



В. Е. Чабанов

*К*урс лекций
**ПО ФИЗИКЕ
ТВЕРДОГО ТЕЛА**
для технических вузов



В. Е. Чабанов

курс лекций **ПО ФИЗИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА для технических вузов**

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптотехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 200100 — Приборостроение, 200200 — Оптотехника

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2011

УДК 539(075.8)
ББК 22.37я73
Ч-12

Чабанов В. Е.

Ч-12 Курс лекций по физике твердого тела для технических вузов: учебное пособие. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 144 с.: ил. — (Учебная литература для вузов)

ISBN 978-5-0775-0677-9

Книга представляет собой учебное пособие по курсу с одноимённым названием, который читается автором в течение многих лет студентам Санкт-Петербургского института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ). Описаны характеристики жидкого состояния вещества, строение аморфных и кристаллических твёрдых тел, физические свойства твёрдых тел, механические характеристики твёрдых тел, физическая природа разрушения материалов, ультразвук и его взаимодействие с веществом, электрические явления в твёрдых телах, техническое использование некоторых свойств твёрдых тел. Кроме этого, излагаются традиционные разделы классической физики.

Для студентов и преподавателей высших и средних учебных заведений

УДК 539(075.8)
ББК 22.37я73

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Евгений Рыбаков</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Екатерина Капалыгина</i>
Компьютерная верстка	<i>Натальи Караваевой</i>
Корректор	<i>Виктория Пиотровская</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Фото	<i>Кирилла Сергеева</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 28.02.11.

Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,68.

Тираж 1000 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.60.953.Д.005770.05.09 от 26.05.2009 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12.

Оглавление

Предисловие.....	1
Глава 1. Структуры конденсированных (твёрдых и жидких) тел.....	3
1.1. Особенности изменения агрегатных состояний вещества.	
Кристаллические и аморфные тела. Моно- и поликристаллы.....	3
1.2. Природа сил связи между атомами и молекулами в твёрдых телах	7
1.2.1. Ионная связь	8
1.2.2. Ковалентная связь	9
1.2.3. Молекулярные связи	10
1.2.4. Металлическая связь в твёрдых телах.....	11
1.3. Влияние кинетической и потенциальной энергии тел на их агрегатные состояния	12
Глава 2. Характеристика жидкого состояния вещества.....	15
2.1. Сопоставление свойств жидких и твёрдых тел.....	15
2.2. Поверхностный слой. Энергия поверхностного слоя вещества.....	18
2.3. Формула Лапласа	20
2.4. Смачиваемость и несмачиваемость поверхностей.	
Капиллярные явления.....	22
Глава 3. Строение кристаллических твёрдых тел	25
3.1. Рост реальных кристаллов	25
3.2. Виды симметрии кристаллических решёток.....	28
3.3. Дефекты в кристаллах	30
Глава 4. Физические свойства твёрдых тел	35
4.1. Особенности строения поликристаллических тел.....	35
4.2. Тепловое расширение материалов	38

4.3. Теплоёмкости твёрдых тел. Закон Дюлонга и Пти.....	41
4.4. Теплопроводности твёрдых тел. Фононы и их свойства	43
Глава 5. Механические характеристики твёрдых тел.....	47
5.1. Деформация твёрдых тел	47
5.2. Упругость, пластичность и хрупкость твёрдых тел	50
5.3. Работа разрушения и остаточный ресурс материалов.....	53
Глава 6. Физическая природа разрушения материалов	57
6.1. Остаточные напряжения.....	57
6.2. Трещины, характер их роста и особенности разрушения образцов	63
6.3. Физические процессы, протекающие при разрушении материалов	68
Глава 7. Ультразвук и его взаимодействие с веществом.....	73
7.1. Упругие волны в твёрдых телах	73
7.2. Источники и приёмники ультразвуковых волн.....	76
7.3. Кавитация.....	80
7.4. Технологическое использование ультразвука.....	82
7.4.1. Применение ультразвука для неразрушающего контроля изделий	82
7.4.2. Ультразвуковая медицинская диагностика.....	85
7.4.3. Ультразвуковая очистка деталей	86
7.4.4. Ультразвуковая пайка	87
7.4.5. Ультразвуковое сверление.....	88
7.4.6. Другие направления технологического применения ультразвука.....	89
Глава 8. Электрические явления в твёрдых телах	93
8.1. Элементы зонной теории твёрдых тел.....	93
8.2. Металлы	96
8.3. Экспериментальные основы электропроводности металлов.....	99
8.4. Работа выхода и эмиссия электронов. Двойной электрический слой. Термоэлектронная эмиссия	101
8.5. Фотоэлектронная эмиссия. Красная граница фотоэффекта.....	105
8.6. Контактная разность потенциалов	107
8.6.1. Внешняя контактная разность потенциалов	107
8.6.2. Внутренняя контактная разность потенциалов	109
Глава 9. Техническое использование некоторых свойств твёрдых тел	113
9.1. Полупроводники, их собственная проводимость	113
9.2. Примесная проводимость полупроводников	115

9.3. Полупроводниковые приборы	118
9.3.1. Диоды	118
9.3.2. Транзисторы.....	119
9.4. Источники рентгеновского излучения.....	121
9.5. Оптические квантовые генераторы (лазеры)	124
Заключение	129
Литература	131
Предметный указатель	133

Предисловие

Твёрдые тела являются основными материалами, применяемыми в технике. Более того, они являются самыми распространёнными в природе. В самом деле, всё, что окружает нас, что мы видим, чего касаемся, чем пользуемся, в большинстве своём состоит из твёрдых тел. Из них мостятся дороги, строятся здания и сооружения, делаются машины и формируется весь окружающий нас Мир. Поэтому без понимания особенностей твёрдых тел, их структуры, физических возможностей высококлассным инженером быть невозможно. Лишь тогда материалы откроют конструктору все свои качества, когда он будет знать не только их параметры, но начнёт чувствовать, что происходит в разных условиях с каждой молекулой, представлять, как поведёт себя материал при тех или иных нагрузках, температурах, давлениях, если материал для инженера будет живым, меняющимся, работающим, уставшим и помнящим прошлое, а не бездушной, холодной и безликой массой, из которой предстоит что-то делать.

По данной дисциплине написано много замечательных книг, в которых с той или иной степенью глубины излагаются многие вопросы физики твёрдого тела. В настоящем курсе главный упор сделан на рассмотрение физической природы формирования и изменения эксплуатационных характеристик конструкционных материалов, с которыми современные инженеры сталкиваются чаще всего. А также на особенностях применения некоторых типов физических полей (ультразвукового, рентгеновского, лазерного) для решения различных технических проблем, при проектировании современных приборов. Причём основное внимание уделено не математическим, а именно физическим аспектам рассматриваемых вопросов. Поэтому изложение этих достаточно непростых тем оказывается несложным и доступным пониманию самым широким кругам студентов и специалистов.

При этом полагаем, что читатель уже знаком с механикой, с основными газовыми законами, с термодинамикой и с электростатическими явлениями.

Глава 1

Структуры конденсированных (твёрдых и жидких) тел

1.1. Особенности изменения агрегатных состояний вещества. Кристаллические и аморфные тела. Моно- и поликристаллы

Нагревание тел. Для того чтобы установить, какими свойствами обладают твёрдые тела, будем их нагревать, т. е. ускорять диффузные процессы, увеличивать скорости их молекул и менять, таким образом, агрегатное состояние вещества. При этом тела, которые относятся к органическим веществам и здесь не рассматриваются, начинают гореть (дерево, уголь и проч.). Другие даже при невысоких температурах становятся мягкими (смолы, парафин, некоторые пластмассы и т. д.), это аморфные тела. Третьи, и их большинство, будут при нагревании менять своё агрегатное состояние, как показано на графике рис. 1.1. Именно они представляют для нас наибольший интерес. Рассмотрим, как поведёт себя температура таких тел, т. е. скорости движения их молекул при нагревании.



Рис. 1.1. Зависимость температуры $T(Q)$ и энтропии $S(Q)$ нагреваемых тел от количества получаемого ими тепла Q

Из приведённого рисунка следует, что при нагревании твёрдых тел их температура вначале растёт пропорционально количеству получаемого ими тепла, пока не достигает температуры плавления (область от 0 до 1). Далее тело начинает плавиться. И пока полностью не превратится в жидкость, его температура остаётся практически неизменной (область от 1 до 2). При дальнейшем нагревании образованной таким образом жидкости её температура опять начинает повышаться пропорционально получаемому количеству тепла вплоть до температуры парообразования (область 2—3). Затем, по мере нагревания, вся жидкость при одной и той же температуре превращается в пар (область 3—4). После этого температура пара при нагревании опять увеличивается, пока не достигает температуры ионизации (4—5). При этом молекулы пара разделяются на положительно и отрицательно заряженные ионы, возникает плазма (область 5—6). А в случае дальнейшего нагревания плазмы её температура растёт пропорционально величине получаемого тепла (6—7 и далее).

Проанализируем полученный результат. Что происходит со структурой тел при протекании в них указанных процессов?

Как известно из предыдущих разделов физики, степень упорядоченности молекул системы определяется её энтропией. Причём чем более структурированным, т. е. упорядоченным является вещество, тем меньше его энтропия. Математически изменение энтропии описывается отношением получаемого или отдаваемого системой тепла к температуре, при которой данные процессы совершаются, т. е. $\Delta S = \Delta Q/T$, где ΔS — изменение энтропии вещества, ΔQ — получаемое (или теряемое) телом тепло, а T — температура в градусах Кельвина.

Очевидно, что в первой области, когда тело находится в твёрдом состоянии, степень упорядоченности его структуры остаётся практически неизменной и является максимальной. А значит, энтропия тела наименьшая. По мере его нагревания растут не только поглощаемое телом тепло, но и температура, в связи с чем величина энтропии в этой области меняется незначительно, как показано на рис. 1.1. Процесс существенного увеличения энтропии возникает только в области 1—2, когда вещество делается двухфазным, т. е. в нём одновременно присутствуют как жидкая, так и твёрдая фазы. А поскольку температура тела при этом не меняется, всё получаемое тепло расходуется исключительно на рост энтропии вещества, на увеличение жидкой фазы и уменьшение твёрдой. И так продолжается до тех пор, пока всё вещество не превратится в жидкость. Примерно такие же процессы протекают также при преобразовании жидкости в газ, а газа — в плазму.

Из полученного графика следует, что видоизменение любого вещества при его нагревании сопровождается двумя чередующимися друг с другом процессами. В одном из них энтропия тел, т. е. их агрегатное состояние, меняется незначительно, а температура — растёт. Во втором постоянной является температура, а увеличивается энтропия (см. рис. 1.1). Вместе с тем температура служит показателем кинетической энергии молекул ψ (у твёрдых и жидких тел она равна $\psi = 3kT$, где k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К). С другой стороны, известно, что кинетическая энергия определяется с помощью формулы $\psi = mv^2/2$, где m — масса одной

молекулы, а v — её среднеквадратичная скорость. Отсюда следует, что тепловая скорость молекул примерно равна $v = \sqrt{6kT/m}$.

В процессе увеличения температуры тел их молекулы разгоняются, вся энергия нагревателя расходуется на увеличение их кинетической энергии. При этом энтропия тела, т. е. взаимное расположение его молекул, сохраняется. Твёрдое тело по-прежнему остаётся твёрдым, а жидкое — жидким. И продолжается это до тех пор, пока скорость движения молекул не достигает некоторого критического значения, характерного для данного агрегатного состояния вещества. После этого вся получаемая телом тепловая энергия уже расходуется не на увеличение кинетической энергии молекул, а на изменение их потенциальной энергии. В таком случае возникает качественное взаимное расположение молекул вещества, приводящее к изменению его агрегатного состояния. И тогда твердое тело превращается в жидкое, жидкое — в газообразное и т. д.

Из приведённого анализа можно сделать следующие выводы. Поскольку качественные скачки не имеют промежуточных состояний, переход тел из одних агрегатных состояний в другие по мере их нагревания происходит не постепенно, как следует из графика, а последовательно, скачками от одной части его объёма к другой. И ещё, каждому агрегатному состоянию тел соответствует собственная энтропия. Причём чем она выше, тем больше энергии для достижения такого состояния нужно. При низкой энтропии (твёрдое тело) наблюдается жёстко регламентированный порядок расположения молекул и для его поддержания требуется меньше энергии. Однако если указанной энергии становится много, это позволяет молекулам приобретать более энергоёмкое состояние. Тогда уже никакой порядок им не нужен, каждая молекула может вести себя вольно, их поведение определяется исключительно кинетической энергией, которой они обладают. И подобное наблюдается не только в жидкостях, газах, но и в плазме.

Охлаждение тела. При обратном течении теплового процесса, т. е. при охлаждении тел, график изменения агрегатного состояния вещества выглядит, как показано на рис. 1.2. То есть вначале плазма охлаждается при небольшом изменении энтропии, потом начинается переход её в газ, при котором энтропия резко убывает. Затем, по мере последующего отбора тепла, газ начинает постепенно охлаждаться, пока его температура не становится равной температуре парообразования при постоянстве энтропии. Далее происходит превращение газа в жидкость при одной и той же температуре (при этом энтропия убывает), после чего начинает охлаждаться сама жидкость. И на этом идентичность процесса изменения агрегатного состояния вещества при его нагревании и охлаждении заканчивается.

Вместо того чтобы начинать кристаллизоваться при постоянной температуре, как следовало, если бы процессы образования кристаллов были аналогичны процессам их плавления, температура вещества после достижения температуры кристаллизации продолжает падать. А затем вообще начинается непонятное поведение материала: при дальнейшем охлаждении его температура неожиданно начинает повышаться (см. рис. 1.2, кривая 1)! То есть начинает выделяться энергия, которая оказывается избыточной для кристаллических тел. И только затем, когда вся жидкость превраща-

ется в твёрдое тело, его температура, как и положено, начинает убывать. Объяснение причины данного феномена будет приведено в дальнейшем.

С другой стороны, можно организовать процесс охлаждения вещества, находящегося в жидком состоянии, при постоянном уменьшении температуры его затвердевания, как показано кривой 2 на рис. 1.2. При этом опять возникает твёрдое тело, но оно уже будет не кристаллическим, а аморфным. Это такое тело, у которого нет строгого порядка расположения атомов и молекул. У аморфных тел отсутствует и постоянная температура плавления. Поэтому если их нагревать, они размягчаются и переходят в жидкое состояние постепенно. То же самое, но в обратном порядке, происходит при их охлаждении.

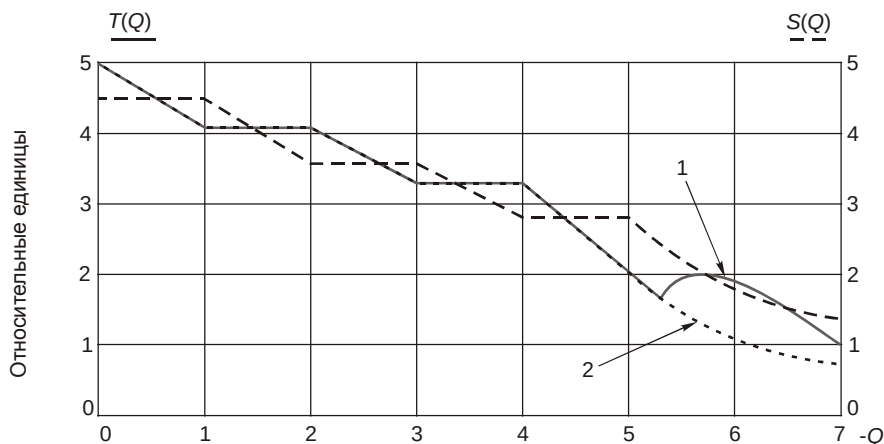


Рис. 1.2. Изменение температуры $T(Q)$ и энтропии $S(Q)$ тел при их охлаждении

Основными проявлениями кристаллических тел являются наличие фиксированной температуры плавления, упругости, прочности, зависимость их свойств от порядка расположения атомов, т. е. от типа кристаллической решетки. Кроме того, отдельные кристаллы таких тел обладают качеством анизотропии, т. е. их механические, электрические и оптические качества зависят от направления. Аморфные твёрдые тела такими способностями не обладают, поэтому их нередко называют затвердевшими жидкостями. Типичными представителями аморфных тел являются парафин, битум, стекло, многие полимеры и др.

Некоторые твёрдые тела способны находиться как в кристаллическом, так и в аморфном состояниях. Например, автомобильное стекло, которое в обычных условиях является аморфным, но перезакалённым. Такая структура оказывается неустойчивой и при получении дополнительной энергии, например при аварии, она быстро меняется. При этом указанное стекло практически мгновенно делается кристаллическим и рассыпается на кусочки, безопасные для водителей. Обычная сталь имеет кристаллическую структуру, однако с помощью специальных методов охлаждения можно изготовить аморфную сталь. В частности, такая сталь может быть получена путём напыления расплава на охлаждаемую подложку, отчего правиль-

ные кристаллы не образуются и молекулы сцепляются друг с другом хаотично. Характерно, что аморфная сталь обладает многими свойствами, отсутствующими у стали кристаллической. Она является более прочной, вязкой, не подвержена коррозии. Однако стоимость такой стали пока ещё очень высока.

При кристаллизации, как правило, в жидких расплавах одновременно образуются много центров кристаллизации. А поэтому возникающие кристаллические твёрдые тела, как правило, состоят не из одного кристалла, а из их множества, т. е. имеют поликристаллическую структуру. Причём каждый кристаллит имеет своё направление осей, а поэтому различие свойств одних кристаллитов в каком-то направлении компенсируются таковыми у других кристаллитов. В этой связи у поликристаллических тел анизотропия обычно не проявляется и их можно считать изотропными. Вместе с тем при использовании специальных условий охлаждения или обработки материалов (ковке, прокате и др.) геометрическая форма отдельных кристаллитов может нарушаться, и поликристаллические тела могут обладать некоторой анизотропией, т. е. приобретать текстуру.

С другой стороны, применяя специальные методы охлаждения, из особо чистых сплавов можно выращивать твёрдые тела в виде отдельных монокристаллов. И к настоящему времени уже разработаны методы получения монокристаллов практически всех металлов и многих сплавов. В частности, русскому учёному Д. К. Чернову в конце 19 века удалось приобрести кристалл, состоящий на 97,86 % из железа, на 0,78 % — из углерода, на 0,255 % — из кремния и 1,05 % — из марганца. Он имел длину 39 см и обладал массой 3,45 кг. Именно в монокристаллическом состоянии проявились некоторые специфические свойства металлов, в том числе железа, вольфрама, никеля, молибдена. Например, монокристаллы железа высокой чистоты не теряют своих пластических свойств при низких температурах и сохраняют их вплоть до температуры жидкого гелия (-269°C).

Особенно перспективными являются так называемые металлические усы, т. е. нитевидные кристаллы в несколько микрон толщиной, обладающие аномально высокой прочностью. В частности, путем восстановления из хлористого или бромистого железа были выращены железные усы длиной до 10 см и диаметром до 1 мк (микрона). Предел прочности таких усов достигает величины 12—13 ГПа, в то время как сталь с прочностью на разрыв 1,5—2 ГПа уже считается высокопрочной.

Тем не менее, механические свойства монокристаллических тел в большинстве своём хуже, чем у поликристаллических, а поэтому в качестве конструкционных материалов их обычно не применяют. Исключением являются полупроводниковые монокристаллы, которые используются в радиоэлектронной промышленности.

1.2. Природа сил связи между атомами и молекулами в твёрдых телах

Вполне закономерным является вопрос: какова природа сил, под воздействием которых молекулы притягиваются друг к другу и образуют достаточно прочные тела? Почему, несмотря на высокие скорости колебаний молекул, твёрдые тела являются устойчивыми?

Можно различать несколько видов сил, благодаря которым твёрдые вещества не разрушаются, обладают прочностью, упругостью и способны выдерживать внешние нагрузки. Среди них наиболее важными являются следующие:

- ☐ ионная связь;
- ☐ молекулярные связи;
- ☐ ковалентная связь;
- ☐ металлическая связь в твердых телах.

Рассмотрим их подробнее.

1.2.1. Ионная связь

Она возникает, когда молекулы тел состоят из заряженных ионов, взаимодействующих друг с другом электрическими силами кулоновского происхождения. Причём силы притяжения в твёрдых телах между ионами противоположного знака оказываются большими, чем силы отталкивания между ионами одного и того же знака. Поэтому ионная связь между молекулами (её ещё называют полярной, гетерополярной) обусловлена преимущественно электростатическим сцеплением противоположно заряженных ионов.

Возникает естественный вопрос: почему многие атомы легко присоединяют к себе чужой электрон и становятся электроотрицательными ионами (как пример — хлор), в то время как другие легко отдают свои электроны и делаются электроположительными (например, натрий)? Казалось бы, у нейтрального атома нет сил кулоновского взаимодействия с электронами других атомов, а поэтому он должен быть устойчивым.

На самом деле вращение электронов вокруг их орбит сопровождается возникновением вращающегося электрического дипольного момента. И это поле становится источником вихревого потенциала притяжения, величина которого обратно пропорциональна расстоянию между молекулами $1/r$ и действует на сравнительно больших расстояниях r . Во многих случаях этот поляризационный потенциал притяжения достаточно велик, чтобы свободный атом смог присоединить к себе добавочный электрон, а соседний атом — чтобы его утратить. Это и является причиной зарождения противоположно заряженных ионов. Схема образуемой при этом кристаллической решётки показана на рис. 1.3.

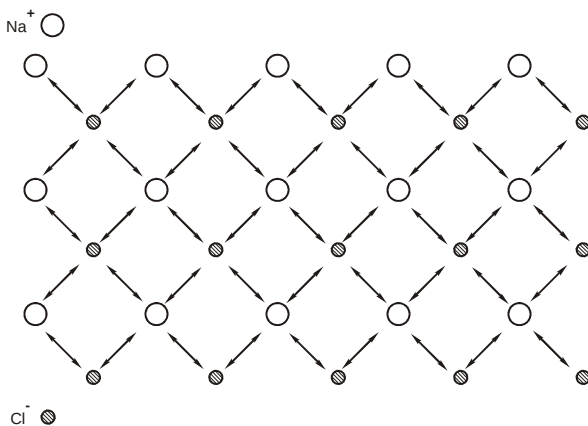


Рис. 1.3. Ионная связь между молекулами кристаллов

Ионная связь является типичной для неорганических соединений. При ней силы электростатического притяжения и отталкивания обладают сферической симметрией, а поэтому ионы разных знаков ведут себя подобно твёрдым шарикам, притягивающим друг друга в разных

направлениях. Типичными представителями таких материалов являются поваренная соль NaCl , CaO , NaOH , LiF , нитраты, фосфаты, сульфаты и многие другие вещества. Ионные связи достаточно сильны, на что указывает высокая температура плавления образованных с их помощью материалов. Например, у NaCl она равна 801°C .

1.2.2. Ковалентная связь

Как известно, атомы состоят из положительно заряженных ядер и вращающихся вокруг них по своим орбитам электронов. Причём максимальное число электронов, расположенных на первой (самой близкой к ядру) орбите, равно двум, на второй — 8, на третьей — 18 и т. д. При этом химически наиболее активными являются электроны, вращающиеся на внешней, самой удалённой от ядра орбите (рис. 1.4). Их ещё называют валентными.

В некоторых случаях расстояние от валентных электронов до собственных положительно заряженных ядер может становиться большим, чем до ядер соседних атомов. И тогда при сближении атомов друг с другом на некоторые критические расстояния их валентные электроны способны образовывать общие орбиты, формируя, таким образом, электронные пары, внутри траектории которых располагаются оба положительно заряженных атомных ядра. Причём эти траектории могут быть или круговыми, или восьмёркообразными, как показано на рис. 1.5. Очевидно, что такая связь образуется, только если суммарная энергия формируемых таким образом молекул окажется меньшей, чем когда указанные атомы не связаны друг с другом. Причём разница указанных энергии будет не чем иным, как энергией связи молекул, становящейся источником сил, называемых ковалентными.

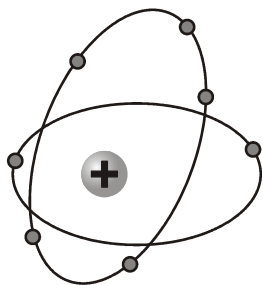


Рис. 1.4. Схема атома

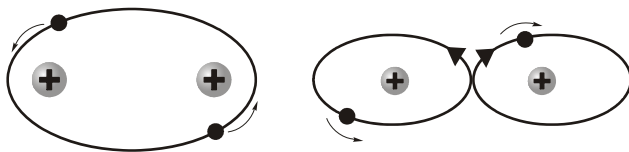


Рис. 1.5. Виды валентной связи

Данная связь может быть образована атомами одного и того же вещества, и тогда она становится неполярной. В частности, таковыми являются молекулы H_2 , O_2 , N_2 , Cl_2 и др. Ковалентная связь может возникать также между атомами разных элементов, сходных по химическому составу, и тогда она оказывается полярной (NF_3 , NH_3 , CO_2 , HCl и т. д.). За счёт ковалентных связей образуются кристаллы углерода (алмаз, графит), кремния, германия, серого олова, карбида кремния, нитрида алюминия и др. Указанная связь очень прочна, поэтому сформированные с её помощью

кристаллы отличаются высокой температурой плавления, большой твёрдостью и малой летучестью.

Причём наиболее прочная ковалентная связь образуется в том направлении, в котором расположена большая часть обобществлённых электронов. Поэтому такая связь имеет направленный характер, под её влиянием атомы не только располагаются на определённых расстояниях друг от друга, но и формируют конкретные пространственные решётки. И от этого в значительной мере зависят их свойства. В частности, на рис. 1.6 приведены кристаллические структуры алмаза и графита, представляющие собой молекулы, образованные из атомов одного и того же углерода.

Как известно, алмаз является самым твёрдым веществом на Земле, он способен резать любые материалы. Графит, из-за пластинчатого расположения его атомов, относится к мягким материалам, в связи с чем его употребляют в качестве грифелей карандашей. Из рисунков видно, что слои графита легко перемещаются друг относительно друга, в то время как у алмаза такие слои отсутствуют вовсе. Экспериментально доказано, что при нагревании графита до температур, достигающих $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$, его решётка может перестраиваться, и графит может превращаться в алмаз. Именно таким образом производят искусственные алмазы.

Путем специальной огранки из алмазов изготавливаются бриллианты. Они являются весьма дорогими камнями и ценятся не только из-за прочности и чистоты их цвета, но также из-за их способности к люминесценции, т. е. к свечению собственными цветами даже в темноте. Кроме того, алмазы применяют в часовой промышленности в качестве неизнашиваемых гнёзд часовых механизмов, при резке и сверлении особо прочных материалов и др.

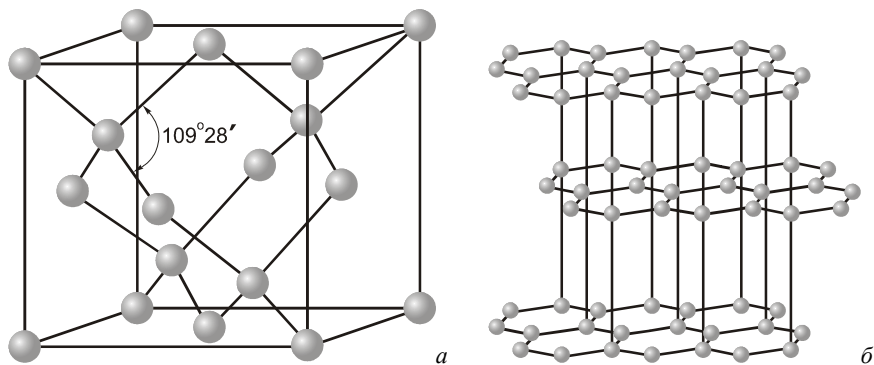


Рис. 1.6. Кристаллические решётки алмаза (а) и графита (б)

1.2.3. Молекулярные связи

Молекулярные связи ещё называют Ван-дер-Ваальсовскими. Они являются сравнительно слабыми, поскольку формируемые ими силы оказываются примерно на два порядка меньшими, чем у кристаллов с ионными и ковалентными связями. Данные силы возникают при несовпадении центров тяжести положительных и от-

рицательных зарядов в атомах, а также при поляризации молекул, внутри которых действуют более прочные ковалентные связи. Поэтому центр тяжести отрицательных зарядов одной молекулы может сместиться к положительному центру тяжести зарядов соседней молекулы, и это приводит к возникновению электрических сил притяжения между ними (рис. 1.7). Причём силы Ван-дер-Ваальса являются более короткодействующими, чем кулоновские силы.

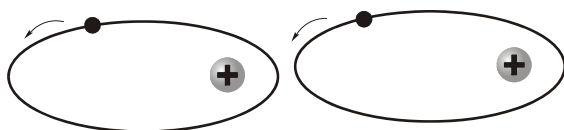


Рис. 1.7. Молекулярные связи

К материалам, формируемым указанными связями, относятся вода H_2O , углекислый газ CO_2 , N_2O_4 , парафин, полимеры, отвердевшие инертные газы, некоторые смолы и др. Они характеризуются низкой температурой плавления и большим коэффициентом температурного расширения. В твёрдом состоянии такие вещества хрупки и легко растворяются в жидкостях.

1.2.4. Металлическая связь в твёрдых телах

Данный вид межмолекулярного притяжения характерен для всех видов металлов. Указанные вещества представляют собой молекулы, утратившие валентные электроны и от этого становящиеся положительными ионами. При этом освободившиеся электроны уже не связаны с каким-либо атомом и становятся как бы обобществлёнными. В виде электронного газа они перемещаются внутри решётки, образованной заряженными ионами, как показано на рис. 1.8. Характерно, что поведение таких электронов описывается законами, справедливыми для обычных газов.

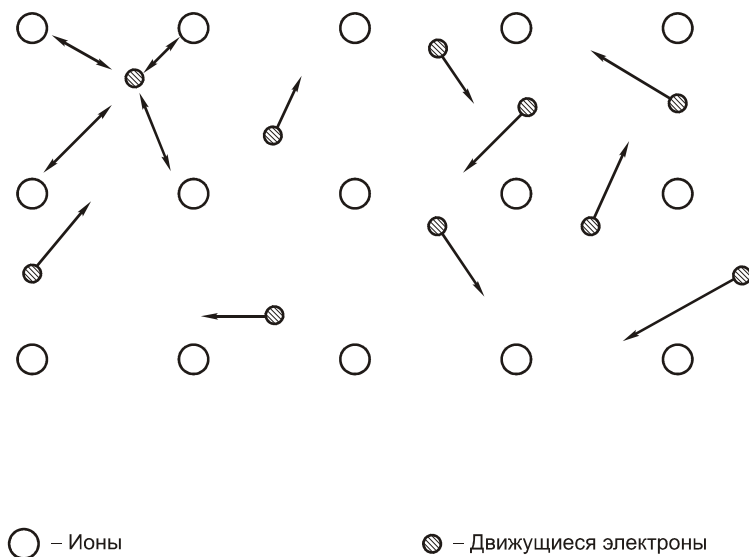


Рис. 1.8. Металлическая связь между молекулами

Поскольку отрицательно заряженный электронный газ всё время располагается между положительными ионами, он таким образом притягивает со всех сторон ионы к себе, а значит и друг к другу. А поэтому служит источником возникновения сил притяжения между молекулами металлов. Является как бы раствором, который скрепляет между собой различные молекулы и не позволяет им распадаться.

Металлы характеризуются высокой электро- и температуропроводностью, обладают хорошей пластичностью и ковкостью.

1.3. Влияние кинетической и потенциальной энергии тел на их агрегатные состояния

Кроме сил притяжения на молекулы действуют также силы отталкивания. Не будь этого, все молекулы слиплись бы в единый неразделимый комок и никакие агрегатные состояния вещества не могли бы возникать.

Вначале ответим на вопрос, от каких факторов зависят силы отталкивания между молекулами и атомами?

Очевидно, что если два атома начинают приближаться друг к другу, между ними начинают действовать описанные ранее силы притяжения, формируемые валентными электронами. Однако по мере их последующего сближения всё большую роль начинают играть силы отталкивания, образуемые всеми отрицательно заряженными электронами, вращающимися на всех орбитах атомов. Величина этих сил существенно больше, чем у сил притяжения, однако с расстоянием они убывают значительно сильнее, чем силы притяжения. А поэтому на малых расстояниях между атомами превалируют силы отталкивания, а на больших расстояниях — силы притяжения, как показано на рис. 1.9, *а*. В этой связи с одной стороны атомы не могут слипаться друг с другом, а с другой — после некоторых критических расстояний начинают притягиваться между собой.

Положительными f здесь считаются силы отталкивания между молекулами, а отрицательными — силы притяжения. Из рисунка видно, что при расстоянии, равном r_0 , силы притяжения и отталкивания взаимно компенсируют друг друга, а поэтому данное расстояние является наиболее устойчивым.

Пользуясь формулой $U = -\int_r \vec{f} d\vec{r}$, определим зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул U от расстояния между ними. Такая зависимость показана на рис. 1.9, *б*. Из него видно, что минимальная величина потенциальной энергии U_0 , как и следовало ожидать, соответствует расстоянию r_0 .

