



УЧЕБНИК
СИБИРСКОГО
ФЕДЕРАЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.22(07)
ББК 30.3я73
М341

Авторы:

О. А. Масанский, А. А. Ковалева, Т. Р. Гильманшина
В. С. Казаков, С. И. Лыткина

Рецензенты:

А. В. Лопатин, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой компьютерного моделирования Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева;

Н. М. Романченко, кандидат технических наук, доцент кафедры общинженерных наук Красноярского государственного аграрного университета

М341 **Материаловедение** : учебник / О. А. Масанский, А. А. Ковалева, Т. Р. Гильманшина [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2020. – 300 с. ISBN 978-5-7638-4347-7

Рассмотрены тенденции и направления развития современного теоретического и прикладного материаловедения, закономерности формирования структуры и свойств материалов при различных видах воздействия и технологии получения. Изложены механизмы фазовых и структурных превращений в зависимости от условий термической и механической обработок. Приведены современные материалы и технологии, применяемые при получении изделий металлургического комплекса.

Предназначен для бакалавров, обучающихся по направлениям 22.03.02.11 «Металлургия CDIO», 22.03.02 «Металлургия». Также может быть использован в качестве основной литературы при изучении дисциплин «Материаловедение», «Материаловедение и ТКМ», «Конструкционное материаловедение» студентами направлений подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» и др.

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 620.22(07)
ББК 30.3я73

ISBN 978-5-7638-4347-7

© Сибирский федеральный университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	8
1. Общая характеристика и свойства металлов	10
1.1. Общая характеристика металлов.....	10
1.2. Свойства материалов	11
1.2.1. Механические свойства материалов.....	11
1.2.2. Технологические свойства	21
1.2.3. Эксплуатационные свойства.....	21
2. Атомно-кристаллическое строение металлов.	
Механизм и параметры кристаллизации.....	23
2.1. Атомно-кристаллическое строение металлов	23
2.2. Полиморфизм и анизотропия.....	25
2.3. Типы связей и их влияние на структуру и свойства кристаллов.....	27
2.4. Дефекты атомно-кристаллического строения	29
2.5. Формирование структуры литых материалов	35
2.5.1. Механизм и параметры кристаллизации	35
2.5.2. Несамостоятельная кристаллизация	37
2.5.3. Строение стального слитка.....	38
2.5.4. Получение монокристаллов.....	40
2.5.5. Аморфные металлы	43
2.5.6. Нанокристаллические материалы	44
3. Диаграммы состояния сплавов двойных систем.....	46
3.1. Основные понятия теории сплавов	46
3.2. Фазы в металлических системах	48
3.3. Методы построения диаграмм состояния.....	52
3.4. Основные типы диаграмм состояния сплавов двойных систем.....	54
3.5. Правило Курнакова	63
4. Диаграмма состояния железо – углерод.....	65
4.1. Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов.....	66
4.2. Значение точек и линий диаграммы железо – цементит	69
4.3. Превращения в железоуглеродистых сплавах	73
4.3.1. Превращения сталей в твердом состоянии	73
4.3.2. Превращения чугунов	76
4.3.3. Превращения в сплавах системы «железо – графит».....	78

4.4. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства железоуглеродистых сплавов	79
5. Механизм и особенности пластического деформирования	82
5.1. Механизм пластического деформирования	82
5.2. Механизм деформации моно- и поликристаллического тела	84
5.3. Возврат и рекристаллизация	86
5.4. Разрушение металлов	89
6. Термическая и химико-термическая обработка сплавов.....	92
6.1. Отжиг сталей	93
6.1.1. Нагрев для снятия остаточных напряжений	94
6.1.2. Рекристаллизационный отжиг	95
6.1.3. Диффузионный отжиг	96
6.1.4. Полный отжиг	97
6.1.5. Изотермический отжиг	98
6.1.6. Неполный отжиг	99
6.1.7. Нормализация сталей	101
6.2. Термическая обработка сплавов с переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии	102
6.3. Превращения в сталях при нагреве до аустенитного состояния	105
6.3.1. Превращение перлита в аустенит	105
6.3.2. Рост зерна аустенита при нагреве	108
6.4. Превращение аустенита при различных степенях переохлаждения	109
6.4.1. Диаграмма изотермического превращения переохлажденного аустенита	110
6.4.2. Перлитное превращение	113
6.4.3. Бейнитное превращение	115
6.4.4. Мартенситное превращение	116
6.5. Закалка	120
6.5.1. Выбор технологических параметров закалки	121
6.5.2. Охлаждающие среды, применяемые при закалке	122
6.5.3. Прокаливаемость и закаливаемость	124
6.5.4. Практические способы закалки сталей и обработка холодом	125
6.5.5. Дефекты, возникающие при закалке	127
6.6. Отпуск закаленных сталей	128
6.6.1. Превращения в закаленных сталях при отпуске	128
6.6.2. Виды отпуска	130
6.7. Химико-термическая обработка сплавов	132
6.7.1. Цементация	133

6.7.2. Азотирование	137
6.7.3. Цианирование и нитроцементация	138
6.7.4. Диффузионная металлизация	139
6.8. Термомеханическая обработка	140
7. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства сталей	142
7.1. Влияние легирующих элементов на равновесную структуру сталей	142
7.2. Распределение легирующих элементов в стали	145
7.2.1. Влияние легирующих элементов на свойства феррита	145
7.2.2. Взаимодействие легирующих элементов с углеродом	146
7.3. Влияние легирующих элементов на превращения в сталях	148
7.3.1. Влияние легирующих элементов на превращение переохлажденного аустенита	148
7.3.2. Влияние легирующих элементов на температуру мартенситного превращения	150
7.3.3. Влияние легирующих элементов на превращения при отпуске	150
7.4. Назначение легирующих элементов	152
8. Классификация и маркировка сталей	157
8.1. Классификация сталей	157
8.2. Маркировка сталей	159
9. Конструкционные стали	164
9.1. Углеродистые конструкционные стали	164
9.1.1. Углеродистые стали обыкновенного качества	164
9.1.2. Углеродистые качественные стали	166
9.2. Легированные стали	168
9.2.1. Стали с высокой технологической пластичностью и свариваемостью	168
9.2.2. Автоматные стали	171
9.2.3. Цементуемые стали	172
9.2.4. Улучшаемые стали	176
9.2.5. Высокопрочные стали	178
9.2.6. Рессорно-пружинные стали	180
9.2.7. Подшипниковые стали	183
9.2.8. Износостойкие стали	184
10. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды	185
10.1. Жаропрочность	185

