

## Лекция 1

### ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

#### 1.1 Общая классификация материалов электронной техники

Материалы, используемые в электронной технике, подразделяют на электротехнические, конструкционные и специального назначения.

Электротехническими называют материалы, характеризующиеся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемые в технике с учетом этих свойств (рис. 1.1). Практически различные материалы подвергаются воздействиям как отдельно электрического или магнитного полей, так и их совокупности.

По поведению в магнитном поле электротехнические материалы подразделяют на сильномагнитные (магнетики) и слабомагнитные. Первые нашли особенно широкое применение в технике благодаря их магнитным свойствам.

По поведению в электрическом поле материалы подразделяют на проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические.

Большинство электротехнических материалов можно отнести к слабомагнитным или практически немагнитным. Однако и среди магнетиков следует различать проводящие, полупроводящие и практически непроводящие, что определяет частотный диапазон их применения.

*Проводниковыми* называют материалы, основным электрическим свойством которых является сильно выраженная электропроводность. Их применение в технике обусловлено в основном этим свойством, определяющим высокую удельную электрическую проводимость при нормальной температуре.

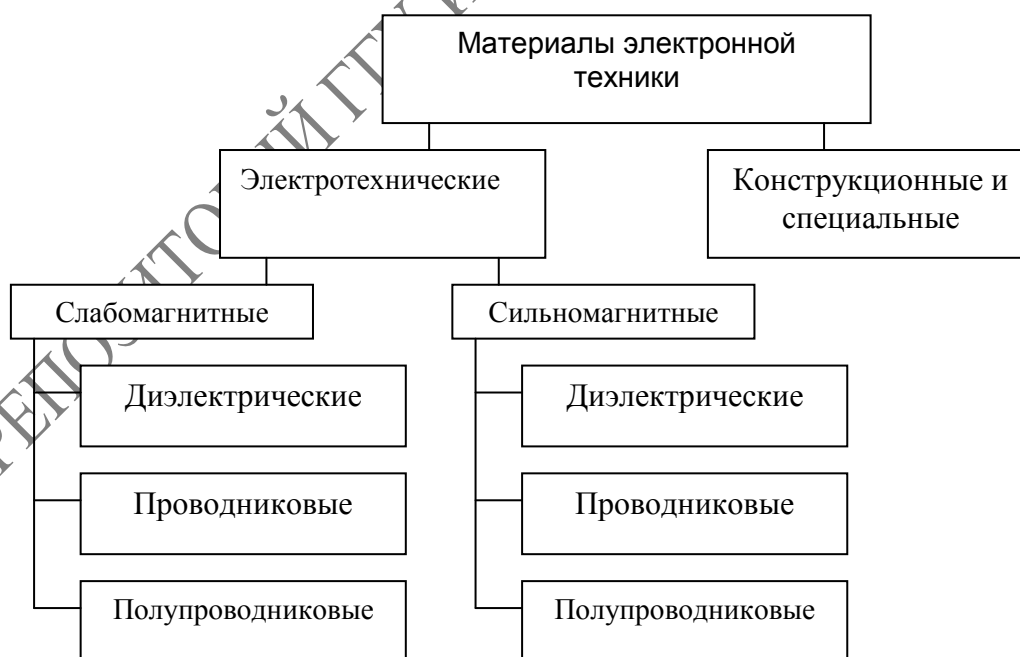


Рисунок 1.1 Классификация материалов электронной техники

*Полупроводниковыми* называют материалы, являющиеся по удельной проводимости промежуточными между проводниковыми и диэлектрическими

материалами и отличительным свойством которых является сильная зависимость удельной проводимости от концентрации и вида примесей или различных дефектов, а также в большинстве случаев от внешних энергетических воздействий (температуры, освещенности и т. п.).

*Диэлектрическими* называют материалы, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электростатического поля. Реальный (технический) диэлектрик тем более приближается к идеальному, чем меньше его удельная проводимость и, чем слабее у него выражены замедленные механизмы поляризации, связанные с рассеянием электрической энергии и выделением теплоты.

Условно к проводникам относятся материалы с удельным электрическим сопротивлением  $\rho < 10^{-5}$  Ом·м, а к диэлектрикам – материалы, у которых  $\rho > 10^8$  Ом·м. При этом надо заметить, что удельное сопротивление хороших проводников может составлять всего  $10^{-8}$  Ом·м, а у лучших диэлектриков превосходит  $10^{16}$  Ом·м. Удельное сопротивление полупроводников в зависимости от строения и состава материалов, а также от условий их эксплуатации может изменяться в пределах  $10^{-5}$  –  $10^8$  Ом·м. Хорошими проводниками электрического тока являются металлы. Металлы составляют наибольшую часть известных в природе химических элементов: из 108 элементов таблицы Менделеева лишь 19 не являются металлами. За исключением Au, Ag, Pt, Cu, встречающихся в самородном состоянии, остальные металлы в природе существуют в составе химических соединений – оксидов, сульфидов и других, образующих руды.

Но кроме элементарных веществ существуют тысячи химических соединений, сплавов или композиций со свойствами проводников, полупроводников или диэлектриков. В то же время диэлектрики при сильном нагревании могут проявлять свойства полупроводников. Качественное различие состоит в том, что для металлов проводящее состояние является основным, а для полупроводников и диэлектриков – возбужденным. Электрические свойства тесно связаны с тем, как атомы связаны между собой.

## 1.2 Виды химической связи

Разделение химически активных элементов на металлы и неметаллы позволяет подразделить химические связи на три основных типа: металлическую, ковалентную и ионную. Связь между сильно электроположительными атомами металлов и электроотрицательными атомами неметаллов трактуют как ионную связь. Поскольку она существует между противоположно заряженными ионами, то ее называют *гетерополярной*. Металлическую и ковалентную связи относят к *гомополярным*. Металлическая связь реализуется между металлом и неметаллом, ковалентная – между неметаллом и неметаллом. Названные типы связей являются предельными случаями химического взаимодействия.

Ионная связь возникает из-за притяжения противоположно заряженных ионов. Наиболее ярким примером конденсированных тел, в которых этот тип связи доминирует, являются щелочно-галогидные кристаллы: NaCl, LiF и др. Образование ионов в таких соединениях энергетически выгодно, поскольку потенциал ионизации атома щелочного

металла превосходит сродство к электрону атома галогена. Энергия электростатического (кулоновского) притяжения  $E_{\text{пр}}$  для пары ионов с зарядом  $\pm e$ , находящихся на расстоянии  $r$ , составляет  $E_{\text{пр}} = -e^2/r$ . В кристалле, где ионы образуют упорядоченную решетку, полная энергия кулоновского взаимодействия (отнесенная к паре ионов) становится равной

$$E_{\text{пр}} = -\alpha \frac{e^2}{r}, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – постоянная Маделунга (E. Madelung – немецкий физик-теоретик), зависящая только от структуры кристалла. Для NaCl  $\alpha = 1,748$ .

В формировании стабильной структуры твердых тел существенную роль играет энергия отталкивания  $E_{\text{от.}}$ , резко возрастающая при уменьшении расстояния между атомами и ионами. Энергия  $E_{\text{от.}}$  имеет квантовомеханическую природу и обусловлена прежде всего отталкиванием ядер взаимодействующих атомов (ионов), экранированных окружающими их электронами. Эта энергия, отнесенная к паре ионов, равна

$$E_{\text{от.}} = \frac{\beta}{r^m}, \quad (1.2)$$

где  $6 < m < 10$ ,  $\beta$  – постоянная,  $r$  – расстояние между частицами.