Величина U_0 получила название энергии сублимации. Именно такую энергию следует иметь молекулам, чтобы преодолеть силы их притяжения и испариться без предварительного превращения вещества в жидкость. Данная энергия зависит от величины сил притяжения между молекулами и от структуры вещества. И понятно, что при отсутствии каких-либо других сил все молекулы тел располагались бы на самом глубоком месте потенциальной ямы, определяемом расстоянием r_0 .

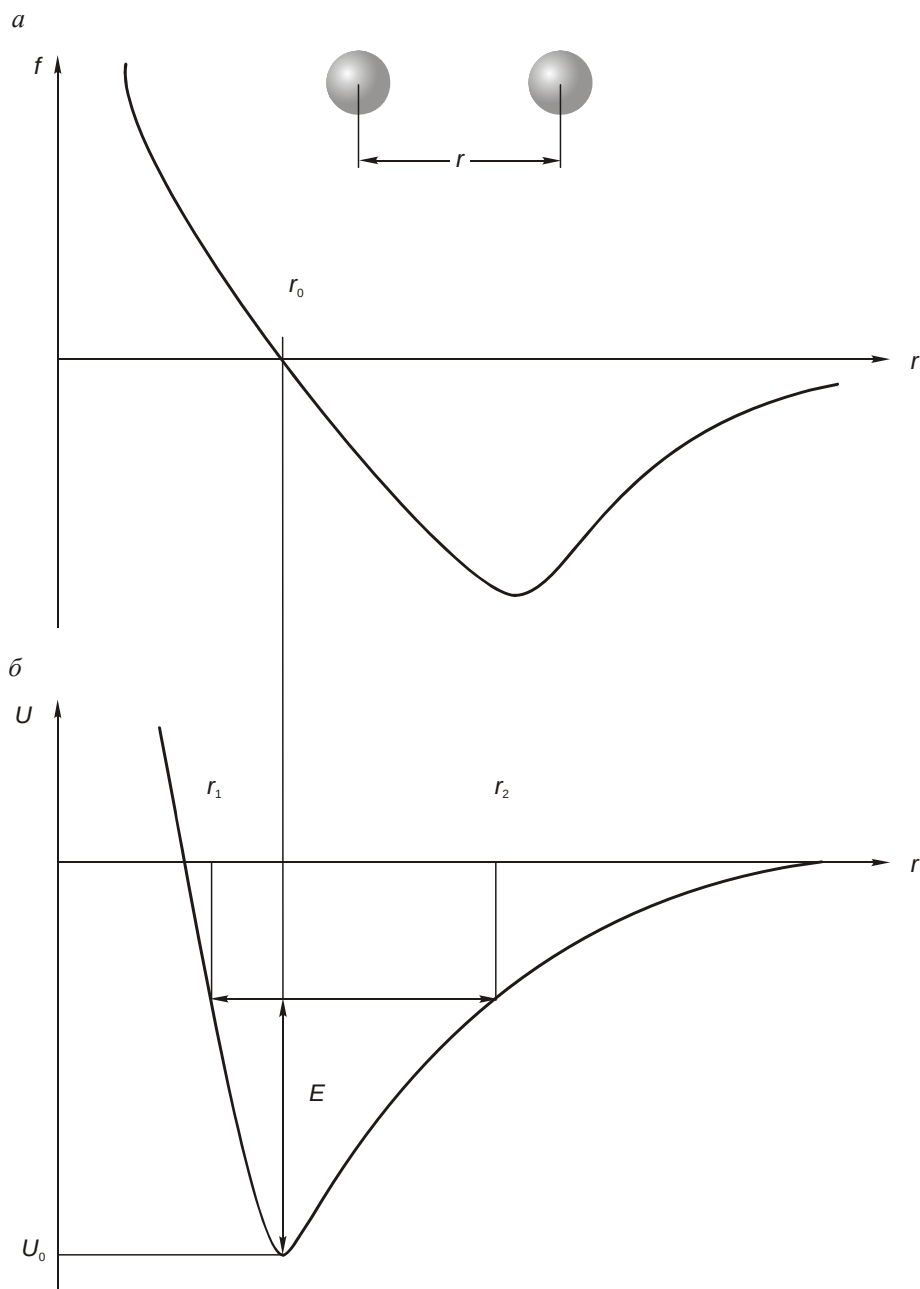


Рис. 1.9. Зависимость сил и энергий от расстояний между молекулами

Однако в действительности происходит нечто иное. Кроме потенциальной энергии молекулы обладают также кинетической энергией, обусловленной их собственным движением. Как указывалось ранее, её величина определяется температурой тела T и равна $E = 3kT$, где k — постоянная Больцмана. В результате под её воздействием молекулы выбираются из нижней точки потенциальной ямы и начинают колебаться внутри неё в пределах расстояния от r_1 до r_2 , как показано на рис. 1.9, б.

При этом могут иметь место следующие соотношения между потенциальной и кинетической энергиями. В случае, когда $E < |U_0|$, тогда среднее расстояние между молекулами остаётся фиксированным, и формируется устойчивое, твёрдое состояние вещества. Если $E \approx |U_0|$, в таком случае молекулы не могут сближаться до расстояний, меньших r_1 , и в то же время величина r_2 у них растёт, т. е. молекулы начинают обладать некоторой подвижностью. Это соответствует жидкому состоянию вещества. А если $E > |U_0|$, тогда вещество переходит в газообразное состояние. При этом движение молекул не ограничивается силами межмолекулярного взаимодействия, и они ведут себя свободно.

Глава 2

Характеристика жидкого состояния вещества

2.1. Сопоставление свойств жидких и твёрдых тел

Между жидкими и твёрдыми телами есть много общего. В самом деле, как те, так и другие обладают постоянством объёма, т. е. их чрезвычайно трудно сжимать, поскольку, в отличие от газов, между их молекулами мало свободного пространства. С другой стороны, при статическом увеличении давления на поверхности жидких и твёрдых тел их плотности изменяются не совсем одинаково. При малых давлениях жидкостей их плотность растёт в большей степени, чем изменяется давление, а у твёрдых тел они пропорциональны друг другу при любых нагрузках (см. качественные кривые рис. 2.1). И данное обстоятельство позволяет считать жидкости, с точки зрения компактности расположения их молекул, по многим позициям подобными твёрдым телам, но несколько более рыхлыми.

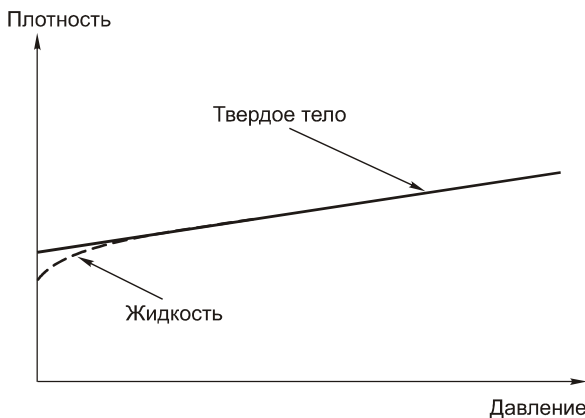


Рис. 2.1. Зависимость плотности твёрдых и жидких тел от давления

В случае быстрых изменений внешнего давления плотности жидких и твёрдых тел ведут себя примерно одинаково. Например, если сжимается один участок тела, тогда избыточное давление от него передаётся на другие участки не мгновенно,

а с некоторым запаздыванием. И таким образом внутри материалов образуются упругие волны, распространяющиеся с вполне определёнными, фиксированными для конкретных материалов и данной температуры скоростями. Их называют волнами плотности. Если амплитуды упругих волн оказываются сравнительно небольшими, их считают звуковыми.

При этом одновременно с плотностью в каждом отдельном элементе объёма изменяются и другие физические параметры тел, а именно их температура, коэффициенты теплопроводности, диэлектрические и магнитные постоянные и др.

С другой стороны, если давление, передаваемое какими-либо силами твёрдому телу, зависит от направления действия этих сил, то в жидкости оно передаётся одинаковым образом по всем направлениям. Данное обстоятельство описывается законом Паскаля, который справедлив также и для газов. Данная особенность жидкостей, наряду с их незначительной сжимаемостью, используется в гидравлических машинах.

Как жидкие, так и твёрдые тела несколько увеличивают свой объём (т. е. расширяются) при нагревании и уменьшают объём (сжимаются) при охлаждении. Однако среди жидкостей встречаются и исключения, например, вода. Вместо того чтобы вести себя как другие тела, она сжимается при нагревании и расширяется при охлаждении. И только благодаря этому жизнь на Земле стала возможной. В самом деле, если бы вода вела себя так же, как и другие вещества, тогда при наступлении холодов лёд не образовывал бы защитный тепловой барьер, а тонул. И тогда при наступлении холодов озера и реки замерзали бы до дна, все живые существа в них бы погибли.

С другой стороны, в отличие от твёрдых, жидкие тела не обладают постоянством формы. И данное обстоятельство приводит к текучести жидкостей. То есть если к участку жидкости, находящемуся в равновесии, приложить внешнюю силу, тогда возникает поток частиц жидкости в том направлении, в котором данная сила приложена, т. е. жидкость начинает течь. Причём предела текучести жидкостей не существует, достаточно приложить сколь угодно малую внешнюю силу, чтобы жидкость потекла. Таким образом, под действием неуравновешенных внешних сил жидкость не сохраняет форму и относительное расположение своих частей, а поэтому принимает форму сосуда, в который её наливают. И в этом своём проявлении жидкости идентичны газам.

Вместе с тем как твёрдые, так и жидкие вещества обладают кристаллической структурой рис. 2.2. Однако если у твёрдых тел справедлив дальний порядок расположения молекул, т. е. расстояния между ними строго фиксированы и определяются числом промежуточных молекул, то для жидкостей верен только ближний порядок. На малых расстояниях между молекулами порядок кристаллической решётки жидкостей можно наблюдать, однако на больших расстояниях между ними локальные флуктуации молекул нарушают этот порядок.

Однако указанные отличия характерны только для кристаллических тел. В случае аморфных твёрдых тел их кристаллическая структура оказывается такой же, как и у жидкостей. Именно поэтому их называют отвердевшими жидкостями. Но в отличие от жидкости, из-за своей высокой вязкости аморфные тела не обладают текучестью.

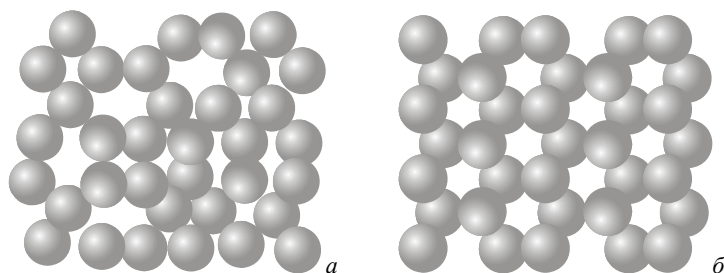


Рис. 2.2. Пример ближнего порядка расположения молекул воды (а) и дальнего порядка молекул льда (б)

Поскольку жидкости занимают промежуточное положение между газообразными и твёрдыми состояниями вещества, их теория оказалась наиболее сложной и не разработана в полной мере до настоящего времени. В этой связи рассмотрим, какое представление жидкости современной теорией считается наиболее верным.

Итак, поскольку жидкости можно рассматривать как рыхлые твёрдые тела, значит, в некоторых узлах их решёток, где должны располагаться молекулы (рис. 2.3), они отсутствуют. Пусть в точке, обозначенной прерывистым кругом, молекулы нет. Тогда соседней молекуле ничего не мешает занять её место и освободить, таким образом, собственное место. Но в таком случае опять ничто не мешает соседней молекуле занять освободившееся место, и так далее, как показано на рис. 2.3. Возникающее таким образом перемещение молекул, с одной стороны, лишает решетку жёсткой определённости, а с другой — приводит к возникновению отмеченной ранее текучести жидкостей. Но и это ещё не все.

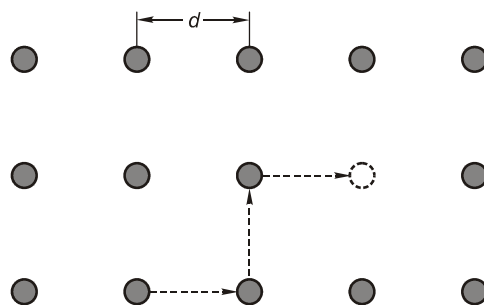


Рис. 2.3. Характер поведения молекул жидкости

Время релаксации τ , в течение которого молекула переходит из одного места решётки в другое, не может быть произвольным. Его величина описывается формулой:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{W}{kT}},$$

где W — пороговая энергия релаксации, которую молекула должна преодолеть, чтобы совершить указанный переход, τ_0 — константа, зависящая от материала, k — постоянная Больцмана, T — температура в градусах Кельвина.

Поскольку произведение kT пропорционально кинетической энергии молекулы, именно соотношение между энергией, которой молекула обладает, и той, сопротивление которой ей предстоит преодолеть, устанавливает время перехода мо-

лекулы из одного узла решётки в другой. Причём чем выше температура жидкости, тем это время оказывается меньшим, а молекулы — подвижнее.

Расстояние, которое за время релаксации преодолевает молекула, определяется периодом решётки d . В результате получаем выражение для средней скорости перемещения молекулы жидкости при её текучести, называемой скоростью релаксации:

$$V = d/\tau = \frac{d}{\tau_0} e^{-\frac{W}{kT}}.$$

Даная скорость является предельной. Для большинства жидкостей она невелика и не превышает (10—20) м/с. Поэтому если какое-то внешнее воздействие на жидкость производится при меньших скоростях, она остаётся текучей, мягкой и податливой. А если такая скорость оказывается больше скорости релаксации, тогда жидкость не успевает проявить свою текучесть и ведёт себя подобно твёрдому телу. Именно поэтому при падении самолетов в воду они разбиваются об неё точно так же, как и при падении на бетонированную площадку. По этой причине неопытные ныряльщики больно ударяются о воду, когда прыгают в неё не как следует.

2.2. Поверхностный слой. Энергия поверхностного слоя вещества

Рассмотрим структуру вещества в жидком или в твёрдом состоянии, как показано на рис. 2.4. На молекулы, расположенные внутри тел, действуют взаимно уравновешивающие друг друга силы притяжения со стороны соседних молекул. Поэтому результирующая всех этих сил равна нулю. То есть на внутренние молекулы, находящиеся в равновесии, фактически никакие силы со стороны других молекул не влияют, и они оказываются как бы свободными.

Иное дело с молекулами, расположенными на границе тела. В то время как со стороны молекул, находящихся внутри вещества, силы притяжения продолжают действовать, над ними никаких молекул нет. А поэтому силы внутреннего притяжения ничем не уравновешены. В связи с этим возникает равнодействующая указанных сил, направленная по нормали от поверхности, как показано на рис. 2.4.

С одной стороны, наличие поверхностных сил приводит к возникновению поверхностного давления, сжимающего тело и становящегося причиной появления потенциального барьера, препятствующего молекулам покидать тело. А с другой — наличие поверхностных сил является причиной появления специфической

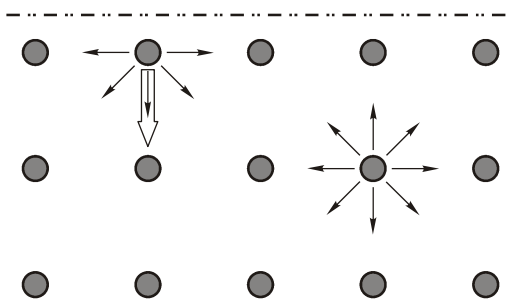


Рис. 2.4. Внутренние и поверхностные силы в веществе

поверхностной энергии U . Величина её пропорциональна площади свободной поверхности тел, т. е.

$$U = \alpha S.$$

В данном выражении α — коэффициент поверхностного натяжения вещества, S — площадь его свободной поверхности. Причём данная энергия присутствует на поверхности не только жидких, но и твёрдых тел.

Коэффициент поверхностного натяжения обусловлен силами межмолекулярного взаимодействия. И с точки зрения энергии представляет собой работу, которую необходимо затратить для изотермического увеличения площади свободной поверхности вещества на 1 м^2 . Однако кроме энергетического определения данного коэффициента нередко используют также его силовое определение, которое соответствует силе, действующей на единицу длины контура $\bar{l}$, ограничивающего свободную поверхность вещества, т. е. $\vec{f} = \alpha / \bar{l}$. Эта сила направлена вдоль поверхности тела и перпендикулярна площади указанного контура. Для жидкости оба коэффициента по величине совпадают, для твёрдых тел они не одинаковы.

Коэффициент поверхностного натяжения уменьшается с повышением температуры, равен нулю в критической точке, зависит от материала и от наличия в нём примесей. В частности, у чистой воды при температуре 20°C коэффициент поверхностного натяжения равен $7,29 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^2$, у жидкого железа при температуре 1600°C он близок к $1,83 \text{ Дж/м}^2$, а у твёрдого железа — приблизительно $1,9 \text{ Дж/м}^2$.

В связи со значительной величиной поверхностной энергии она оказывает большое влияние на поведение жидких и твёрдых тел. Например, именно под её воздействием поверхность жидкости принимает форму, при которой указанная энергия становится минимально возможной. Так, из-за неё капли жидкости в невесомости принимают форму шара, струи воды "слипаются" в цилиндр, небольшие объекты с плотностью, большей плотности жидкости, способны "плавать" на её поверхности. Некоторые насекомые могут передвигаться по воде, удерживаясь на её поверхности за счёт сил поверхностного натяжения, как показано на рис. 2.5.

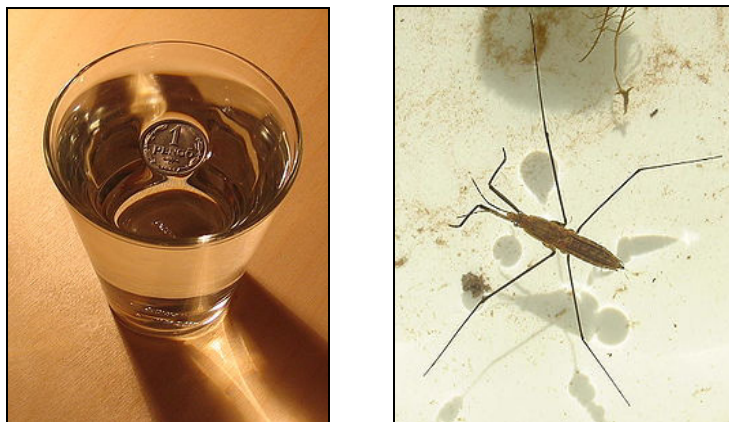


Рис. 2.5. Демонстрация плавания монеты и перемещения водомерки по поверхности воды

Кроме того, поскольку под влиянием поверхностного натяжения молекулы, образующие твёрдые и жидкие тела, энергетически располагаются в глубине потенциальной ямы, поэтому те молекулы, кинетическая энергия у которых оказывается больше глубины указанной ямы, способны покинуть тело и сформировать облако пара над ним. Остальные молекулы указанный барьер преодолеть не могут. В результате этого они образуют твёрдые или жидкие тела, удерживающие свои молекулы с помощью сил поверхностного натяжения сильнее, чем если бы они были каким-либо образом связаны друг с другом.

При нагревании кинетическая энергия молекул возрастает, что приводит к увеличению их числа, способного вырваться за пределы жидкости. В результате при получении дополнительной энергии парообразование усиливается, жидкость начинает парить, кипеть, интенсивно испаряться.

2.3. Формула Лапласа

Даная формула устанавливает зависимость дополнительного давления внутри жидкости, обязанного своим возникновением силам поверхностного натяжения. В качестве объекта исследования возьмём жидкий шарик радиусом R , находящийся вне сил гравитационного притяжения. Мысленно разрежем его пополам, как показано на рис. 2.6. Тогда дополнительное давление внутри шарика создаётся поверхностными силами F , величина которых равна длине линии разреза, помноженной на коэффициент поверхностного натяжения, т. е. $F = 2\pi\alpha R$.

В результате действия данных сил внутри шарика создаётся дополнительное давление, равное силам поверхностного натяжения, делённым на площадь разреза, т. е.

$$P = \frac{F}{S} = \frac{2\pi\alpha R}{\pi R^2} = \frac{2\alpha}{R}.$$

Таким образом, если коэффициент поверхностного натяжения воды равен $0,073 \text{ Дж/м}^2$, а радиус капли — 1 мкм , тогда указанное давление внутри шарика оказывается равным $1,46 \cdot 10^5 \text{ Па}$ или составляет почти полторы атмосферы (1 атм равна 10^5 Па).

Понятно, что если размеры водяных шариков оказываются меньшими, тогда сжимающее их давление становится ещё большим и не позволяет им распасться. А поэтому тучи, которые состоят из таких водяных шаров, являются достаточно устойчивыми и дождь из них не возникает. Но если концентрация таких шаров становится значительной, они начинают слипаться друг с другом. Тогда радиусы водяных капель увеличиваются, давление внутри них уменьшается и начинается дождь.

В общем виде поверхность жидкостей не обязательно может быть шарообразной и способна принимать более сложные формы. Поэтому вводится понятие

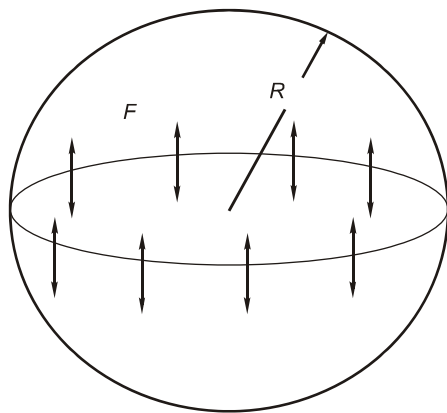


Рис. 2.6. Схема капли жидкости

о кривизне поверхности, как сочетания радиусов линий R_1 и R_2 , проведённых к точке наблюдения по поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях, как показано на рис. 2.7. И тогда кривизна H в данной точке поверхности описывается выражением $H = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. А дополнительное давление внутри жидкости будет описываться следующей формулой Лапласа:

$$P = \alpha H = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

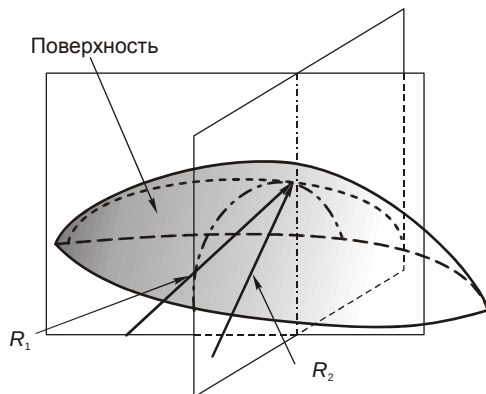


Рис. 2.7. Положение радиусов кривизны поверхности

Из неё следует, что для шара, который мы рассматривали ранее, $R_1 = R_2 = R$, а поэтому полученное ранее выражение для давления шара без труда вычисляется с помощью формулы Лапласа.

В случае, когда поверхность мениска жидкости в одном каком либо направлении становится цилиндрической, т. е. бесконечно большой и равной $R_2 = \infty$, тогда формула для внутреннего давления жидкости принимает вид $P = \frac{\alpha}{R_1}$. Именно благодаря

наличию данного давления трудно разорвать между собой две стеклянные пластинки, между которыми помещается капля воды, не сдвигая их относительно друг друга.

Иногда кривизна жидкости в одном направлении может быть с положительным радиусом, а в другом — с отрицательным, т. е. направленным в другую сторону от поверхности жидкости. Тогда формула Лапласа оказывается справедливой и для данного варианта, с учётом, разумеется, направлений радиусов кривизны мениска и знака, возникающего при этом давления.

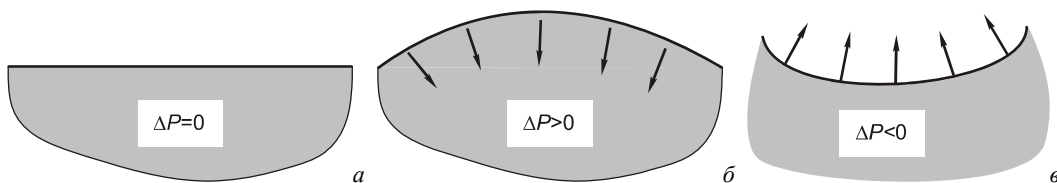


Рис. 2.8. Избыточное давление, возникающее под мениском жидкого или твёрдого тел

Данные обстоятельства оказывают большое влияние на дополнительное давление, возникающее внутри жидкости под влиянием поверхностного натяжения.

Соответствующие демонстрационные примеры приведены на рис. 2.8. Здесь показано, что если мениск жидкого или твёрдого тел является плоским, тогда никакого избыточного давления под воздействием поверхностного натяжения внутри указан-

ных тел не наблюдается (случай *а*). Если мениск выпуклый (случай *б*), тогда под их влиянием возникает дополнительное давление $\Delta P > 0$. А если мениск вогнутый, в таком случае давление внутри твёрдого и жидкого тел становится отрицательным (случай *в*). И очевидно, что чем в большей мере проявляется выпуклость или вогнутость мениска, тем большими по величине оказываются указанные давления.

2.4. Смачиваемость и несмачиваемость поверхностей. Капиллярные явления

Понятия смачиваемости и несмачиваемости имеют громадное значение как в природе, так и в технике. В самом деле, при соприкосновении твёрдых и жидких тел они могут и слипаться, и отторгать друг друга. В частности, при взаимном перемещении деталей поршней в цилиндрах двигателей автомобилей между ними помещается масло. И если оно не смачивает трущиеся поверхности, тогда указанная смазка не работает, детали быстро изнашиваются, автомобиль выходит из строя. Аналогичным образом процессы проникновения жидкости в почву, доставки влаги к листьям растений и пр. объясняются особенностями смачиваемости и несмачиваемости материалов растений и почвы.

Продemonстрируем оба вида взаимодействий жидкого и твёрдого вещества друг с другом. Значение смачиваемости поверхности принято определять углом Θ , проведённым от соприкасающихся частей поверхности твёрдого и жидкого тел по касательной к ним. Чтобы установить его зависимость от параметров жидкого и твёрдого тел, сопоставим между собой проекции сил поверхностного натяжения $\bar{f}_{жс}$ — жидкости, $\bar{f}_{ТТ}$ — твёрдого тела и $\bar{f}_{Тжс}$ — поверхности между твёрдым телом и жидкостью в граничной точке их соприкосновения, как показано на рис. 2.9. Откуда следует $f_{ТТ} = f_{Тжс} + f_{жс} \cos \Theta$. В результате, принимая во внимание, что $f_{ТТ} = \alpha_{ТТ} \Delta x$, $f_{жс} = \alpha_{жс} \Delta x$, а $f_{Тжс} = \alpha_{Тжс} \Delta x$, получаем:

$$\cos \Theta = \frac{\alpha_{ТТ} - \alpha_{Тжс}}{\alpha_{жс}}.$$

Таким образом, если $\alpha_{ТТ} < \alpha_{Тжс}$, тогда $\Theta > \pi/2$ и поверхность не смачивается (рис. 2.9, *а*). А если $\alpha_{ТТ} > \alpha_{Тжс}$, тогда угол $\Theta < \pi/2$ и поверхность твёрдого тела оказывается смачиваемой (рис. 2.9, *б*).

Капиллярными явлениями называют подъём или опускание жидкостей в трубках малого диаметра, называемых **капиллярами**. Причём смачивающие жидкости поднимаются по капиллярам, а несмачивающие — опускаются по ним.

На рис. 2.10 изображена капиллярная трубка некоторого радиуса r , опущенная нижним концом в смачивающую жидкость плотностью ρ . Верхний конец капилляра открыт. Подъём жидкости в капилляре продолжается до тех пор, пока сила тяжести $\bar{F}_T$, действующая на столб жидкости в капилляре, не станет равной по модулю результирующей F_H сил поверхностного натяжения, действующих вдоль

границы соприкосновения жидкости с поверхностью капилляра, т. е. пока не будет $F_T = F_H$, где $F_T = mg = \rho h \pi r^2 g$, $F_H = \alpha_{\text{жс}} 2\pi r \cos \theta$. Отсюда следует $h = \frac{2\alpha_{\text{жс}} \cos \theta}{\rho g r}$. Откуда, принимая во внимание решение, полученное в предыдущем разделе, находим:

$$h = \frac{2(\alpha_{\text{ТТ}} - \alpha_{\text{Тжс}})}{\rho g r}.$$

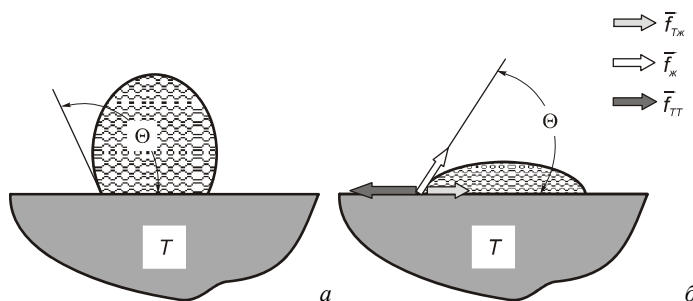


Рис. 2.9. Особенности смачивания и несмачивания твёрдой поверхности жидкостью

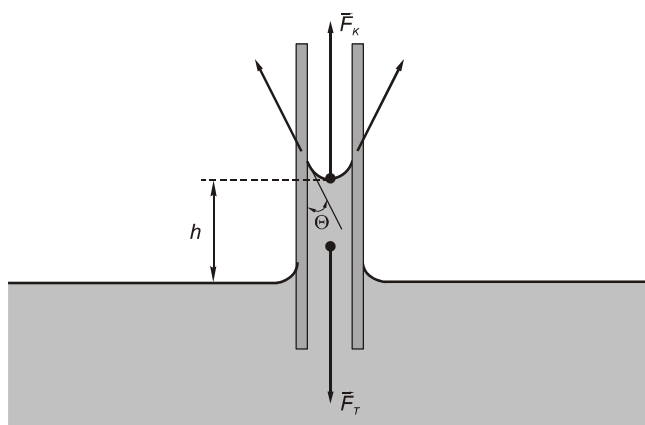


Рис. 2.10. Подъём смачивающей жидкости в капилляре

При смачивании уровень жидкости в капилляре по сравнению с областью вне его оказывается положительным, а при несмачиваемости — отрицательным. В частности, вода практически полностью смачивает поверхность чистого стекла, а поэтому она в капилляре повышает свой уровень. Ртуть не смачивает стеклянную поверхность, в связи с чем её уровень в стеклянном капилляре опускается ниже уровня в сосуде.

Капиллярные явления играют значительную роль в природе. Так, благодаря им вода питает ветки громадного дерева, снабжает каждый его лист столь необходимой им влагой. Аналогичным образом, кровь и лимфа проникают во всякий орган человеческого организма, в любой его капилляр, питая и очищая их.

Глава 3

Строение кристаллических твёрдых тел

3.1. Рост реальных кристаллов

Чтобы представить себе, каким образом возникают реальные кристаллы, рассмотрим поведение расплавов материалов. Они обычно состоят из отдельных молекул, которые перемещаются друг относительно друга со скоростями, зависящими от температуры. Для простоты восприятия будем считать молекулы квадратными кубиками одного и того же размера. Поскольку молекулы являются свободными, а грани у них равны между собой, можно считать, что каждая из них обладает поверхностной энергией w , равной $w = 6\alpha\Delta S$, где α — коэффициент поверхностного натяжения, а ΔS — площадь одной грани куба (см. положение молекул на рис. 3.1, а).

Как только температура расплава начинает убывать, скорости перемещения молекул понижаются, и растёт вероятность их прилипания друг к другу. Однако как только две молекулы слипаются, они уже образуют общую структуру, в результате чего из 12 свободных поверхностей обеих молекул свободными остаётся только 10 граней. Таким образом, при каждом подобном акте слипания двух молекул выделяется энергия, равная поверхностной энергии двух их слипшихся граней, равная $\Delta w = 2\alpha\Delta S$. Отсюда энергетически выгодным оказывается рост нитей, состоящих из молекул. И это становится причиной появления дополнительной энергии при охлаждении (!) расплавов, отмеченной на рис. 1.2.

Однако на этом возможный рост молекул не завершается. Очевидно, что направление роста нитей не ограничивается одним направлением. Они способны одновременно расти и в другом направлении, как показано на рис. 3.1, б. И тогда если дополнительная молекула попадает в угол, образованный взаимно перпендикулярными нитями, тогда она уже может одновременно слипаться не с одной гранью каждой молекулы, а с двумя. В таком случае при каждом таком слипании уже выделяется поверхностная энергия, равная $\Delta w = 4\alpha\Delta S$, и формируются плоскости, состоящие из сцепившихся друг с другом молекул.

Но и на этом процесс роста кристаллов не заканчивается. При возникновении одной плоскости из молекул может происходить одновременный рост следующих их плоскостей. Тогда каждая дополнительная молекула, пришедшая к такой структуре, начинает уже прилипать тремя своими гранями, в результате чего выделяется энергия, равная $\Delta w = 6\alpha\Delta S$. И таким образом начинается рост кристаллов одновременно во всех трёх направлениях, формируется весь объём кристалла.