10.2. Усталость металлов.....	192
10.3. Коррозия металлов и сплавов	194
10.3.1. Газовая коррозия	195
10.3.2. Химическая коррозия в жидкостях-неэлектролитах	198
10.3.3. Коррозионно-стойкие покрытия.....	205
10.4. Эрозионный и кавитационный износ.....	206
10.5. Влияние температурно-временных факторов на фазовый состав, сфероидизацию и графитизацию сталей.....	208
10.6. Жаропрочные стали и сплавы	210
10.7. Жаростойкие стали и сплавы.....	218
10.8. Коррозионно-стойкие стали.....	221
10.9. Стали для изделий, работающих при низких температурах.....	225
11. Инструментальные стали.....	227
11.1. Стали и сплавы для режущего инструмента	227
11.2. Штамповые стали	231
11.3. Стали для измерительного инструмента.....	233
12. Чугуны	235
12.1. Серые чугуны	237
12.2. Высокопрочные чугуны.....	239
12.3. Ковкие чугуны.....	240
13. Цветные металлы и сплавы на их основе.....	243
13.1. Медь и ее сплавы	243
13.1.1. Латунни	245
13.1.2. Бронзы.....	248
13.2. Алюминий и его сплавы.....	250
13.2.1. Деформируемые алюминиевые сплавы	254
13.2.2. Литейные алюминиевые сплавы	258
13.3. Титан и его сплавы.....	263
14. Благородные металлы и сплавы.....	265
14.1. Форма нахождения в рудах	265
14.1.1. Золото.....	265
14.1.2. Серебро	267
14.1.3. Металлы платиновой группы	267
14.2. Физико-химические свойства благородных металлов	269
14.2.1. Физико-химические свойства золота	270
14.2.2. Физико-химические свойства серебра.....	272

14.2.3. Физико-химические свойства металлов платиновой группы	274
14.3. Общие принципы извлечения благородных металлов	281
14.4. Аффинаж благородных металлов	282
14.5. Применение благородных металлов	284
15. Композиционные и неметаллические материалы.....	288
15.1. Композиционные материалы	288
15.2. Неметаллические материалы	292
Библиографический список.....	298

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

В огромном ряду материалов, с незапамятных времен известных человеку и широко используемых им в своей жизнедеятельности, металлы всегда занимали особое место.

Подтверждение этому находим и в названиях эпох (золотой, серебряный, бронзовый, железный века, на которые греки делили историю человечества), и в археологических находках металлических изделий (кованые медные украшения, сельскохозяйственные орудия), и в повсеместном использовании металлов и сплавов в современной технике.

Причина этого – особые свойства металлов, выгодно отличающие их от других материалов и делающие во многих случаях незаменимыми.

1.1. Общая характеристика металлов

Металлы – один из классов конструкционных материалов, к которому относятся химически простые вещества, характеризующиеся определенным набором свойств:

- металлический блеск (хорошая отражательная способность);
- пластичность;
- высокая теплопроводность;
- высокая электропроводность;
- положительный температурный коэффициент электрического сопротивления, означающий рост сопротивления с повышением температуры;
- сверхпроводимость некоторых металлов при температурах, близких к абсолютному нулю;
- термоэлектронная эмиссия, т. е. способность к испусканию электронов при нагреве;
- кристаллическое строение в твердом состоянии.

Металлические материалы обычно делят на две большие группы: железо и сплавы на его основе (сталь и чугун) называют *черными* металлами, а остальные металлы и их сплавы – *цветными*.

Цветные металлы, применяемые в технике, с учетом их свойств и характера залегания в земной коре условно делятся на следующие группы:

легкие – алюминий, магний, титан, бериллий, литий, натрий, калий, кальций, рубидий, цезий, стронций, барий;

тяжелые – медь, никель, кобальт, свинец, олово, цинк, кадмий, сурьма, висмут, ртуть;

тугоплавкие – вольфрам, молибден, ниобий, тантал, рений, ванадий, хром, цирконий;

благородные (драгоценные) – золото, серебро, платина и платиноиды; *рассеянные* – галлий, индий, таллий;

редкоземельные – скандий, иттрий, лантан и все лантаноиды;

радиоактивные – радий, полоний, актиний, торий, франций, уран и все трансурановые элементы.

Металлы, которые производят и используют в ограниченных количествах, называют редкими, но так как деление это условно, то к ним относят все рассеянные и редкоземельные металлы, а также часть тугоплавких, радиоактивных и легких металлов.

1.2. Свойства материалов

Создание надежно работающих и экономичных агрегатов тепловых электрических станций, детали и узлы которых эксплуатируются в условиях сложнопонапряженного состояния и высоких температур, невозможно без обеспечения механической прочности их деталей. Основными факторами, определяющими механическую прочность, являются действующие и предельные нагрузки, которые может выдержать материал без разрушения. Чем меньше действующие нагрузки по отношению к предельным, тем надежнее деталь.

1.2.1. Механические свойства материалов

Механические свойства характеризуют сопротивление материала деформации, разрушение или особенность его поведения при разрушении. Эта группа свойств включает показатели прочности, жесткости (упругости), ползучести, пластичности, твердости и вязкости.

При приложении к некоторому телу внешних сил внутри него возникают *напряжения* – внутренние силы, препятствующие разрушению твердого тела. Если, например, к образцу (рис. 1.1) приложить внешнюю продольную силу P , то в каждом его сечении появляются внутренние продольные распределенные по сечению силы. Величина возникающих напряжений σ , МПа, определяется нагрузкой, отнесенной к площади поперечного сечения:

$$\sigma = P / F, \quad (1.1)$$

где P – действующая нагрузка, Н; F – площадь поперечного сечения испытуемого образца, мм².