Сумма энергий  $E_{\text{пр}}$  и  $E_{\text{от.}}$  дает полную энергию взаимодействия пары ионов. Как видно из рис. 1.2, график  $E(r)$  имеет минимум при некотором расстоянии  $r_0$  между ионами, которое определяет равновесный параметр структуры твердого тела, а соответствующая энергия  $E(r_0)$  – является энергией связи ионов в нем.

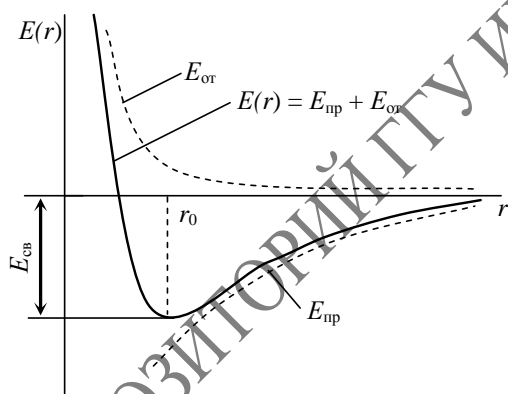


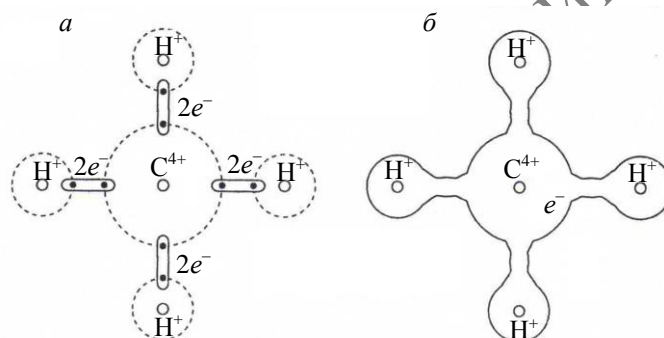
Рисунок 1.2 Зависимость энергии взаимодействия двух ионов от расстояния между ними

Ковалентная связь образуется путем обменного электронного взаимодействия между атомами, которое реализуется в виде сгущений электронной плотности при обобществлении внешних электронов у атомов с перекрывающимися орбитами. В отличие от ионной связи, ковалентно могут быть связаны и одинаковые, и разные атомы. Ковалентная связь имеет место: в гомополярных молекулах  $\text{H}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{I}_2$  и др.; в веществах, атомы которых расположены в периодической системе элементов в отдалении от инертных газов (кристаллы алмаза, Si, Ge, Te); в молекулах органических соединений; в полупроводниковых кристаллах типа  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{IV}}$ .

Расчет энергии ковалентных связей затруднен необходимостью привлечения представлений квантовой механики для описания электронной плотности. Это вызвано тем, что движение электронов в изолированных и взаимодействующих атомах существенно отличается. Ковалентная связь обычно образуется парой электронов с антипараллельными спинами, по одному от каждого из соединяющихся атомов.

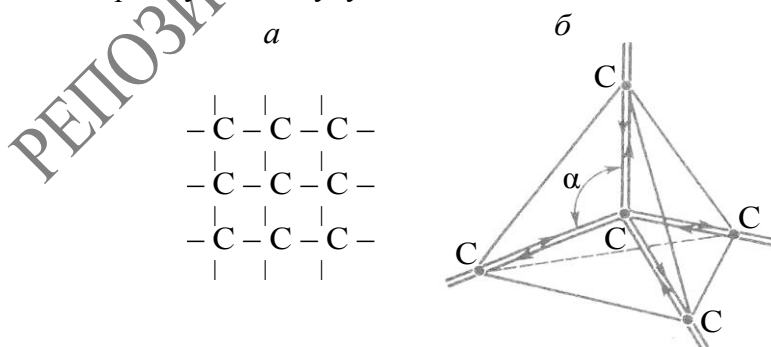
В молекуле метана  $\text{CH}_4$  (рис. 1.3) атом углерода с электронной конфигурацией  $1s^2 2s^2 2p^2$  окружен четырьмя атомами водорода с электронной конфигурацией  $1s^1$ . Орбиты внешних гибридных  $2s-2p$  электронов углерода и электронов атомов водорода перекрываются, и эти электроны обобществляются. В органической химии это трактуется как образование «связей» между атомами С и Н (рис. 1.3, а).

**Рис. 1.3** Ковалентная связь в молекуле метана: а – модель образования связей в результате обобществления электронов; б – сгущения электронной плотности



Однако, согласно принципам квантовой механики четыре гибридных  $2s^2$  и  $2p^2$  электрона углерода индивидуально не различимы, и можно говорить лишь об образовании сгущений электронной плотности между атомами водорода и углерода (рис. 1.3, б). С позиций квантовой теории химической связи образование таких локализованных сгущений энергетически выгодно, что подтверждается образованием устойчивых молекул.

Важными свойствами ковалентной связи являются насыщенность и направленность. *Насыщенность* – свойство атома образовывать ковалентную связь лишь с определенным числом своих соседей. Так, атом водорода может устанавливать связь только с одним соседом. В алмазе или графите несколько валентных электронов являются общими для атома углерода и его соседей, и потому невозможно считать какую-либо группу атомов химически насыщенной (рис. 1.4). С этой точки зрения кристалл алмаза представляет собой огромную молекулу.



**Рис. 1.4** Схемы связей (а) и тетраэдрического расположения атомов углерода (б) в структуре алмаза. Стрелками обозначены направления обмена электронами

*Направленность* ковалентной связи состоит в том, что связь образуется в тех направлениях, по которым локализована максимальная электронная плотность.

Вследствие направленности связей ковалентные кристаллы обладают высокой твердостью и хрупкостью.

Ковалентные связи между парами атомов можно рассматривать как короткодействующие силы. В молекуле  $H_2$  энергия химической связи зависит только от расстояния между атомами, а в алмазе, где атом углерода находится в тетраэдрическом окружении аналогичных атомов (рис. 1.4, б), для расчета энергии надо знать еще и значения валентных углов (примерно  $109^\circ$ ).

В конденсированных телах ковалентные связи в чистом виде реализуются редко и имеют частично ионную природу. Веществ с единственно ионными связями также чрезвычайно мало. Степень «ионности» связи в химических соединениях атомов  $A$  и  $B$  можно оценить, исходя из электроотрицательности  $X_A$  и  $X_B$ . Относительная плотность связи равна

$$\xi = 1 - \exp[-0,25(X_A - X_B)^2].$$

Если  $\xi = 1$ , т.е. ионность составляет 100 %, то связь между атомами чисто ионная, если  $\xi = 0$ , то связь чисто ковалентная. В табл. 1.1 приведены приблизительные значения ионности связи для некоторых соединений. Из таблицы видно, что NaCl можно считать ионным кристаллом, а SiC и GaAs – преимущественно ковалентными. Атомы с почти заполненными оболочками (F, Cl, Br, I) обнаруживают тенденцию к ионной связи, тогда как атомы III, IV, и V групп периодической системы элементов – к ковалентной связи. В табл. 1.2 приведены значения энергии ковалентной связи для некоторых пар атомов.