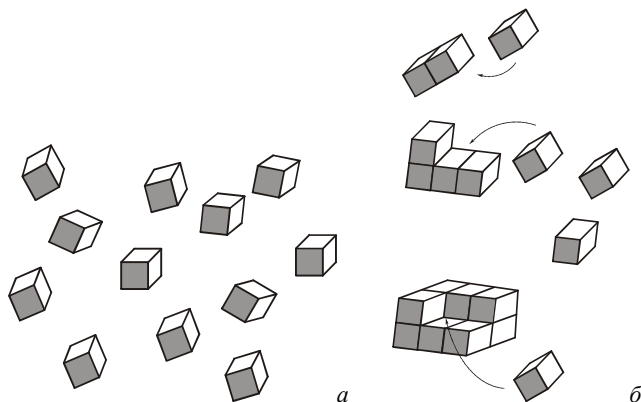


Рис. 3.1. Особенности роста кристаллов



Рис. 3.2. Некоторые виды кристаллических тел: кристаллы кварца (а); кристаллы витерита (б)

С другой стороны, отдельные молекулы не обязательно должны быть кубиками с равными сторонами. В действительности поверхностная энергия одной грани кристалла может не быть равной таковой у другой грани. А поэтому энергетически выгодным оказывается повышенный рост кристаллов именно в том направлении, в котором поверхностная энергия выше. И таким образом формируется вся непростая форма кристаллов, образуется весь многообразный их набор. Причём форма отдельного кристаллита не зависит от его размеров, пропорции кристаллитов сохраняются вне зависимости от того, большими или малыми они оказываются. На рис. 3.2 показаны некоторые из известных видов кристаллов.

Вместе с тем реальные расплавы твёрдых тел не бывают абсолютно чистыми. Внутри них всегда находятся сторонние субстанции, примеси, температура отверждения которых выше, чем у образующего расплав материала. В этой связи данные субстанции формируют твёрдую фазу быстрее, чем окружающий их материал, и становятся центрами кристаллизации. Именно вокруг них кристаллы начинают активно развиваться.

Причём каждый кристаллит растёт до тех пор, пока не встретится с соседним, препятствующим его дальнейшему росту. И таким образом формируется их граница,

возникает поликристаллическая структура твёрдых тел. А поскольку главные оси каждого кристаллита имеют самые различные направления, образованные таким образом твёрдые тела обладают качествами изотропии, т. е. их свойства уже не зависят от направления наблюдения.

Но и это ещё не всё. На формирование структуры твёрдых тел существенное влияние оказывают особенности их охлаждения. Понятно, что периферийные области расплава остывают быстрее, чем центральная его часть. В результате внутри расплава формируется градиент температуры, который определяет наибольшую скорость охлаждения и устанавливает направление преимущественного роста отдельных кристаллитов. И таким образом формируется структура, демонстрируемая рис. 3.3.

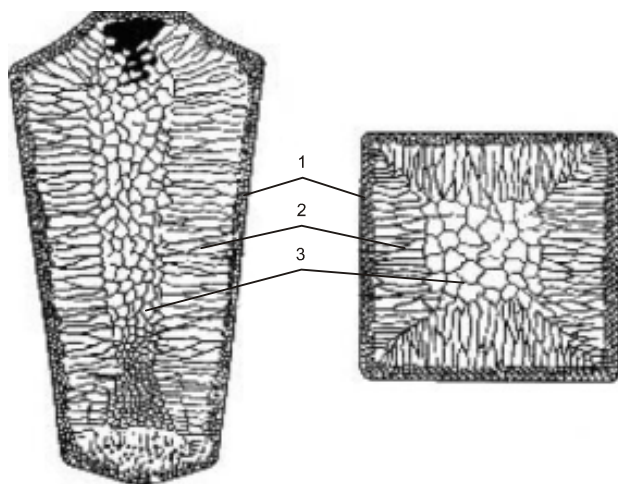


Рис. 3.3. Схема конфигурации кристаллитов стального слитка, представленная Д. К. Черновым.

1 — мелкозернистые приповерхностные зоны отливки; 2 — вытянутые кристаллиты;
3 — характер кристаллитов, формирующих центральную часть отливки

На данном рисунке показан шлиф отливки стального слитка, на котором отслеживаются крупные кристаллиты, вытянутые от периферии к центру. А поскольку при охлаждении уже застывшего металла его объём уменьшается, это приводит к образованию усадочной раковины, обычно заполняемой легкоплавкими примесями и шлаками, вытесненными основным металлом. Он наблюдается на левом из представленных рисунков.

С другой стороны, по той же причине по краям отдельных кристаллитов образуются пустоты и отливки оказываются пористыми. В результате требуется специальная механическая обработка, в частности ковка металлов, чтобы ликвидировать такие поры, разукрупнить кристаллы и уничтожить анизотропию свойств, присутствующих в отливках. Подобно тесту, их, нагретых до определённых температур, перемешивают, уплотняют, делают однородными. Причём, чтобы шлаки и примеси, находящиеся в усадочной раковине, не попадали внутрь металла и не становились причиной образования дефектов, указанную часть её обычно вырезают.

3.2. Виды симметрии кристаллических решёток

Плоские грани и прямые рёбра, наблюдаемые на рис. 3.2, являются отличительными качествами кристаллов. Причём правильность их форм свидетельствует о жёстком порядке внутреннего строения кристаллов. Каким образом их можно классифицировать?

Кристаллическая решётка — это вспомогательный геометрический образ, вводимый для анализа строения кристаллов. Она образуется соединением молекул, формирующих решётку, прямыми линиями, в результате чего и возникают описывающие кристаллы геометрические фигуры. Причём места кристаллической решётки, в которых расположены атомы или ионы, обычно называют её узлами.

Для анализа различных кристаллических решёток в первую очередь, используют всевозможные виды их симметрий. *"Кристаллы блещут симметрией"*, — утверждал выдающийся кристаллограф Е. С. Федоров. Поэтому различия между формами кристаллов — это прежде всего разница видов их симметрии.

Характерной особенностью кристаллов является периодичность их внутренней структуры. Идеальный кристалл можно получить путем регулярного повторения его ячейки в трех направлениях без изменения ориентации. Однако кроме трансляционной симметрии некоторые кристаллы обладают также вращательной симметрией. А именно при их повороте на угол $2\pi/n$, где n — порядок оси, они повторяют сами себя.

С другой стороны, периодичность кристаллов накладывает ограничения на порядок n осей поворотов и на число зеркальных отображений, которые могут в них существовать. А они не могут быть произвольными. В самом деле, в кристаллах могут иметь место оси только второго, третьего, четвертого и шестого порядков. Других симметрий (более высокого порядка) в трехмерном пространстве не бывает. Причём у кристаллов высоких порядков в их узлах обычно располагается одна или несколько молекул, поэтому их можно считать состоящими из нескольких кристаллов более низкого порядка.

Примеры подобной симметрии приведены на рис. 3.4.

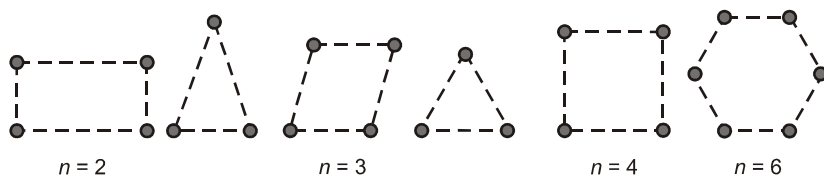


Рис. 3.4. Виды вращательной симметрии кристаллов

И причина этого заключается в том, что в природе не могут образовываться кристаллы, которые не способны заполнить всё пространство полностью, не оставляя в нём пустых областей. И это легко проверить путём наложения указанных фигур на лист бумаги. Поэтому не бывает круглых кристаллов, поскольку из окружностей невозможно составить никакую плоскость.

Кроме того, у каждого кристалла существует плоскость симметрии, которая делит его на две равные части, каждая из которых является зеркальным отражением другой. Некоторые кристаллы могут состоять из молекул одного и того же химического элемента. В других происходит замещение в кристаллической решётке атомов одного химического элемента на атомы другого элемента.

В целом оказывается, что в зависимости от типа пространственной симметрии, все кристаллические решётки подразделяются на шесть кристаллических систем. А по форме элементарной ячейки они могут быть разбиты на **6** сингоний. Причём все возможные сочетания имеющихся в кристаллической решетке поворотных осей симметрии и зеркальных плоскостей приводят к делению кристаллов на **32** класса симметрии, а с учётом их винтовых осей и скользящих плоскостей симметрии — на **230** пространственных групп. Они были предложены русским учёным Е. С. Федоровым. В дальнейшем практически все указанные группы были обнаружены в природе и не найдено ни одной структуры, не соответствующей описанным.

С другой стороны, помимо основных трансляций, из которых строится элементарная ячейка, в кристаллической решётке могут присутствовать также дополнительные трансляции. Они определяются соотношениями величин и взаимной ориентации рёбер кристаллической решётки относительно друг друга, как показано на рис. 3.5. При этом установлено, что всего может существовать 14 типов кристаллических решёток, получивших название решёток Браве.

В частности, если $a \neq b \neq c$, а $\alpha \neq \beta \neq \gamma$, тогда образуется триклинная форма кристалла. Если $a \neq b \neq c$, а $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$, имеет место моноклинная решётка. В случае, когда $a \neq b \neq c$, а $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, возникает ромбическая решётка. При $a = b \neq c$, а $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ — тетрагональная, а если $a = b = c$ при $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ — кубическая.

Когда $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ, \neq 90^\circ$, образуется тригональная решётка, а в случае $a = b \neq c$, при $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ — гексагональная решётка. Причём почти половину всех элементов в природе имеют кристаллы кубической или гексагональной симметрии. Характерно, что многие металлы при определённых температурах довольно легко изменяют свою структуру с кубической на гексагональную плотной упаковки и наоборот.

Тем не менее, следует отметить, что в действительности монокристаллы различных твёрдых тел наблюдаются редко, а как правило, они имеют поликристаллическую структуру. Кроме того, чистые вещества в природе практически не встречаются, обычно они имеют значительную долю примесей.

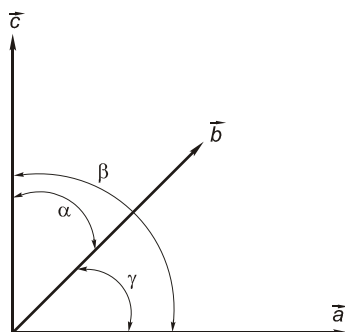


Рис. 3.5. Размеры и взаимная ориентация рёбер решётки

3.3. Дефекты в кристаллах

В идеальных кристаллах атомы занимают определённые положения, образуя правильные трёхмерные кристаллические решётки. В реальных кристаллах (природных или искусственно выращенных) обычно наблюдаются различные отступления от правильного расположения атомов, ионов или их групп, минимизирующие потенциальную энергию состояния кристаллов. Такие нарушения могут происходить либо на атомарном уровне, либо иметь макроскопические размеры, заметные даже невооружённым глазом.

Они появляются в процессе кристаллизации металлов, при их температурной обработке, при пластической деформации и др. Могут возникать под действием тепловых, механических и электрических нагрузок, при облучении нейтронами, электронами, рентгеновскими лучами, ультрафиолетовым излучением (радиационные дефекты) и т. п.

Помимо статических дефектов, существуют отклонения от идеальной решётки другого рода, связанные с тепловыми колебаниями частиц, составляющих решётку (динамические дефекты). Всё это приводит к изменению свойств кристаллов, и не всегда в худшую сторону.

По характеру нарушения кристаллической структуры дефекты делятся на:

- точечные, размеры которых сравнимы с межатомными расстояниями кристаллической решётки;
- линейные (одномерные) дефекты, которые имеют большую длину внутри кристаллов;
- плоскостные (двухмерные) дефекты, в том числе расположенные на поверхности кристаллов;
- заметные искажения кристаллической решётки (трехмерные дефекты).

Рассмотрим каждый из них более подробно.

Точечные дефекты. При их появлении в местах, соответствующих идеальной схеме решётки, часть атомов или молекул может отсутствовать. Такие дефектные места называются *вакансиями* (рис. 3.6, *а*). Кроме того, в кристаллах могут также находиться чужеродные (*примесные*, рис. 3.6, *б*) атомы или молекулы, которые замещают основные частицы, образующие кристалл, или внедряются между ними (*межузельные атомы*, рис. 3.6, *в*). Точечными дефектами являются также собственные атомы или молекулы материалов, сместившиеся из своего нормального положения (так называемые диффундирующие атомы и ионы). В ионных кристаллах, образованных вакансиями и межузельными атомами, указанные дефекты нередко возникают парами.

Образование вакансий и межузельных атомов связано с тем, что колеблющиеся около положения равновесия атомы могут под влиянием некоторой привнесённой извне энергии выходить из положения равновесия, образуя после себя в узле кристаллической решётки пустоту (вакансию) или впуская во внутреннюю часть решётки посторонний атом. При этом и вакансии, и межузельные атомы обладают высокой подвижностью даже при комнатной температуре. Встречаясь друг с другом

в процессе миграции по кристаллу, они могут рекомбинировать, т. е. нейтрализовать друг друга. Или выходить на поверхность кристаллов, "закрепляться" на их дефектах (на примесных атомах, дислокациях, границах зёрен, на микротрещинах и т. д.).

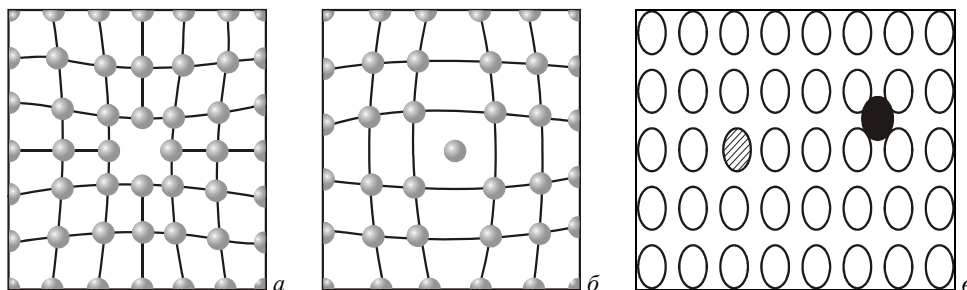


Рис. 3.6. Вакансии (а), примеси (б) и межузельные атомы (в)

Увеличение числа вакансий и межузельных атомов может достигаться резким охлаждением металла, пластичной деформацией, облучением высокоэнергетическими лучами, воздействием электрических или магнитных полей и др.

Линейные дефекты. К ним относятся, в первую очередь, дислокации. Они представляют собой линии, вдоль которых нарушены плоскости расположения молекул, характерные для правильного кристалла.

В теории дислокаций рассматриваются множественные механизмы их зарождения. Большая их часть сводится к возникновению локальных участков концентрации напряжений на границах твёрдых или жидких фаз материалов. Эти концентрации возникают в результате термических перепадов, изменения состава и структуры кристаллов, наличия примесей, вакансий, различных случайностей и др. Под их воздействием некоторые плоскости, образованные атомами, могут обрываться.

Именно края таких оборванных (лишних) плоскостей образуют **линейные дислокации**, показанные линией АВ на рис. 3.7, а. Они возникают, когда одна из плоскостей кристаллитов, образующих кристалл, не доходит до его края и обрывается внутри. И тогда при возникновении перерезывающих нагрузок, показанных стрелками, одни блоки кристаллитов способны без особых усилий перемещаться относительно других блоков, как это демонстрируется ступенькой DbC на рисунке.

Линейные дислокации действуют как клин, создавая значительное искажение кристаллической решётки, особенно в их окрестности. Иногда линейные дислокации образуются из скоплений точечных дефектов, расположенных цепочками. При этом линии дислокаций не обязательно должны быть прямыми, они могут представлять собой произвольные кривые. Причём линии дислокаций не могут обрываться внутри кристаллитов. Они должны либо выходить на поверхность, либо быть замкнутыми, образуя петли, либо разветвляться на несколько дислокаций. Линейными дислокациями являются также границы между участками одного и того же кристалла (т. е. субкристаллами), повернутыми на малые углы по отношению друг к другу.

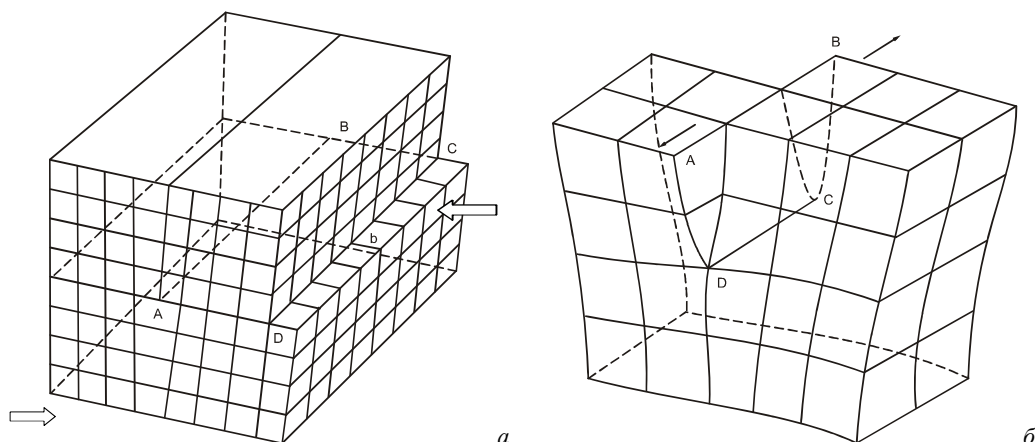


Рис. 3.7. Модель линейной (а) и винтовой (б) дислокации в кубических кристаллах

Винтовые дислокации (см. линию DC на рис. 3.7, б) образуются при развороте части кристаллов, разделённых плоскостью ABCD, относительно других плоскостей в направлении АВ. В зависимости от направления поворота, такие дислокации могут обладать как правым, так и левым вращением. Кроме того, существуют винтовые дислокации, связанные с закручиванием атомных плоскостей в виде винтовой лестницы, а также другие более сложные типы дислокаций.

Причём, в зависимости от взаимной ориентации векторов сдвига двух винтовых дислокаций, они могут между собой либо притягиваться, либо отталкиваться. Если эти векторы направлены в одну сторону, они отталкиваются, а если в разные стороны — притягиваются, иногда до полной компенсации друг друга. Между предельными случаями краевой и винтовой дислокации возможны любые промежуточные состояния, при которых линии дислокаций составляют произвольный угол с вектором формируемого их сдвига.

Особенностью дислокаций является то обстоятельство, что сильные искажения структуры сосредоточены в непосредственной близости от дислокационной линии. Эта область называется *ядром дислокации*.

Дислокации оказывают большое влияние на механические и магнитные свойства веществ. В частности, материалы с дислокациями, если число их не очень велико, отличаются повышенной пластичностью. Одним из важнейших свойств дислокаций является независимость их числа от температуры. Причина этого заключается в большой энергии, требуемой для образования дислокаций. Дислокации, возникшие при кристаллизации, имеют свойства размножаться или исчезать при пластической деформации, при термообработке или при других видах энергетического воздействия на образец.

Дислокации можно наблюдать визуально в местах их выхода на поверхность, поскольку сильно деформированные области вблизи их ядра вступают в химические взаимодействия с некоторыми элементами, называемыми *травителями*. В результате на поверхности хорошо полированных образцов образуются ямки травления, ко-

торые показывают места выхода дислокаций и по которым можно судить о характере их расположения. Они наблюдаются с помощью микроскопов.

Обычно плотность дислокаций определяется как среднее число ямок травления, выходящих изнутри тела на площадку размером 1 см^2 . В обычных веществах она колеблется от 10^2 до 10^3 шт./см², а в сильно искажённых (наклёпанных) металлах доходит до 10^{11} — 10^{12} шт./см².

Плоскостные искажения — это дефекты, имеющие значительную протяжённость в двух направлениях. К ним относятся границы электрических и магнитных доменов, области включений дополнительных фаз (например, мартенситной), границы между субзёрнами, зёрнами, межфазные границы, дефекты упаковки кристаллической решётки, скопления дислокаций в одной плоскости и др. Многие из поверхностных дефектов представляют собой ряды и сетки дислокаций, а совокупность таких сеток в поликристаллах образует границы зёрен. Они препятствуют свободной диффузии атомов, молекул, газовых включений, примесей и дислокаций, а поэтому служат областью их повышенной концентрации.

Объёмные дефекты имеют протяжённость во всех трёх измерениях. К ним относится совокупность точечных, линейных и поверхностных дефектов, которая приводит к искажению кристаллической решётки в больших объёмах кристалла. Такие дефекты также образуют скопления вакансий, формирующих поры и каналы, места концентрации частиц, оседающих на различных дефектах, пузырьках газов, скопления примесей и зон роста. Кроме того, к объёмным дефектам относят места сосредоточения разнородных фаз, дисперсных выделений, различных включений, а также неравномерные распределения напряжений и деформаций в макроразмерах вещества.

Дефекты кристаллов приводят к образованию упругих искажений структуры, вызывающих внутренние механические напряжения. Причём точечные дефекты, взаимодействуя с дислокациями, зачастую упрочняют или, наоборот, разупрочняют кристаллы. Дефекты влияют на спектры поглощения, на спектры люминесценции, на рассеяние света в кристаллах и т. д. Они изменяют электропроводность, теплопроводность, сегнетоэлектрические и магнитные свойства вещества.

Подвижность дислокаций определяет пластичность кристаллов, а скопления дислокаций приводят к возникновению внутренних напряжений и к разрушению кристаллов. Дислокации являются местами концентрации примесей. Они препятствуют процессам намагничивания и электрической поляризации благодаря взаимодействию с границами доменов. Структурные дефекты оказывают существенное влияние на упрочнение и разрушение металлов при обработке и т. д.

Величина упругой энергии, обусловленной полем напряжений, создаваемых дислокацией, равна примерно 10^{-9} Дж на один метр их длины. И хотя на первый взгляд эта энергия невелика, однако учитывая количество дислокаций, приходящихся на единицу поверхности кристаллитов, на самом деле она является значительной. А поэтому существенно влияет на всё поведение материалов. Например, если число таких дислокаций равно 10^9 ед/см², тогда величина указанной энергии только в одном кубическом сантиметре вещества оказывается равной примерно 10^{-2} Дж. И это совсем не мало.

Кроме того, дислокациями определяются так называемые структурно-чувствительные свойства материалов, к которым относятся диффузионные явления (движение точечных дислокаций), пластичность (движение дислокаций и точечных дислокаций), разрушение (зарождение и рост трещин при объединении дислокаций). От числа дислокаций зависят фазовые превращения веществ (движение в них межзёренных и межфазных границ), изменение свойств под действием радиации, создающие точечные дефекты, влияющие на электрические, оптические и другие свойства, обусловленные взаимодействием носителей зарядов с дислокациями.

При возникновении различных перерезывающих сил, как показано на рис. 3.7, дислокации без особого труда могут перемещаться внутри кристаллитов. Данное обстоятельство является главной причиной пластичности, при которой деформация тел увеличивается без искажения их объёма, т. е. без значительного изменения напряжений. В результате таких деформаций отдельные блоки, из которых состоят кристаллиты и которые разделены между собой линиями дислокаций, при возникновении внешних напряжений без особого труда скользят друг относительно друга, как это показано на рис. 3.8. И данное обстоятельство на несколько порядков понижает реальную прочность кристаллов по сравнению с теоретическим её значением.

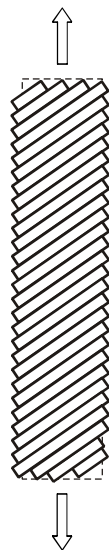


Рис. 3.8. Схема скольжения блоков кристаллитов по линиям дислокаций

Глава 4

Физические свойства твёрдых тел

4.1. Особенности строения поликристаллических тел

Любая структура представляет собой взаиморасположение и связь составных частей чего-либо целого. Рассмотрим особенности структур различных твёрдых тел как макрообъектов.

Ранее рассматривались в основном свойства монокристаллов, изучались особенности их строения, роста и поведения. В этой связи установим характеристики поликристаллических твёрдых тел, с которыми инженеры в своей практической деятельности сталкиваются наиболее часто. Как уже отмечалось, такие тела образуются при одновременном росте многих кристаллов, которых, приходя в соприкосновение друг с другом, ограничивают свои размеры и таким образом формируют границы отдельных кристаллитов. В связи с хаотичностью расположения их осей, поликристаллические тела обладают свойствами изотропии, т. е. их статистические параметры не зависят от направления наблюдения.

Термомеханическая обработка поликристаллических материалов (ковка, волочение, прессование и др.) способна внести некоторую зависимость параметров тел от направления, иначе говоря, сформировать их **текстуру**. Степень её развития влияет на величину параметров, чувствительных к анизотропии кристаллов. В результате, например, упругость твёрдых тел в направлении волочения может в значительной мере отличаться от таковой в перпендикулярном к нему направлении. Однако кроме текстуры, связанной с кристаллической анизотропией, на неё влияет также распределение фаз полифазных материалов, когда оно зависит от направления наблюдения.

Таким образом, микроструктура поликристаллических материалов определяется формой, размерами, относительным количеством и взаимным расположением кристаллов. Наличием различных фаз или их совокупностей, имеющих однообразный вид, их размерами, которые обычно имеют величину от 10^{-3} до 10^{-1} см. Под тонкой структурой (субструктурой) понимают строение отдельных зёрен, определяемых расположением внутри них дислокаций и других дефектов кристаллической решётки. Размеры субмикрозёрен обычно имеют величины от 10^{-5} до 10^{-3} см.

Формирование и изменение внутреннего строения металлов (их структуры) происходит в результате фазовых превращений при нагреве или при охлаждении металлов, а также вследствие пластической деформации, облучения, отдыха, рекристаллизации, спекания. Так, структура литого металла, формирующаяся в результате возникновения и роста в расплаве центров кристаллизации, зависит от скорости охлаждения, от содержания примесей, от направления отвода тепла и от других факторов.

После сильной деформации имеющиеся в кристаллитах дислокации могут образовывать скопления, разделяющие зёрна на отдельные фрагменты, влияя, таким образом, на их субструктуру. Микроструктура резко изменяется при протекании в твёрдом металле фазовых превращений, которые могут быть вызваны изменением температуры или всесторонним сжатием (растяжением).

На свойства твёрдых тел сильно влияют также тепловые явления, которые могут вызвать изменение формы и строения кристаллитов (их пространственной решётки). Причём структура зависит не только от химического состава, но также от предыстории образца, от того, каким механическим и тепловым воздействиям он подвергался ранее (см. рис. 4.1).

Например, сталь при комнатной температуре имеет другую кристаллическую решётку, чем при высокой температуре. Однако если её охлаждение происходит настолько быстро, что она не успевает перейти в положенное ей кристаллическое состояние, тогда сталь остаётся в том же виде и при низкой температуре. И тогда она становится твёрдой и хрупкой. Чтобы вернуть её в положенное состояние, сталь надо снова нагреть и медленно охладить, этот процесс называется отпуском. С другой стороны, при переходе из одного кристаллического состояния к другому поглощается или выделяется некоторое количество теплоты, меняются размеры тел и проч.

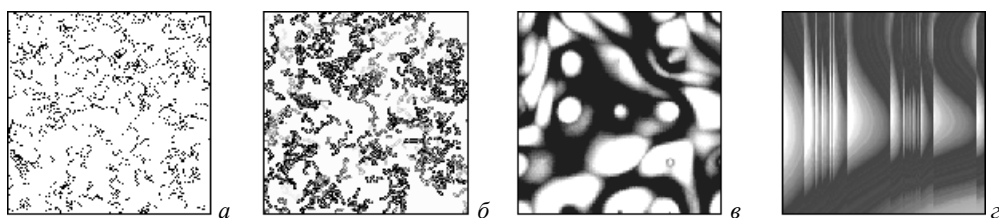


Рис. 4.1. Схематическое изображение структур, возникающих в металлических материалах при пластической деформации:
а — хаотическое распределение зёрен; *б* — их скопления и клубки;
в — ячеистая структура; *з* — полосчатая структура

На механические свойства поликристаллических тел значительное влияние оказывает также величина зёрен. В большинстве случаев мелкозернистый материал является более прочным, чем крупнозернистый. Кроме того, на них воздействует также природа межкристаллитной прослойки. Эта прослойка, формируясь из атомов основного металла, вблизи границ зёрен имеет сильно искажённую кристалли-

ческую решетку. Кроме того, в состав прослойки входят различные примеси, неизменно присутствующие в металлах и в сплавах.

По сравнению с материалом зёрен, механические свойства межкристаллитной прослойки характеризуются большей хрупкостью и меньшей теплоустойчивостью. Поэтому при динамическом разрушении или в условиях нагружения при высоких температурах излом чаще всего происходит по прослойке, а не по самому кристаллиту, т. е. носит межкристаллитный характер.

В поликристаллических телах деформация зёрен при воздействии внешней силы происходит неравномерно. При этом одни зёрна достигают предела упругости раньше, чем другие, и начинают пластически деформироваться быстрее, в то время как другие ещё остаются упругими. Кроме того, в пределах каждого отдельного зерна поликристаллического тела его строение не является идеально правильным. Установлено, что зёрна имеют мозаичное строение и состоят из отдельных блоков, отличающихся между собой ориентировкой кристаллической решётки. Если металлы и сплавы подвергаются пластической деформации, тогда блоки мозаичной структуры дробятся, что приводит к заметному изменению их свойств.

С другой стороны, параметры структуры зависят от места её расположения. В самом деле, поверхностная оболочка детали — это слой, у которого структура, фазовый и химический состав отличаются от основного материала, из которого сделана деталь.

Вблизи поверхностного слоя материала можно выделить следующие основные области (см. рис. 4.2):

1. Зона адсорбированных из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ. Толщина такого слоя имеет размеры от 0,001 до 1 мкм.
2. Зона продуктов химического взаимодействия металлов с окружающей средой (обычно она состоит из оксидов). Её толщина простирается от 1 до 10 мкм.
3. Граничная зона толщиной несколько межатомных расстояний, имеющая иную, чем внутри объёма вещества, кристаллическую и электронную структуру.
4. Зона с изменённой по сравнению с основным металлом структурой, фазовым и химическим составом, которая возникает при изготовлении деталей и меняется в процессе их эксплуатации.

Толщина и состояние указанных областей поверхностного слоя могут изменяться в зависимости от состава материала, от метода обработки, условий эксплуатации. Оценка их состояния осуществляется методами химического, физического и механического анализа. Многообразие параметров состояния поверхностного слоя и методов его оценки не позволяет выделить единственный параметр, определяющий качество поверхностного слоя. Поэтому в научной и в инженерной практике состояние поверхностного слоя оценивается набором единичных или комплексных параметров, с той или иной степенью учитывающих качество поверхностного слоя.

Укрупнённо эти данные характеризуют геометрические параметры неровностей поверхности, их физические составляющие, химический состав, механическое и температурное состояние. При этом **геометрические параметры неровностей поверхности** оцениваются данными шероховатости, наличием регулярных микрорельефов, волнистости.

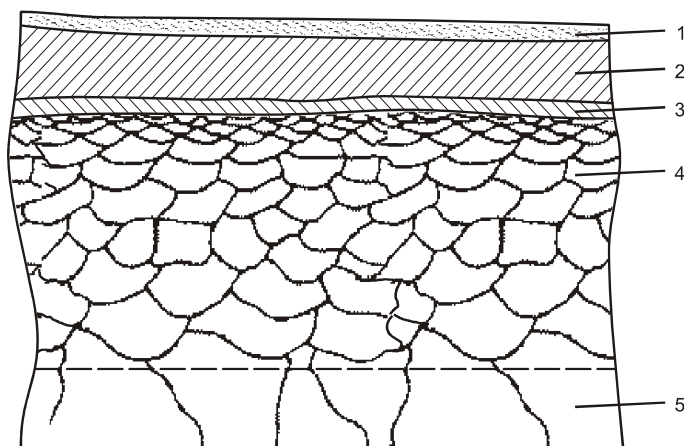


Рис. 4.2. Схема поверхностного слоя детали

Шероховатость поверхности — это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, т. е. расстояниями между ними. Примерное отношение высоты неровностей к шагу у таких поверхностей меньше 50.

Волнистость поверхности — это совокупность неровностей, имеющих больший шаг, чем статистические размеры шероховатостей.

Регулярные микрорельефы — это неровности, которые, в отличие от шероховатости и волнистости, имеют периодически повторяющиеся формы, размеры и взаиморасположение по отношению друг к другу. Регулярный микрорельеф получается обработкой резанием или поверхностным пластическим деформированием роликами, шариками, алмазами.

Физическое состояние поверхностного слоя деталей в технологии их упрочнения чаще всего характеризуется параметрами структуры и фазового состава, т. е. числом и концентрацией фаз, распределением их по объёму вещества и по поверхностному слою и др. Исследование физического состояния изделий осуществляется экспериментальными методами физики твёрдого тела, с помощью дифракционных и микроскопических эффектов.

Химический состав характеризуется элементным составом сплава и фаз, концентрацией элементов в объёме фаз, в объёме сплава и др. Исследования химического состава поверхностного слоя позволяют оценить адсорбцию из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ, диффузионные процессы, процессы окисления и другие явления, происходящие при обработке металлов и других материалов.

4.2. Тепловое расширение материалов

Тепловым расширением называется эффект изменения размеров тел при изменении их температуры при постоянном давлении. Указанный феномен возникает у всех твёрдых тел и играет громадную роль при работе материалов и при проектировании различных приборов и механизмов.