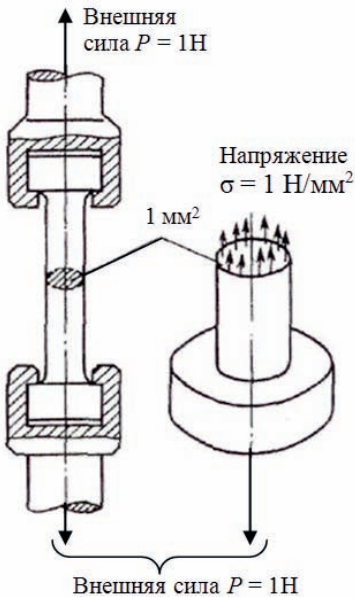


Рис. 1.1. Напряжения в стержне, растягиваемом внешней силой

Если площадь сечения рассмотренного образца $F = 1 \text{ мм}^2$, а растягивающая $P = 1 \text{ Н}$, то напряжения в сечении составят $\sigma = P / F = 1 \text{ Н/мм}^2$.

Размерность напряжения совпадает с размерностью давления, и поэтому их чаще всего измеряют в мегапаскалях ($1 \text{ МПа} = 10 \text{ ат} = 1 \text{ Н/мм}^2 = 0,1 \text{ кг·с/мм}^2$). Такие напряжения называют *внешними*. При тепловом воздействии или протекании фазовых изменений в металле возникают *внутренние* напряжения.

Необходимо отметить, что напряжения, появляющиеся, например, в сечении вращающейся рабочей лопатки паровой турбины под действием центробежных сил и парового потока, изгибающего рабочую лопатку, будут различны по сечению. Для оценки механической прочности таких деталей требуется определить опасную точку, в которой напряжения максимальны, а затем

сравнить их с характеристикой прочности материала, применяемого для изготовления детали.

Возникшие в металле напряжения (внешние и (или) внутренние) вызывают деформацию.

Деформация – это изменение формы и размеров твердого тела под влиянием образующихся в металле напряжений. Деформация подразделяется на упругую и пластическую.

Упругая деформация – это деформация, которая полностью исчезает после прекращения действия вызывающих ее напряжений. При упругом деформировании происходит изменение расстояний между атомами в кристаллической решетке металла. С увеличением межатомных расстояний возрастают силы взаимного притяжения атомов. При снятии напряжения под действием этих сил атомы возвращаются в исходное положение. Искажение решетки исчезает, тело полностью восстанавливает свою форму и размеры. Если нормальные напряжения достигают значения сил межатомной связи, то произойдет хрупкое разрушение путем отрыва.

Пластической называется деформация, остающаяся после прекращения действия вызвавших ее напряжений. При пластической деформации в кристаллической решетке металла под действием касательных напряжений происходит не-

обратимое перемещение атомов. При небольших напряжениях атомы смещаются незначительно и после снятия напряжений возвращаются в исходное положение. При увеличении касательного напряжения наблюдается необратимое смещение атомов на параметр решетки, т. е. происходит пластическая деформация.

Прочность – способность материала сопротивляться деформациям и разрушению под действием внешних нагрузок.

В зависимости от условий нагружения механические свойства могут определяться:

- при статическом нагружении – нагрузка на образец возрастает медленно и плавно;
- динамическом нагружении – нагрузка возрастает с большой скоростью, имеет ударный характер;
- повторно-переменном, или циклическом, нагружении – нагрузка в процессе испытания многократно изменяется по величине или по величине и направлению.

Статические испытания предусматривают медленное и плавное нарастание нагрузки, прилагаемой к испытываемому образцу. Прочность при статическом нагружении определяется испытаниями на растяжение, сжатие, изгиб и кручение. Обязательным является испытание на растяжение (ГОСТ 1497–84).

Испытание на растяжение проводят с применением плоских или цилиндрических образцов, вырезанных из детали или специально изготовленных (рис. 1.2). Размеры образцов регламентированы указанным стандартом, они подчиняются геометрическому подобию и могут быть короткими и длинными.

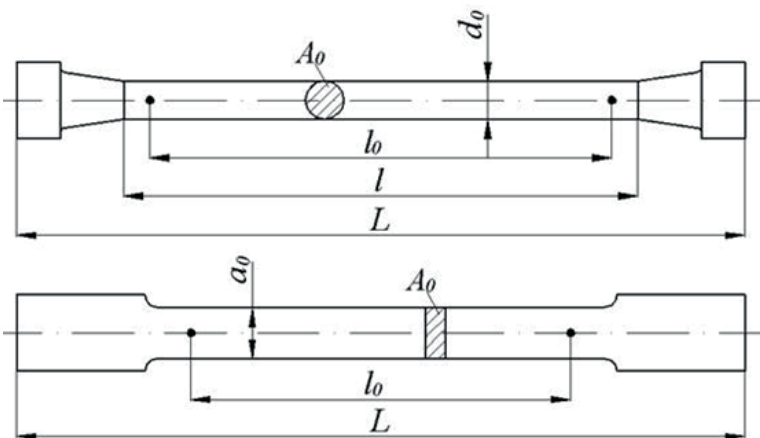


Рис. 1.2. Цилиндрические и плоские образцы для испытания на растяжение

Цилиндрические образцы изготавливаются диаметром 3 мм и более, плоские образцы – толщиной 3 мм и более. Образцы состоят из рабочей части длиной l_0 и головок, форма и размер которых соответствуют захватам машины.

Растяжение образца производят на специальных машинах, позволяющих фиксировать величину прилагаемой нагрузки и изменение длины образца при растяжении. Эти же машины дают возможность записывать изменение длины образца при увеличении нагрузки. Диаграмма испытания на растяжение в координатах нагрузка, P , Н – абсолютное удлинение образца Δl , мм – приведена на рис. 1.3.