Таблица 1.1 Степень ионности связи в кристаллах бинарных соединений

Кристалл	Степень ионной связи	Кристалл	Степень ионной связи
Si	0,00	GaSb	0,26
SiC	0,18	GaAs	0,32
Ge	0,00	CuBr	0,74
ZnTe	0,61	CuCl	0,75
ZnO	0,62	AgI	0,77
ZnS	0,62	AgBr	0,85
ZnSe	0,63	AgCl	0,86
CdTe	0,67	MgS	0,79
CdS	0,69	MgSe	0,79
CdSe	0,70	MgO	0,84
CdO	0,79	LiF	0,92
InSb	0,32	NaCl	0,94
InAs	0,35	RbF	0,96

Энергия ионной связи в полупроводниках  $A^{III}B^V$  возрастает при переходе к более тяжелым соединениям – от GaAs к InSb. С другой стороны, в кристаллах, которые называют «ионными», в частности, в состав которых входят ионы элементов шестой группы ( $O^{2-}$ ,  $S^{2-}$  и др.), всегда наряду с ионной реализуется ковалентная связь, т.е. некоторая доля электронной плотности «обобществлена» соседними атомами. Даже в галогенидах щелочных металлов вклад ковалентной связи хотя и мал, но не равен нулю. Таким образом, твердых тел, в которых связь была бы чисто ионной, не существует. В

отличие от ионной, только ковалентная связь имеет место в диэлектрических монокристаллах, например, в алмазе.

Таблица 1.2 Энергии ковалентной связи

Связь	Энергия связи	
	эВ	кДж/моль
O–O	1,4	138
Te–Te	1,4	138
Ge–Ge	1,6	159
Si–Si	1,8	176
P–P	2,2	213
Cl–Cl	2,5	243
C–C	3,6	347
H–H	4,5	435

Металлическая связь – разновидность гомополярной химической связи, характерна для металлов и сплавов. Металлическая связь, так же, как и ковалентная, осуществляется обобществленными электронами, но принадлежащим не соседним атомам, а всему объему конденсированного тела. Внешние валентные электроны в атомах металлов связаны с ядрами довольно слабо. В металле они коллективизированы и образуют «электронный газ» (или «электронную жидкость»), заполняющий межионное пространство. Положительно заряженные ионы «стягиваются», отрицательно заряженным электронным газом. Таким образом, металлическая связь возникает вследствие взаимодействия положительных ионов с электронным газом.

С уменьшением расстояния между ионами увеличивается плотность электронного газа, вследствие чего растет сила, стягивающая ионы. С другой стороны, по мере сближения ионов, увеличивается сила отталкивания между ними. Расстояние между ионами, при котором силы притяжения уравновешены силами отталкивания, характеризуют устойчивое состояние решетки. Это принципиально верное представление недостаточно точно. В действительности металлическая связь имеет более сложную природу, и методы ее расчета основаны на зонной теории твердого тела. В наиболее простом варианте энергия металлической связи определяется двумя факторами. С одной стороны, при сближении металлических атомов волновые функции электронов перекрываются, и электрон получает возможность перемещаться в более широкой (чем в изолированном атоме) зоне, где он имеет более низкую потенциальную энергию. С другой стороны, при «сжатии» электронного газа возрастает средняя кинетическая энергия электронов. Равновесная плотность электронов соответствует минимуму полной энергии взаимодействия двух атомов (ионов). Расстояние между ними, при котором это условие реализуется, можно считать атомным (ионным) радиусом металла.

Наличие свободных электронов в металле обуславливает *ненаправленный* и *ненасыщенный* характер металлической связи. Чистая ненаправленная металлическая связь наблюдается у одновалентных металлов (Na, Li и др.) с кубической плотно упакованной структурой. У металлов с несколькими электронами на внешней оболочке не все электроны делокализуются. Поэтому определенную составляющую в связь вносит ковалентное взаимодействие ионов. Металлическая связь определяет электрические и тепловые свойства металлов, обуславливая высокие электро- и теплопроводность.

Металлическая связь является довольно сильной, о чем свидетельствует прочность и высокая температура плавления многих (хотя и не всех) металлов.

Помимо упомянутых химических связей – ионной, ковалентной и металлической – атомы связываются посредством ван-дер-ваальсовой и водородной связей.

Ван-дер-ваальсовая связь имеет место в кристаллах, состоящих из молекул с насыщенными связями ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $Cl_2$ ,  $Br_2$  и др.) или из атомов инертных элементов. Название связи происходит от имени нидерландского физика Я.Д. Ван-дер-Ваальса (J.D. Van der Waals), который для объяснения свойств газов и жидкостей предложил в 1873 г. уравнение состояния, учитывающее межмолекулярные взаимодействия. Механизм этого вида связи состоит в мгновенном возникновении электрических диполей в молекуле вследствие флуктуаций межатомных расстояний (отсюда еще одно название – *флуктуационная* связь). Квантовомеханический расчет энергии взаимодействия диполей показал, что она обратно пропорциональна шестой степени расстояния между атомами. Ван-дер-ваальсовую связь называют также *молекулярной*, поскольку она связывает частицы в молекулярных кристаллах. Энергия этой связи очень мала, о чем свидетельствуют чрезвычайно низкие температуры плавления веществ, в которых они реализуются.

Водородная связь осуществляется в результате кулоновского взаимодействия иона  $H^+$  (протона) с «дополнительным» отрицательным ионом азота, кислорода, хлора и др. Она не образуется с ионами, с которыми водород вступает в ковалентную связь. Энергия водородной связи приблизительно равна 0,1 эВ, т.е. на порядок меньше энергии ковалентной связи.

Образование водородной связи можно объяснить следующим образом. Электроотрицательный атом, «оттягивая» электрон от ядра атома водорода, приобретает положительный заряд, равный заряду протона. Этот протон и осуществляет связь между атомами. Из-за малого размера ядра атома водорода водородная связь осуществляется только между двумя атомами.

Типичным примером водородной связи является связь между молекулами воды (рис. 1.5). Атом кислорода одной молекулы воды и атом водорода другой молекулы образуют диполь с зарядами  $+q$  и  $-q$  на полюсах. Притяжение между этими зарядами приводит к возникновению водородной связи. Длина водородной связи  $r_{OH} = 2,76\text{Å}$  значительно больше длины ковалентной связи  $H-O$  в молекуле воды ( $r_0 = 0,96\text{Å}$ ).