Количественно тепловое расширение при постоянном давлении P характеризуется изобарным коэффициентом расширения (объёмного α_V или линейного α_l). При этом коэффициент объёмного расширения устанавливается как относительное изменение объёма V при нагревании тела на 1 К, а именно: $\alpha_V = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$. Здесь

∂T — изменение температуры тела в процессе нагревания или охлаждения. На практике величина α_V обычно находится по формуле:

$$\alpha_V = \frac{V_2 - V_1}{V_1 (T_2 - T_1)},$$

где V_1 и V_2 — начальный и конечный объёмы тел при температурах, соответственно равных T_1 и T_2 .

Наряду с объёмными коэффициентами теплового расширения тел используют также линейные коэффициенты теплового расширения α_l , которые определяются по формулам $\alpha_l = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_P$ или $\alpha_l = \frac{l_2 - l_1}{l_1 (T_2 - T_1)}$, где l_1 и l_2 — начальный и конечный размеры тела в каком-то направлении при температурах T_1 и T_2 . Причём для большей части твёрдых материалов $\alpha_l \approx \frac{\alpha_V}{3}$. То есть линейные коэффициенты температурного расширения тел примерно в 3 раза меньше их объёмных коэффициентов.

В общем случае можно полагать, что $l_t = l_0 (1 + \alpha_T t)$ или $V_t = V_0 (1 + \alpha_V t)$, где параметр t обозначает температуру в градусах Цельсия, а l_0 и V_0 — соответственно, линейные и объёмные размеры тел при температуре 0 °С.

У поликристаллических тел (а таковыми является подавляющая часть твёрдых веществ, с которыми имеет дело современный инженер) коэффициенты линейного расширения не зависят от направления наблюдения. В случае изучения отдельных кристаллов или текстурированных материалов данные коэффициенты могут зависеть от направления. Поэтому если нагреть шар из монокристалла или материала, обладающего какой-либо текстурой, он превратится в эллипсоид.

Температурное расширение обусловлено несимметричностью потенциала взаимодействия атомов вещества в кристаллической решётке вещества, что приводит к негармоничному колебанию атомов относительно их среднего положения. В самом деле, вернёмся к зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от их кинетической энергии, т. е. от температуры, как показано на рис. 4.3.

Если считать, что по длине твёрдого тела укладывается N молекул, тогда в случае абсолютного нуля температуры эта длина оказывается равной $l_0 = N r_0$. Однако при нагревании тела до температуры T , соответствующей потенциальной энергии E , молекулы, находящиеся внутри потенциальной ямы, начинают колебаться в пределах от r_1 до r_2 . То есть средняя часть молекул уже будет перемещаться

относительно точки $r_T = \frac{r_1 + r_2}{2}$, а не r_0 . И тогда полная длина твёрдого тела оказывается равной $l_T = Nr_T$. При этом общая длина образца увеличится на $\Delta l = N \frac{r_1 + r_2 - 2r_0}{2}$.

Откуда для коэффициента линейного расширения получаем следующую формулу:

$$\alpha_l \approx \frac{r_1 + r_2 - 2r_0}{2r_0 T}.$$

На самом деле этот коэффициент окажется несколько иным, поскольку зависимость его от температуры не будет линейной, как можно видеть из рис. 4.3. Однако вносимая при этом ошибка не будет существенной, а следуемая из приведённых рассуждений физика процесса выглядит достаточно убедительной.

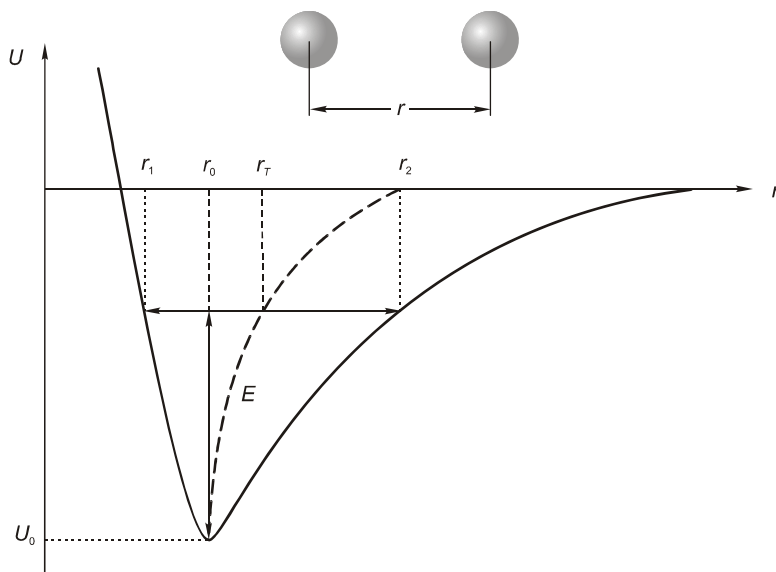


Рис. 4.3. К объяснению ангармоничной природы теплового расширения тел

В случае кварца, инвара и некоторых других материалов $\frac{r_1 + r_2}{2} \approx r_0$, а поэтому их линейное расширение оказывается несущественным, примерно $1,2 \cdot 10^{-6}$ 1/град. У других материалов $\frac{r_1 + r_2}{2} > r_0$, поэтому их линейные и объёмные размеры с ростом температуры увеличиваются в большей степени.

Так, у значительной части материалов коэффициенты линейного и объёмного расширения располагаются в пределах $(10^{-6}—10^{-5})$ 1/град. В частности, у алюминия этот коэффициент равен $2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/град, у меди — $1,66 \cdot 10^{-5}$ 1/град и у железа — $1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/град. Вода имеет коэффициент объёмного расширения, равный 10^{-3} 1/град,

однако он, как уже указывалось ранее, является отрицательным. То есть вода при нагревании сжимается, а при охлаждении — расширяется.

Тем не менее, несмотря на сравнительно малые его размеры, при проектировании различных устройств тепловое расширение нужно учитывать обязательно. И это вполне объяснимо. Например, если рельс длиной 25 м нагревается на 50° , тогда его размер увеличится на 1,5 см. И данное обстоятельство нужно принимать во внимание как при прокладке рельсового пути, так и при строительстве других инженерных сооружений, в частности, металлических мостов.

Под влиянием указанных расширений детали, изготовленные из разных материалов, при изменении температуры перестают стыковаться друг с другом, нарушаются их допуски и посадки, они могут заклиниваться и т. д. Нагрев или охлаждение материалов приводит к возникновению внутри них громадных термоупругих напряжений, способных их разрушить. Поэтому, несмотря на незначительную величину температурного расширения вещества, практическое значение его огромно.

С другой стороны, данный физический процесс является обратимым. Поэтому если при нагревании тела расширяются, тогда расширение тел ведёт к их разогреву, а сжатие — к охлаждению.

4.3. Теплоёмкости твёрдых тел. Закон Дюлонга и Пти

Теплоёмкостью C называется физическая величина, определяемая отношением количества тепла ΔQ , полученного телом, при приращении его температуры на

ΔT , а именно $C = \frac{\partial Q}{\partial T} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta T}$. В системе СИ теплоёмкость измеряется в Дж/К°.

С другой стороны, температура зависит не только от физических параметров вещества, но и от его количества, т. е. от массы m . Поэтому кроме обычных теплоёмкостей C , характерных для произвольных тел, применяют также их молярную теплоёмкость C_μ , определяемую количеством тепла, требуемого для нагревания

одного киломоля вещества на 1 градус. Отсюда следует, что $C_\mu = \left. \frac{\Delta Q}{\Delta T} \right|_{m=\mu}$, где μ — молярный вес.

Но и это ещё не всё. Кроме указанных теплоёмкостей применяют также удельную теплоёмкость c_μ , соответствующую теплоёмкости одного килограмма вещества. Она

равна $c_\mu = \frac{C_\mu}{\mu}$. И понятно, что $C = mc_\mu = \frac{m}{\mu} C_\mu$.

Теплоёмкости тел определяются тепловыми колебаниями их молекул. В самом деле, любой кристалл представляет собой суперпозицию сложных колебательных систем, образованных их атомами и молекулами.

В молекулярно-кинетической теории газов доказывается, что молярная теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме определяется числом степеней

свободы, которыми их молекулы обладают. Иначе говоря, считается, что теплоёмкость газа при постоянном объёме равна $C_v = \frac{i}{2}R$, где R — универсальная газовая постоянная ($8,31 \cdot 10^3$ Дж/град·кмоль), а i — количество степеней свободы газовых молекул. Причём под степенью свободы понимают количество координат, которые требуются для описания положения молекулы вещества в пространстве. Для молекул твёрдых тел можно полагать $i = 3$, однако при этом учитывается только их кинетическая энергия.

Вместе с тем как у всякой колебательной системы, кроме кинетической энергии имеется также равная ей по величине потенциальная энергия молекул. А поскольку тепловое расширение у твёрдых тел незначительно, можно считать, что их теплоёмкости не зависят от условий измерения. То есть теплоёмкости, измеряемые при постоянном объёме и постоянном давлении, у твёрдых тел одинаковы. Отсюда с полным основанием можно полагать, что для них $C_\mu = 2iR = 3R$. Это и есть **закон Дюлонга и Пти**, который подтверждён многими имеющимися опытными данными.

Отсюда становится понятным, почему при неизменном агрегатном состоянии веществ их энтропия, представленная на рис. 1.1 и 1.2, остаётся постоянной. В самом деле, поскольку $dQ = \frac{m}{\mu} C_\mu dT$, получается, что энтропия $S = dQ/dT = \frac{m}{\mu} C_\mu$. То есть при фиксированном значении C_μ она меняться не должна. В представленном выражении m — масса вещества, μ — его молярная масса.

С другой стороны, полученный закон для твёрдых тел справедлив только тогда, когда их температура оказывается выше, чем так называемая *температура Дебая*. Это такая температура, при которой в твёрдом теле возбуждаются все возможные моды колебаний. А поэтому дальнейшее увеличение температуры не приводит к появлению новых мод, но ведёт лишь к увеличению амплитуд колебаний уже существующих мод. До достижения температуры Дебая возбуждение всех мод невозможно из-за недостатка для этого имеющейся в теле тепловой энергии. А поэтому его теплоёмкость оказывается меньшей, чем следует из закона Дюлонга и Пти, как показано на рис. 4.4.

Из данного рисунка видно, что до температуры Дебая Θ_D теплоёмкость твёрдых тел с увеличением температуры растёт, а после достижения её она уже от температуры не зависит вовсе. В этой связи интересно знать температуру Дебая для различных тел. В частности, у железа она равна 467 °К, у меди — 339 °К, у свинца — 94,5 °К и у натрия — 160 °К.

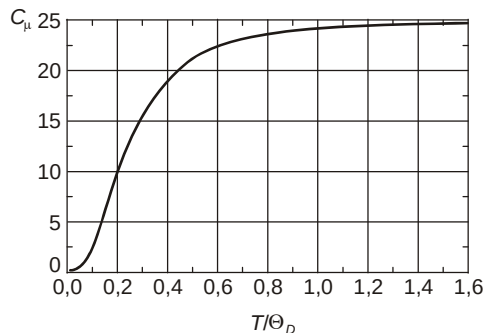


Рис. 4.4. Изменение молярной теплоёмкости твёрдых тел (Дж/град·кмоль) от их относительной температуры

4.4. Теплопроводности твёрдых тел.

Фононы и их свойства

Если какой-либо материал в какой-то его части нагревается или охлаждается, тогда через некоторый промежуток времени начинают нагреваться или охлаждаться все другие его части. Аналогичным образом, если какое-либо тело располагается на пути теплового потока, тогда этот поток частично отражается, в какой-то части идёт на нагревание самого тела, а частично проходит через него, как показано на рис. 4.5. Все указанные явления имеют одну и ту же природу и получили в физике название теплопроводности. **Теплопроводность**, таким образом, определяет способность материалов передать тепловую энергию через самих себя.

В общем случае теплопроводность в твёрдом теле складывается из электронной и молекулярной составляющих. Причём электронная теплопроводность осуществляется за счёт увеличения при нагревании тел скорости движущихся в них электронов, а молекулярная — за счёт роста амплитуды и скорости тепловых колебаний решётки.

Вклад каждой из указанных теплопроводностей зависит от природы вещества, от того, насколько много в нём свободно перемещающихся электронов. Так, в металлах основную роль в переносе тепла при обычных температурах играют электроны проводимости. В диэлектриках тепловая энергия передаётся преимущественно колеблющимися молекулами и пропорциональна теплоёмкости вещества. В полупроводниках преобладание того или иного механизма теплопроводности определяется наличием в них примесей, их типом и концентрацией, а также состоянием кристаллической решётки (аморфное, моно- или поликристаллическое), наличием или отсутствием структурных дефектов.

Теплопроводность — одна из важнейших характеристик вещества. Она характеризуется коэффициентом теплопроводности λ , который численно равен потоку q тепловой энергии, проходящему через единичную площадку куба при перепаде на его гранях температуры в 1° . Лучшее всего передают тепло металлы. У меди, например, $\lambda = 400 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, у серебра чуть больше — $418 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, у алюминия — $200 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, у нержавеющей стали — примерно $20 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. У простых сталей она примерно в два раза выше.

У диэлектрических материалов теплопроводность значительно ниже. Так, у бетона она равна $\lambda = 0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, у трансформаторного масла — $\lambda = 0,13 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, у воздуха $\lambda = 3,67 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Отметим, что в большинстве справочников приводятся значения λ в устаревших единицах $\text{кал/(см}\cdot\text{сек}\cdot^\circ\text{С)}$. Для перевода указанных величин в систему единиц СИ нужно умножать их на 418.

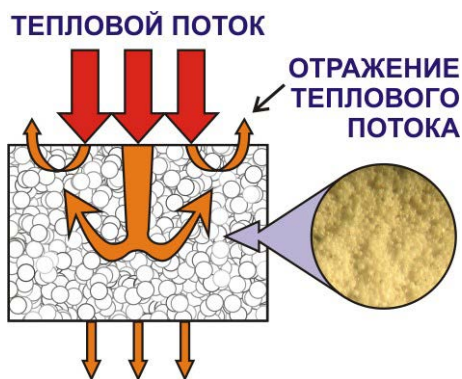


Рис. 4.5. Тепловые процессы в твёрдых телах

Рассмотрим особенности прохождения тепловой энергии путём колебаний решётки. Для этого воспользуемся её структурой, показанной на рис. 4.6. Сами молекулы здесь отмечены тёмными шариками, упругие связи между ними, обусловленные силами межмолекулярного взаимодействия, пружинками.

Равновесие молекул обеспечивается равенством сил притяжения и отталкивания соседних молекул, при котором их потенциальная энергия минимальна. Однако тепловая энергия постоянно выводит молекулы из равновесия. Поэтому кроме потенциальной энергии молекулы твёрдых тел обладают также энергией кинетической. В этой связи молекулы, закреплённые в узлах кристаллической решётки, можно рассматривать как осцилляторы и полагать, что они совершают гармонические колебания относительно своих положений равновесия.

При этом частота колебаний γ определяется с помощью формулы $\gamma = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$, где K — коэффициент упругости связей, удерживающих молекулы в состоянии равновесия, а m — их масса.

С другой стороны, каждая из молекул решётки не является изолированной от других молекул. Поэтому при их смещении из положения равновесия, как показано на рис. 4.6, молекула соответствующим образом напрягает своих соседей. Отсюда колебания, имеющиеся у одной молекулы, в виде упругих волн начинают распространяться во все стороны от неё. А поскольку все молекулы находятся примерно в одинаковых условиях, частота γ для указанных волн становится у всех них одной и той же. И эти волны распространяются вдоль всего твёрдого тела.

Вместе с тем молекулы удерживаются в состоянии равновесия не только в направлении их колебаний, но также и в перпендикулярном к нему направлении. А там уже коэффициенты упругости другие и колебательные частоты отличаются от полученной ранее величины γ . Аналогичным образом каждая молекула обладает упругими связями не только с соседними молекулами, но и с более отдалёнными.

Поэтому в кристаллическом теле одновременно распространяется множество волн, каждая из которых обладает своими скоростями и частотами. Они получили название *волн Дебая*. Эти колебания формируют постоянный фон упругих волн, которые сталкиваются между собой, интерферируют, взаимодействуют с молекулами, электронами, примесями и дефектами кристаллической решётки.

В самом деле, если в ясный летний день прислушаться к железнодорожным рельсам, тогда каждый сможет услышать их гудение. Именно волны Дебая являются его причиной.

Так как частота колебания не зависит от температуры, то при известной массе атома элемента " m ", определяемой его положением в периодической системе

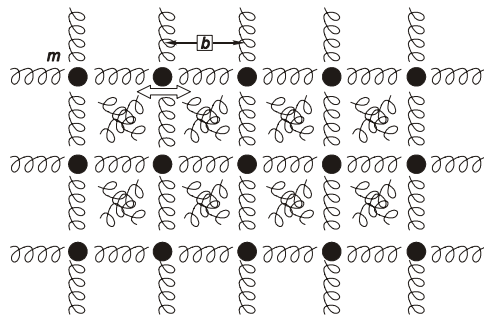


Рис. 4.6. К вопросу о молекулярном механизме теплопроводности

Д. И. Менделеева, можно оценить основную частоту колебания волн Дебая. Расчёты, проведённые по приведённому ранее уравнению, показывают, что собственные частоты колебаний атомов в кристаллических решётках железа, меди, германия примерно одинаковы и равны $3 \cdot 10^{12}$ Гц.

С другой стороны, известна формула Планка, определяющая энергию любой колеблющейся частицы. Она равна $w = h\gamma$, где h — постоянная Планка, а γ — частота. В этой связи можно полагать, что волны Дебая представляют собой поток не только волн как таковых, а квазичастиц, каждая из которых распространяется со своей скоростью и обладает собственной кинетической энергией, определяемой её частотой. Такие квазичастицы получили название **фононов**.

На самом деле в природе таких частиц нет, они представляют собой физическую абстракцию. Однако применение вытекающего из данного представления математического аппарата позволяет изучать взаимодействие фононов друг с другом, с примесями, электронами и дефектами кристаллической решётки. И получаемые при этом результаты соответствуют экспериментам. Понятно, что прямое изучение данных эффектов с помощью обычных волн Дебая было бы весьма затруднительным.

Глава 5

Механические характеристики твёрдых тел

5.1. Деформация твёрдых тел

Деформация представляет собой изменение формы и объёма тел под действием внешних сил или под влиянием различных физико-механических процессов, происходящих в самих образцах, например при их нагревании. Деформация связана с изменением относительного положения частиц тела и обычно сопровождается сопротивлением межатомных сил, приводящих к возникновению упругих напряжений.

Различают четыре основных вида деформаций: растяжение — сжатие, сдвиг, кручение и изгиб. В настоящем разделе рассматриваются особенности только растяжения твёрдых тел, как показано на рис. 5.1. Закономерности, следуемые из других видов деформаций, оказываются примерно такими же, что и при растяжении.

Пусть для эксперимента используется образец из упругого материала длиной l_0 и площадью поперечного сечения S . К нему прикладывается сила F , равномерно распределённая по его кромке. Под её воздействием образец удлиняется на величину Δl . При анализе данного процесса применяются следующие параметры: деформация, равная относительному удлинению образца $\varepsilon = \Delta l / l_0$, напряжение, т. е.

сила, приложенная к единице площади образца $\sigma = F / S$. Причём для жидких и газообразных тел напряжение σ эквивалентно давлению.

В общем случае напряжение σ является не скаляром, а тензором σ_{ij} , в котором индексы i и j соответствуют направлениям осей координат. В случае $i = j$ имеют место напряжения, определяемые растяжением или сжатием образца вдоль координатных осей. А если $i \neq j$, тогда в образце возникают сдвиговые напряжения. В нашем случае эти тонкости принимать во внимание не будем и под напряжением в дальнейшем станем понимать параметр силового воздействия на образец, как показано на рис. 5.1.

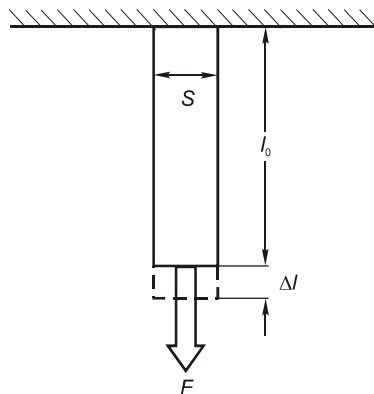


Рис. 5.1. Схема опыта

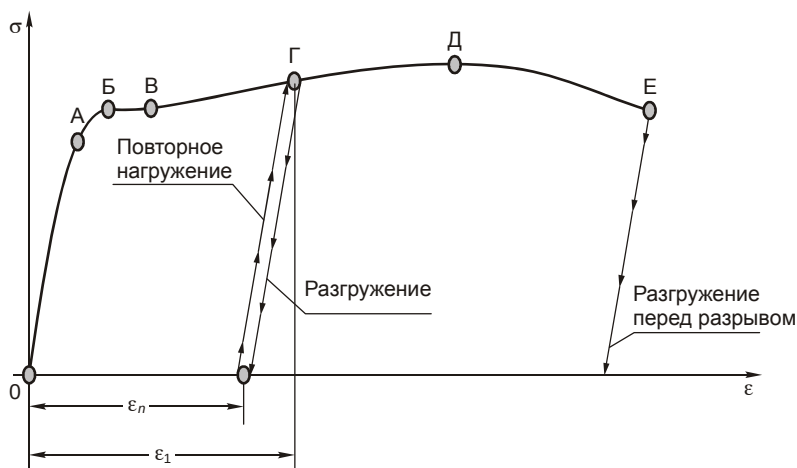


Рис. 5.2. Типовая кривая, демонстрирующая зависимость напряжения в образце от его деформации

Типичная кривая, описывающая зависимость напряжения, возникающего в образце, от величины его деформации, приведена на рис. 5.2. Рассмотрим её более подробно.

При постепенном удлинении образца вначале происходит рост в нём напряжения по закону, соответствующему кривой от точки **0** до точки **А**. Данная зависимость описывается законом Гука, согласно которому напряжения в образцах пропорциональны их деформациям, т. е. $\sigma = E\varepsilon$. При этом величина E является модулем Юнга, который представляет собой табличную величину и зависит от характера материала.

Физически модуль Юнга обозначает напряжение, при котором длина образца увеличивается вдвое. На самом деле для большинства материалов такое удлинение без разрушения невозможно. Поэтому модуль Юнга выступает всего лишь как коэффициент пропорциональности между деформацией и напряжением, когда нагрузки на образец сравнительно малы.

С другой стороны, имеется класс материалов, у которых область пропорциональной зависимости напряжения от деформации отсутствует вовсе. К таковым, в частности, относятся дерево, кожа, камни и др.

Точка **А** на графике характеризует предел упругости материала. После её прохождения указанная пропорциональность нарушается и деформация растёт быстрее напряжения. Поэтому промежуток кривой от **А** до **Б** называют областью неупругой деформации.

При дальнейшем увеличении деформации напряжение, т. е. сопротивляемость образца, может исчезнуть вовсе или становится незначительным (см. область между точками **Б**, **В**, **Г**, **Д** и **Е**), т. е. наблюдается пластическая деформация. А при достижении точки **Е** образец разрушается.

Рассмотрим природу указанной связи напряжения с деформацией. С этой целью вернёмся к зависимости силы взаимодействия молекул от расстояния между ними.

Будем считать, что $l_0 = Nr_1$, т. е. первоначальная длина образца соответствует устойчивому расстоянию между молекулами r_1 , помноженному на общее их количество N в линейке молекул. При этом получается, что $\Delta l = N\Delta r$ или $\epsilon = \Delta l/l_0 = \Delta r/r_1$. И тогда, пользуясь рис. 5.3, нетрудно видеть, что вплоть до достижения области, близкой к точке перегиба, силы упругости Δf , препятствующие растяжению образца под воздействием внешней силы F (см. рис. 5.1), увеличиваются пропорционально деформации.

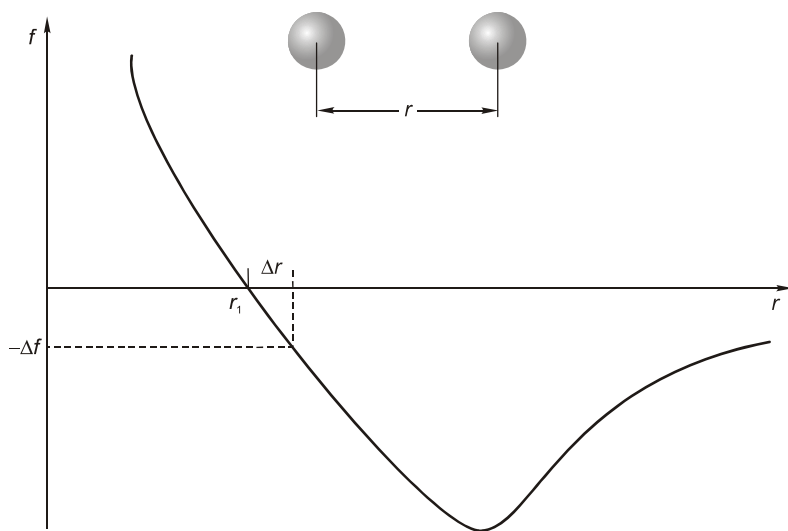


Рис. 5.3. Зависимость сил притяжения молекул от расстояния между ними

В дальнейшем указанная пропорциональность нарушается и силы упругости способны не только расти медленнее деформаций, но даже убывать с их увеличением.

Разумеется, приведённая кривая не в полной мере описывает процессы в твёрдых телах, поскольку кроме продольных сил упругости в них присутствуют также сдвиговые силы, как это не трудно представить из рис. 4.6 и 5.1. На самом деле под действием указанных сил образец не только растягивается, но и уменьшает свои поперечные размеры. Для учёта данного обстоятельства в теории упругости вводится коэффициент Пуассона μ , который равен относительному уменьшению поперечного сечения образца при его деформации по сравнению с продольным удлинением ϵ_1 , т. е. $\mu = \epsilon_1/\epsilon$. В частности, для образцов цилиндрической формы можно полагать $\epsilon_1 = -\Delta D/D$, где D — их диаметр. Характерно, что данная величина оказывается постоянной для любого материала.

В результате под воздействием внешней нагрузки изменение объёма образца становится равным $\frac{\Delta V}{V} = \epsilon(1 - 2\mu)$. Для материалов, у которых указанный объём

не меняется вовсе, например, для резины, коэффициент Пуассона оказывается равным $\mu = 1/2$. У других материалов он меньше 0,5, в частности у стали $\mu \approx 0,3$.

При большом растяжении образца на некоторой части его длины возникает местное его сужение. Или, как принято говорить, начинается образование шейки. В результате этого напряжение падает, и образец разрывается в самом узком месте шейки.

С другой стороны, на процесс разрушения образца оказывает значительное влияние также время воздействия нагрузки. То есть если одно и то же напряжение действует на образец длительное время, тогда он продолжает удлиняться при сохранении указанного напряжения. И может быть разрушен, если данная нагрузка даже будет меньше её предельного значения.

Исследования многих кристаллических и аморфных тел показали, что в широком интервале температур T (по абсолютной шкале) и напряжений σ , приложенных к образцу, его долговечность τ (время наступления разрушения) при постоянно действующем напряжении определяется соотношением:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \sigma V}{kT}\right),$$

где τ_0 приблизительно равно периоду тепловых колебаний атомов в твёрдом теле (10^{-12} с). При этом энергия U_0 близка к энергии сублимации материала (см. рис. 1.9). Величина σ представляет собой действующее напряжение. Активационный объём V составляет несколько тысяч атомных объёмов и зависит от структуры материала, сформировавшейся в процессе предварительной термической и механической обработки, а также от времени нагружения, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана.

При низких температурах долговечность резко падает с ростом напряжений, так что при любых важных для практики значениях τ существуют предельные значения напряжений σ_0 , выше которых образец разрушается практически мгновенно, а ниже — живёт долго. Это значение σ_0 можно считать пределом прочности материала при указанных температурах.

5.2. Упругость, пластичность и хрупкость твёрдых тел

Упругость — это свойство материала восстанавливать свою форму и объём после прекращения действия внешних сил или других причин (например, нагревания), вызвавших деформацию. Упругость обусловлена взаимодействием и тепловым движением частиц, из которых состоит вещество. Наибольшее напряжение, при котором материалы ещё обладают упругостью, называется пределом упругости. К упругим материалам относят резину, сталь, древесину и др. В упругой стадии материал получает преимущественно упругие деформации. При расчётах все материалы на этой стадии с тем или иным приближением рассматриваются как идеально

упругие. Основная функциональная зависимость между деформацией и напряжением при этом описывается законом Гука.

Пластичность представляет собой способность твёрдых тел изменять под нагрузкой форму и размеры без образования разрывов и трещин, а также частично сохранять её после снятия нагрузок. К числу пластичных материалов относятся отожжённая медь, алюминий, латунь, золото, малоуглеродистые стали и др.

Первое представление о свойствах материалов, вызываемых пластичностью, даёт комок пластилина, который легко меняет форму и сохраняет её после воздействия на него. В отличие от растянутой пружины, которая опять сожмётся, если её отпустить. В этом смысле говорят, что пружина упруга, а пластилин — пластичен. Свойство пластичности имеет решающее значение для таких технологических операций с материалами, как штамповка, вытяжка, волочение, гибка и др.

После увеличения нагрузки выше некоторого критического уровня наряду с упругими начинают появляться пластические (остаточные) деформации. У одних материалов (например, у металлов) пластические деформации могут достигать значительной величины, у других — например, у камней, она является весьма малой (хрупкие материалы). Если упругая деформация практически не влияет на механические свойства материалов, то пластическая деформация приводит к значительному изменению их. В частности, у строительных материалов при увеличении на них нагрузки происходит упрочнение и снижение пластичности.

Хрупкость — это свойство твёрдых тел разрушаться при механических воздействиях без заметной пластической деформации. Так, сильно закалённая сталь, многие сорта чугуна и бронзы, стекло и керамика от удара разлетаются на куски. Хрупкие материалы не имеют явно выраженной стадии пластических деформаций, она в них практически сливается со стадией разрушения.

Данные обстоятельства демонстрируются рис. 5.4. Из него следует, что если у пластичных материалов разрушение достигается при больших деформациях, то у хрупких — при малых. Причём напряжения, при которых наблюдается разрушение, у хрупких материалов обычно выше, чем у пластичных.

При этом обнаруживаются интересные явления. Если в опыте на растяжение использовать стальной образец в виде длинной пластинки с полированной (зеркальной) поверхностью, то в процессе пластического деформирования образца на этой поверхности появляются близко расположенные друг к другу тонкие параллельные прямые линии, ориентированные под углом 45° к направлению нагружения образца. Их называют линиями Людерса. Микроскопический анализ этих линий показывает, что они появляются в результате того, что в материале образца происходит сдвиг,

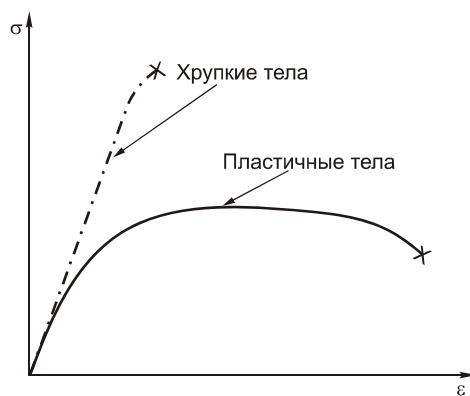


Рис. 5.4. Деформационные кривые для хрупких и пластичных тел

т. е. один тонкий слой как бы сползает относительно второго, второй — относительно третьего и т. д., как карты в колоде.

На рис. 5.5 схематически изображена картина такого деформирования. Данная схема демонстрирует, каким образом указанные сдвиги приводят к пластическому удлинению образца и почему после снятия нагрузки пластические деформации не исчезают. Более сложные и точные опыты показывают, что пластические деформации металлов и сплавов всегда вызываются сдвигами внутри материалов. То же самое справедливо для любой области поликристаллической структуры металла, поскольку при этом одни зёрна деформируются больше, чем другие. В результате этого и здесь после снятия внешней нагрузки в зёрнах остаются остаточные напряжения и накапливается упругая энергия.

Как уже отмечалось, исходный металл, не подвергавшийся никаким нагрузкам, содержит начальную плотность дислокаций, которая возрастает при нагружении. В самом деле, один из механизмов диссипации подводимой энергии заключается в преобразовании её в энергию образования дислокаций. За счёт этого каждая вновь возникающая дислокация запасает определённую порцию энергии. Поэтому при переходе металла из упругого в пластическое состояние достигается определённое значение плотности дислокаций, соответствующее данному состоянию материала. Но сами дислокации при этом располагаются хаотически.

Следующий механизм диссипации позволяет сократить часть энергии, запасённой одиночными дислокациями, путём их перемещения по отношению друг к другу и их объединения. Это позволяет отдельным коллективам дислокаций действовать как единое целое и формировать более крупные и сложные структуры. При этом границы отдельных кристаллитов начинают притягивать дислокации, которые продвигаются к ним при одновременном их объединении. И тогда плотность дислокаций на границах увеличивается, в то время как в теле самих ячеек она существенно не меняется и остаётся практически равной первоначальной.

Хрупкость твёрдых тел является свойством, противоположным пластичности. В хрупких материалах наблюдается недостаток дислокаций, вследствие чего деформации осуществляются только в результате удаления или сближения атомов. При этом в случае критических нагрузок возникают необратимые нарушения сплошности. В телах появляются макроскопические трещины, приводящие к тому, что они распадаются на части, которые после разрушения можно сложить так, чтобы составленное из них тело совпадало с первоначальным. То есть такие материалы разрушаются без значительной пластической деформации. Указанное разрушение характерно для чугуна, легированных сталей, бетона, стекла, керамики и некоторых других конструкционных материалов.