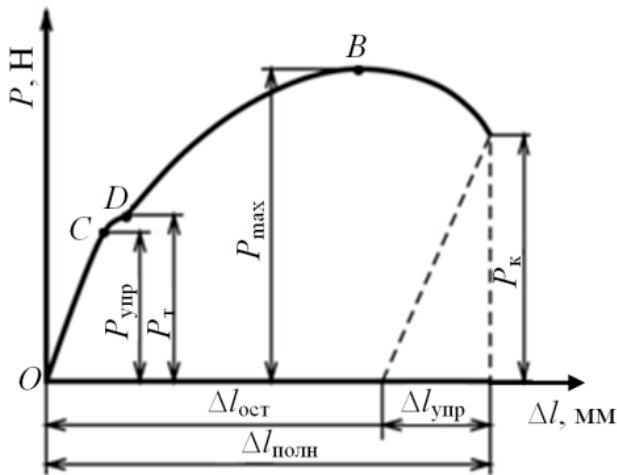


Рис. 1.3. Напряжения в стержне, растягиваемом внешней силой

На приведенной диаграмме выделяют три участка:

- 1) участок OC соответствует упругой деформации до нагрузки $P_{\text{упр}}$;
- 2) участок CB – равномерной пластической деформации от $P_{\text{упр}}$ до P_{max} ;
- 3) участок от точки B – сосредоточенной пластической деформации от P_{max} до $P_{\text{к}}$.

Пластическое деформирование выше $P_{\text{упр}}$ идет по возрастающей нагрузке, так как металл в процессе деформирования упрочняется. Упрочнение металла при холодной пластической деформации называется *наклепом*. Наклеп металла увеличивается до момента разрыва образца, хотя растягивающая нагрузка при этом уменьшается от P_{max} до $P_{\text{к}}$ (рис. 1.3). Это объясняется появлением в образце местного утонения – шейки, в которой в основном сосредотачивается пластическая деформация. Несмотря на уменьшение нагрузки, растягивающие напряжения в шейке повышаются до тех пор, пока образец не разорвется.

Разрушение материала при постоянных напряжениях σ и в условиях невысоких температур наступает при достижении напряжений, равных *временному сопротивлению* $\sigma_{\text{в}}$, МПа. Оно характеризует максимальную несущую способность материала, его прочность, предшествующую разрушению.

Если к образцу приложить усилие P , создающее в его сечении напряжение $\sigma = \sigma_{\text{в}}$, то он разрушится, получив при этом остаточное (необратимое) удлинение:

$$\sigma_{\text{в}} = P_{\text{max}} / F_0. \quad (1.2)$$

Для оценки надежности детали, работающей при постоянных напряжениях, обычно используется не предел прочности, соответствующий разрушению, а меньшая величина – *предел текучести* $\sigma_{\text{т}}$.

Физический предел текучести $\sigma_{\text{т}}$ определяют по диаграмме растяжения, когда на ней имеется площадка текучести. Однако при испытаниях на растяжение площадка текучести существует только у сталей с содержанием углерода до 0,1 % и некоторых латуней. Сплавы без площадки текучести имеют *условный предел текучести* – это напряжение, которому соответствует пластическая деформация 0,2 % – точка D на диаграмме растяжения (рис. 1.3); его обозначают $\sigma_{0,2}$. Выбранная пластическая деформация 0,2 % достаточно точно характеризует переход от упругих деформаций к пластическим, а напряжение $\sigma_{0,2}$ несложно определить при испытаниях независимо от того, имеется или нет площадка текучести на диаграмме растяжения.

Повышение уровня прочности материала и, как следствие, рабочих напряжений сопровождается увеличением упругих деформаций:

$$\varepsilon_{\text{упр}} = \frac{\sigma_{\text{упр}}}{E}, \quad (1.3)$$

где $\sigma_{\text{упр}}$ – предел упругости, МПа; E – модуль нормальной упругости, МПа.

Пластичность – способность материала изменять свои форму и размер без разрушения. Пластичность характеризуется относительным удлинением δ , %, и относительным сужением ψ , %:

$$\delta = [(l_{\text{к}} - l_0) / l_0] \cdot 100, \quad (1.4)$$

$$\psi = [(F_0 - F_{\text{к}}) / F_0] \cdot 100, \quad (1.5)$$

где l_0 и $l_{\text{к}}$ – начальная и конечная длина образца; F_0 – площадь поперечного сечения исходного образца, мм²; $F_{\text{к}}$ – площадь поперечного сечения в месте разрыва, мм².

Допустимое напряжение, которое используют в расчетах, выбирают меньше $\sigma_{0,2}$ (обычно в 1,5 раза) или меньше $\sigma_{\text{в}}$ (в 2,4 раза).

Для малопластичных материалов испытания на растяжения вызывают значительные затруднения. Незначительные перекосы при установке образца вносят существенную погрешность в определение разрушающей нагрузки. Такие материалы, как правило, подвергают испытанию на изгиб.

Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению (вдавливанию) в него другого более твердого тела (индентора) под действием внешних сил.

Для определения твердости металлических материалов в них вдавливают пирамиду, конус или шарик, в связи с чем различают следующие методы испытаний: по Виккерсу, Роквеллу и Бринеллю соответственно. Кроме того, существуют менее распространенные методы испытания твердости: метод упругого отскока (по Шору), метод сравнительной твердости (Польди) и некоторые другие.

Испытание материалов на твердость относится к неразрушающим методам контроля и не требует изготовления стандартных или специальных образцов. Поверхность, на которой производится измерение твердости, должна быть гладкой, параллельной противоположной поверхности образца, и перпендикулярной оси индентора. В противном случае будет происходить разложение силы, приложенной к индентору, и нормальная ее составляющая, обуславливающая вдавливание, не будет соответствовать установленной нагрузке.

Измерение твердости широко используется для контроля качества готовой продукции в машиностроении, инструментальном производстве, а также при проведении научно-исследовательских работ в материаловедении. При этом качество их поверхности практически не нарушается (при необходимости следы испытаний могут быть зачищены).

Измерение *твердости по Бринеллю* относится к стандартным методам (ГОСТ 9012–59). Измерение твердости производят путем вдавливания в поверхность образца закаленного стального шарика (рис. 1.4). В зависимости от твердости металла диаметр шарика может составлять 1, 2, 2,5, 5 или 10 мм, а нагрузка – от 10 до 30 000 Н. После снятия нагрузки на поверхности образуется отпечаток в форме сферической лунки диаметром d . Его измеряют лупой, на окуляре которой нанесена шкала с ценой деления 0,1 мм. Число твердости по Бринеллю НВ определяют путем деления нагрузки P на площадь поверхности сферического отпечатка (полученное значение твердости записывают без единиц измерения):

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (1.6)$$

где D – диаметр вдавливаемого шарика, мм.