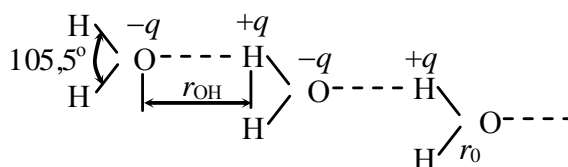


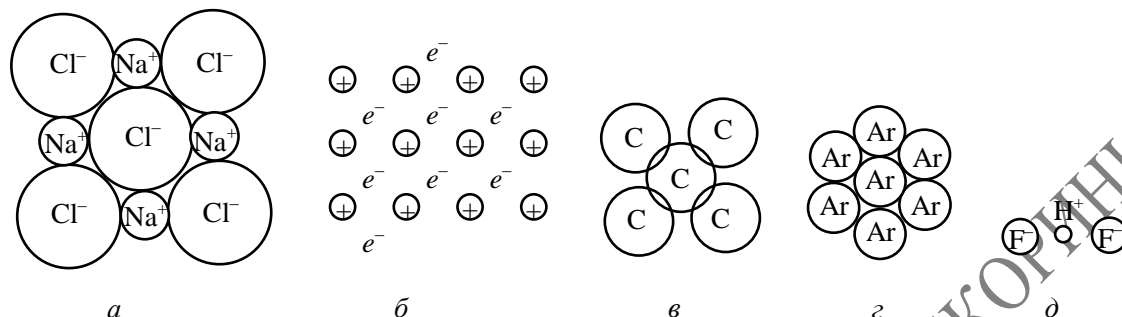
Рис. 1.5 Водородная связь (пунктир) между молекулами воды

Наличием водородных связей объясняется своеобразие структуры и физических свойств воды и водных растворов. Кристаллическая структура льда представляет собой тетраэдрическую сетку водородных связей, в которой имеется большое количество пустот. При плавлении льда эти пустоты частично заполняются молекулами воды, и поэтому плотность воды выше плотности льда.

Водородные связи могут быть не только межмолекулярными, но и внутримолекулярными. Внутримолекулярные водородные связи: стабилизируют

глобулярную структуру атомов белков; влияют на свойства древесины и бумаги, построенных из волокон целлюлозы; ответственны за уникальную структуру молекул нуклеиновых кислот, содержащихся во всех живых организмах.

На рис. 1.6 приведены схемы основных видов межатомного взаимодействия в конденсированных телах.



**Рис. 1.6** Основные виды связи между атомами (ионами) в конденсированных телах. *a* – ионная связь в кристалле хлористого натрия; *б* – металлическая связь; *в* – ковалентная связь между атомами алмаза; *г* – силы Ван-дер-Ваальса между атомами аргона; *д* – водородная связь в молекуле HF<sub>2</sub>

Химические связи классифицируют по ряду других признаков. Важнейшим из них является энергетический. Энергию связи многоатомных молекул определяют как энергию диссоциации. Для многоатомных молекул эта величина является условной и отвечает энергии такого процесса, при котором данная химическая связь исчезает, а все остальные остаются без изменения. По энергетическому признаку связи подразделяют на сильные ( $\geq 500$  кДж/моль), слабые (от 100 до 15 кДж/моль) и ван-дер-ваальсовы ( $\leq 5$  кДж/моль). Параметрами связей являются: равновесные межъядерные расстояния (длины связей); валентные углы; частоты колебаний, отнесенные к паре связанных атомов; поляризуемость; электрический дипольный и магнитный моменты химической связи. Значения параметров получают экспериментально, например, оценивая распределение электронной плотности рентгенографическими методами.

### 1.3 Особенности строения твердых тел

Твердое тело – агрегатное состояние вещества, которое характеризуется стабильностью формы и тепловым движением атомов, совершающих малые колебания около положений равновесия. Изучением свойств твердого тела занимается самостоятельная область науки – физика твердого тела, развитие которой привело к познанию фундаментальных свойств материального мира и стимулируется потребностями техники. Около половины физиков мира работают в области физики твердого тела, почти половина всех научных публикаций по физике относится к исследованию твердого тела.

В природе существует две разновидности твердых тел, различающихся по своим свойствам: кристаллические и аморфные. *Кристаллические* тела остаются твердыми, т.е. сохраняют свою форму до определенной температуры ( $T_{пл}$ ), при которой они переходят в жидкое состояние. При охлаждении процесс идет в обратном направлении. *Аморфные* тела при нагревании размягчаются в большом температурном интервале, становятся вязкими, а затем переходят в жидкое состояние. При охлаждении процесс идет в обратном направлении. Большинство кристаллических тел состоит из кристаллов.



*Кристаллы* – твердые тела, обладающие трехмерной периодической атомной структурой и имеющие (при равновесных условиях образования) естественную форму правильных симметричных многогранников. Присущее кристаллам регулярное расположение частиц (атомов, ионов, молекул), характеризующееся периодической повторяемостью в трех измерениях, названо *кристаллической решеткой*. Для обозначения кристаллического строения химических соединений вместо термина "кристаллическая решетка" употребляют термин "кристаллическая структура". Одним из основных свойств кристаллов является симметрия.

Симметрия – одно из фундаментальных понятий физики и естествознания. В широком смысле слова *симметрия* – это неизменность (инвариантность) объектов и явлений природы по отношению к некоторым преобразованиям в пространстве переменных величин, описывающих эти объекты и явления.

Понятие симметрии используют в кристаллографии – науке об атомно-молекулярном строении, свойствах, образовании и росте кристаллов. Кристаллы при росте в термодинамически равновесных условиях приобретают правильную внешнюю форму в виде многогранников с плоскими гранями и прямыми ребрами. Если грани и ребра многогранников периодически повторяются, то такой кристалл обладает симметрией. Многогранник поворотом вокруг какой-либо оси, отражением в точке или плоскости может совмещаться сам с собой всеми своими точками. Операции (поворот, отражение, смещение), в результате которых объект (кристалл, геометрическая фигура) может быть совмещен сам с собой, называются *преобразованием симметрии* или *симметрическими преобразованиями*.

После преобразования симметрии части объекта, находившиеся в одном месте, совпадают с частями этого же объекта, находящимися в другом месте. Это значит, что в симметричном объекте есть подобные друг другу части – совместимые или зеркальные. В первом случае части объекта совмещаются всеми своими точками путем наложения, во втором – совмещение возможно только после предварительного отражения одной из частей в зеркале. Два объекта, являющиеся зеркальными отражениями друг друга, называются *энантиоморфными*, например, правая и левая рука, кристаллы кварца, молекулы аминокислот и др. Геометрические образы (точки, прямые линии, плоскости), относительно которых осуществляются симметрические преобразования, называют *элементами симметрии*.

Кристаллу может быть присуще не одно, а несколько преобразований симметрии. Совокупность операций симметрии данного кристалла образует *группу симметрии G*. Число операций, образующих группу *G*, называют *порядком группы*.

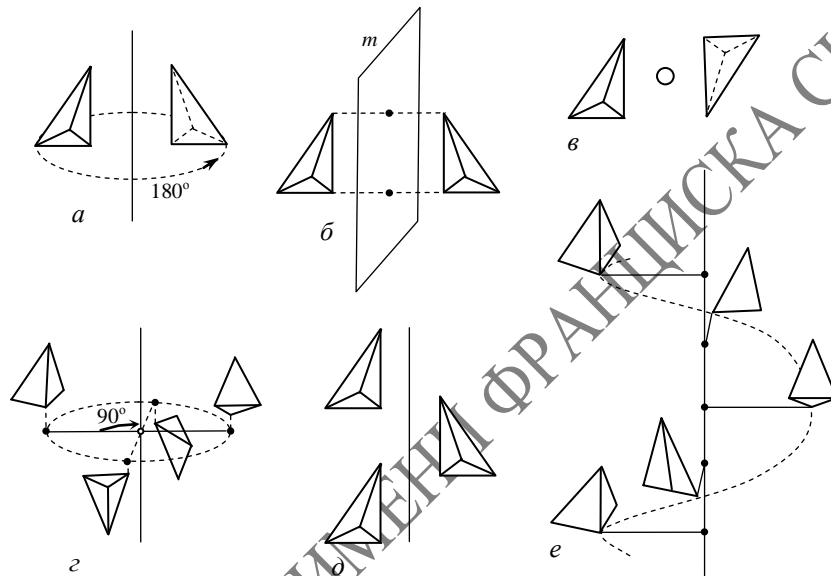
Группы симметрии классифицируют по числу *n* измерений пространства, в которых они определены и по числу *t* измерений пространства, в которых объект периодичен (их соответственно обозначают  $G_m^n$ ). Для описания кристаллов используют несколько групп симметрии, из которых важнейшими являются *пространственные* группы симметрии  $G_3^3$ , описывающие атомную структуру кристаллов, и *точечные* группы симметрии  $G_0^3$ , описывающие их внешнюю форму. Последние называют также кристаллографическими *классами*.

