненту сплава, распределение на группы и подгруппы чаще всего производится по характерным особенностям в свойствах или области применения данного сплава или нескольких сплавов.

Свойства металлических сплавов могут быть изменены *легированием*, а также их механической, термической, термомеханической, радиационной и другими видами обработки.

Легирование — введение в состав металлических сплавов так называемых *легирующих элементов* (например, в сталь — Cr, Ni, Mo, W, V и др.) для придания сплавам определенных физических, химических или механических свойств.

1.3.2. Характеристика фаз, образующих сплавы

Компоненты, входящие в состав сплава, могут образовывать следующие фазы:

жидкие растворы;

твердые растворы;

химические соединения.