На практике при измерении твердости расчет по формуле (1.6) не производят, а используют готовые таблицы, указывающие значение НВ в зависимости

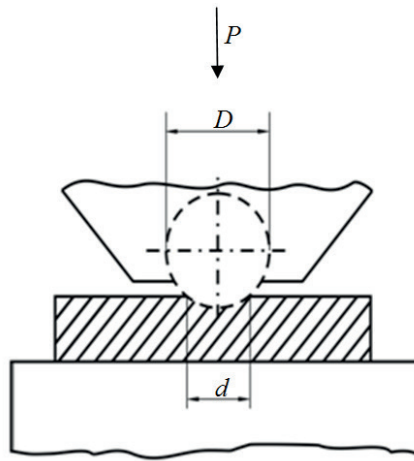


Рис. 1.4. Схема определения твердости

от диаметра отпечатка и выбранной нагрузки. Чем меньше диаметр отпечатка, тем выше твердость.

Способ измерения по Бринеллю не является универсальным. Его используют для материалов малой и средней твердости: сталей с твердостью менее 450 НВ, цветных металлов менее 200 НВ и т. п. Для них установлена корреляционная связь между временным сопротивлением σ_b и числом твердости НВ: σ_b равна около 3,4 НВ для горячекатаных углеродистых сталей; 4,5 НВ – для медных сплавов; 3,5 НВ – для алюминиевых сплавов.

При стандартном методе измерения *твердости по Виккерсу* (ГОСТ 2999–75) в поверхность образца вдавливают четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136° . После снятия нагрузки в полученном отпечатке, имеющем форму квадрата, измеряют длину диагонали (рис. 1.5). Число твердости вычисляют по формуле

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2}, \quad (1.7)$$

где P – нагрузка, Н; d – длина диагонали отпечатка, мм.

На практике для удобства определения числа твердости используют специальные таблицы, показывающие значение твердости в зависимости от длины диагонали отпечатка и величины нагрузки. Метод Виккерса применяют главным образом для материалов, имеющих высокую твердость, а также для испытания на твердость деталей малых сечений или тонких поверхностных слоев. Как правило, используют небольшие нагрузки: 10, 30, 50, 100, 200, 500 Н. Чем тоньше сечение детали или исследуемый слой, тем меньше выбирают нагрузку. Зна-

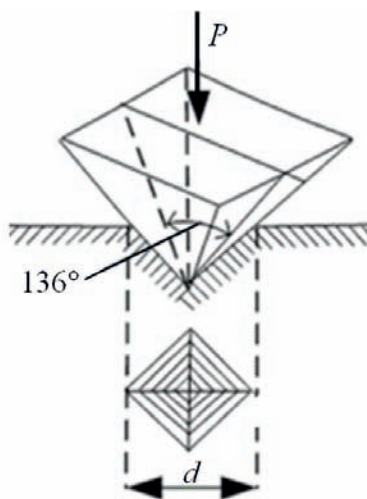


Рис. 1.5. Отпечаток алмазной пирамиды при определении твердости по методу Виккерса

чение числа твердости по Виккерсу и по Бринеллю для материалов, имеющих твердость до 450 НВ, практически совпадают.

Метод измерения *твердости по Роквеллу* наиболее универсален и наименее трудоемок (ГОСТ 9013–59). Здесь не нужно измерять размеры отпечатка, так как число твердости отсчитывают непосредственно по шкале твердомера. Число твердости зависит от глубины вдавливания наконечника, в качестве которого используют алмазный конус с углом при вершине 120° или стальной шарик диаметром 1,588 мм. Нагрузку выбирают в зависимости от материала наконечника. Для различных комбинаций нагрузок и наконечников прибор Роквелла имеет три измерительные шкалы: *A*, *B*, *C*. Твердость по Роквеллу обозначают цифрами, определяющими уровень твердости, и буквами HR с указанием шкалы твердости, например: 70 HRA, 58 HRC, 50 HRB.

Шкалу *A* (наконечник индентора – алмазный конус, общая нагрузка 600 Н) применяют для особо твердых материалов, для тонких листовых материалов или тонких (0,5–1,0 мм) слоев. Пределы измерения твердости по этой шкале – 70–85 HRA.

По шкале *B* (наконечник индентора – стальной шарик, общая нагрузка – 1 000 Н) определяют твердость сравнительно мягких материалов (менее 400 НВ). Пределы измерения твердости по этой шкале – 25–100 HRB.

Шкалу *C* (наконечник – алмазный конус, общая нагрузка – 1 500 Н) используют для твердых материалов (более 450 НВ), например закаленных сталей. Пределы измерения твердости по этой шкале – 20–67 HRC.

Числа твердости по Роквеллу не имеют точных соотношений с числами твердости по Бринеллю и Виккерсу.

Микротвердость согласно ГОСТ 9450–76 определяют вдавливанием в поверхность образца алмазной пирамиды при небольших нагрузках (0,05–5,00 Н) и измерением диагонали отпечатка. Микротвердость рассчитывают по той же формуле, что и твердость по Виккерсу, и применяют для оценки твердости отдельных фаз, структурных составляющих, тонких слоев или тонких деталей.

Ударная вязкость – работа, которую необходимо затратить для разрушения единичного образца. Ударная вязкость характеризует надежность материала при воздействии динамических нагрузок, его способность сопротивляться хрупкому разрушению.

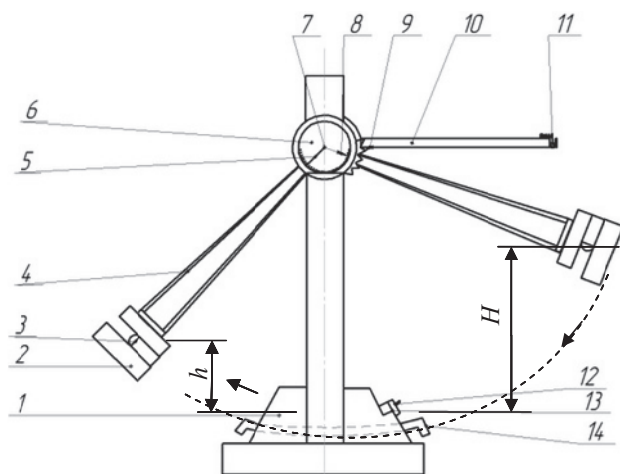


Рис. 1.6. Схема маятникового копра типа МК-30А

Определение ударной вязкости проводят на маятнике копра (рис. 1.6) с применением специальных образцов, выполненных в соответствии с ГОСТ 9454–78 (рис. 1.7) и имеющих надрезы определенной формы и размеров, относится к разрушающим методам контроля.