*Точечные группы симметрии*. Основные элементы симметрии геометрических фигур (конус, шар, цилиндр, многогранник) – поворотная *ось симметрии*

(простая и зеркальная), зеркальная *плоскость симметрии*, *центр симметрии* или *центр инверсии*. Соответственно операциями точечной симметрии являются:

- поворот фигуры вокруг оси симметрии порядка  $N$  на угол  $\alpha = 360^\circ/N$  (рис. 1.7, *a*);
- отражение в плоскости симметрии  $m$  (зеркальное отражение, рис. 1.7, *б*);
- инверсия  $\bar{1}$  (симметрия относительно точки, рис. 1.7, *в*);
- инверсионные повороты  $\bar{N}$  фигуры (комбинация поворота на угол  $360^\circ/N$  с одновременной инверсией, рис. 1.7, *г*).

Геометрически возможные сочетания операций точечной симметрии определяют ту или иную точечную группу симметрии. При преобразованиях точечной симметрии по крайней мере одна точка объекта остается неподвижной – преобразуется сама в себя. В ней пересекаются все элементы симметрии.



**Рис. 1.7** Примеры операций симметрии: *a* – поворот; *б* – отражение; *в* – инверсия; *г* – инверсионный поворот 4-го порядка; *д* – скользящее отражение; *е* – винтовой поворот 4-го порядка

Число точечных групп  $G_0^3$  бесконечно. Однако в кристаллах возможны только операции и соответственно оси симметрии до шестого порядка, кроме пятого. В кристаллической решетке не может быть оси симметрии 5-го порядка, так как с помощью пятиугольных фигур нельзя заполнить пространство без промежутков). Элементы симметрии обозначаются символами: оси 1, 2, 3, 4, 6, инверсионные оси  $\bar{1}$  (она же – центр симметрии или центр инверсии),  $\bar{2}$  (она же плоскость симметрии  $m$ ),  $\bar{3}$ ,  $\bar{4}$ ,  $\bar{6}$ . Количество точечных кристаллографических групп симметрии, описывающих внешнюю форму кристаллов, ограничено – их всего 32. Эти группы объединяют по признаку точечной симметрии формы элементарной ячейки в 7 сингоний.

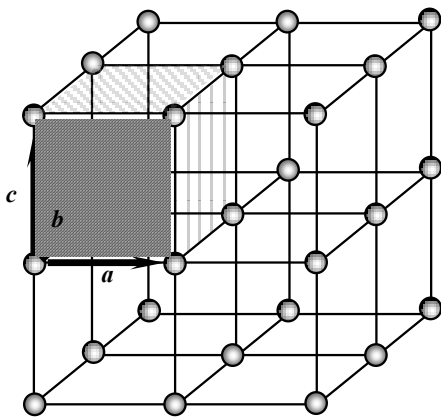
**Пространственные группы симметрии.** Пространственную симметрию атомной структуры кристаллов описывают пространственными группами симметрии  $G_3^3$  (их называют также федоровскими в честь обнаружившего их в 1890 г. русского кристаллографа Е.С. Федорова). Характерными для атомной структуры кристаллов операциями являются три некопланарных переноса (т.е. в непараллельных плоскостях), называемых *трансляциями*, которые задают трехмерную периодичность

атомной структуры кристаллов. Сдвиг элемента атомной структуры на векторы  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  или на вектор  $\mathbf{t} = p_1\mathbf{a} + p_2\mathbf{b} + p_3\mathbf{c}$ , где  $p_1, p_2, p_3$  – любые целые числа, совмещает сдвигаемый элемент с собой и, следовательно, является операцией симметрии (так называемая *трансляционная симметрия*).

Вследствие комбинирования в решетке операций трансляций и точечной симметрии в группах  $G_3^3$  возникают элементы симметрии с трансляционной компонентой – плоскости скользящего отражения и винтовые оси различных порядков (рис. В.7, д, е).

Существование кристаллической решетки в твердом теле объясняется тем, что равновесие сил притяжения и отталкивания между атомами, соответствующее минимуму его потенциальной энергии, достигается при условии трехмерной периодичности.

Кристалл есть однородное анизотропное тело. Однородность означает, что физические свойства кристалла одинаковы во всех его точках. Для описания



**Рис. 1.8** Элементарная ячейка кристаллической решетки (заштрихована); кружками обозначены узлы решетки

кристаллической решетки нужно знать координаты центров атомов (или узлы решетки) в элементарной ячейке кристалла (рис. 1.8). *Элементарная ячейка* – часть атомной структуры кристалла, параллельными переносами которой (трансляциями) в трех измерениях можно построить всю кристаллическую решетку. Длины ребер элементарной ячейки  $a$ ,  $b$ ,  $c$  называют постоянными или периодами кристаллической решетки, а в векторной форме – векторами трансляции. Элементарная ячейка имеет форму параллелепипеда, её выбор определяется симметрией кристаллов.

В элементарной ячейке кристалла может размещаться от одного атома (химические

элементы) до сотен (химические соединения) и миллионов атомов (белки, вирусы). Соответственно периоды кристаллических решеток составляют от нескольких десятых до  $10^2$  нм (табл. 1.3).

Таблица 1.3 Параметры элементарных ячеек некоторых кристаллов

Тип кристаллов	Периоды кристаллической решетки, нм	Число атомов в элементарной ячейке
Химические элементы, простейшие соединения	0,5–1,0	1–10
Неорганические и простые молекулярные соединения	1,0–2,0	до сотен
Сложные органические соединения	2,0–4,0	до тысяч
Белки	до 10–30	$10^3$ – $10^5$
Вирусы	до 200	$10^6$ – $10^9$

По признаку точечной симметрии элементарной ячейки все кристаллы делят на семь групп, получивших название кристаллографических *сингоний*, которые различаются соотношением между длинами ребер  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ячейки и углами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  между ними (рис. 1.9):

- кубическая ( $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ );
- тетрагональная ( $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ );
- гексагональная ( $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ );
- тригональная ( $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ );
- ромбическая ( $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ );
- моноклинная ( $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$ );
- триклинная ( $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ ).

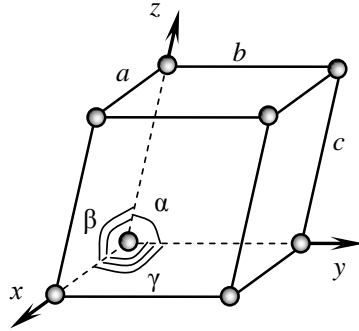


Рис. 1.9 Конфигурация элементарной ячейки с параметрами  $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$ ;  
 $x, y, z$  – кристаллографическая система координат

Каждую кристаллическую структуру можно охарактеризовать определенным набором трансляций. Разным соотношениям значений векторов  $a, b, c$  и взаимной ориентации основных трансляций соответствуют решетки, отличающиеся друг от друга по симметрии.