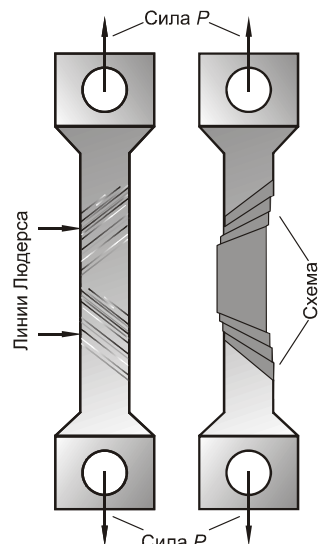


Рис. 5.5. Пластическое растяжение образцов

С другой стороны, деление материалов по характеру разрушения на хрупкие и пластичные является весьма условным, поскольку оно обычно относится только к некоторым стандартным условиям эксплуатации. На самом деле в зависимости от обстоятельств (т. е. от температуры, характера нагружения, технологии изготовления и др.) один и тот же материал может вести себя или как хрупкий, или как пластичный. Например, некоторые пластичные при нормальной температуре материалы разрушаются как хрупкие при низких температурах.

Поэтому правильнее говорить не о хрупких и пластичных материалах, а о хрупком или пластичном состоянии вещества. Данное обстоятельство демонстрируется на рис. 5.6. Из него следует, что до температур, меньших температуры хладостойкости $T_{хл}$, материалы ведут себя как хрупкие, а после них — как пластичные. При этом следует отметить, что металлы, в которых силы связи определяются не локальным, а коллективным действием электронов проводимости, оказываются более пластичными, чем материалы с другими типами связей, в том числе диэлектрики.

Кроме дислокаций, причиной хрупкости и пластичности могут служить также другие точечные, линейные или объёмные дефекты, а также границы зёрен, наличие дополнительных фаз материалов и др. При этом хрупкость и пластичность материалов могут в значительной степени меняться в зависимости от влажности, характера нагрузки. Например, замёрзшая замазка теряет свои пластичные свойства, глина пластична только в увлажнённом состоянии и др. Хрупкие при ударе твёрдые тела могут выдерживать существенно большую статическую нагрузку, чем пластичные, тугоплавкие битумы крошатся под ударами, но пластичны при действии статической нагрузки и т. д.

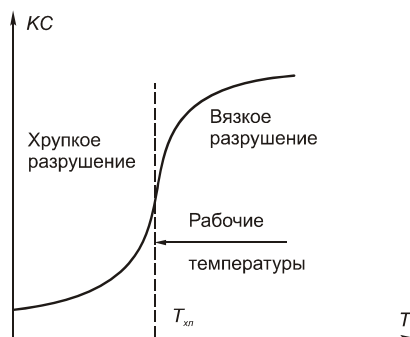


Рис. 5.6. Зависимость разрушения тел от температуры

5.3. Работа разрушения и остаточный ресурс материалов

Любой материал работает. Если это кирпичи, тогда на них держится всё здание. Если рассматривается деталь, передающая динамические нагрузки, тогда она им противостоит, с ними работает. А если это стул, на котором вы сидите, тогда именно он противодействует вашему весу. Таким образом, все они работают, претерпевают механические напряжения, удерживают тепло или поглощают радиацию. И понятно, что всё это не может не влиять на их состояние, не приводить к внутренним изменениям материалов.

Чем выражается работа изделий, от чего зависит их остаточный ресурс, т. е. сколько времени они ещё смогут работать без потери работоспособности? Ответы на эти вопросы попытаемся получить следующим образом.

Всякая работа dA представляет собой процесс преодоления каких-то сил F на пути dl , поэтому $dA = \vec{F}d\vec{l}$. Установим величину этой работы применительно к единице объёма вещества V , а именно будем полагать, что имеющаяся в единице объёма вещества энергия $dw = \frac{dA}{V} = \frac{\vec{F}}{S} \frac{d\vec{l}}{l}$, поскольку $V = S\vec{l}$, представляет собой произведение площади образца $\vec{S}$ на его длину $\vec{l}$.

В предыдущих разделах мы установили, что $\frac{\vec{F}}{S} = \sigma$ представляет собой напряжение, действующее на образец, а $\frac{d\vec{l}}{l} = d\epsilon$ — изменение деформации. Откуда сле-

дует, что $w = \int_0^{\epsilon_{0n}} \sigma d\epsilon$, где ϵ_{0n} — деформация, при которой происходит разрушение образца, т. е. полная потеря его работоспособности. И тогда приведённая ранее кривая изменения напряжения образцов от деформации (см. рис. 5.2) приобретает новое звучание.

В самом деле, несколько изменим эту кривую, как показано на рис. 5.7. Из приведённой ранее формулы и полученного рисунка видно, что площадь, ограниченная кривой, заключённой между точками 0 , A , σ_{0n} , ϵ_{0n} и осью абсцисс, эквивалентна начальному ресурсу материала образца для пластичного материала. Для материалов, находящихся в хрупком состоянии, указанный ресурс ограничен кривой между точками 0 , σ_{0x} , ϵ_{0x} и осью абсцисс. Отсюда становится понятным, почему хрупкие материалы менее работоспособны, чем пластичные. В самом деле, площади, характеризующие их ресурс, оказываются меньшими, а значит меньшим является и их ресурс.

С другой стороны, если в процессе эксплуатации напряжённость образца приведена к состоянию, обозначенному точкой A , тогда после его разгрузки остаточная деформация материала становится равной ϵ_A . А значит если после этого возобновить нагрузку на образец, тогда его напряжение из точки ϵ_A опять вернётся к точке A и далее продолжит меняться по тому же самому пути вплоть до разрушения при напряжении σ_{0n} .

Отсюда можно будет сделать следующий важный вывод. Площадь I, ограниченная кривой между точками 0 , A , ϵ_A и осью абсцисс, эквивалентна работе, уже совершённой образцом, т. е. работе его разрушения. А площадь II, заключённая между кривой, описываемой точками ϵ_A , A , σ_{0n} , ϵ_{0n} и осью абсцисс, будет эквивалентна

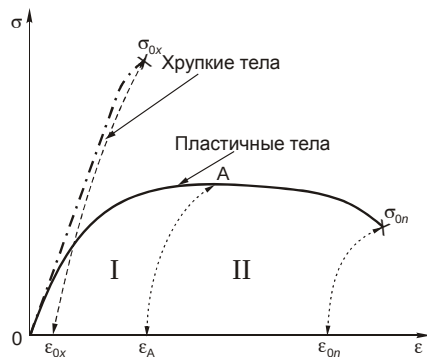


Рис. 5.7. Работа разрушения и остаточный ресурс для хрупких и пластичных материалов

остаточному ресурсу материала образца. И данная картина делает указанные понятия зримыми.

Одной из характеристик материалов, применяемых в настоящее время для оценки их остаточного ресурса, является **ударная вязкость**. Данный параметр устанавливает способность материалов поглощать энергию развивающихся в них трещин и измеряется работой, требуемой для разрушения образца, отнесённой к единице поперечного сечения его излома. Ударной она называется из-за того, что для измерения указанной работы применяют ударные нагрузки.

Знание ударной вязкости позволяет определять максимально допустимые напряжения конструкций при наличии в них трещин определённой длины. Причём чем выше ударная вязкость, тем меньшей оказывается скорость роста трещин.

На рис. 5.8 показан эскиз прибора, применяемого для измерения ударной вязкости образцов. В нём специально изготовленные образцы из исследуемого материала размерами $80 \times 10 \times 4$ мм с надрезом посередине помещаются на опоры. Маятниковый копер наносит удар с определённой высоты, которая фиксирует энергию удара, приходящуюся на область, расположенную против выреза. Измеряют минимальную энергию удара, при которой образец разрушается, т. е. данные измерения относятся к разрушающим методам контроля.

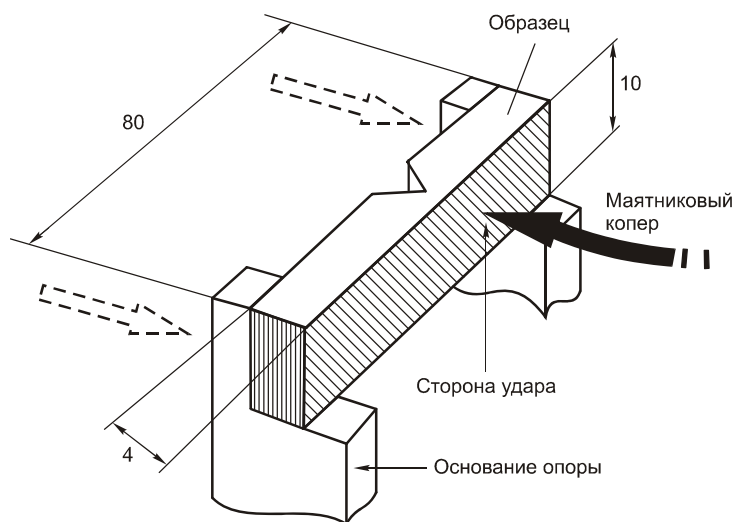


Рис. 5.8. Метод измерения ударной вязкости по Шарпи

Величина ударной вязкости KC оценивается следующим образом:

$$KC = E_{\text{разр}} / S_{\text{изл}},$$

где $E_{\text{разр}}$ — энергия, необходимая для разрушения образца, а $S_{\text{изл}}$ — площадь поверхности излома. Величина KC измеряется в Дж/м².

Метод определения ударной вязкости основан на линейной зависимости её от радиуса головки выреза на описанных ранее образцах. Причём чем этот радиус ρ

меньше, тем меньшими оказываются результаты измерения. Поэтому обычно применяют измерения при трёх радиусах конца выреза: 0,1, 0,25 и 1 мм. И графическим приведением полученных результатов к нулевому радиусу выреза получают истинное значение KC , как показано на рис. 5.9.

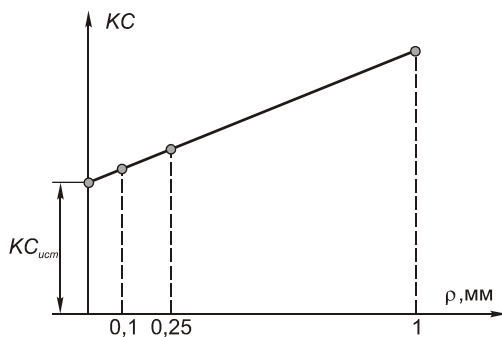


Рис. 5.9. Зависимость ударной вязкости образца от радиуса конца выреза

Значение ударной вязкости сильно зависит от температуры, при понижении её величина вязкости уменьшается. При этом для каждого материала существует пороговое значение температуры, при котором происходит переход от хрупкого разрушения к вязкому (см. рис. 5.6).

Глава 6

Физическая природа разрушения материалов

6.1. Остаточные напряжения

Что происходит с физическим строением вещества, когда оно расходует свой энергетический ресурс? Какие необратимые изменения при этом совершаются с ним? Как ведут себя атомы и молекулы, дефекты и примеси, отдельные кристаллиты и их конгломераты в процессе работы материалов?

Можно выделить несколько механизмов, сопровождающих работу изделий, под влиянием которых они утрачивают свой ресурс. Среди них наиболее существенными представляются следующие факторы.

Остаточные напряжения. Это упругие силы, которые появляются в телах после их обработки или зарождаются в условиях эксплуатации. Они возникают, когда деформации в различных частях изделий начинают разниться между собой.

Неоднородность деформаций вызывается самыми различными обстоятельствами. В частности, они возникают при неравномерном нагреве или охлаждении тел, при фазовых превращениях вещества, приводящих к неодинаковым изменениям его локальных объёмов (закалка, затвердевание, охлаждение после сварки и т. д.). Появляются при неравномерной пластической деформации деталей, при возникновении дефектов и пр. Однако в напряжения эти деформации превращаются только тогда, когда свободному поведению локальных объёмов препятствуют окружающие части одного и того же тела или границы соседних тел.

На практике наиболее часто встречаются деформации, вызываемые неравномерным нагревом изделий, их называют **термонапряжениями**. Они зарождаются в процессе быстрого нагрева или охлаждения материалов при неоднородном расширении поверхностных и внутренних областей изделий. Как пример, на рис. 6.1 приведён результат расчёта напряженно-деформированного состояния головки рельса, охлаждённого до температуры минус 60 °С, который с целью его неразрушающего ультразвукового контроля поливается водой, нагретой до температуры плюс 70÷75 °С. Из рисунка видно, что в приведённых экстремальных условиях термонапряжения в различных частях головки рельса могут различаться в 2,6 раза.

В общем виде остаточные напряжения могут быть как растягивающими (со знаком $-$), так и сжимающими (со знаком $+$). С другой стороны, условия равновесия требуют, чтобы сумма проекций указанных сил во всём объёме тела всегда равнялась нулю. В противном случае оно начинает самопроизвольно деформироваться,

компенсируя, таким образом, неуравновешенные силы. В результате после обработки или эксплуатации деталей нередко случается их искривление в ту или иную сторону, разворот их, выпучивание и пр.

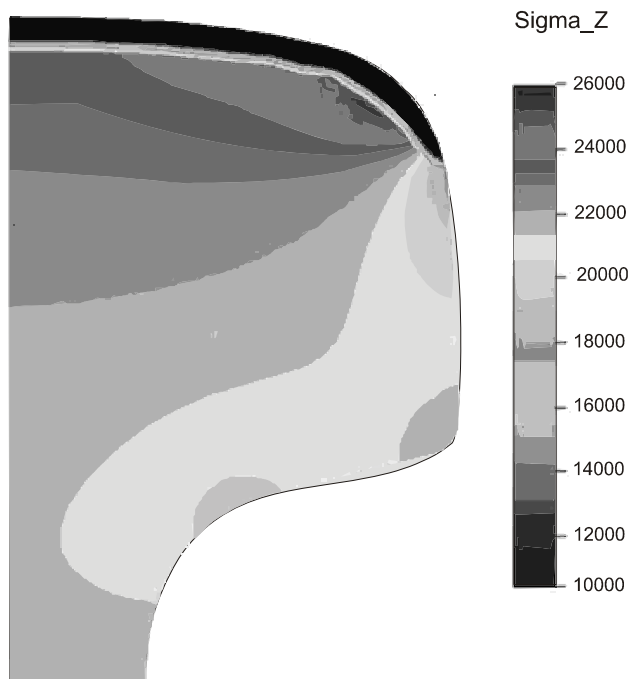


Рис. 6.1. Распределение продольных температурных напряжений по головке рельса зимой при поливе его горячей водой температурой +75 °С

В зависимости от объектов, в которых рассматриваются внутренние напряжения, они подразделяются на несколько видов, а именно:

- остаточные напряжения первого рода, уравновешенные в телах как целых деталей;
- остаточные напряжения второго рода, которые скомпенсированы в пределах размера отдельных зёрен;
- остаточные напряжения третьего рода, ограниченные несколькими межатомными расстояниями.

В инженерной практике **остаточные напряжения первого рода** принято представлять в виде их проекций на оси заданных систем координат. Так, для тел вращения используют понятия осевых σ_x^0 , окружных (тангенциальных) σ_ϕ^0 и радиальных σ_r^0 остаточных напряжений. Для других тел данные напряжения могут иметь другие направления.

На рис. 6.2 показаны некоторые примеры разрушений, случившихся под воздействием остаточных напряжений 1-го рода, а также эпюры остаточных напряжений и результаты их воздействия на деформацию изделий. Так, в примере *a* внешняя

часть изделия нагрета. В результате на эпюре напряжений σ в верхней части плоскости А—А детали возникают растягивающие напряжения, приводящие к их местному удлинению. Они компенсируются сжимающими напряжениями и сокращением размера центральной части детали, уравновешиваемыми некоторыми растягивающими напряжениями нижней приповерхностной кромки. А в примере *в*, *г* всё происходит наоборот.

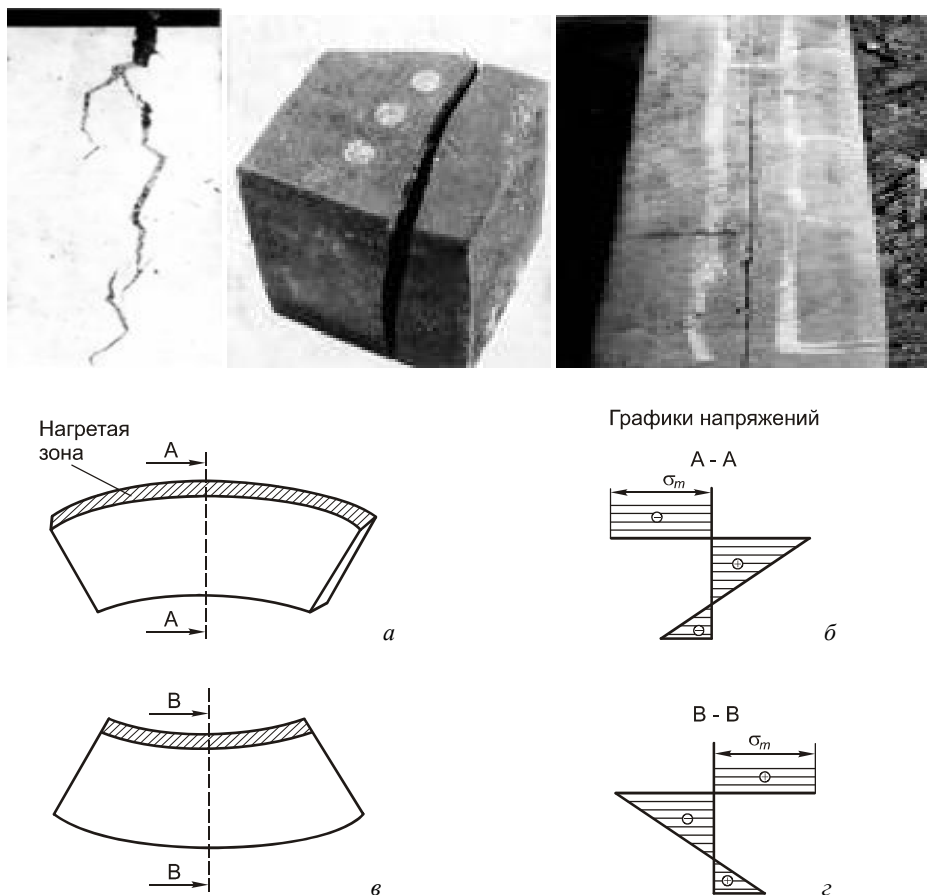


Рис. 6.2. Остаточные напряжения 1-го рода и результаты их воздействия на материалы

Из рисунка следует, что указанные напряжения могут как понижать под действием внешних нагрузок пределы упругости материалов, так и увеличивать их. Вести, таким образом, к возникновению в изделиях дополнительных деформаций, уменьшающих или увеличивающих остаточный ресурс изделий. И многочисленные экспериментальные данные в полной мере подтверждают данные обстоятельства.

Так, рассмотрим влияние остаточных напряжений на прочность тел при их статических или переменных нагрузках. Как показывает опыт, в случае пластичных материалов остаточные напряжения слабо влияют на величину разрушающих усилий.

Более того, пластические деформации, возникающие от однократных внешних нагрузок, зачастую приводят к уменьшению или даже к полному исчезновению остаточных напряжений, если они направлены против этих напряжений.

В частности, сжимающие напряжения (+), сконцентрированные в приповерхностном слое изделий, повышают циклическую прочность деталей, т. к. разгружают приповерхностный слой от напряжений, вызванных растягивающими нагрузками. И наоборот, растягивающие остаточные напряжения (–) в приповерхностном слое уменьшают прочность деталей при их растяжении. Таким образом, сжимающие остаточные напряжения увеличивают усталостную прочность, в то время как растягивающие действуют неблагоприятно. Для хрупких материалов указанный эффект незначителен и разрушающая нагрузка зачастую не сильно зависит от таковой при отсутствии остаточных напряжений.

Наличие в испытуемом образце механических надрезов, трещин, внутренних дефектов материалов приводит к неравномерному распределению в них напряжений, создавая у основания надреза пиковую концентрацию сил. В связи с этим указанные источники сосредоточения сил называют концентраторами напряжений. Причём пик дополнительных напряжений оказывается тем большим, чем меньше радиус конца надреза и большей является его глубина. Поэтому полировка поверхности и нанесение на них защитные покрытия повышают прочность изделий.

С другой стороны, случайное распределение структурных неоднородностей по всему объёму образцов приводит к разбросу значений пределов прочности при их испытаниях. В этой связи вероятность встретить в образце "слабое" место оказывается тем большей, чем крупнее является его объём. А прочность всякого изделия определяется прочностными качествами самой непрочной его части, как прочность цепи устанавливается прочностью самого слабого его звена. Поэтому разрушающее напряжение малых образцов (например, тонких нитей), как правило, значительно выше, чем у больших образцов, изготовленных из того же самого материала.

Кроме внутренних сил первого рода при эксплуатации изделий большую роль играют также внутренние силы, создающие **напряжения второго рода**, которые локализованы в пределах размера зёрен. Это источники не менее коварных, но ещё более трудноразличимых сил. Выявление их природы невозможно без изучения микроструктуры материалов.

Рассмотрение поликристаллических тел под микроскопом показывает, что они состоят из микрокристаллов — маленьких кристалликов, которые называют зёрнами или кристаллитами. Каждый кристаллит представляет собой правильно расположенные ряды атомов, имеющих главную ось симметрии. Именно вдоль такой оси кристаллиты при сжатии или растяжении демонстрируют свои максимальные или минимальные отклонения от средних показателей.

Причём главными своими осями зёрна по-разному ориентированы в пространстве и плотно соединены между собой. Поэтому при изменении внешних условий, например температуры или механической нагрузки, между соседними зёрнами возникает несогласованность. И появляющиеся при этом напряжения будут тем значительнее, чем больше разнятся между собой направления главных осей соседствующих кристаллитов.

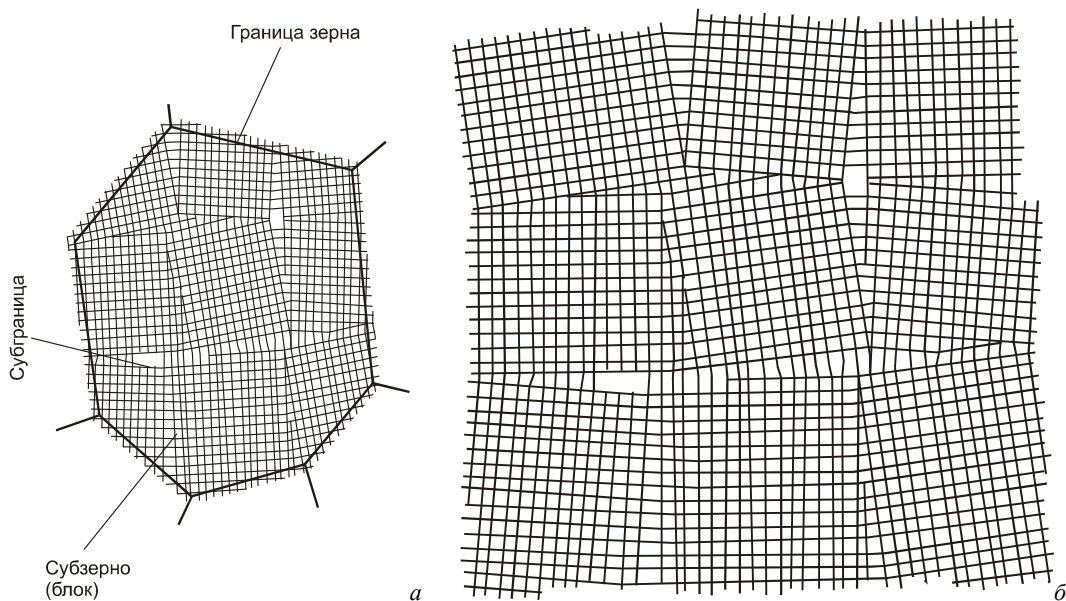


Рис. 6.3. Схема расположения субзерен (а) и их блоков (б) внутри кристаллитов

С другой стороны, если с одной стороны границы какое-то зерно стремится сократиться, то соседние зёрна будут препятствовать этому. В самом деле, если в какой-то части зерна возникают силы растяжения, тогда в другой его части появится сжатие. И понятно, что последующие за этим изменения размеров указанного зерна будут компенсироваться противоположно направленными силами со стороны соседних зёрен.

Особенно интенсивно такие процессы протекают на границах кристаллитов. Поэтому чем большим окажется перепад температур при резком нагреве или остывании детали, тем большими будут указанные силы. То же самое происходит и при механических воздействиях на изделие. Это и есть напряжения второго рода. В некоторых материалах они столь велики, что детали нередко растрескиваются или взрываются без всякой видимой причины. Причём это может произойти не сразу после возникновения указанных напряжений, а через какой-то промежуток времени.

Однако если вначале и не произошло видимого растрескивания, то всё равно в структуре материала в его деформированных зёрнах могут тайно возникать микроскопические трещины, которые в дальнейшем при эксплуатации вызовут преждевременное повреждение образцов. Причём указанный эффект оказывается тем более разрушительным, чем больше размеры отдельных кристаллитов. Поэтому чем крупнее кристаллы, образующие твёрдое тело, тем менее прочными, при прочих равных условиях, они являются.

Печальный опыт столкновения с напряжениями первого и второго рода, этими коварными внутренними врагами материалов, заставляет тратить массу энергии и средств на борьбу с ними.

В частности, одним из основных методов борьбы с термонапряжениями является так называемый отжиг, т. е. долгий прогрев деталей при такой температуре, при которой материал всё ещё проявляет пластичность, но в нём уже возникают диффузионные эффекты атомарного уровня. При этом происходит уменьшение внутренних сил за счёт перераспределения атомов в пространстве.

С другой стороны, внутри кристаллитов существуют субзёрна. А в них, в свою очередь, присутствуют блоки, разориентированные относительно друг друга на углы, обычно меньшие 10° , как показано на рис. 6.3. Причём именно границы блоков являются основными источниками зарождения дислокаций. По ним микротрещины диффундируют до границ кристаллитов, образуя так называемые стоки дислокаций.

Повреждение металлов под действие повторных или знакопеременных нагрузок называют **усталостью металла**. Количественно усталостный процесс описывается зависимостью между накопленным количеством повреждений и числом циклов или длительностью нагружения. Они порождают необратимые деформации, накапливающиеся с нарастанием числа циклов и длительности пребывания под такой знакопеременной нагрузкой.

Их увеличение до критических значений приводит к зарождению микротрещин, локализованных на границах кристаллитов, дефектах и примесей. А также к изменению плотности дислокаций и концентрации вакансий, к образованию линий скольжения, остаточных микронапряжений, изменений локальной твёрдости и др.

При этом возникают трещины, которые чаще всего появляются на поверхности изделий или границах кристаллитов и способствуют потере ими своего ресурса. Сопротивление материала характеризуется наибольшим напряжением, которое может он выдержать без разрушения за большее число циклов.

И, наконец, в материалах существуют **внутренние напряжения третьего рода**, которые возникают на атомарном уровне. Дефекты, вызываемые ими, настолько малы, что на протяжении десятка расстояний между атомами их воздействие полностью затухает.

Остаточные напряжения 3-го рода появляются при искажениях кристаллической решётки, приводящих к возникновению дополнительных сил межмолекулярного взаимодействия, обусловленными ими деформациями и неоднородностью структуры.

На указанные напряжения влияют также дополнительные фазы веществ, решётки которых отличаются от таковых у основного материала. Кроме того, данные напряжения зависят от наличия примесей, от их характера, размеров и формы, от особенностей межмолекулярных связей.

С одной стороны, такие дефекты ослабляют величину межмолекулярных сил, поскольку прочность кристаллов, в конечном итоге, определяется прочностью самых слабых связей. А с другой — препятствуют распространению дислокаций, ведут к понижению пластичности материалов со всеми вытекающими из этого последствиями. Становятся зародышами более крупных повреждений материалов.

Таким образом, в любом реальном материале могут существовать как несовершенства структуры — поры, трещины, микротрещины, внедрённые атомы примесей и др., так и остаточные внутренние напряжения первого, второго и третьего рода. Причём все они существуют совместно друг с другом, суммируются, достигая на некоторых участках критического значения, и вместе с внешними напряжениями способствуют разрушению изделий и потере ими своего ресурса.

6.2. Трещины, характер их роста и особенности разрушения образцов

Трещины являются главной причиной разрушения объектов. Более того, именно они, достигая краёв изделий, и приводят к их расчленению. Поэтому процесс возникновения и роста трещин представляет интерес для всякого инженера, имеющего дело с материалами и с различного рода техническими конструкциями.

Что такое трещины, каким образом они зарождаются, как ведут себя в тех или иных условиях?

Как известно, под воздействием внешних сил в изделиях возникают деформации, сопровождаемые противодействующими им упругими напряжениями. В результате происходит дробление субкристаллитных блоков в кристаллах (см. рис. 6.3). Растёт число дислокаций, и тем в большей степени, чем сильнее деформации и более пластичным является материал.

При этом сами дислокации начинают перемещаться, пока не встретятся с другими дислокациями, дефектами или с границами кристаллитов, которые останавливают их передвижение. Следующие за ними дислокации упираются в указанные преграды, в результате чего возникают так называемые "стоки дислокаций", тяготеющие к границам кристаллитов. Вследствие этого границы оказываются как бы "рыхлыми", межмолекулярные силы вблизи них ослабевают. И неудивительно, поэтому, если внешние напряжения начинают превосходить силы сцепления молекул, появляются микротрещины.

Нетрудно нарисовать физическую картину того, что в действительности происходит у таких надразов, как трещины. При растяжении одиночная цепочка атомов испытывает равномерное напряжение, а поэтому обладает максимально возможной и близкой к теоретической величине прочностью. Взяв ещё несколько таких же цепочек и расположив их так, чтобы они образовали кристалл, мы обнаружим, что ничто не мешает каждой цепочке в отдельности выдерживать напряжение, соответствующее её теоретической возможности.

Предположим теперь, как показано на рис. 6.4, что несколько соседних межатомных связей оказались перерезанными, т. е. создали трещину. Разумеется, разорванные цепочки уже не смогут, как прежде, нести нагрузку, передавая её от атома к атому. Теперь эту работу должны взять на себя оставшиеся цепочки. И поэтому упругая сила внутри материала, ранее приходящаяся на область решётки, занятой трещиной, обходит её по самому краю. Отсюда почти вся нагрузка, которую несли разрезанные атомные цепочки, падает теперь на единственную атомную связь и её соседей, расположенных у самого кончика трещины.

Ясно, что при подобных обстоятельствах перегруженная связь оборвётся раньше других. Когда же такое звено лопнет, положение только ухудшится, т. к. на долю соседнего звена добавится не только нагрузка перерезанных ранее цепочек, создавших трещину, но и та доля нагрузки, которая приходилась на только что лопнувшую цепочку. Так трещина и бежит по материалу, пока не разрушит его полностью. И это происходит не только при наличии растягивающих усилий, но также при сжимающих, сдвиговых, крутильных или сгибающих нагрузках, как показано на рис. 6.5.

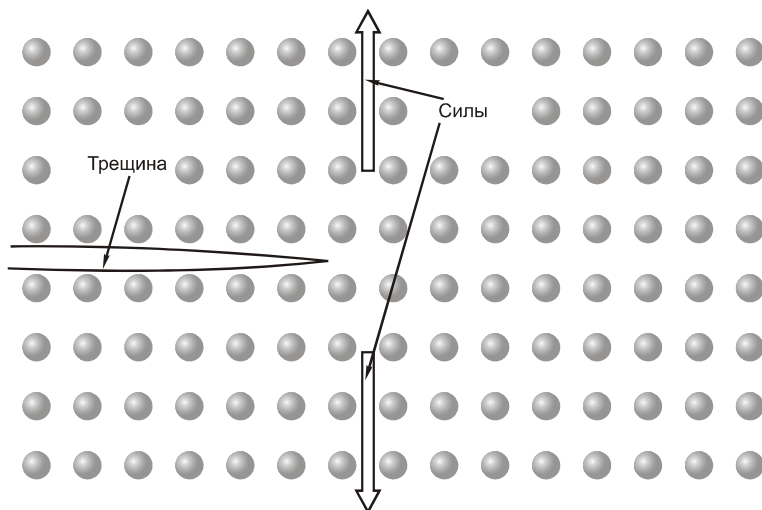


Рис. 6.4. К вопросу роста трещин в процессе силовой нагрузки материалов

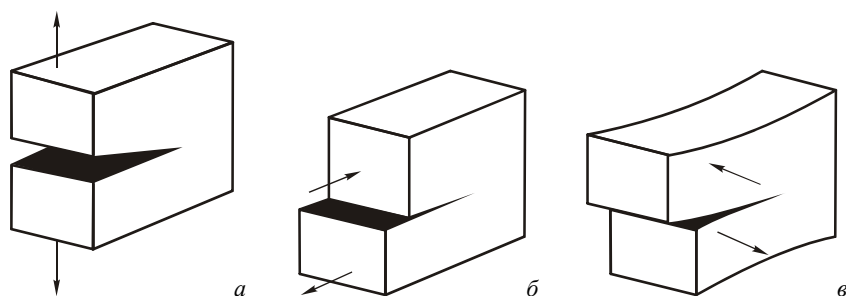


Рис. 6.5. Типы трещин и их взаимодействие с нагрузками:

- а* — трещина отрыва (I мода деформации);
- б* — трещина сдвига (II мода деформации);
- в* — трещина среза (III мода деформации)

Сопrotивляемость изделий нагрузкам при наличии в них различных повреждений и вырезов характеризуется коэффициентом концентрации напряжений K . Он показывает, во сколько раз местное напряжение у конца трещины вблизи вырезов различной формы (прямоугольных, круглых или цилиндрических отверстий) больше среднего его значения. Данный коэффициент вычисляется с помощью формулы: $K = 1 + L/r$, где L — длина трещины (размер её "берега"), а r — радиус кривизны её конца (головки трещины).