Маятник копра состоит из чугунной станины 1, выполненной в виде фундаментной плиты с двумя вертикальными колоннами, маятника и измерительного устройства. Маятник состоит из тяжелого молота 2, укрепленного на подвесках 4. Молот маятника имеет паз, в который вставлен нож 3, выполненный из закаленной стали. Перед началом испытаний маятник взводится и с помощью собачки 11 закрепляется на подъемной раме 10. В свою очередь, подъемная рама

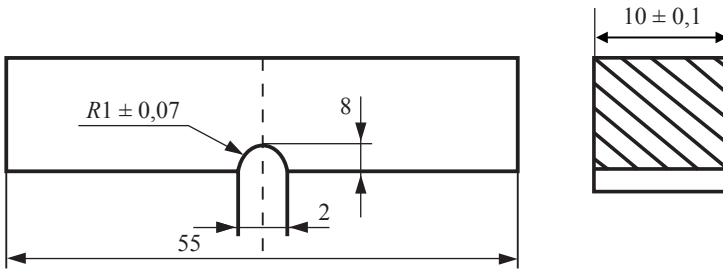


Рис. 1.7. Внешний вид образца для испытания на ударную вязкость

может устанавливаться на различной высоте и удерживаться в этом положении храповиком 9.

При производстве испытаний образец 12 опирается на закаленные опоры 13, укрепленные на станине копра. Отсчетный механизм 6 имеет две шкалы, расположенные симметрично относительно нулевой риски «0». Две стрелки – левая 7 и правая 8 – насажены на специальную втулку. Поводок 5, жестко сидящий на оси маятника, поочередно ведет ту или другую стрелку шкалы и останавливает их в положении, фиксирующем угол взвода и взлета маятника после излома образца.

Образец устанавливают на опорах маятника копра надрезом в сторону, противоположную удару ножа маятника. Ударную вязкость обозначают КС V (Дж/м²) или КС U (Дж/м²). КС – символ ударной вязкости, третий символ показывает вид надреза: острый (V), с радиусом закругления (U). Ударную вязкость вычисляют по формуле

$$КС = \frac{A}{F}, \quad (1.8)$$

где A – работа, затраченная на разрушение образца, Дж; F – площадь поперечного сечения образца, м²;

$$A = P(H - h). \quad (1.9)$$

Здесь P – вес молота, Н; H и h – высота подъема молота маятника до и после удара соответственно, м.

Шкала прибора градуирована в Дж (Н·м), по ней можно определить запас энергии взведенного маятника и остаточный запас энергии после удара. Работа, затраченная на излом образца, находится непосредственным вычитанием. Для того чтобы маятник не раскачивался после разрушения образца, копер снабжен ленточным тормозом 14.

1.2.2. Технологические свойства

Технологические свойства металлов и сплавов характеризуются литейными свойствами, ковкостью, свариваемостью и обрабатываемостью режущим инструментом.

Литейные свойства определяются жидкотекучестью, усадкой и склонностью к ликвации.

Жидкотекучестью называют способность металла или сплава заполнять литейную форму.

Усадка – уменьшение объема и размеров металла отливки при затвердевании и последующем охлаждении.

Ликвацией называется неоднородность химического состава твердого сплава по сечению слитка.

Чугун обладает высокими литейными свойствами – хорошей жидкотекучестью, небольшой усадкой и незначительной склонностью к ликвации. Сталь имеет меньшую, чем чугун, жидкотекучесть, большую усадку и склонность к образованию ликвации. Оловянистые бронзы обладают хорошей жидкотекучестью и малой усадкой.

Ковкость – способность металла деформироваться при наименьшем сопротивлении и принимать необходимую форму под влиянием внешней нагрузки без разрушения. Металлы можно подвергать ковке в холодном и нагретом состояниях. В нагретом состоянии ковкость металла обычно выше. Хорошую ковкость имеет сталь в нагретом состоянии; чугун этим свойством не обладает. Алюминиевые сплавы и латуни обладают ковкостью в холодном состоянии.

Свариваемость – способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения с требуемыми свойствами. Хорошая свариваемость у низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Высокоуглеродистые и высоколегированные стали, некоторые цветные металлы и сплавы имеют худшую свариваемость.

1.2.3. Эксплуатационные свойства

К эксплуатационным (служебным) свойствам относят хладостойкость, жаропрочность, жаростойкость, антифрикционность, износостойкость, коррозионная и эрозионная стойкость. Эти свойства определяют в зависимости от условий эксплуатации деталей или конструкции специальными испытаниями.

Износостойкость – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения. Повышение износостойкости обеспечивается проведением термической обработки, нанесением износостойких покрытий.

Коррозионная стойкость – способность материала сопротивляться самопроизвольному разрушению вследствие химического или электрохимического взаимодействия с окружающей (рабочей) средой. Коррозионно-стойкими называют металлы и сплавы, в которых процесс коррозии развивается с малой скоростью. Повышение коррозионной стойкости сталей достигается путем введения легирующих элементов, основными из которых являются никель и хром.

Жаростойкость – это способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре. Повышение жаростойкости достигается главным образом введением в сталь хрома, а также алюминия и кремния, т. е. элементов, находящихся в твердом растворе и образующих в процессе нагрева защитные пленки оксидов. Количественной характеристикой жаростойкости является увеличение массы испытуемого образца за счет поглощения металлом кислорода.

Жаропрочность – это способность материала сохранять свои прочность и окалиностойкость (жаростойкость) при высоких температурах. Основными характеристиками жаропрочности являются предел ползучести и предел длительной прочности.

Хладостойкость – способность материала сохранять достаточную вязкость при отрицательных температурах.