В 1848 г. швейцарский математик Браве (A. Bravais) математическим путем доказал, что существует 14 типов трехмерных геометрических фигур, характеризующих все возможные типы трансляционной симметрии кристаллической решетки (рис. 1.10).

Сингония \ Тип решетки	Три- клинная $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Моно- клинная $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$	Ромби- ческая $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Тетра- гональная $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Три- гональная (ромбод- рическая) $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Гекса- гональная $a = b \neq c$ $\gamma = 120^\circ$ $\alpha = \beta = 90^\circ$	Кубичес- кая $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Примитивный							
Базоцентри- рованный							
Объемноцен- трированный							
Гранецентри- рованный							

Рис. 1.10 Трансляционные решетки Браве

Различают *примитивные* решетки Браве, в которых узлы расположены только в вершинах элементарных параллелепипедов, *базоцентрированные* (узлы в вершинах и в центрах двух противоположных граней), *объемноцентрированные* (узлы в вершинах и в центре параллелепипедов) и *гранецентрированные* (узлы в вершинах и в центрах всех граней). Понятие "решетки Браве" используют при описании атомной структуры кристаллов. В простейших случаях (например, у металлов) структура кристалла описывается одной решеткой Браве. Сложную кристаллическую структуру можно описывать несколькими решетками Браве, «вдвинутыми» одна в другую. Полное описание кристаллической решетки содержит характеристику пространственной группы симметрии, параметры элементарной ячейки, координаты атомов в ячейке. В этом случае понятие «кристаллическая решетка» эквивалентно понятию атомной структуры кристалла.

Структура кристаллических твердых тел отличается от идеализированной схемы, описываемой понятием «кристаллическая решетка». Идеализацией является представление о дискретности кристаллической решетки. В действительности электронные оболочки атомов, составляющих кристаллическую решетку, перекрываются, образуя непрерывное периодическое распределение заряда с максимумами около дискретно расположенных ядер. Идеализацией является также неподвижность атомов. Атомы и молекулы кристаллической решетки колеблются около положений равновесия, а параметры колебаний зависят от взаимодействия атомов. С повышением температуры амплитуда колебаний увеличивается, что в конечном итоге приводит к разрушению кристаллической решетки и переходу твердого вещества в жидкое состояние. Кроме того, в кристаллах всегда имеются дефекты, искажающие кристаллическую решетку.

#### 1.4 Элементы зонной теории твердого тела

Зонная структура энергетического спектра электронов возникает в кристалле, образованном из  $N$  атомов, потому что каждый из них в свободном состоянии обладает дискретным электронным энергетическим спектром. Кристалл можно трактовать как гигантскую молекулу, в которой электроны всех атомов обобществлены и которую следует рассматривать как единую квантовомеханическую систему. В ней происходят квантовые переходы между уровнями энергии атомов, из которых состоит кристалл. Эти переходы связаны с изменением энергетического состояния электронов. Электронные уровни атомов образуют энергетические зоны. Если в каждом атоме  $Z$  электронов, то полное число электронов в кристалле равно  $NZ$ , и они занимают уровни в разрешенных зонах, начиная с нижних и заполняя более высокие. Нижние зоны целиком заполнены электронами внутренних оболочек атомов.

Физические свойства кристаллов определяются в основном электронами верхних разрешенных зон. Энергетический интервал  $E_g$  (рис. 1.11) между «дном»  $E_c$  (минимум энергии) самой верхней содержащей электроны зоны и «потолком»  $E_v$  (максимум энергии) соседней нижней целиком заполненной зоны, называется *запрещенной зоной*. Ниже по шкале энергии может быть еще несколько запрещенных и разрешенных зон. Зона, заполненная электронами частично (может стать пустой при  $T = 0$  К) называется *зоной проводимости*. Самая верхняя зона, целиком заполненная электронами даже при  $T = 0$  К, называется *валентной зоной*.

Кристаллы, у которых нижние зоны (в том числе – валентная) полностью заполнены электронами, а зона проводимости пуста, являются диэлектриками или полупроводниками (рис. 1.11). Вещества с широкой запрещенной зоной, разделяющей валентную зону и зону проводимости ( $E_g > 2-3$  эВ), условно относят к *диэлектрикам*, а вещества с более узкой запрещенной зоной ( $E_g < 2-3$  эВ) – к *полупроводникам*.

Необходимым условием электрической проводимости твердого тела является наличие в зоне проводимости свободных энергетических уровней, на которые под действием внешнего электрического поля могли бы перейти электроны. Если зона проводимости заполнена частично и содержит свободные верхние уровни, твердое тело будет проводником. *Металлы* – это кристаллы с частично заполненной зоной проводимости. Проводниками являются также *полуметаллы*, у которых имеется перекрытие зон с образованием гибридной зоны, причем нижняя зона заполнена, а верхняя пуста, но перекрывается нижней (рис. 1.11, з).

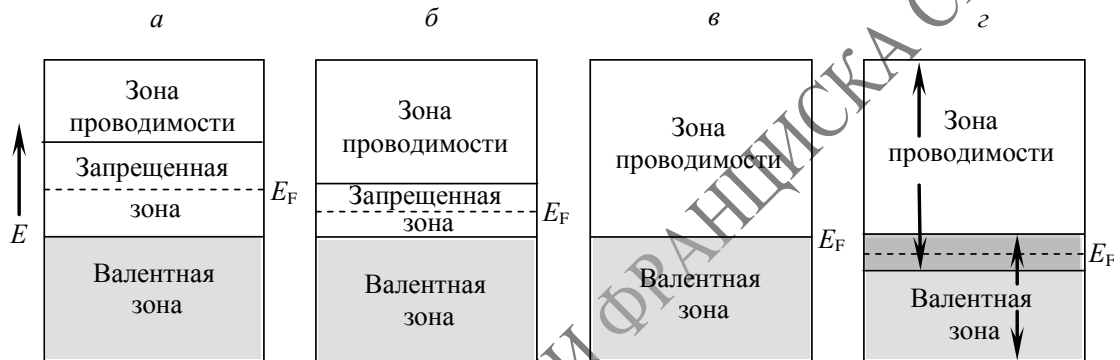


Рис. 1.11 Схема энергетических зон в диэлектриках (а), полупроводниках (б), металлах (в) и полуметаллах (з).  $E_F$  – уровень Ферми

Большинство металлов состоит из атомов с не полностью заполненными наружными электронными оболочками. Например, одиннадцать электронов в атоме Na распределены по состояниям следующим образом:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ . При объединении  $N$  атомов в кристалл энергетические уровни атомов группируются в зоны. Электроны внутренних оболочек атома полностью заполняют зоны, образованные из уровней  $1s$ -,  $2s$ - и  $2p$ - оболочек. Зону проводимости образуют электроны в  $3s$ -состоянии. В ней имеется  $2N$  энергетических состояний, в которых находятся  $N$  электронов из  $3s$ -оболочки. Таким образом, в кристалле натрия зона проводимости заполнена лишь наполовину.