Из расчётов следует, что у круглого отверстия в изделии местное напряжение втрое превышает среднее. А если трещина имеет длину 1 мкм и радиус кривизны, соответствующий половине расстояния между соседними молекулами (примерно 1 Ангстрем, т. е. 10^{-10} м), тогда коэффициент концентрации напряжения у её конца возрастает в 10 тысяч раз. Такую микротрещину трудно разглядеть с помощью мик-

роскопа, и тем не менее именно во столько раз повышается локальная нагрузка, увеличивающая длину трещины по сравнению с первоначальной.

Таким образом, трещина становится тем инструментом, с помощью которого приложенная извне даже небольшая сила рвёт прочнейшие межатомные связи твёрдых тел.

С другой стороны, разрушение тел может быть как вязким, так и хрупким. Вязкое разрушение происходит со значительной пластической деформацией, поэтому действующее на конец трещины напряжение приходится не на одну атомную цепочку, как мы рассматривали ранее, а передаётся большому числу атомов. В этой связи трещины в вязких телах имеют сравнительно большие радиусы головок.

От этого коэффициенты концентрации напряжения у головок таких трещин оказываются не столь значительными, и растут они с не очень высокой скоростью.

В то же время хрупкое разрушение происходит практически без макропластической деформации. Отсюда хрупкие трещины имеют малый радиус головок, коэффициенты концентрации напряжений у них велики и скорости распространения трещин близки к скорости звука.

Причём вязкому разрушению соответствует большая работа распространения трещины, превосходящая возникающую при её росте поверхностную энергию. У хрупкого разрушения такая работа невелика. Поэтому надёжность конструкции в большей степени определяется сопротивлением материала распространению уже зародившихся трещин, чем интенсивностью их возникновения. И чем большая работа затрачивается на перемещение трещины, тем меньше возможность внезапного хрупкого разрушения конструкции.

С другой стороны, характер трещин в значительной степени зависит от особенностей нагрузки. Так, на рис. 6.6, *а* показан характер трещин, возникающих от действия локальной нагрузки, растущей со временем. Видно, что большая часть образуемых при этом трещин носит сдвиговой характер. Они растут под углами, примерно равными 45° от направления действующей силы, и идут в одну сторону.

На рис. 6.6, *б* показаны трещины, возникающие под действием вибрационных нагрузок. Из рисунка видно, что трещины здесь также носят сдвиговой характер и распространяются под углами $\pm 45^\circ$ от направления силы. Однако, в отличие от ранее приведённого случая, образуемые при этом трещины симметричны относительно направления действия силы. В случае рис. 6.6, *в* на образец действует сосредоточенная импульсная сила (удар). И тогда все трещины начинают разбегаться от точки приложения силы в произвольных направлениях.

По характеру роста трещин их делят на *транскристаллитные*, которые распространяются по телу зёрен, и *интеркристаллитные*, которые проходят по их границам. Причём при низких температурах межзёренные границы обычно прочнее самих зёрен. Поэтому у большинства металлов при низких температурах разрушение имеет транскристаллитный характер и проходит по зёрнам. При повышенных температурах межзёренные границы обычно оказываются слабее зёрен и разрушение имеет преимущественно интеркристаллитный характер.

Таким образом, дефекты типы трещин являются концентраторами напряжений, которые оказываются тем большими, чем острее трещина и больше её длина.

В случае достаточно острой и длинной трещины напряжения вблизи её вершины могут достигать значений, превышающих разрушающее напряжение материалов даже при сравнительно малых внешних нагрузках.

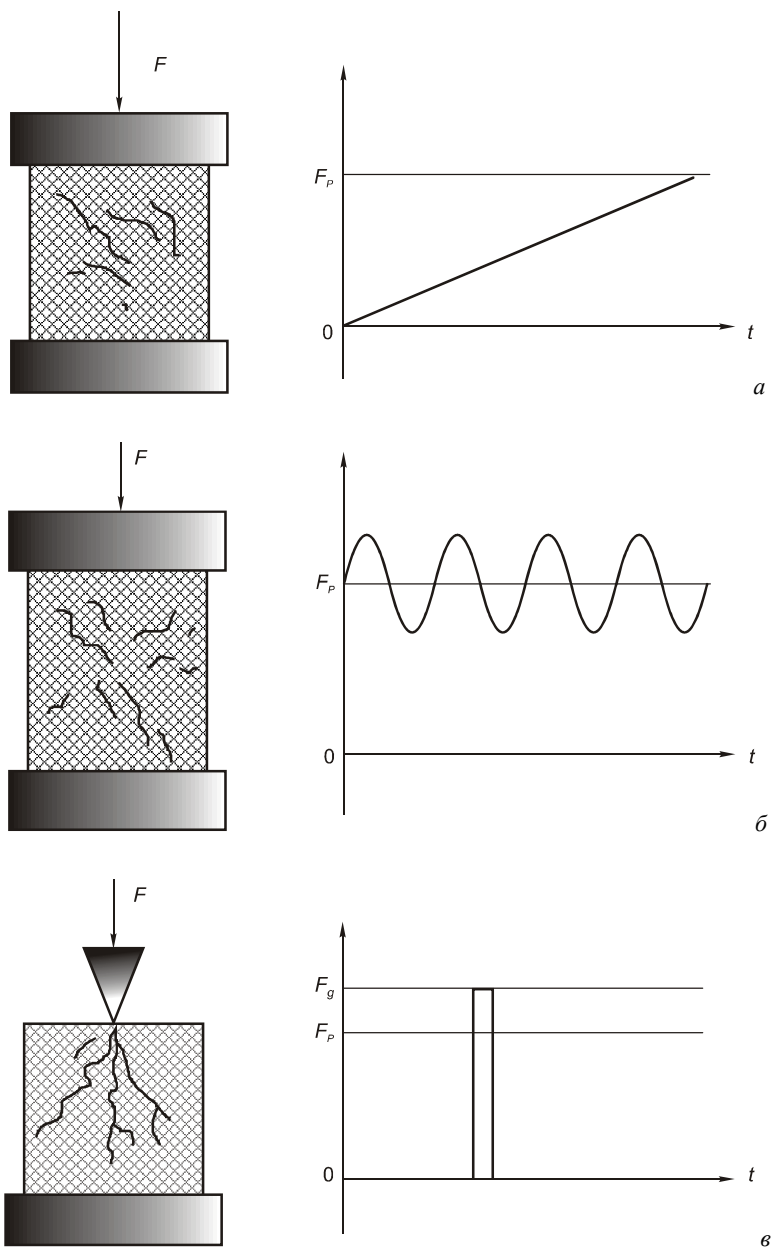


Рис. 6.6. Характер трещин, возникающих под действием различных сил:

а — локальная нагрузка, растущая со временем;

б — вибрационная нагрузка;

в — сосредоточенная импульсная сила (удар)

При продвижении трещины, с одной стороны, часть упругой энергии, запасённой системой, высвобождается и идёт на увеличение трещины. А с другой — происходит расходование внешней энергии на образование новых свободных поверхностей трещины (её границ). Причём обе части энергии выступают в противовес друг другу.

В этой связи поведение трещины, в конечном итоге, зависит от того, в какую сторону будет меняться общая энергия трещины при малом приращении её длины. Если с ростом трещины данная энергия будет понижаться, тогда трещина будет расти без внешнего дополнительного воздействия, т. е. самопроизвольно. А если энергия станет убывать — тогда трещина будет способна зарастать без всяких внешних воздействий. И данные процессы наглядно демонстрируются на рис. 6.7.

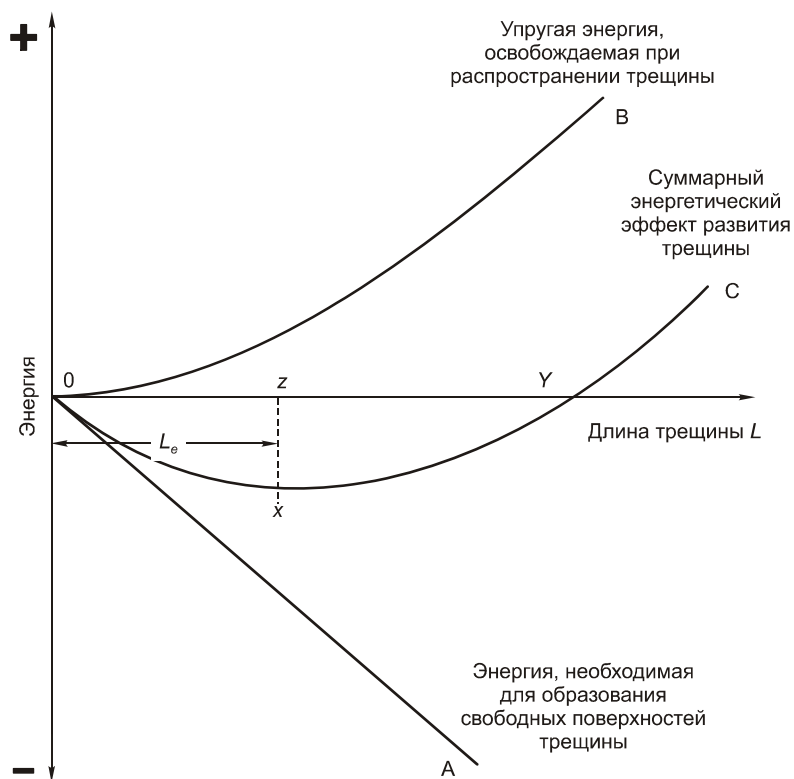


Рис. 6.7. О влиянии длины трещины на величину поглощаемой ею энергии

В этой связи для каждого материала существует своя критическая длина трещин L_g , получившая название трещины Гриффитса. Если возникающие в материале трещины оказываются короче указанной критической длины, они могут залечиться. А если больше — тогда трещины способны расти самопроизвольно со скоростью, приближающейся к скорости распространения упругой волны (т. е. до 1,5—2 км/с), и разрушат изделие.

Сжимающие усилия, в отличие от растягивающих, могут передаваться через трещины, не вызывая концентрации напряжений. Поэтому хрупкие материалы всегда оказываются прочнее при сжатии, чем при растяжении. В этой связи из кирпичей лучше выкладывать стены зданий, чем сооружать арки.

6.3. Физические процессы, протекающие при разрушении материалов

Возьмём какой-нибудь пластичный материал, например, медную пластинку. Из неё с помощью ножниц можно вырезать любую фигуру.

Возьмём пластину из хрупкого материала, например, кусок обыкновенного оконного стекла, и попытаемся сделать с ним то же самое. И у нас ничего не получится. Как только ножницы начнут резать стекло, тут же возникают трещины, которые будут распространяться быстро и совсем не так, как стекло режут. Это один из наиболее зримых примеров особенностей поведения пластичных и хрупких материалов при возникновении в них трещин.

Казалось бы, здесь уже ничего не поделать, пластичное тело всегда будет пластичным, а хрупкое — хрупким. Но оказывается, что здесь не всё так просто.

Возьмём те же самые ножницы и то же самое стекло и поместим последнее в воду. И тогда оказывается, что такое стекло уже резать ножницами можно. Правда, его края не будут столь гладкими, как в случае медной пластинки, однако трещины уже перестанут вести себя непредсказуемым образом. В стекле уже будет можно не только сделать прямой разрез, но появится возможность вырезать круг, овал или любую другую фигуру. Прделаем ещё один эксперимент, нанесём на стекло жидкий парафин. И тогда стекло уже начнёт вести себя почти как пластичное тело. Из него уже можно будет вырезать достаточно сложные фигуры.

Почему? Ведь физическая природа вещества не изменилась, стекло как было хрупким, таковым и осталось. Поменялась только окружающая его среда. То есть оказалось, что последняя оказывает существенное воздействие на поведение твёрдых тел, на то, как хрупкие или как пластичные ведут они себя на практике. И это заставляет о многом задуматься.

Прделаем ещё один эксперимент. Возьмём большое число одинаковых стеклянных пластинок и разделим их на три части. На одни из них с одной стороны напылим тонкий, не заметный глазом порошок из какого-либо металла, например, алюминия или вольфрама. На другие — то же самое прделаем с двух сторон образцов, а последнюю треть пластинок оставим без какого-либо напыления. Поместим поочерёдно каждое стекло на опоры, как показано на рис. 6.8, и начнём измерять, с какой высоты на них надо бросать стальной шарик, чтобы они раскололись. То есть станем находить энергию, которую необходимо затратить для их разрушения.

При этом заметим, что поскольку материал стекла является хрупким, то если высота, с которой падает шарик, окажется недостаточной для его разрушения, удар не приведёт к существенному накоплению повреждений и к потере образцами своего ресурса. Стекло по-прежнему остаётся таким, каким было.

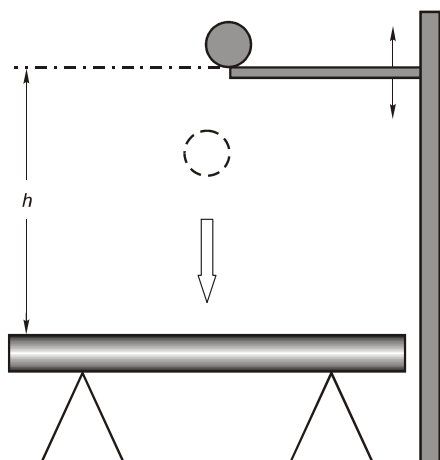


Рис. 6.8. Опыт по измерению работы разрушения стеклянных пластин

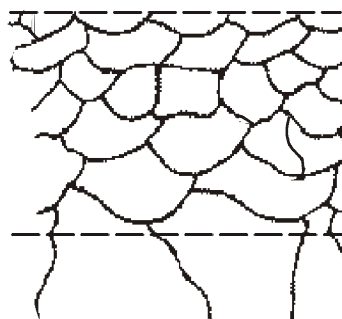


Рис. 6.9. Межкристаллитные границы поликристаллических тел

Результаты данного опыта оказались весьма любопытными. Выяснилось, что если высота падения шарика, при которой разрушались ненапылённые пластинки, была равна примерно 80 см, то у напылённых с одной стороны она уже оказывалась больше в полтора раза. И это не зависело от того, с напылённых или с ненапылённых сторон падал шарик. А в случае пластинок, напылённых с двух сторон, эта высота уже оказывалась примерно в два раза больше, чем у пластинок ненапылённых.

Таким образом, работа разрушения хрупких тел существенно зависит не только от состояния самих материалов, из которых они изготовлены, но в не меньшей степени — от веществ, контактирующих с ними. В этой связи уместно задать вопрос: а не происходит ли то же самое при работе изделий и при исчерпывании ими своего остаточного ресурса?

В самом деле, у каждого зерна поликристаллического материала имеются свои границы, как это видно на рис. 6.9. И опытом доказано, что чем более прозрачными для дислокаций и напряжений являются границы, тем более работоспособным оказывается вещество.

Объяснить данный феномен можно следующим образом. Любой удар по границе тела имеет непрерывный спектр механических колебаний, частота которого располагается в диапазоне от 0 до $1/\tau$, где τ — длительность удара. И понятно, что чем более твёрдыми являются ударник и жёстче исследуемое тело, тем шире этот спектральный диапазон (см. рис. 6.10).

С другой стороны, любое ограниченное тело обладает своими собственными резонансными частотами, определяемыми его объёмом. И очевидно, что отдельные кристаллиты также имеют свои резонансные частоты, на которых они колеблются с наибольшими деформациями. Поэтому если эти частоты располагаются внутри частотного диапазона, устанавливаемого длительностью удара, как показано на рис. 6.10, тогда этот удар приводит к возникновению интенсивных резонансных

колебаний каждого кристаллита на его собственных частотах. И как при всяком резонансе, амплитуда таких колебаний оказывается тем большей, чем выше добротность колебательной системы, образованной отдельными кристаллитами вещества.

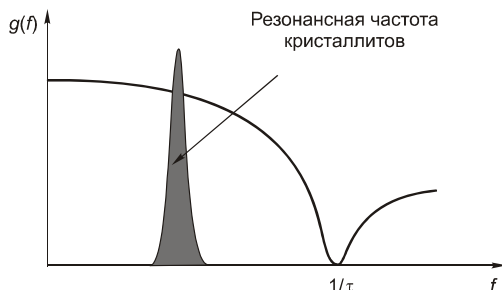


Рис. 6.10. Спектральная плотность удара

В самом деле, в механике под добротностью Q понимается количественная характеристика резонансных свойств колебательной системы, указывающая, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду тех же колебаний вдали от резонанса. Её величина определяется с помощью выражения $Q = \sqrt{mk/\eta}$, где в нашем случае m — масса кристаллита, k — коэффициент его упругости, а η — коэффициент потерь на границах при колебательном процессе. Поэтому чем меньшими являются потери, тем выше добротность, а значит и больше амплитуда колебаний, т. е. деформация кристаллита.

С другой стороны, как следует из рис. 5.7, напряжения, возникающие в хрупких телах, в значительной степени зависят от величины их деформации. Поэтому при малых потерях на границах кристаллитов их добротность, как колебательных систем, оказывается громадной, напряжения внутри них растут многократно и они способны разрушаться даже при малых внешних нагрузках. Что и демонстрируют результаты описанных ранее опытов со стеклянными пластинками.

В самом деле, при помещении их в жидкость, а тем более в парафин существенно возрастают потери, излучаемые ими при резонансных колебаниях в окружающую среду. А значит понижается их добротность как колебательных систем. И то же самое наблюдается в опыте с напылёнными пластинками.

С другой стороны, из практики известно, что чем крупнее являются кристаллиты, тем ниже их резонансная частота, а поэтому при более длительных ударах наступает их резонанс. Природные явления, с которыми встречаются изделия, в большинстве своём являются сравнительно длительными. И данное обстоятельство, наряду с другими известными причинами, способствует меньшему ресурсу материалов с крупными зёрнами.

То же самое происходит, если средние статистические углы между соседними кристаллитами увеличиваются. В самом деле, коэффициенты отражения упругих волн от границ R пропорциональны величине $R \approx \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$, где ρ_j — плотности

первой ($j = 1$) и второй ($j = 2$) составляющей их границы, а c_j — скорости распространения в них упругих колебаний.

Скорости, как будет описано в дальнейшем, зависят от модулей упругости. Произведение указанных параметров называется импедансом среды $z = \rho c$. Отсюда следует, что при больших углах межкристаллитного рассогласования разница между импедансами соседних граничащих друг с другом кристаллитов оказывается большей. А следовательно, коэффициенты R являются большими, добротность кристаллитов, как колебательных систем, увеличивается, амплитуды их деформаций растут, они проявляют большую способность к хрупкости и к разрушению.

Кроме того, к границам зёрен притягиваются все находящиеся в материалах примеси, которые взаимодействуют с молекулами вещества. Иногда они способны усиливать связи между ними, но чаще всего их ослабляют. Известно, что при потере материалами своего ресурса, при накоплении в них усталостных повреждений внутри кристаллитов возникают микротрещины, также тяготеющие к границам. В случае возникновения межкристаллитной коррозии агрессивные окружающие среды проникают в глубь вещества и локализуются по границам зёрен, нарушая, таким образом, механическую связь между ними и повышая их добротность как колебательных систем.

Точно так же при возникновении радиационного охрупчивания, когда в материалах под действием нейтронов выделяется водород, его молекулы также концентрируются на границах кристаллитов. И понятно, что всё это увеличивает способность границ отражать упругие волны. В результате добротность зёрен, как колебательных систем, при утрате материалами своего ресурса увеличивается. Деформации в них растут, и это ведёт к потере работоспособности, разрушению материалов.

Всё изложенное в полной мере подтверждает накопленный опыт, известные зависимости ресурсов материалов от их параметров.

Глава 7

Ультразвук и его взаимодействие с веществом

7.1. Упругие волны в твёрдых телах

Упругими волнами называются колебания, осуществляемые самими частицами среды. Однако в отличие от рассмотренных ранее волн Дебая (см. разд. 4.4), которые являются самопроизвольными, в настоящем разделе мы будем рассматривать такие волны, которые возбуждаются внешними источниками и обычно являются монохроматическими, т. е. описываются законами синуса или косинуса.

Рассмотрим особенности распространения упругих волн в твёрдых телах. Для этого исследуем простейшую одномерную модель вещества, состоящего из одинаковых молекул массой m , расположенных на расстоянии b друг от друга, как показано на рис. 4.6. Будем считать, что силы, действующие на молекулы цепочки, обусловленные влиянием других молекул, являются упругими и пропорциональны отклонению молекул от положения равновесия u . При этом коэффициент упругости будем считать, в соответствии с законом Гука, постоянным и равным K . Примем также для простоты решения, что силы взаимодействия F действуют только между соседними молекулами. Тогда классическое уравнение движения n -й молекулы, согласно 2-му закону Ньютона, запишется следующим образом:

$$ma = m \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} = F = K(u_{n+1} - u_n) - K(u_n - u_{n-1}) = K(u_{n+1} + u_{n-1} - 2u_n),$$

где a — ускорение молекулы.

Решение данного уравнения будем искать в виде $u_n = u_0 \exp(i\omega t - iknb)$, в котором u_0 — постоянная величина, характеризующая амплитуду упругой волны, ω — круговая частота, $\omega = 2\pi f$, f — физическая частота колебаний, t — текущее время, а k — волновое число, $k = \omega/v$, v — скорость распространения волны, i — мнимое число, $i = \sqrt{-1}$. В результате подстановки указанного решения в дифференциальное уравнение и выполнения всех требуемых преобразований, получаем:

$$-m\omega^2 = K \left(e^{ikb} + e^{-ikb} - 2 \right) = -4K \sin^2 \left(\frac{kb}{2} \right).$$

Откуда получается следующее решение для собственной частоты колебаний волны: $\omega = 2\sqrt{\frac{K}{m}} \sin\left(\frac{kb}{2}\right)$. Принимая во внимание, что расстояние между соседними молекулами в кристаллической решётке вещества b — малая величина, можно воспользоваться асимптотическим значением синуса при малых значениях его аргумента. То есть будем полагать, что $\sin\left(\frac{kb}{2}\right) \rightarrow \frac{kb}{2}$. И тогда получаем следующий результат для скорости упругой волны:

$$v = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{K}{m}} b.$$

Из данного решения следует, что скорость упругой волны в твёрдых телах зависит от их модуля упругости, определяемого силами межмолекулярного взаимодействия, от массы молекул, образующих вещество, а также от расстояния между ними. А поскольку все указанные величины для любого упругого материала являются фиксированными, скорости распространения упругих волн в веществе оказываются постоянными.

При распространении волн упругости в твёрдых телах частицы среды могут колебаться в направлении распространения волн, и тогда такие колебания называют продольными. Типичным примером указанной волны служит область сжатия пружины, пробегающая вдоль неё при ударе по одному её краю. Но те же частицы среды могут колебаться и в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, и такие волны называют поперечными или сдвиговыми. Наглядной демонстрацией такой волны служат колебания верёвки, натянутой между двумя опорами и выведенной из равновесия поперечным ударом.

Особенности колебаний среды при прохождении продольных и поперечных волн в веществе показаны на рис. 7.1.

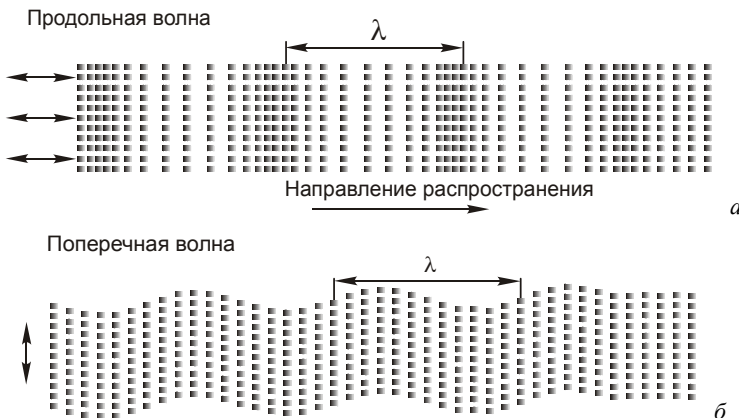


Рис. 7.1. Особенности колебаний молекул твёрдого тела при прохождении в нём продольной и поперечной волны

Причём в продольной волне изменение элементарных объёмов среды происходит при сохранении их формы. То есть прямоугольный кубик вещества в такой волне остаётся таким же кубиком, каким был до прохождения волны, но размеры его меняются, он как бы дышит. В поперечной волне величины элементарных объёмов вещества при прохождении волны остаются неизменными, а происходит изменение их конфигурации, формы. Поэтому указанные волны существенно отличаются друг от друга.

При этом отметим, что поперечные волны способны распространяться только в средах, обладающих поперечной упругостью, а поэтому ни в газах, ни в жидкостях они не образуются.

Поскольку модули упругости у продольных и поперечных волн неодинаковы, различными являются и скорости их распространения. На практике скорости указанных волн находятся с помощью формул:

$$v_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \text{ а } v_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

В приведённых выражениях введены следующие обозначения: v_l — скорости распространения продольных волн, v_t — скорости поперечных волн. Параметры λ и μ являются объёмным и сдвиговым модулями Ламе среды (их значения для различных материалов имеются в соответствующих справочниках), а ρ — её плотностью.

Данные решения не противоречат полученным ранее решениям, поскольку $\frac{m}{b^3} = \rho$ представляет собой плотность тела, а $\frac{K}{b}$ эквивалентно модулю упругости вещества. Таким образом, на самом деле $v = \sqrt{\frac{\alpha + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K}{b} \frac{b^3}{m}} = \sqrt{\frac{K}{m}} b$.

Скорость распространения продольных волн в воздухе при атмосферном давлении и обычных температурах равна примерно 0,33 км/с, в воде — 1,5 км/с, в различных смолах и в полимерах — от 1,4 до 2,3 км/с.

В металлах эти скорости существенно выше: от 4,7 км/с (медь) до 12,5 км/с (бериллий), т. е. имеют значения, приближающиеся или даже превосходящие 1-ю космическую скорость. В сталях данная скорость равна от 5,66 до 5,85 км/с, в алюминии — 6,26 км/с. Скорости поперечных волн существенно меньше, они примерно равны 0,55 от скорости продольных волн. При наличии каких-либо границ твёрдых тел кроме описанных волн в них могут возникать и другие типы волн, но их здесь рассматривать не будем.

В зависимости от частоты, упругие или акустические волны делят на следующие диапазоны:

- инфразвук, частоты которого имеют значения от 0 до 16 Гц;
- слышимый звук, частоты от 16 Гц до 18 кГц;
- ультразвук, частоты от 18 кГц до 20 мГц;
- гиперзвук, его частоты имеют величины от 20 мГц и выше.

Разумеется, границы между указанными диапазонами условны и не являются жёстко определёнными.

В дальнейшем будем изучать техническое применение только ультразвуковых волн.

7.2. Источники и приёмники ультразвуковых волн

Имеются самые разные источники и приёмники ультразвука. Однако на практике чаще всего применяются магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи указанных волн. Опишем их более подробно.

Магнитострикция представляет собой изменение размеров и формы некоторых материалов при их намагничивании. Обратный эффект заключается в намагничивании тел при насильственном изменении их геометрических размеров.

Магнитострикционные преобразователи преобразуют энергию магнитного поля в механическую (звуковую или ультразвуковую) энергию и наоборот. Их действие основано на магнитоупругом эффекте, т. е. на том, что некоторые металлы (прежде всего ферромагнетики — железо, никель, кобальт и их сплавы) деформируются в магнитном поле. Ярко выраженными магнитоупругими свойствами обладают также ферриты (материалы, спекаемые из смеси окиси железа с окислами никеля, меди, кобальта и других элементов).

Поскольку магнитострикция зависит от величины магнитного поля (рис. 7.2, *а*), а не от его направления, при синусоидальном возбуждении преобразователей генерируемые ими акустические сигналы имеют двойную частоту, как показано на рис. 7.2, *б*. Данное обстоятельство затрудняет работу магнитострикционных преобразователей, нарушает зависимость акустических импульсных сигналов от величины магнитных сигналов, возбуждающих их.

Чтобы данное обстоятельство исключить, кроме синусоидальных составляющих токов, являющихся источниками магнитного поля, на преобразователи подаются также постоянные токи, создающие фиксированные смещения преобразователей, как показано на рис. 7.2, *в*. И тогда временные характеристики магнитного и акустического полей, излучаемых преобразователями, совпадают.

Таким образом, если магнитоупругий стержень обмотать проволокой с протекающими в нём переменным и постоянным токами, являющимися источниками работающего магнитного поля и подмагничивания, тогда этот стержень начнёт попеременно сокращаться и удлиняться, т. е. испытывать механические колебания с частотой изменения магнитного поля и амплитудой, пропорциональной его индукции. Тогда вибрации преобразователя возбуждают в твёрдой или в жидкой среде, с которой он соприкасается, волны ультразвука той же частоты.

Обычно такие преобразователи работают на собственной частоте механических колебаний стержня. При этом возникает резонанс акустических колебаний, происходит более эффективное преобразование энергии из магнитной её формы в механическую и обратно. Это позволяет достигать относительного удлинения $\Delta L/L$ стержня на величину от 10^{-5} до 10^{-3} , т. е. развивать колоссальную акустическую мощность.

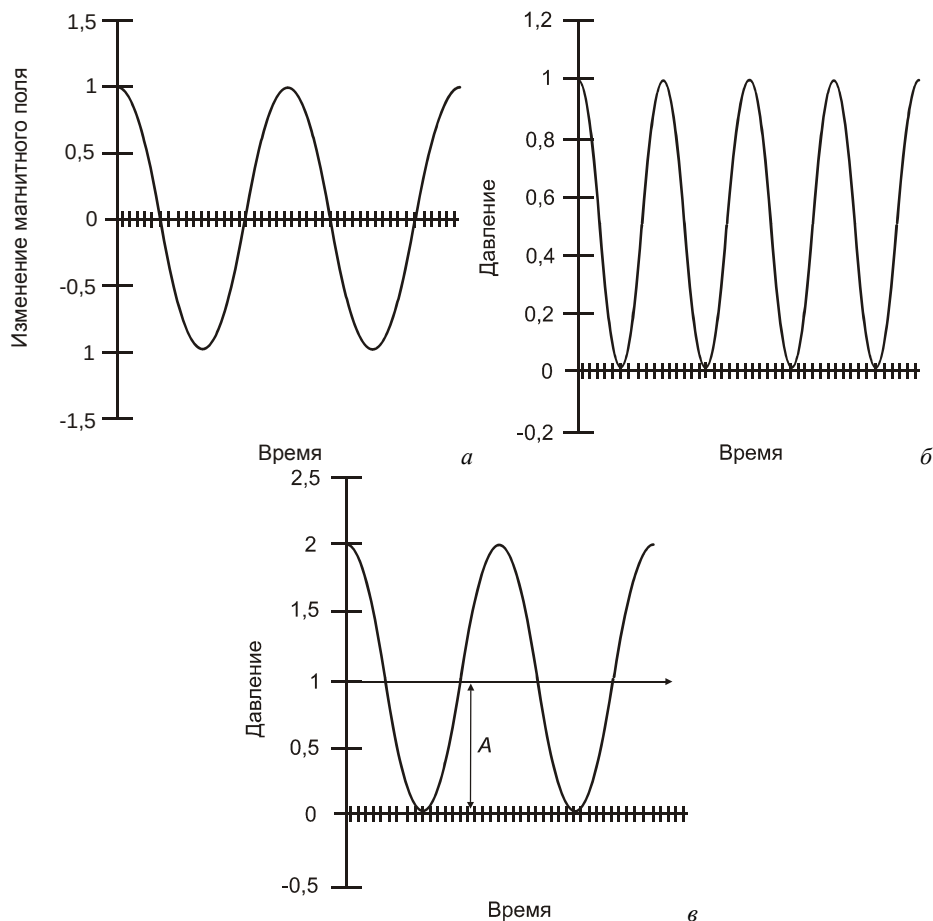


Рис. 7.2. Временные характеристики полей, возбуждаемых магнитострикционными преобразователями:
a — описывает изменение магнитного поля, возбуждающего преобразователь;
б — показывает временные параметры давления, генерируемого преобразователем без подмагничивания;
в — то же при наличии подмагничивания *A*

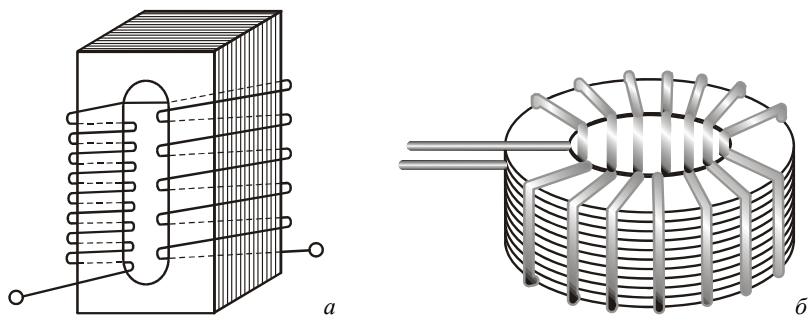


Рис. 7.3. Общий вид стержневого (*a*) и кольцевого (*б*) магнитострикционного преобразователей

Магнитострикционные преобразователи обычно изготавливают либо в виде стержневых, либо в форме кольцевых преобразователей (рис. 7.3). И делают их или из магнитных сплавов, или из ферритов. При этом металлические сплавы применяют для изготовления мощных магнитострикционных преобразователей, поскольку они имеют высокие прочностные характеристики. Однако большая электропроводность металлических сплавов приводит к значительным потерям в них на микровихревые токи, называемые токами Фуко. И они оказываются тем большими, чем выше частота ультразвука.