Антифрикционность – способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и малую скорость изнашивания сопряженной детали.

Эксплуатационные свойства определяются конкретным комплексом испытаний с учетом условий эксплуатации.

Выбор материалов для изготовления конструкций и изделий осуществляется с учетом механических, технологических и эксплуатационных свойств. Более подробно применение и назначение свойств металлов и сплавов будут рассмотрено в последующих главах.

2. АТОМНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ. МЕХАНИЗМ И ПАРАМЕТРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Все металлы, затвердевающие в нормальных условиях, представляют собой кристаллические вещества, т. е. укладка атомов в них характеризуется определенным порядком – периодичностью. Этот порядок формируется как по различным направлениям, так и по различным плоскостям.

2.1. Атомно-кристаллическое строение металлов

Кристаллическая решетка – это воображаемая пространственная решетка, в узлах которой располагаются центры атомов, образующие твердое тело (рис. 2.1).

Элементарная ячейка – элемент объема из минимального числа атомов, многократным переносом которого в пространстве можно построить весь кристалл. Элементарная ячейка характеризует особенности строения кристалла. Основными параметрами кристаллической решетки являются:

- *период*, под которым понимают расстояние между ближайшими параллельными атомными плоскостями (a, b, c), образующими элементарную ячейку (рис. 2.1). Период решетки измеряется в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ нм} = 10^{-10} \text{ м}$). Период решетки металлов находится в пределах от 1 до 7 \AA ;

- *углы* между осями: α, β, γ .

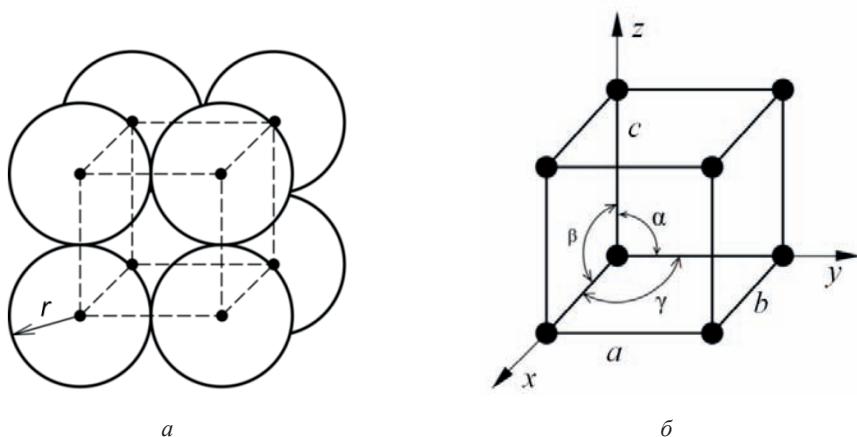


Рис. 2.1. Расположение атомов в кристаллической решетке: *а* – пространственное изображение элементарной ячейки; *б* – схема зарисовки элементарной ячейки

Соотношение между этими величинами определяется симметрией, согласно которой все кристаллы подразделяют на семь систем (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Типы кристаллических систем

Система	Ребра (периоды)	Углы
Триклинная	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$
Моноклинная	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$
Ромбическая	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ромбоэдрическая	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Гексагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Тетрагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Кубическая	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Всего для кристаллических тел существует 14 видов решеток, основными типами которых являются (рис. 2.2):

- *объемно-центрированная кубическая (ОЦК)*, атомы которой расположены в узлах ячейки и один атом – в центре куба (рис. 2.2, а); ОЦК-решетку имеют следующие металлы: V, W, Ti, Fe_α, K, Na, Li, Ba, Cr, Ta и др.;

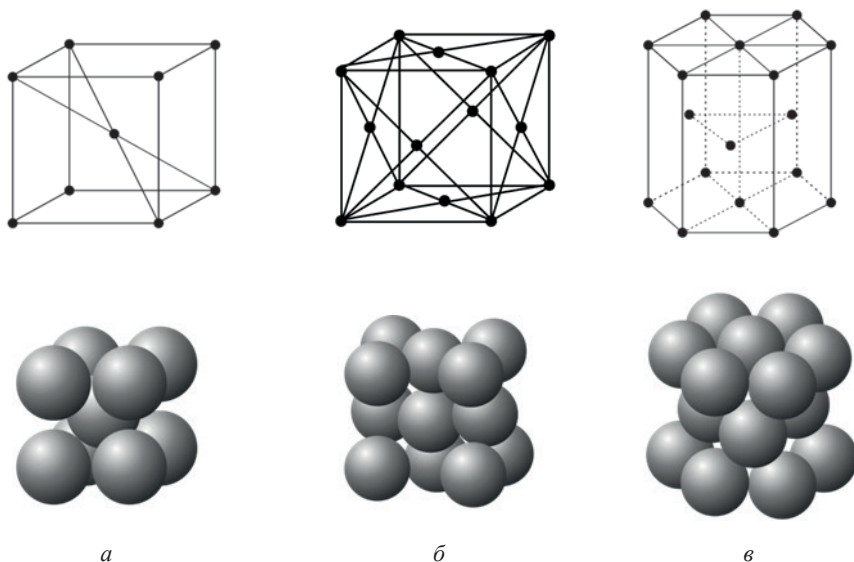


Рис. 2.2. Типы кристаллических решеток: а – ОЦК; б – ГЦК; в – ГПУ

- *гранецентрированная кубическая* (ГЦК), атомы которой расположены в узлах ячейки и в центре каждой из шести граней (рис. 2.2, б); ГЦК-решетку имеют: Cu, Ag, Au, Fe_γ, Ce, Pb, Ni, Mn и др.;

- *гексагональная*, в основании которой лежит шестиугольник:

а) простая – атомы располагаются в вершинах ячейки и по центру двух оснований (графит);

б) плотноупакованная (ГПУ) – имеется три дополнительных атома в средней плоскости (рис. 2.2, в): Zn, Mg, Cd и др.

Дополнительными характеристиками кристаллической решетки являются координационное число и коэффициент компактности.