Кристаллы, составленные из атомов или ионов с полностью заполненными оболочками, обычно являются диэлектриками или полупроводниками. Например, щелочно-галогидные кристаллы типа NaCl, у которых все  $s$ -электроны катиона переходят на  $p$ -оболочку аниона, полностью заполняя ее, – диэлектрики. Однако многие из таких кристаллов в результате перекрытия зон приобретают свойства металлов. Типичный пример металла с подобной зонной структурой – магний. У каждого атома Mg ( $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ ) в валентной оболочке имеются два электрона. В кристалле магния валентные электроны полностью заполняют  $3s$ -зону. Однако эта зона перекрывается со следующей разрешенной зоной, образованной из  $3p$ -уровней.

В полупроводниках при  $T > 0$  К заметное число электронов переброшено в зону проводимости. При температурах, близких к абсолютному нулю, любой полупроводник

становится хорошим диэлектриком. Таким образом, между металлами и диэлектриками существует принципиальное различие, а между диэлектриками и полупроводниками – только количественное. В табл. 1.4 приведены значения ширины запрещенной зоны для некоторых диэлектриков и полупроводников.

**Таблица 1.4** Ширина запрещенной зоны в кристаллах

Кристалл	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C (алмаз)	BN	GaAs	Si	Ge	InSb
$E_g$ , эВ	7,0	5,2	4,6	1,43	1,08	0,66	0,17

Электронная структура атомов, образующих твердое тело, не единственный фактор, обуславливающий различие в заполнении зон. Степень заполнения энергетических зон зависит также от структуры кристалла и природы химической связи. Так, например, углерод в структуре алмаза – диэлектрик, а углерод в структуре графита обладает свойствами проводника.

При  $T = 0$  К уровень Ферми  $E_F$  определяет границу между заполненными и незаполненными электронными уровнями энергии. В чистых веществах – полупроводниках и диэлектриках  $E_F$  находится в запрещенной зоне, разделяющей валентную зону и зону проводимости; а в металлах и полуметаллах – в разрешенной зоне (см. рис. 1.11). При повышении температуры в полупроводниках и диэлектриках электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости, образуя пустые места в валентной зоне, называемые *дырками*. Движение носителей заряда в валентной зоне обычно описывают как движение дырок. Каждой дырке приписывают заряд и волновой вектор, равные с обратным знаком заряду и волновому вектору отсутствующего электрона.

### 1.5. Основные свойства материалов

К основным свойствам относятся: механические, тепловые, электрические, магнитные и технологические, а также их сопротивление коррозии.

**Механические свойства** материалов характеризуют возможность их использования в изделиях, эксплуатируемых при воздействии механических нагрузок. Основными показателями таких свойств служат параметры прочности и твердость. Они зависят не только от природы материалов, но и от формы, размеров и состояния поверхности образцов, а также режимов испытаний, прежде всего, от скорости нагружения, температуры, воздействия сред и других факторов.

**Прочность** – свойство материалов сопротивляться разрушению, а также необратимому изменению формы образца под действием внешних нагрузок.

*Предел прочности* – напряжение, соответствующее максимальному (в момент разрушения образца) значению нагрузки. Отношение наибольшей силы, действующей на образец, к исходной площади его поперечного сечения называют *разрушающим напряжением* и обозначают  $\sigma_B$ .

*Деформирование* – изменение относительного расположения частиц в материале. Наиболее простые его виды – растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг. *Деформация* – изменение формы и размеров образца в результате деформирования.

Параметры деформирования – *относительное удлинение*  $\varepsilon = (l - l_0)/l_0$  (где  $l_0$  и  $l$  – длина образца исходная и после деформирования), *угол сдвига* – изменение прямого угла между лучами, исходящими из одной точки в образце, при его деформировании. Деформацию называют упругой, если она исчезает после снятия нагрузки, или пластической, если она не исчезает (необратима). Пластическими свойствами материалов при малых деформациях часто пренебрегают.

*Предел упругости* – напряжение, при котором остаточные деформации (т. е. деформации, обнаруживаемые при разгрузке образца) достигают значения, установленного техническими условиями. Обычно допуск на остаточную деформацию составляет  $10^{-3} \div 10^{-2}$  %. Предел упругости  $\sigma_y$  ограничивает область упругих деформаций материала.

Понятие о модуле как о характеристике упругости материалов возникло при рассмотрении идеально упругих тел, деформация которых линейно зависит от напряжения. При простом растяжении (сжатии)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.3)$$

где  $E$  – модуль Юнга, или модуль продольной упругости, который характеризует сопротивление материалов упругой деформации (растяжению, сжатию);  $\varepsilon$  – относительная деформация. При сдвиге в материале по направлению сдвига и по нормали к нему действуют только касательные напряжения

$$\tau = G\gamma, \quad (1.4)$$

где  $G$  – модуль сдвига, характеризующий упругость материала при изменении формы образца, объем которого остается постоянным,  $\gamma$  – угол сдвига.

При всестороннем сжатии в материале по всем направлениям действует нормальное напряжение

$$\sigma = K\Delta, \quad (1.5)$$

где  $K$  – модуль объемной упругости, который характеризует сопротивление материала изменению объема образца, не сопровождающемуся изменением его формы;  $\Delta$  – относительное объемное сжатие.

Постоянной величиной, характеризующей упругость материалов при одноосном растяжении, является *коэффициент Пуассона*:

$$\nu = |\varepsilon'| / \varepsilon, \quad (1.6)$$

где  $\varepsilon'$  – относительное поперечное сжатие;  $\varepsilon$  – относительное продольное удлинение образца.

**Т в е р д о с т ь** является механической характеристикой материалов, комплексно отражающей их прочность, пластичность, а также свойства поверхностного слоя образцов. Она выражается сопротивлением материала местному пластическому деформированию, возникающему при внедрении в образец более твердого тела – *индентора*. Вдавливание индентора в образец с последующим измерением размеров отпечатка является основным технологическим приемом при оценке твердости материалов. В зависимости от особенностей приложения нагрузки, конструкции инденторов и определения чисел твердости различают методы Бринелля, Роквелла, Виккерса, Шора. При измерении микротвердости по ГОСТ 9450–76 на поверхности



образца остаются отпечатки незначительной глубины, поэтому такой метод используют, когда образцы выполнены в виде фольги, пленок, покрытий малой толщины. Метод определения пластической твердости заключается во вдавливании в образец сферического наконечника путем последовательного приложения различных нагрузок.

**Коррозия** – физико-химический процесс изменения свойств, повреждения структуры и разрушения материалов вследствие перехода их компонентов в химические соединения с компонентами окружающей среды. Под коррозионным повреждением понимают любой дефект структуры материала, возникший в результате коррозии. Если механические воздействия ускоряют коррозию материалов, а коррозия облегчает их механическое разрушение, имеет место *коррозионно-механическое* повреждение материалов. Потери материалов из-за коррозии и затраты на защиту от нее машин и оборудования непрерывно увеличиваются вследствие активизации производственной деятельности человека и загрязнения окружающей среды отходами производства.

Наиболее часто сопротивление материалов коррозии характеризуют с помощью параметра *коррозионной стойкости* – величины, обратной технической скорости коррозии материала в данной коррозионной системе. Условность этой характеристики заключается в том, что она относится не к материалу, а к коррозионной системе. Коррозионную стойкость материала нельзя изменить, не изменив других параметров коррозионной системы. Противокоррозионная защита – это модифицирование коррозионной системы, ведущее к снижению скорости коррозии материала.