Поэтому преобразователи, подобно трансформаторам, обычно выполняют в виде пакетов из пластин толщиной 0,1—0,2 мм, что понижает потери на токи Фуко. Но, тем не менее, КПД таких преобразователей оказывается сравнительно небольшим (40—50 %). Это приводит к значительному расходованию электроэнергии и к необходимости их водяного охлаждения. В этой связи такие преобразователи обычно применяют только на низких частотах ультразвука (от 20 до 50 кГц).

На частотах, превышающих указанные величины, в качестве магнитострикционных материалов обычно применяют ферриты. Их удельное сопротивление является большим, а поэтому токи Фуко в них не образуются. В этой связи ферритовые преобразователи обладают более высоким КПД (до 70 %), но их мощностные характеристики ограничены низкой механической прочностью таких магнитострикционных материалов.

Для усиления акустического эффекта магнитострикционные преобразователи нередко снабжаются ультразвуковыми концентраторами, как показано на рис. 7.10. Они позволяют в несколько раз увеличивать амплитуду и мощность ультразвука в ограниченном объёме пространства.

В качестве источников и приёмников ультразвука, применяемого для ультразвуковых испытаний, в настоящее время чаще всего используют пьезопреобразователи. В них реализуется прямой и обратный пьезоэффекты, заключающиеся в изменении размеров пьезопластин под действием переменного электрического поля, а также в появлении свободных зарядов на их поверхностях при деформации. В качестве пьезоматериалов обычно применяют кварц, сегнетову соль, цирконат-титанат свинца, титанат бария и др. При этом толщину пьезопластины подбирают таким образом, чтобы она составляла половину длины волны ультразвука, на котором преобразователи работают.

Типовые конструкции пьезопреобразователей приведены на рис. 7.4. Прямые преобразователи применяют для ввода и приёма ультразвука под углами, нормальными к поверхности контроля. Наклонные — для генерации и регистрации ультразвуковых сигналов, распространяющихся под какими-либо углами.

В обычных преобразователях используется одна и та же пьезопластина как для излучения, так и для приёма ультразвука. В совмещённых преобразователях одна из них применяется только для излучения, а другая — только для приёма ультразвуковых сигналов. Чаще всего преобразователи бывают круглыми, но нередко в них применяют также квадратные пьезопластины, особенно для наклонных и совмещённых преобразователей.

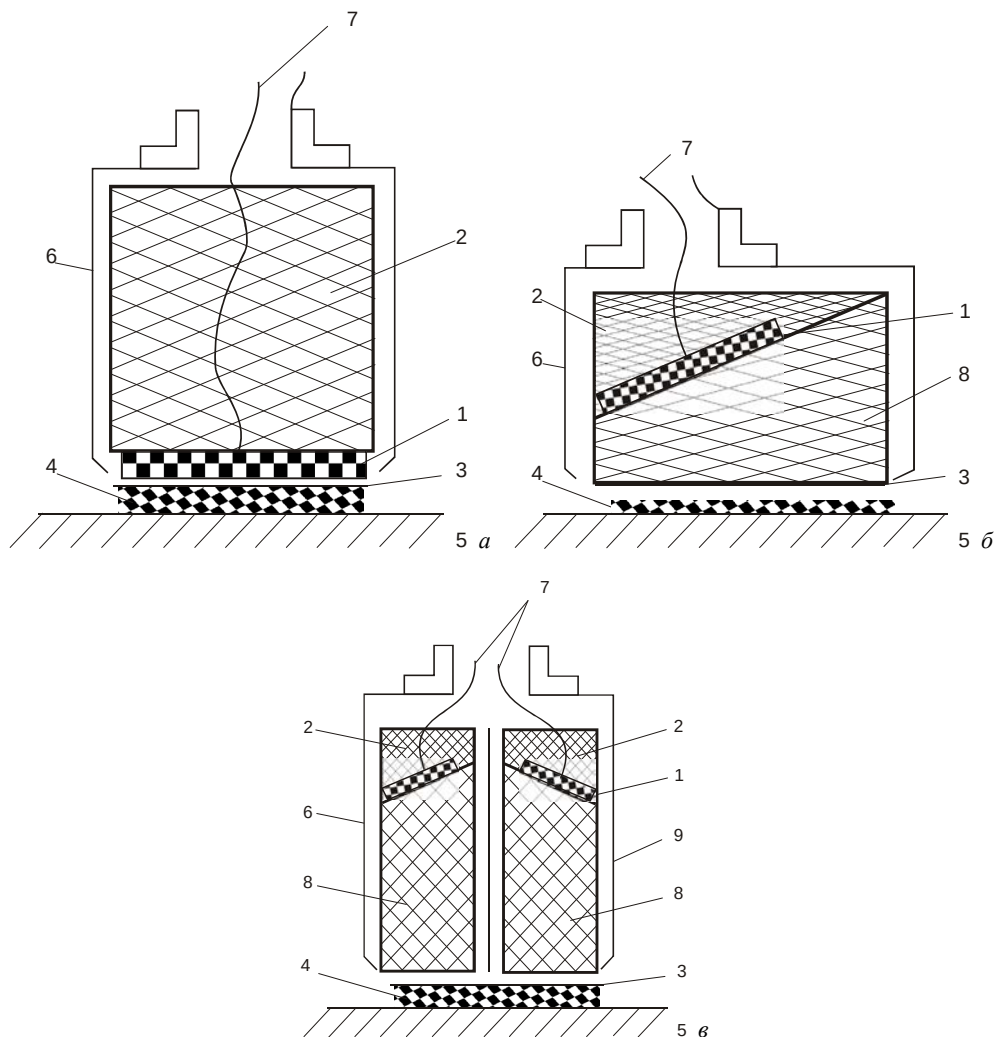


Рис. 7.4. Конструкции типовых пьезопреобразователей, применяемых для ультразвукового неразрушающего контроля изделий: *а* — прямой; *б* — наклонный; *в* — совмещённый.

1 — пьезопластина; 2 — демпфер; 3 — подложка; 4 — контактная смазка;
5 — контролируемый объект; 6, 7 — электроды; 8 — звуководы; 9 — корпус

Поскольку пьезопластины используют для возбуждения и приёма ультразвуковых сигналов, их поперечные размеры устанавливают исходя из требуемого сечения ультразвуковых пучков. Демпфер в пьезопреобразователях применяется для увеличения потерь в ультразвуковой системе. Это позволяет сокращать длительность импульсных сигналов, применяемых при контроле, уменьшает мёртвую (неконтролируемую) зону контроля и помогает более точно определять размеры и координаты дефектов. Подложка применяется для защиты пьезопластин от внешних разрушений. Контактная смазка используется для облегчения ввода ультразвука в контролируемое изделие и из него. Назначение других элементов пьезопреобразователей очевидно.

7.3. Кавитация

Кавитацией называется процесс образования разрывов сплошности жидкостей в результате местного понижения давления и связанные с этим явления. Если уменьшение давления происходит вследствие прохождения в жидкости упругих волн, тогда кавитация называется акустической. А если из-за перепада скоростей в потоке движущейся жидкости, тогда гидродинамической. Рассмотрим каждую из них в отдельности.

Акустическая кавитация возникает в результате образования и захлопывания газовых пузырьков в жидкости под воздействием ультразвука. Происходит это следующим образом. Во всякой жидкости имеются растворённые пузырьки газа. В обычных условиях давление насыщенного пара внутри них равно давлению в жидкости, а поэтому они ведут себя достаточно устойчиво. Однако если в жидкости начинают распространяться звуковые волны, тогда положение меняется кардинально.

В самом деле, при прохождении ультразвуковой волны даже небольшой интенсивности (всего несколько ватт на квадратный сантиметр) в жидкости возникает переменное звуковое давление, амплитуда которого достигает нескольких атмосфер. Под воздействием таких давлений жидкость попеременно испытывает то сжатие (–), то растяжение (+), как показано на рис. 7.5. Подробная картина того, что происходит при этом с воздушными пузырьками, попавшими в области переменного давления, показана на рис. 7.6.

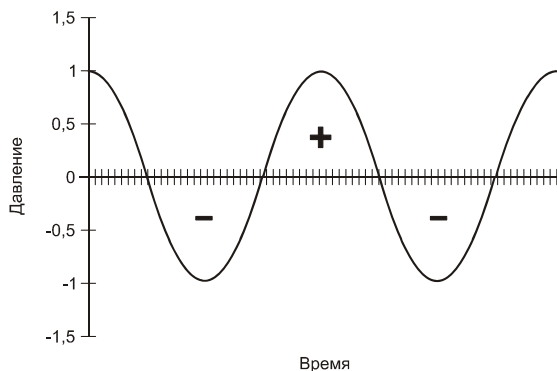


Рис. 7.5. Зависимость давления в точке наблюдения от времени

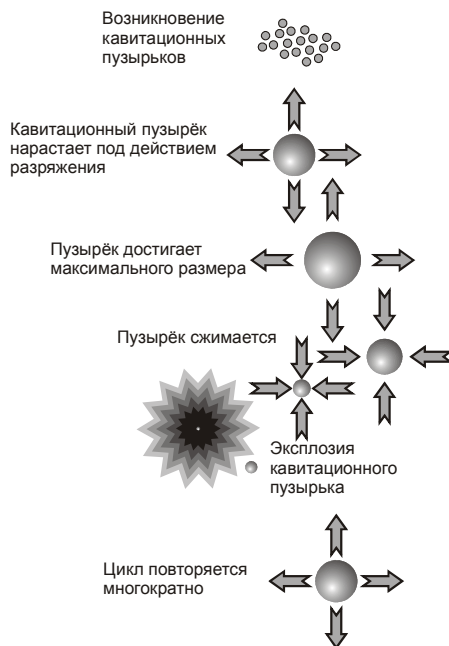


Рис. 7.6. Фазы роста и схлопывания кавитационных пузырьков

Итак, газовые пузырьки свободно располагаются в жидкости. Но как только пузырёк попадает в фазу пониженного давления ультразвука, тогда под воздействием растворённых внутри него паров пузырёк начинает увеличиваться в размере. И тем в большей степени, чем меньшим оказывается давление газа снаружи него. Затем наступает фаза повышенного давления ультразвука, и под его воздействием пузырёк начинает уменьшаться. Однако при достижении внутри него давления, равного таковому в упругой волне $+P$, его уменьшение не прекращается. В самом деле, к этому моменту расположенные на границе пузырька молекулы жидкости уже набирают значительную скорость и мгновенно остановиться не могут. А поэтому они по инерции продолжают двигаться в направлении центра пузырька.

Однако только этим рассматриваемый феномен себя не исчерпывает. По мере уменьшения размеров пузырька в нём не только увеличивается плотность газа, но молекулы жидкости продолжают двигаться к центру с всё возрастающими скоростями. И это приводит как к возникновению громадных давлений в центре пузырька, достигающих тысяч и даже десятков тысяч атмосфер, так и к увеличению температуры в указанной области до десяти и более тысяч градусов.

Причём особенно большое давление при захлопывании пузырьков возникает в случае кавитации на низких частотах в обезгаженной жидкости. В результате в момент захлопывания кавитационного пузырька наблюдается его слабое свечение. Вспышка может длиться от $1/20$ до $1/1000$ с. Интенсивность свечения зависит от количества газа в пузырьке, светиться он может всеми цветами радуги. В обычных условиях свечение наблюдается слабо и становится хорошо видимым только при усилении или в полной темноте.

Гидродинамическая кавитация наблюдается вследствие возникновения в ней вихревых потоков, сопровождающихся как увеличением, так и понижением давления в некоторых её областях. В результате если давление понижается до некоторого критического уровня, тогда присутствующие в жидкости пузырьки газа или пара, двигаясь с её потоком, приобретают способность к росту. После приведения в равновесие газа внутри и снаружи увеличение размеров пузырьков прекращается и они, попадая в зону повышенного давления, начинают уменьшаться. А дальше всё происходит в той же последовательности, как и при акустической кавитации.

Вихревая кавитация часто наблюдается на передних кромках подводных крыльев, на лопастях и позади ступицы гребного винта. Для плохо обтекаемых тел, обладающих острыми кромками, формирование струйного вида кавитации происходит очень быстро. Если степень развития гидродинамической кавитации такова, что одновременно растёт и захлопывается множество пузырьков, тогда данное явление сопровождается сильным шумом со сплошным спектром от нескольких сотен герц до сотен килогерц, затрудняющим работу гидролокаторов. Этот спектр расширяется в область низких частот по мере увеличения максимального радиуса пузырьков.

Волну сжатия в жидкости можно вызвать также мощным импульсом электрического разряда между электродами, помещёнными в жидкость. Причём чем круче фронт электрического импульса и менее сжатой является сама жидкость, тем выше возбуждаемое в ней ударное давление.

Понятно, что заканчиваться просто так без каких-либо последствий такие явления не могут. Поэтому если образовавшиеся паровые пузырьки схлопываются вблизи границы твёрдых тел, тогда около них возникают интенсивные микропотоки. В результате происходит разрушение и диспергирование (измельчение) твёрдых тел, порошков, эмульгирование, т. е. активное перемешивание несмешивающихся друг с другом жидкостей. Ускоряются химические реакции, связанные с ионизацией при захлопывании пузырьков и т. д.

Кроме того, громадная энергия, выделяемая при схлопывании кавитационных пузырьков, может приводить к повреждению поверхности подводных сооружений, гребных винтов, турбин, насосов и даже узлов ядерных реакторов. Причём масштабы такого воздействия, называемого гидравлической эрозией, могут быть разными — от точечного поверхностного разрушения до катастрофического выхода из строя больших конструкций. Кавитация на гребных винтах может вызывать периодические колебания давления, действующего на корпус судна и силовые установки. Возникающие при этом вибрации способствуют разрушению механизмов, создают дискомфортные условия для пассажиров, команды и т. д.

Кавитация может существенно увеличивать гидродинамическое сопротивление при движении, в результате чего снижается коэффициент полезного действия гидравлического оборудования. В частности, чрезмерная кавитация на гребном винте может уменьшить его тягу и ограничить максимальную скорость судна. Кавитация может быть причиной снижения производительности турбин или насосов и даже полного прекращения их работы.

Громадным является биологическое воздействие кавитации на организмы. Так, при ультразвуковом медицинском обследовании в биологических тканях могут зарождаться и расти кавитационные пузырьки со всеми вытекающими из этого последствиями. При наличии кавитации ультразвук большой интенсивности может вызвать повреждение тканей, разрушение клеток и др.

И в то же время благодаря тем же самым эффектам кавитация находит всё большее применение при создании новых и совершенствовании известных технологических процессов. Об этом более подробно будет говориться в следующем разделе. В частности, электрогидравлический удар применяется при холодной обработке металлов, при разрушении горных пород, для интенсификации химических процессов и т. д.

7.4. Технологическое использование ультразвука

7.4.1. Применение ультразвука для неразрушающего контроля изделий

Неразрушающий контроль в настоящее время является одним из наиболее востребованных технологических процессов испытания вещества и всевозможных изделий. И это вполне закономерно, поскольку с повышением технологического уровня производства многократно увеличиваются требования к надёжности выпус-

каемых и эксплуатируемых изделий и механизмов. Это связано не только с удорожанием оборудования и с увеличением финансовых потерь, которые сопровождают техногенные аварии, но и с тем, что за них приходится платить тяжкими человеческими жертвами.

В самом деле, в 80-е годы XX века в СССР в Сибири погиб самолёт ТУ-154 с 250 пассажирами и экипажем на борту. А причиной аварии явился всего лишь осколок от плавильного тигля размером менее 1 мм, попавший в материал диска турбины давления компрессора двигателя. В этой связи требования к неразрушающему контролю со временем становятся всё более жёсткими.

В настоящее время применяют различные методы неразрушающих испытаний, которые во многом решают проблему отбраковки ненадёжных деталей. К таковым, в частности, относятся рентгеновский, радиационный, магнитный, оптический, вихретоковый и другие способы неразрушающего контроля изделий. Причём в каждом из них применяют свои поля, изменения которых зависят от характеристик изделий, через которые они проходят.

Данные методы позволяют во многом решить проблему контроля тех или иных изделий, а также обнаруживать в них локальные повреждения. Вместе с тем одним из самых востребованных методов, с помощью которого в настоящее время контролируется свыше 50 % всех изделий, является ультразвуковой. Этот метод был разработан советским учёным-физиком С. Я. Соколовым в Ленинградском электротехническом институте в 1928 году и получил самое широкое распространение, явился таким же универсальным способом обнаружения неоднородностей в различных телах, как рентгеновский.

У данного метода контроля по сравнению с другими имеется множество преимуществ. Так, он является одним из наименее дорогих, универсальных и безопасных для обслуживающего персонала. Достоинством ультразвукового метода является возможность контроля изделий большой толщины. Например, только с его помощью можно выявлять дефекты малого раскрытия в изделиях размерами свыше 80 мм.

И в то же время у данного метода имеется ряд недостатков, не позволяющих заменить им все другие методы контроля. Так, с помощью ультразвука невозможно контролировать детали без применения контактных смазок, поскольку без них ультразвук не способен проходить от преобразователя в изделие и обратно. И это вполне объяснимо, поскольку зазор толщиной 1 мкм отражает до 90 % падающего на него ультразвука. Поэтому затруднён контроль изделий сложной формы, имеющих грубую, шероховатую поверхность, движущихся с высокими скоростями.

На рис. 7.7 представлены наиболее употребительные схемы ультразвукового неразрушающего контроля с применением прямых и наклонных пьезопреобразователей.

При **теновом методе** (см. рис. 7.7, а) признаком наличия дефекта служит уменьшение интенсивности (амплитуды) ультразвуковой волны, прошедшей от излучающего пьезопреобразователя к приёмному. Недостатком метода является необходимость двустороннего доступа к изделию и малая точность измерения координат дефектов. Достоинством — высокая помехоустойчивость. Метод может применяться также для контроля изделий со сравнительно грубой поверхностью.

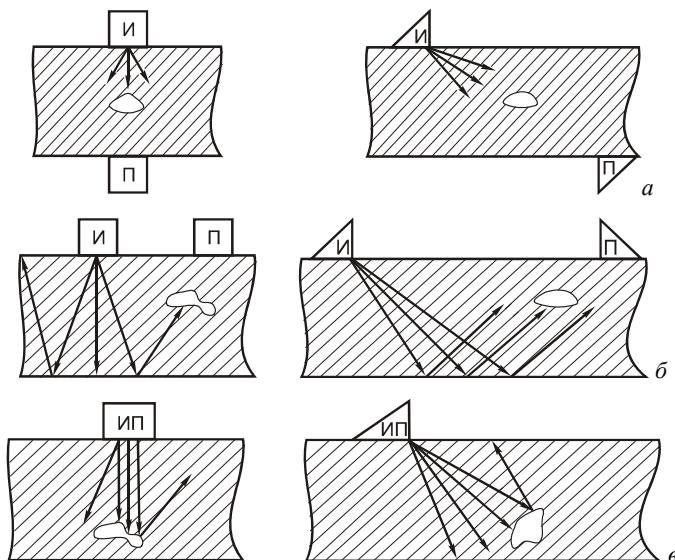


Рис. 7.7. Методы ультразвукового контроля: *а* — теневой; *б* — зеркально-теневой; *в* — эхо-метод. И — излучатель; П — приёмник

При **зеркально-теневом методе** (см. рис. 7.7, *б*) признаком наличия дефектов является уменьшение интенсивности (амплитуды) ультразвуковой волны, отражённой от противоположной поверхности изделия. Метод не требует двустороннего доступа к контролируемому изделию, позволяет более достоверно выявлять корневые дефекты в стыковых швах. Он помехоустойчив, применяется для изделий как значительной, так и небольшой толщины с относительно грубой поверхностью. Однако точность определения координат дефектов при использовании этого метода невысока.

При **эхо-методе** (см. рис. 7.7, *в*) признаком обнаружения дефектов является приём эхо-сигналов, отражённых ими. Причём при зеркально-теневом и эхо-методе можно пользоваться одним и тем же пьезопреобразователем в качестве как излучателя, так и приёмника. Но при этом сигналы должны быть импульсными. Эхо-метод, по сравнению с ранее рассмотренными, позволяет достаточно точно обнаруживать дефекты, а также устанавливать некоторые их характеристики. Однако если длина волны ультразвуковых волн оказывается больше размера дефектов, тогда из-за дифракции будет происходить огибание волн и дефекты не обнаруживаются.

Кроме того, при большой величине зёрен металла происходит значительное затухание и рассеяние колебаний, возникает структурный шумовой фон. В этой связи ультразвуковой контроль крупнозернистых материалов (чугуна, меди, аустенитных сталей и др.) с помощью ультразвука затруднён.

С другой стороны, зависимость коэффициента затухания от размеров зёрен используется в ультразвуковых структурных анализаторах. Поскольку длина волны обратно пропорциональна частоте колебаний, то с увеличением частоты повышается чувствительность ультразвука к более мелким дефектам. Но при этом сущест-

венно возрастают потери и увеличиваются структурные помехи. Это необходимо учитывать при выборе рабочей частоты. Поэтому при контроле изделий обычно применяют частоты от 0,5 до 10 МГц.

7.4.2. Ультразвуковая медицинская диагностика

Поскольку любые среды, в том числе и ткани организма, препятствуют распространению ультразвука, они обладают различными акустическими сопротивлениями (импедансами). Величины импедансов определяются произведением плотности материала на скорость распространяющегося в нём ультразвука. В результате при достижении границы раздела двух сред с различными акустическими импедансами одна часть пучка ультразвуковых волн продолжает распространяться в новой среде, а другая — отражается. Причём отражение оказывается тем большим, чем значительнее разность акустических сопротивлений граничащих друг с другом тканей. И это является главным диагностическим признаком обнаружения границы человеческих органов, оценки их состояния и поведения. Типичная картина такого контроля показана на рис. 7.8.

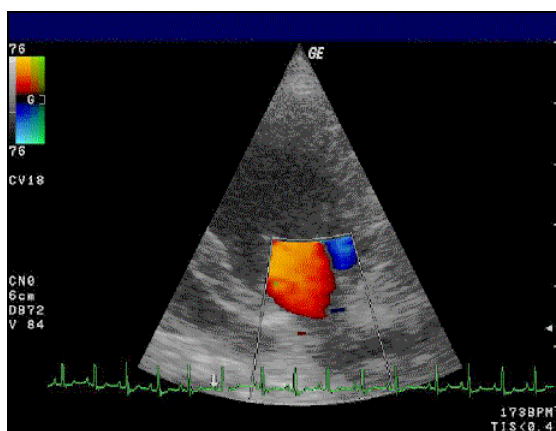


Рис. 7.8. Изображение человеческого органа, полученное при его ультразвуковой диагностике

В общем случае отражение ультразвука зависит от угла падения лучей и от частоты их колебаний (при более высокой частоте отражается большая часть акустической энергии). Поэтому для исследования, например, органов брюшной полости и забрюшинного пространства, а также малого таза используются частоты от 2,5 до 3,5 МГц. А для изучения состояния щитовидной железы человека — частота 7,5 МГц.

Ввиду относительно невысокой стоимости, наглядности и универсальности ультразвуковых исследований данный метод диагностики пациентов нашёл самое широкое применение. С его помощью надёжно обнаруживаются большое количество заболеваний, в том числе онкологических, фиксируются диффузные изменения в печени и в поджелудочной железе, в почках и предстательной железе, в желчном пузыре и т. д.

7.4.3. Ультразвуковая очистка деталей

Указанный способ очистки поверхности твёрдых тел основан на возбуждении в моющем растворе колебаний ультразвуковой частоты и их кавитационном воздействии на поверхности очищаемых изделий.



Рис. 7.9. Ультразвуковая ванна для очистки деталей

Представим следующую проблему. Нужно очистить и отполировать несколько килограммов деталей часов, полученных методом штамповки. Все они имеют сложную форму, покрыты слоем масла, применяемого в процессе их изготовления. Поверхности деталей имеют заусенцы, неизбежные при значительном деформировании деталей, малые размеры и широкий ассортимент. И понятно, что только применением всевозможных моющих средств, вручную такую работу качественно выполнить невозможно.

В процессе их ультразвуковой очистки и полировки все требующие помывки детали помещаются в сетку и опускаются в ультразвуковую ванну (рис. 7.9). И уже через некоторое время достаются тщательно отмытыми и отполированными без всяких затрат человеческого труда. Разве это не фантастика? И, тем не менее, здесь всё правда.

В основе указанного метода лежат достаточно сложные процессы, сочетающие в себе кавитацию с действием акустических течений, акустокапиллярным эффектом, радиационным давлением. И всё это приводит к разрушению загрязнений и к отделению их от поверхности очищаемого тела. В результате действия ультразвукового полирования все шероховатости на поверхности деталей исчезают, а микротрещины — заживают. Диапазон частот ультразвуковых аппаратов для очистки лежит в пределах 20—40 кГц; интенсивность ультразвуковых колебаний обычно составляет 0,5—5 Вт/см².

В этой связи неудивительно, что в настоящее время ультразвуковая очистка получила самое широкое применение. С помощью неё можно чистить как крупногабаритные, так и мелкие детали. Важнейшим достоинством ультразвуковой очистки является возможность отмывать детали сложной формы, в том числе с полостями и с отверстиями различного диаметра, глубины и размеров. В частности, ультразвук применяют при очистке труб, металлических фильтроэлементов и др. Причём качество очистки внутренних полостей такое же, как и открытых поверхностей.

Ультразвуковая очистка легко встраивается в любой технологический процесс, в том числе при конвейерном изготовлении изделий. А поскольку при ней не используется ручной труд, её несложно автоматизировать. Поэтому неудивительно, что технология ультразвуковой очистки нашла применение в самых различных областях техники, от тяжелого машиностроения до медицинской и фармацевтической промышленности.

7.4.4. Ультразвуковая пайка

Традиционная пайка представляет собой соединение двух веществ, одно или оба из которых переходят в расплавленное состояние и соединяют детали на молекулярном уровне. При этом смачивание является необходимым условием образования паяного соединения. Наряду с хорошо смачиваемыми материалами, такими как медь и серебро, в промышленности применяются также материалы, которые смачиваются припоем плохо или не смачиваются им вовсе. Это, в первую очередь, алюминиевые сплавы, нержавеющая сталь, керамика, пластмассы, стекло и т. п.

Кроме того, технологические процессы формирования паяльных соединений в электротехнике до настоящего времени не являются надёжными. В самом деле, от 50 до 80 % всех отказов оборудования происходит вследствие некачественного соединения токопроводов с деталями и друг с другом. В результате зачастую происходит не только обрыв проводов, но и местный их разогрев, выводящий из строя элементы приборов. Для надёжного припоя применяют сложные флюсы, места соединения нагреваются до высоких температур, что чревато выходом из строя полупроводниковых элементов. И вместе с тем все эти проблемы можно разрешить с помощью ультразвука.

Принцип работы ультразвуковых паяльных систем основан на передаче ультразвука через наконечник паяльника в точку пайки подобно тому, как это показано на рис. 7.10. При этом трение, возникающее на соприкасающихся поверхностях, способно привести к их местному разогреву и плавлению. С другой стороны, если при таком нагреве вследствие высокой температуры плавление материалов не происходит, тогда применяют специальные припои и (или) тепловой нагрев области соединения. Причём кавитация, обусловленная мощными ультразвуковыми волнами в образованных таким образом расплавах, разрушает окисную пленку материалов и позволяет проводить их пайку без применения флюса.

Ультразвуковая сварка производится при температурах, значительно меньших температуры плавления, поэтому соединение деталей происходит в твёрдом состоянии. С помощью ультразвука можно сваривать многие металлы и сплавы, другими методами не сплавляемые (медь, молибден, тантал, титан, многие типы сталей), надёжно приваривать друг к другу тонкие и толстые детали. При ультразвуковой сварке

минимально изменяются свойства металлов в зоне сварки, требования к качеству подготовки поверхности значительно ниже, чем при других способах сварки.

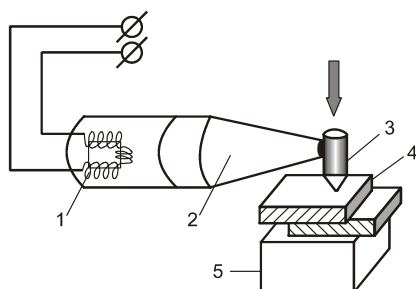


Рис. 7.10. Ультразвуковой сварочный агрегат с концентратором: 1 — преобразователь; 2 — концентратор; 3 — ударник; 4 — свариваемые детали; 5 — подложка

Кроме пайки в настоящее время всё шире используют ультразвуковое лужение, металлизацию поверхности изделий, позволяющие получать высококачественные соединения и стойкие покрытия. В частности, осуществлять металлизацию другими материалами алюминия, нержавеющей стали, большинства материалов и сплавов, применяемых в электронике, пайку керамики со стеклом, металлизацию керамики, полимерных материалов и пр. В этой связи указанные ультразвуковые технологии находят всё большее применение.

7.4.5. Ультразвуковое сверление

Наложение ультразвуковых колебаний на режущий инструмент — резец, сверло, метчик и т. д., улучшает условия резания (рис. 7.11).

В самом деле, работа при резании металла затрачивается, главным образом, на пластическую деформацию срезаемого слоя и на внешнее трение на рабочих гранях резцов. В то же время ультразвуковые колебания, сообщаемые режущему инструменту, могут оказывать значительное воздействие на основные составляющие работы резания. Так, создаваемые ими знакопеременные напряжения ускоряют движение инструмента и детали относительно друг друга. Они способствуют образованию дислокаций, обеспечивающих появление пластической деформации при более низких напряжениях, чем без применения ультразвука. А циклические перемещения контактирующих поверхностей вызывают периодический разворот векторов сил трения на рабочих гранях инструмента, что значительно уменьшает сопротивление сходу стружки и облегчает процесс стружкообразования.

В настоящее время технология наложения ультразвуковых колебаний на режущий инструмент применяется



Рис. 7.11. Ультразвуковой сверлильный станок

при проведении следующих видов работ: резание (строгание, токарная обработка, фрезерование, сверление, нарезание резьбы и пр.), гравировка, шабрение, полировка, спиливание, выглаживание, пробивка отверстий и др. Во всех указанных процессах ультразвук обычно подводят к рабочим органам машин (к сверлу, к валкам прокатного стана, штампу прессы, фильере и т. д.) с помощью волноводного концентратора, показанного на рис. 7.10.

Резание на ультразвуковых станках обеспечивает более высокую точность, позволяет получать не только круглые отверстия, но и вырезы сложных сечений (например, треугольных, прямоугольных, эллипсоидальных). При обработке металлов давлением ультразвуковые колебания улучшают условия деформирования, повышают пластичность материалов, снижают необходимые усилия и уменьшают брак.

Эффект действия ультразвуковых колебаний на процессы резания зависит от амплитуды и частоты колебаний, от отношения колебательной скорости и скорости перемещения инструмента относительно заготовки, размеров сечения срезаемого слоя, физико-механических и теплофизических свойств инструмента и заготовки.

Наиболее широкое применение ультразвуковое сверление находит при обработке жаропрочных и титановых сплавов. Использование ультразвуковых колебаний при резании материалов из хрупких неметаллов и полимерных материалов также приводит к повышению качества обрабатываемых поверхностей, к уменьшению нагрева материалов, снижению вероятности "сколов" (для хрупких неметаллов) и "подтёков" (для полимеров), увеличивает срок службы инструмента. Кроме того, оно позволяет повысить производительность обработки в 2—3 раза и увеличить стойкость инструмента в 1,5—2 раза.

7.4.6. Другие направления технологического применения ультразвука

Перечислить все направления, в которых использование ультразвуковых колебаний приносит громадный технологический, энергетический, временной и финансовый эффект, не представляется возможным. В частности, при ультразвуковом поверхностном упрочнении деталей повышаются их микротвёрдость и износостойкость, снижается шероховатость поверхности. Данную обработку применяют, в частности, для упрочнения стальных колец турбогенераторов, дисков турбин, турбинных лопаток и пр.

При этом стоимость операций, проводимых с применением ультразвука, как правило, понижается, а качество изделий существенно растёт. Ультразвук применяют при обработке металлов и сплавов в твёрдом состоянии, что приводит к "разрыхлению" их структуры и к искусственному старению. При прессовании металлических порошков с применением ультразвука детали приобретают более высокую плотность и однородность.