Координационное число (К) указывает на число атомов, расположенных на ближайшем одинаковом расстоянии от любого атома в решетке. Координационное число для объемно-центрированной кубической решетки будет равно восьми (К 8), для простой кубической решетки – шести (К 6), для гранецентрированной кубической решетки – двенадцати (К 12).

Коэффициент компактности – объем, занятый атомами, которые условно рассматриваются как жесткие шары. Его определяют как отношение объема, занятого атомами к объему ячейки. Для ОЦК-решетки – 0,68, для ГЦК-решетки – 0,74, для простой кубической решетки – 0,52.

2.2. Полиморфизм и анизотропия

Способность некоторых металлов существовать в различных кристаллических формах в зависимости от внешних условий (давление, температура) называется **полиморфизмом** или **аллотропией**.

Каждый вид решетки представляет собой *аллотропическое видоизменение* или *модификацию*.

Примером аллотропического видоизменения, обусловленного изменением давления, является углерод: при низких давлениях образуется графит, а при высоких – алмаз. Примером аллотропического видоизменения в зависимости от температуры является железо Fe.

При температуре 1 539 °С (температура кристаллизации железа) железо приобретает ОЦК-решетку, формируется модификация Fe_δ – высокотемпературный феррит (рис. 2.3). При охлаждении до температуры 1 392 °С в железе протекает первое полиморфное превращение – ОЦК-решетка перестраивается в ГЦК-решетку, образуется модификация Fe_γ. При достижении температуры 911 °С происходит второе полиморфное превращение – ГЦК-решетка перекристаллизуется в ОЦК-решетку, формируется модификация Fe_α – низкотемпературный феррит.

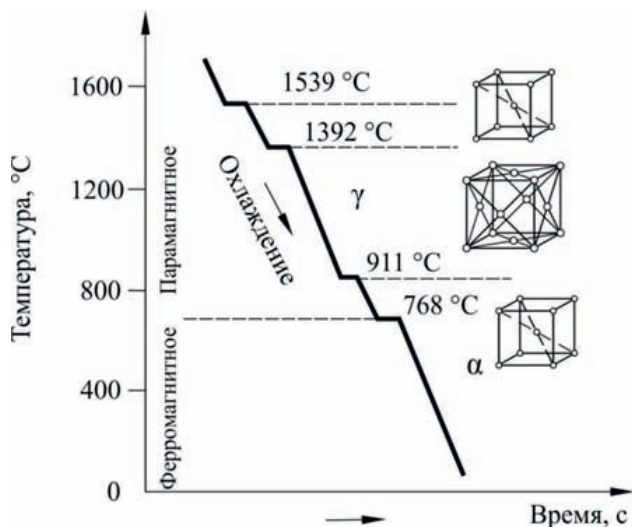


Рис. 2.3. Кривая охлаждения чистого железа

Превращение одной модификации в другую протекает при постоянной температуре и сопровождается тепловым эффектом. При охлаждении полиморфное превращение сопровождается выделением теплоты, а при нагреве – ее поглощением. Видоизменения элемента обозначаются буквами греческого алфавита в виде индекса у основного обозначения металла. Используя явление полиморфизма, можно упрочнять и разупрочнять сплавы при помощи термической обработки.

Свойства твердого тела зависят от природы атомов, из которых оно состоит, и от силы взаимодействия между этими атомами. Силы взаимодействия между атомами в значительной степени определяются расстояниями между ними. В аморфных телах с хаотическим расположением атомов в пространстве расстояния между атомами в различных направлениях равны, следовательно, свойства будут одинаковые, т. е. аморфные тела **изотропны**.

В кристаллических телах атомы правильно располагаются в пространстве, причем по разным направлениям расстояния между атомами неодинаковы, что предопределяет существенные различия в силах взаимодействия между ними и в конечном счете разные свойства. Зависимость свойств от направления называется **анизотропией**.

Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, т. е. имеют поликристаллическое строение. Эти кристаллы называются зернами. Они имеют неправильную форму и различно ориентированы в пространстве. Каждое зерно имеет свою ориентировку кристаллической

решетки, отличную от ориентировки соседних зерен, вследствие чего свойства реальных металлов усредняются и явления анизотропии не наблюдается.

Некоторые металлы намагничиваются под действием магнитного поля. После удаления магнитного поля они обладают остаточным магнетизмом. Это явление впервые было обнаружено на железе и получило название **ферромагнетизма**. К ферромагнетикам относятся железо, кобальт, никель и некоторые другие металлы.

При нагреве ферромагнитные свойства металла уменьшаются постепенно: вначале слабо, затем резко и при определенной температуре (точка Кюри) исчезают (точка Кюри для железа – 768 °С). Выше этой температуры металлы становятся парамагнетиками. Магнитные превращения не связаны с изменением кристаллической решетки или микроструктуры, они обусловлены изменениями в характере межэлектронного взаимодействия.

2.3. Типы связей и их влияние на структуру и свойства кристаллов

Атомы любого вещества состоят из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, распределяющихся по энергетическим уровням. В зависимости от взаимодействия молекул, атомов, ионов и электронов в атомной структуре материалов встречается несколько типов химической связи: ионная, ковалентная, молекулярная, металлическая (рис. 2.4).

Ионная связь обусловлена переходом электронов от одного атома к другому, и в результате образуется электростатическое притяжение между положительными и отрицательными ионами. Данная связь характерна для солей и оксидов (NaCl, MgO, LiF), это направленная прочная связь, ограничивающая движение электронов. Ионным кристаллам (рис. 2.4, *а*) свойственна малая электропроводность при низких температурах, электрический ток в этих кристаллах обеспечивается направленным потоком ионов (ионная проводимость).

Ковалентная (гомеополярная) связь возникает в результате того, что электроны, находящиеся на внешнем энергетическом уровне, примерно равномерно распределяются между соседними атомами. Поэтому каждый атом связан с соседним атомом парой валентных электронов (рис. 2.4, *б*). Силы притяжения между атомами слабее, чем при ионной связи, однако ковалентная связь является сильно направленной и определяет прочное взаимное расположение атомов. Ковалентные кристаллы характеризуются высокой температурой плавления, большой твердостью и малой электропроводностью, которая, как и у кристаллов с ионной связью, растет с повышением температуры. В ковалентных кристаллах, в отличие от ионных, электропроводность связана с направленным движением