**Температурные характеристики.** Основными температурными параметрами материалов являются следующие.

**Жаростойкость** – свойство материалов сохранять или незначительно изменять механические параметры при высоких температурах. Свойство металлов противостоять коррозионному воздействию газов при высоких температурах называют **жароупорностью**. В качестве характеристики жаростойкости легкоплавких материалов используют *температуру размягчения*.

**Жаропрочность** – свойство материалов длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при высоких температурах. Это важнейшая характеристика материалов, эксплуатируемых при температурах  $T > 0,3 T_{пл}$ . Такие условия имеют место в двигателях внутреннего сгорания, паросиловых установках, газовых турбинах, металлургических печах и др.

При низких температурах (в технике – от 0 до  $-269$  °C) увеличивается статическая и циклическая прочность материалов, снижаются их пластичность и вязкость, повышается склонность к хрупкому разрушению. **Хладноломкость** – возрастание хрупкости материалов при понижении температуры. Склонность материала к хрупкому разрушению определяют по результатам ударных испытаний образцов с надрезом при понижении температуры.

**Тепловое расширение** материалов регистрируют по изменению размеров и формы образцов при изменении температуры. У газов оно обусловлено увеличением кинетической энергии частиц при нагревании, у жидкостей и твердых материалов связано с несимметричностью тепловых колебаний атомов, благодаря чему межатомные расстояния с ростом температуры увеличиваются.

Количественно тепловое расширение материалов характеризуют *температурным*

коэффициентом объемного расширения:

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \left( \frac{\Delta V}{\Delta T} \right)_\xi, \quad (1.7)$$

а твердых материалов – и температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР):

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \left( \frac{\Delta l}{\Delta T} \right)_\xi, \quad (1.8)$$

где  $\Delta l$ ,  $\Delta V$  и  $\Delta T$  – изменения линейного размера, объема образцов и температуры (соответственно). Индекс  $\xi$  служит для обозначения условий теплового расширения (обычно – при постоянном давлении).

Экспериментально  $\alpha_v$  и  $\alpha_l$  определяют методами *дилатометрии*, изучающей зависимость изменения размеров тел при воздействии внешних факторов. Специальные измерительные приборы – дилатометры – различаются устройством датчиков и чувствительностью систем регистрации размеров образцов.

**Теплоемкость** – отношение количества теплоты, полученной телом при бесконечно малом изменении его состояния в каком-либо процессе, к вызванному последним приращению температуры:

$$C = dQ/dT. \quad (1.9)$$

По признакам термодинамического процесса, в котором определяют теплоемкость материала, различают теплоемкость при постоянном объеме и при постоянном давлении. В процессе нагревания при постоянном давлении (изобарный процесс) часть теплоты расходуется на расширение образца, а часть – на увеличение внутренней энергии материала. Теплота, сообщенная тому же образцу при постоянном объеме (изохорный процесс), расходуется только на увеличение внутренней энергии материала.

**Удельная теплоемкость**, [Дж/(кг·К)], – отношение теплоемкости к массе тела. Различают удельную теплоемкость при постоянном давлении ( $c_p$ ) и при постоянном объеме ( $c_v$ ). Отношение теплоемкости к количеству вещества называют *молярной теплоемкостью* ( $c_m$ ), [Дж/(моль·К)]. Для всех веществ  $c_p > c_v$ , для разреженных (близких к идеальным) газов  $c_{mp} - c_{mv} = R$  (где  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная).

**Теплопроводность** – перенос энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц. Эта величина характеризует самопроизвольное выравнивание температуры твердых тел.

Для изотропных материалов справедлив закон Фурье, согласно которому вектор плотности теплового потока  $q$  пропорционален и противоположен по направлению градиенту температуры  $T$ :

$$q = -\lambda \text{grad}T, \quad (1.10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности [Вт/(м·К)], зависящий от агрегатного состояния, атомно-молекулярного строения, структуры, температуры и других параметров материала.

*Коэффициент температуропроводности* ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) является мерой теплоизоляционных свойств материала:

$$a^2 = \lambda / (\rho c_p), \quad (1.11)$$

где  $\rho$  – плотность;  $c_p$  – удельная теплоемкость материала при постоянном давлении.

**Технологические свойства** материалов характеризуют податливость материалов технологическим воздействиям при переработке в изделия. Знание этих свойств позволяет обоснованно и рационально проектировать и осуществлять технологические процессы изготовления изделий. Основными технологическими характеристиками материалов являются обрабатываемость резанием и давлением, литейные параметры, свариваемость, склонность к деформации и короблению при тепловой обработке и др.

**Обрабатываемость резанием** характеризуют следующими показателями: качеством обработки материалов – шероховатостью обработанной поверхности и точностью размеров образца, стойкостью инструмента, сопротивлением резанию – скоростью и силой резания, видом стружкообразования. Значения показателей определяют при обтачивании образцов и сравнивают с параметрами материала, принятого за эталон.

**Обрабатываемость давлением** определяют в процессе технологических испытаний (проб) материалов на пластическую деформацию. Методы оценки обрабатываемости давлением зависят от вида материалов и технологии их переработки. Например, технологические испытания металлов *на изгиб* проводят, изгибая образцы до заданного угла (до появления первой трещины в растянутой зоне образца с фиксацией угла изгиба, до параллельности сторон или до их соприкосновения). Считают, что образец выдержал испытания, если в нем не появилось излома, расслоений, надрывов, трещин. Листы и ленты испытывают *на выдавливание* (метод Эриксона) с помощью специального пресса. В образце формируют сферическую лунку, прекращая вытяжку в момент достижения текучести материала. Результат определяют по наибольшей глубине лунки в неразрушенных образцах.

**Обрабатываемость давлением** порошковых материалов характеризуют их текучестью, уплотняемостью и формуемостью. Метод определения *текучести* основан на регистрации времени истечения навески порошка в процессе его самопроизвольного просыпания через калиброванное отверстие воронки. От этого параметра зависит скорость заполнения порошковыми материалами форм для обработки давлением. *Уплотняемость* порошка характеризуют зависимостью объема навески порошка от давления – диаграммой прессования. *Формуемость* – свойство порошкового материала сохранять форму, полученную в процессе прессования.

**Литейные характеристики** материалов – совокупность технологических показателей, характеризующих формирование отливок путем заливки расплавленных материалов в литейную форму. *Жидкотекучесть* – свойство расплавленного материала заполнять литейную форму зависит от вязкости расплава, температур расплава и литейной формы, степени смачивания расплавом стенок формы и т. д. Ее оценивают по длине заполнения расплавом прямолинейного или спирального канала в специальной литейной форме. *Усадка литейная* – уменьшение объема расплава при переходе из жидкого состояния в твердое. Практически усадку определяют как отношение соответствующих линейных размеров формы и отливки в виде безразмерного коэффициента усадки, индивидуального для каждого материала.

Свариваемость – свойство материала образовывать сварное соединение, работоспособность которого соответствует качеству основного материала, подвергнутого сварке. О свариваемости судят по результатам испытания сварных образцов и характеристикам основного материала в зоне сварного шва. Установлены правила определения следующих показателей свариваемости металлов: механических свойств сварных соединений, допускаемых режимов дуговой сварки и наплавки, качества сварных соединений и сварных швов, длительной прочности сварных соединений.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