Если в расплавленный металл вводят ультразвуковые колебания, тогда при его кристаллизации заметно измельчается зерно, уменьшается пористость, повышается

однородность (рис. 7.12). Более того, имеющиеся в расплаве примеси, шлаки и газовые включения могут "сдуваться" акустическим течением, что в значительной мере повышает эксплуатационные характеристики отливок, их однородность и чистоту. С его помощью понижаются остаточные напряжения в изделиях и пр.

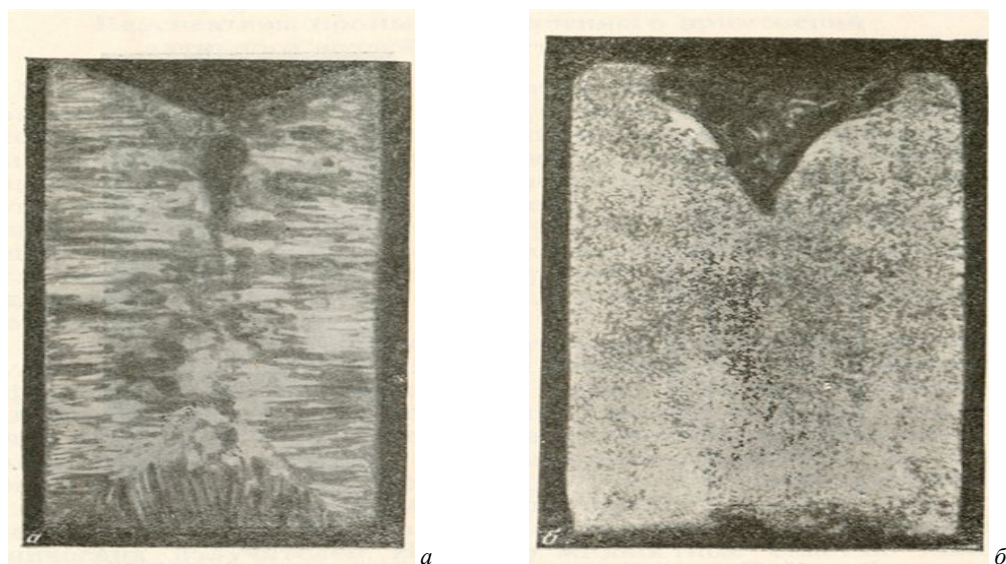


Рис. 7.12. Шлиф отливки хромистого сплава: *а* — обычная отливка, на которой видны крупные кристаллы; *б* — отливка, застывшая в поле ультразвука, наблюдается равномерная мелкокристаллическая структура

Известны и другие способы использования технологического ультразвука. Так, применение его позволяет значительно ускорить смешивание различных жидкостей и получить устойчивые эмульсии (даже такие, как вода и ртуть). Воздействием ультразвука большой интенсивности на жидкость можно получать тонкодисперсные аэрозоли высокой плотности. Под его действием значительно ускоряется процесс гальванического осаждения металлов и сплавов и т. д.

Ультразвуковые колебания высокой интенсивности обеспечивают по крайней мере 10- и даже 1000-кратное ускорение процессов, протекающих между жидкими и жидкодисперсными средами (растворение, дегазация, пропитка, эмульгирование, экстрагирование, кристаллизация, полимеризация, предотвращение образования накипи и др.).

Например, сравнительно недавно начали применять ультразвук для пропитки электротехнических намоточных изделий, и это позволило сократить её время примерно в 35 раз, заменить 2—3-кратную пропитку одноразовой. При этом не только увеличивается выход полезных продуктов (в частности, экстрактов), но в ряде случаев им придаются дополнительные свойства (в частности, повышается

биологическая активность и стерильность). Кроме того, удастся получить вещества с новыми свойствами (тонкодисперсные эмульсии и суспензии и пр.).

В поле ультразвука повышается интенсивность горения и увеличивается КПД использования топлива в тепловых двигателях. Производится коагуляция (слипание друг с другом) молекул аэрозолей и вредных выбросов, что является весьма перспективным при организации безотходных технологий и улавливания вредных примесей. Осуществляется диспергирование (измельчение) порошков, что может найти применение при изготовлении деталей из керамики. Ультразвук применяется в стиральных машинах, при сушке пищевых продуктов, при конструировании специального хирургического инструмента, исключающего потерю крови пациентами во время операций. С его помощью осуществляется уничтожение микроорганизмов и стерилизация инструментов в медицине. И ещё многое другое.

Складывается впечатление, что ультразвук способен делать всё или почти всё.

Глава 8

Электрические явления в твёрдых телах

8.1. Элементы зонной теории твёрдых тел

В соответствии с планетарной моделью атома Бора, его электроны вращаются по орбитам, расположенным на различных расстояниях от ядра, и обладают тем большей энергией связи, чем ближе они от него находятся. Причём существуют вполне определённые значения энергий, которые связанные с ядром электроны могут иметь. Их называют энергетическими состояниями или энергетическими уровнями. Именно от них во многом зависит поведение как электронов, так и самих материалов.

В самом деле, на близких к ядрам орбитах электроны не могут оторваться от них, поскольку для этого им требуется громадная энергия. Поэтому самыми зависимыми от сторонних воздействий являются электроны, расположенные на внешних орбитах. Такие электроны называют валентными. И если ядро оказывается изолированным от других ядер, тогда указанные электроны обладают вполне конкретными энергетическими состояниями.

Однако если атомы располагаются в кристаллической решетке, т. е. находятся на небольших расстояниях r относительно друг друга, как показано на рис. 8.1, тогда электроны начинают взаимодействовать между собой. В результате их энергетические уровни объединяются или, как говорят, расщепляются.

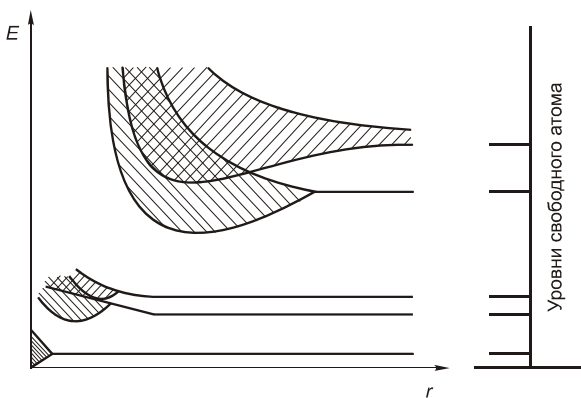


Рис. 8.1. Энергетические зоны связанных и свободных электронов

Таким образом, в твёрдых телах внутренние электроны атомов в целом ведут себя так же, как и в изолированных атомах. Валентные и близкие к ним электроны "коллективизированы" и принадлежат всему материалу.

Причин такого поведения энергетических уровней электронов несколько. Так, электрон, принадлежащий одному атому, в твёрдом теле не может не подвергаться электрическому воздействию со стороны соседних атомов. Причём с одной стороны он притягивается к их ядрам, а с другой — отталкивается их электронами. Кроме того, в силу принципа запрета Паули, два электрона разных атомов, даже находясь на идентичных орбитах, тем не менее, не могут быть строго в одном и том же энергетическом состоянии. Поэтому их энергетические уровни начинают несколько различаться между собой.

С третьей стороны, поскольку валентные электроны связаны с собственными ядрами слабее, чем внутренние электроны, они способны переходить от одного атома к другому сквозь потенциальные барьеры, разделяющие их, без изменений полной энергии кристаллической решётки. Это приводит к тому, что среднее время жизни связанного валентного электрона τ (примерно 10^{-8} с) по сравнению с таковым у изолированного атома становится существенно меньшим и примерно равным 10^{-15} с. Вместе с тем время жизни электрона связано с вариацией его энергии соотношением неопределённостей Гейзенберга, согласно которой $\Delta E \approx h/\tau$, где h — постоянная Планка. Поэтому если естественная ширина спектральных линий изолированного электрона оказывается равной примерно 10^{-7} эВ, то в кристаллах она уже составляет от 1 до 10 эВ (один электрон-вольт соответствует энергии, приобретаемой электроном при прохождении разности потенциалов, равной одному Вольту, $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

В результате вместо вполне конкретного энергетического уровня изолированных электронов возникает энергетическая зона связанных электронов. Она состоит из такого числа отдельных, близко расположенных энергетических уровней, сколько указанных электронов находится в атомах данного кристалла. Так, в кубическом сантиметре натрия содержится примерно 10^{22} атомных ядер, поэтому таковым и будет число уровней в его энергетической зоне. При этом увеличение числа атомов в образце не приводит к расширению энергетической зоны, а вызывает лишь уплотнение уровней в самой зоне.

В связи с этим энергетическая разница между соседними уровнями в зоне оказывается столь ничтожной, что всю зону можно считать практически непрерывной. Формируемую таким образом энергетическую зону называют *валентной*. И обычно такая зона заполнена имеющимися в атомах валентными электронами. При этом энергетические уровни внутренних электронов либо совсем не расщепляются либо расщепляются слабо, как это показано на рис. 8.1.

С другой стороны, энергетические уровни, на которых могут располагаться орбитальные электроны атомов, не ограничиваются энергией реально существующих валентных электронов. В каждом атоме имеются уровни энергии, на которых в свободном состоянии электроны отсутствуют, но в принципе находиться они там могут. Поэтому при формировании твёрдых тел эти области ведут себя точно так

же, как валентные энергетические уровни, т. е. также образуют зоны. Они получили название *разрешённых* или *зон проводимости*. И вот почему.

Как уже отмечалось, валентная зона обычно полностью заполнена электронами, а поэтому их энергетические состояния меняться не могут. В этой связи валентные электроны должны обязательно располагаться в пределах собственных атомов. Однако если вдруг каким-либо образом электроны попадают в зону проводимости, тогда они уже могут вести себя совершенно свободно. Вырваться за пределы атомов, наращивать свою скорость под действием самых незначительных энергетических воздействий, в том числе радиации, тепла и т. п. В случае приложения к образцу внешней разности электрических потенциалов такие электроны начинают дружно "маршировать" в одном направлении, создавая, таким образом, электрический ток. Поэтому данная зона и получила название *зоны проводимости*.

В этой связи возникает вполне закономерный вопрос: каким образом валентные электроны могут попадать в зону проводимости?

Как видно из рис. 8.1, в зависимости от расстояний между ядрами, в некоторых случаях валентная и разрешённая энергетические зоны располагаются на значительном удалении друг от друга, а в других — на небольшом и даже способны перекрывать друг друга. Энергетическая область, разделяющая указанные зоны, получила наименование *запрещённой*. В такой зоне электроны находиться не могут и именно от её ширины зависят электрические свойства материалов.

В самом деле, все тела, в зависимости от их электрических свойств, условно можно отнести к одной из трех групп: проводники, полупроводники и диэлектрики. И в соответствии с положениями представленной здесь зонной теории, все они различаются между собой именно шириной запрещённой зоны. Данное положение демонстрируется на рис. 8.2.

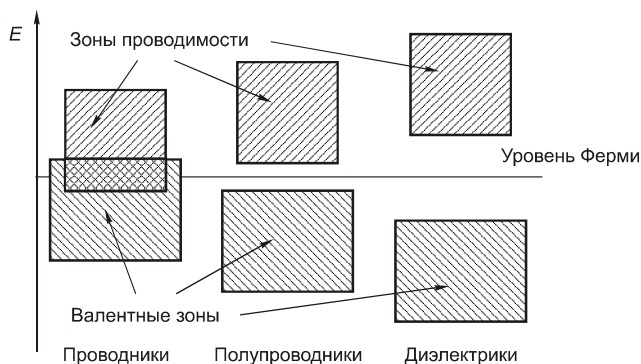


Рис. 8.2. Особенности деления твёрдых тел на проводники, полупроводники и диэлектрики

Действительно, ширина запрещённых зон у различных веществ неодинакова. Она определяется материалом, из которого состоит кристалл, а также характером его структуры. В частности, у металлов эти зоны перекрываются, а поэтому их валентные электроны свободно покидают свои атомы. У полупроводников ширина

запрещённой зоны невелика. В частности, у германия она составляет примерно 0,7 эВ, у кремния — 1,09 эВ. Более значительной является запрещённая зона у диэлектриков и у близких к ним материалов. У них она способна достигать величины 3 — 5 эВ и даже больше. Например, у оксида цинка она равна 3 эВ, у алмаза — 5,6 эВ.

Переход электронов между соседними зонами, которые разделены запрещёнными участками шириной до 1 эВ, возможны при поглощении ими нужной для этого энергии или под влиянием тепловых колебаний атомов. При обычных температурах ($T = 300$ К) последняя невелика и составляет примерно 0,025 эВ. Её недостаточно, чтобы электропроводность чистых проводников была значительной. В диэлектриках ширина запрещённой зоны велика настолько, что тепловые колебания атомов могут сообщать электронам энергию, достаточную для перехода в зону проводимости, только при очень высоких температурах, при которых само существование диэлектрика в твёрдом состоянии становится невозможным.

Строго говоря, изложенная зонная теория справедлива только для кристаллических твёрдых тел. В случае аморфных тел, вследствие разупорядоченности их структуры, разработка строгой теории сталкивается со значительными трудностями.

8.2. Металлы

К металлам относятся простые вещества, образованные атомами элементов, имеющих небольшое число (от 1 до 4) электронов на внешнем энергетическом уровне. В периодической системе Д. И. Менделеева из 110 известных элементов 87 являются металлами. Атомы металлов имеют, как правило, большие атомные радиусы, наибольшие из которых принадлежат щелочным металлам. Большинство металлов химически активны, т. е. их атомы легко отдают электроны и служат хорошими восстановителями. В соединениях металлы проявляют положительную степень окисления, а с неметаллами образуют химическую связь ионного характера. В виде простого вещества атомы металлов связаны между собой описанной ранее (разд. 1.2.4) металлической связью.

Все металлы обладают рядом сходных физических черт, отличающих их от неметаллов. В частности, чем больше валентных электронов имеет металл, тем он твёрже, прочнее его кристаллическая решётка, выше температура плавления и кипения.

Металлы имеют либо серебристо-белый цвет (алюминий, серебро, никель), либо серебристо-серый (железо, свинец). Только золото жёлтого цвета, а медь — красного.

По технической классификации металлы условно делятся на чёрные и цветные. К чёрным относятся железо и его сплавы, все остальные металлы называются цветными. За исключением ртути все металлы являются твёрдыми и имеют кристаллическую структуру, поэтому температуры их плавления выше нуля по Цельсию. При этом металлы, плавящиеся при температурах свыше 1600 °С, называют тугоплавкими, к ним относятся молибден, титан, хром и др. Наиболее тугоплавким является вольфрам (3380 °С). Среднеплавкими с температурой плавления от 600 до 1600 °С считается почти половина металлов, в том числе магний, алюминий, железо, никель, медь, золото.

Легкоплавкими (температура их плавления не превышает $600\text{ }^{\circ}\text{C}$) являются цинк, олово, свинец, висмут и др. Наиболее легко плавятся цезий ($28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), галлий ($29,78\text{ }^{\circ}\text{C}$) и рубидий ($39\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ртуть плавится при $-39,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому при обычных температурах она ведёт себя как жидкость.

Металлы обладают разной твёрдостью. Самый твёрдый из них — хром (режет стекло), а самые мягкие — калий, рубидий и цезий, они легко режутся ножом. Все металлы являются пластичными и обладают ковкостью. Причём наиболее ковким металлом является золото, из него можно выковать фольгу толщиной $0,1\text{ }\mu\text{м}$ — в 500 раз тоньше человеческого волоса. Пластичность металлов используется при их прокате, при штамповке деталей сложной формы. Пластичностью не обладают марганец и висмут, это хрупкие металлы.

По плотности металлы разделяются на тяжёлые и легкие. Тяжёлыми считаются металлы, плотность которых больше 5 г/см^3 . В частности, к ним относятся железо, никель, медь, цинк, олово и др. К очень тяжёлым (с плотностью более 10 г/см^3) — молибден, вольфрам, золото, свинец и др. Самым тяжёлым является осмий ($22,61\text{ г/см}^3$). В промышленности широкое распространение получили лёгкие металлы магний, алюминий и титан. Наиболее лёгкими являются литий, натрий и калий. Их плотность меньше единицы, поэтому они способны плавать в воде.

Металлы характеризуются высокой электро- и теплопроводностью. В наибольшей степени такими качествами обладает серебро, далее по убывающей идут медь, золото, алюминий, железо и др. Хорошая электропроводность металлов объясняется присутствием в них свободных электронов, которые под влиянием даже небольшой разницы потенциалов приобретают направленное движение от отрицательного полюса источника тока к положительному. Причём металлы с высокой электропроводностью имеют и высокую теплопроводность. Теплопроводность обуславливается высокой подвижностью свободных электронов и колебательным движением атомов, благодаря которым в массе тела происходит быстрое выравнивание температуры.

Некоторые металлы проявляют магнитные свойства. Хорошо намагничиваются железо, кобальт, никель и их сплавы. Такие металлы и сплавы называются ферромагнитными.

Рассмотрим классическую теорию электропроводности металлов и установим, от чего она зависит. При этом полагаем, что основу металлов составляет кристаллическая решётка, в узлах которой положительно заряженные ионы совершают беспорядочные колебательные движения. Эта решётка погружена в "электронный газ", электроны которого совершают хаотическое движение, время от времени сталкиваясь с решёткой и друг с другом.

Когда металл помещают в электрическое поле, на электроны действует сила Кулона, сообщаящая им ускорение, направленное против вектора напряжённости внешнего электрического поля, поскольку сами они имеют отрицательный электрический заряд. В результате электроны одновременно участвуют в двух видах движений, одно из которых является тепловым и для него характерна средняя длина свободного пробега, которую они способны в среднем проходить без соударений. А другое движение — упорядоченным и направленным против вектора напряжённости внешнего электрического поля.

Величину средней скорости теплового движения электронов в электронном газе, расположенном внутри кристаллической решётки металлов, можно оценить с помощью классической формулы $v_{cp} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$, где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, а m — масса электрона. При обычных условиях эта скорость равна примерно 100 км/с.

Для оценки направленной или максимально возможной дрейфовой скорости электронов $v_{D\max}$ воспользуемся законом сохранения импульса, согласно которому $v_{D\max}m = f\tau$, где τ — время между двумя соударениями электронов при их тепловом движении, f — сила, действующая на электроны со стороны электрического поля. Причём $f = eE$, где E — напряжённость внешнего электрического поля. Откуда следует: $v_D = \frac{e\tau}{2m}E$. Здесь принято во внимание, что $v_D \approx v_{D\max}/2$.

Время между последовательными соударениями электронов определяется длиной их свободного пробега λ и равно $\tau = \lambda/v_{cp} = \lambda\sqrt{\frac{\pi m}{8kT}}$. При обычных температурах длина свободного пробега невелика и имеет величину от 1 до 10 ангстрем (10^{-10} м), т. е. близка к расстоянию между ионами в кристаллической решётке металлов. Однако при низких температурах длина свободного пробега может иметь значительно бóльшую величину.

Отсюда можно оценить среднее значение дрейфовой скорости электронов под действием реально возможных напряжённостей электрического поля. Оказывается, что она равна примерно $v_D \approx 10^{-3}$ м/с, т. е. на восемь порядков меньше, чем тепловая скорость электронов. И, следовательно, если мы отправляем телеграмму из Санкт-Петербурга во Владивосток, то именно с такими скоростями перемещаются по проводам электроны, несущие эту телеграмму. А быстро по назначению она приходит потому, что на самом деле передаётся не электронами, а связанными с ними электромагнитными волнами, которые распространяются со скоростью света, т. е. $3 \cdot 10^8$ м/с.

Рассмотрим, от каких факторов зависит электропроводность металлов. Для этого воспользуемся известным законом Ома в дифференциальной форме: $j = env_D = \sigma E$. Здесь j — плотность электрического тока, e — заряд электрона, n — число электронов в единице объёма металла, которая примерно равна 10^{29} м $^{-3}$. Параметр σ представляет собой коэффициент электропроводности. Откуда получаем: $\sigma = \frac{e^2 n \lambda}{2m v_{cp}}$. Указанная формула была впервые выведена физиком Друдом и получила его имя.

Очевидно, что если бы электроны не сталкивались с ионами решётки, длина их свободного пробега, а следовательно, и проводимость были бы значительно большими. Электрическое сопротивление металлов, таким образом, обусловлено, прежде всего, соударениями свободных электронов с ионами.

Современная физика твёрдого тела базируется на представлениях квантовой механики, согласно которым для описания свойств электронного газа применяется квантовая статистика, отличная от статистики Максвелла — Больцмана, использованной при выводе формулы Друде. Вместе с тем приведённая ранее теория не потеряла своей полезности до настоящего времени, поскольку отдельные её результаты поражают своей точностью, а методы являются физически наглядными.

Металлические проводниковые материалы разделяются на материалы высокой проводимости и материалы высокого сопротивления. Материалы с высокой проводимостью используются для изготовления проводов, обмоток электрических машин и аппаратов, электроизмерительных приборов и т. д. К ним относятся, в первую очередь, медь, алюминий и их сплавы с другими металлами.

Материалы высокого сопротивления применяются в электронагревательных устройствах, лампах накаливания, реостатах и пр. Таковыми являются нихром, константан, никелин, манганин, вольфрам и всевозможные их сплавы.

8.3. Экспериментальные основы электропроводности металлов

Тот факт, что носителями тока в металлах являются электроны, на заре развития теории электричества требовал экспериментального подтверждения. И одним из таких явился опыт, выполненный немецким физиком Карлом Виктором Эдуардом Рикке в 1901 году. Его целью было получить ответ на вопрос, участвуют ионы металлов в переносе электрических зарядов или электрический ток обусловлен другими носителями?

Для установления этого два одинаковых по объёму и по форме проводника из меди и один из алюминия были соединены последовательно, как показано на рис. 8.3. И в течение года по ним пропускали громадный электрический заряд, равный $3,5 \cdot 10^6$ К. После этого систему проводников разобрали и обследовали. Предстояло выяснить, проходили ли ионы проводников под действием тока в соседние проводники или нет, а если проходили — то по направлению тока или против него?

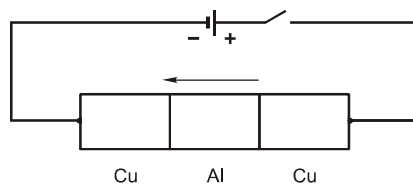


Рис. 8.3. Опыт Рикке

Опыт показал, что никаких изменений в проводниках не произошло. Разумеется, под влиянием диффузии наблюдался переход некоторой части ионов одного материала в другой, но он был точно таким же, как и при отсутствии электрического тока. Таким образом, опыт подтвердил выводы теории, согласно которой электрический ток в цепи не сопровождается переносом вещества, а носителями электрического тока в металлах является то общее, что присутствует во всех металлах, т. е. их свободные заряды.

Для доказательства того, что указанными зарядами могут быть только электроны и никакие другие носители тока, явились результаты опыта, выполненного

в 1913 году Петербургскими физиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. Идея эксперимента заключалась в следующем. Если носители тока в металлах на самом деле обладают массой и являются свободными, тогда они должны подчиняться законам инерции и двигаться вместе с металлом. Поэтому если металл разогнать, а затем резко затормозить, тогда свободные заряды по инерции продолжат своё движение и в цепи появится кратковременный электрический ток.

Для опыта применялась катушка с намотанным на неё медным проводом, которая вначале раскручивалась до высокой скорости, а затем тормозилась. В этот момент электрическая цепь, в которой располагалась катушка, замыкалась и по ней начинал течь ток, обусловленный продолжающими двигаться электронами. Первоначально в качестве измерителя тока применялся телефон, в нём при торможении катушки был слышен звук, обусловленный импульсом тока. Аналогичный эффект имел место при разгоне катушки.

Данный опыт был повторен в 1916 году американскими учёными Р. Толменом и Б. Стюартом, однако в качестве измерителя они уже использовали баллистический гальванометр, способный фиксировать величину прошедшего в цепи заряда (схема их установки показана на рис. 8.4). И данное обстоятельство позволило получить нужные количественные характеристики носителей электрического заряда.

Проделано это было следующим образом. При торможении вращающейся катушки на каждый носитель заряда e действует тормозящая сила $F = -m \frac{dv}{dt}$, где v — скорость перемещения проводника, которая играет роль сторонней силы неэлектрического происхождения.

По определению, сторонняя сила, отнесённая к единице заряда, равна напряженности $E_{сТ}$ поля сторонних сил, т. е. $eE_{сТ} = F = -m \frac{dv}{dt}$. Откуда следует:

$$E_{сТ} = -\frac{m}{e} \frac{dv}{dt}.$$

Под её воздействием в цепи возникает электродвижущая сила ε , равная $\varepsilon = E_{сТ}L = -\frac{m}{e}L \frac{dv}{dt}$, где L — длина провода. За время торможения катушки по цепи протекает электрический заряд q , равный $q = \int Idt = \frac{1}{R} \int_0^0 \varepsilon dt = \frac{m}{e} \frac{Lv_0}{R}$. Здесь I — мгновенное значение силы тока в катушке, R — полное сопротивление цепи,

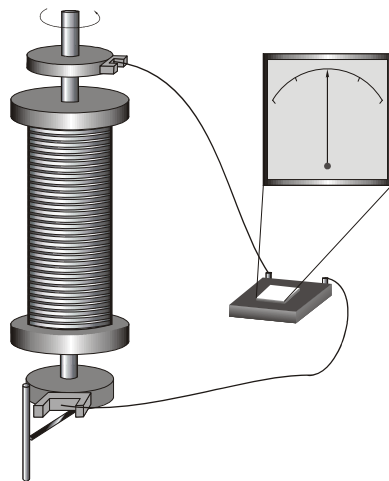


Рис. 8.4. опыты Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси, а также Р. Толмена и Б. Стюарта

v_0 – начальная линейная скорость перемещения проволоки. Отсюда удельный заряд свободных носителей тока в металлах становится равным $\frac{e}{m} = \frac{Lv_0}{Rq}$.

Все величины, входящие в правую часть этого соотношения, можно легко измерить, заряд q находился с помощью баллистического гальванометра. В результате было установлено, что носители свободного заряда в металлах имеют отрицательный знак, а отношение заряда носителя к его массе соответствует электрону, параметры которого были получены из других опытов. Таким образом, было однозначно доказано, что носителями свободных зарядов в металлах действительно являются электроны, а их ионы в прохождении электрического тока не участвуют.

8.4. Работа выхода и эмиссия электронов.

Двойной электрический слой.

Термоэлектронная эмиссия

Итак, электроны проводимости в металлах обычно находятся в беспорядочном движении. Причём их скорости в среднем достигают величины 100 км/с. Отсюда вполне логично задать вопрос, почему при столь высоких скоростях все электроны не вылетают из металлов и не распространяются в окружающем их пространстве? Ведь очевидно, что каждый электрон не привязан к металлу какими-либо нитями, он совершенно свободен в своих действиях и всю толщу образца способен пролететь за малые доли секунды. И он не может не стремиться делать это. Чтобы разобраться в данном феномене, рассмотрим последствия подобного поведения электронов.

Понятно, что как только отрицательно заряженный электрон вылетает за пределы электрически нейтрального куска металла, последний тут же приобретает равный ему по величине положительный заряд. А поэтому между таким "резвым" электроном и поверхностью металла сразу же возникает кулоновская сила притяжения, которая будет стремиться вернуть "беглеца" в толщу "родного ему" металла. Нет никакого сомнения, что ей это удаётся, в противном случае все металлы были бы заряжены положительно, и электронов в них не было бы вовсе. Очевидно также, что это не останавливает других "беглецов", а поэтому процесс бегства электронов из металлов и возвращения их обратно происходит постоянно.

В результате формируется динамическое равновесие, при котором вблизи поверхности металлов располагается электронное облако, образованное сменяющими друг друга электронами, а сама поверхность металлов обладает постоянным положительным электрическим зарядом. Поэтому вблизи металла возникнет двойной электрический слой, который окружает его со всех сторон, как показано на рис. 8.5. И это справедливо не только для металлов, но и для всех других тел, в которых имеются свободные заряды. И не только при погружении тел в воздух, но и в другие среды.



Рис. 8.5. Двойной электрический слой на поверхности металлов

Данное обстоятельство оказывает громадное воздействие на всё поведение твёрдых тел. В частности, именно такое происходит с сосудами человека, когда внутри них пульсирует кровь. Перемещаясь вместе с нею при работе сердца, электронное облако, сконцентрированное вблизи стенок кровеносных сосудов, излучает электромагнитные волны, которые воспринимаются индукционными катушками при снятии электрокардиограммы.

Таким образом, между зарядами, образующими двойной электрический слой, возникает разность потенциалов, направленная против движущихся из металлов электронов. И если электроны вырываются в пространство между слоями, тогда дальнейшему их продвижению будут препятствовать как положительные заряды, расположенные на границе твёрдого тела, так и силы отталкивания отрицательно заряженных электронов, образующих облако второго электрического слоя. И таким образом внутри всего объёма металлов формируется потенциальная яма, препятствующая электронам свободно их покидать.

Разность потенциалов между зарядами двойного электрического слоя, как у всякого плоского конденсатора, можно оценить с помощью формулы $\Delta\phi = \sigma d / \epsilon_0$, где σ — поверхностная плотность образованных таким образом зарядов, d — среднее расстояние между слоями, а $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная. Поэтому чтобы преодолеть её, электрон должен совершить работу, равную $A = e\Delta\phi$, которую называют **работой выхода**.

Величина работы выхода для чистых материалов составляет до 2 и даже до 5 эВ. Понятно, что указанная работа может производиться электронами только за счёт уменьшения их кинетической энергии, поэтому медленно движущиеся электроны вырываться из металлов не смогут. Работа выхода зависит от химической природы металлов и от состояния их поверхности. И поэтому всякие загрязнения поверхности, следы влаги, краски, ржавчины и пр. изменяют её величину.

Таким образом, электрон проводимости может вылететь из какого-либо металла только в том случае, когда его энергия превышает работу выхода A . Явление испускания электронов металлами называется **электронной эмиссией**.

Концентрация n_0 электронов проводимости в металлах весьма велика. Их тепловые скорости при обычной температуре велики, различны и распределены по величине в соответствии с законом Максвелла. Это означает, что даже при небольших температурах в металлах имеется некоторое количество электронов проводимости, способных совершить работу выхода и вылететь из металла. При этом работа выхода электронов соответствует убыли их кинетической энергии,

т. е. $A = e\Delta\phi = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}$, где m и e — соответственно, масса и заряд электрона,

v_1 и v_2 — скорости электрона до и после вылета из металла.

Таким образом, при обычных температурах количество электронов, имеющих скорость, достаточную для вылета за пределы металлов, невелико. В то же время существуют способы сообщения электронам дополнительной энергии, необходимой для их удаления из металлов. К таковым, в частности, относится нагревание проводников, вследствие чего появляется заметное испускание ими электронов. Данное явление получило название **термоэлектронная эмиссия**.

К данному состоянию приводит также облучение металлов видимым и ультрафиолетовым светом, результатом которого становится **фотоэлектронная эмиссия электронов**. Аналогичными свойствами обладают ускоряющее внешнее электрическое поле, под влиянием которого возникает **автоэлектронная** или **холодная эмиссия**, а также бомбардировка металлов электронами, ионами или электромагнитными волнами.

Понятно, что если металл помещают в постоянное электрическое поле, тогда зарождается как бы "электронный ветер", выдувающий электроны с поверхности проводников. И в таком случае двойной электрический слой может не успевать образовываться. Указанное свойство широко применяется в электронных приборах.

В настоящем разделе рассмотрим более подробно термоэлектронную эмиссию. Для того чтобы получить значительный поток электронов, их источник (его ещё называют эмиттером) нагревают до температуры порядка $2000 \div 2500$ К.

Для исследования термоэлектронной эмиссии можно использовать установку, состоящую из двух электродов — анода A и эмиттера (катода) K , которые, чтобы они быстро не сгорели, помещены в вакуум (рис. 8.6). Катод в ней выполнен из нити, анод — в виде коаксиального цилиндра. Катод подогревается с помощью специальной батареи накала B_n . Анодная батарея B_a служит для создания электрического поля E_{BH} между катодом и анодом.

Когда нить разогрета, тогда ею излучается электронное облако, несущее отрицательный заряд. В результате включения батареи анода B_a поток электронов начинает двигаться между катодом и анодом, т. е. в цепи начинает протекать электрический ток. Сила тока зависит от температуры нити, от напряжения U_a , которое создаёт анодная батарея, от материала катода и от геометрии электродов. Зависимость анодного тока, регистрируемого гальванометром G , от анодного напряжения $I = f(U_a)$ называется *вольтамперной характеристикой установки*.

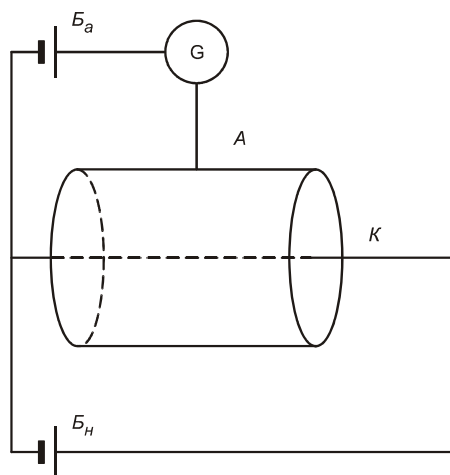


Рис. 8.6. Установка для исследования термоэлектронной эмиссии

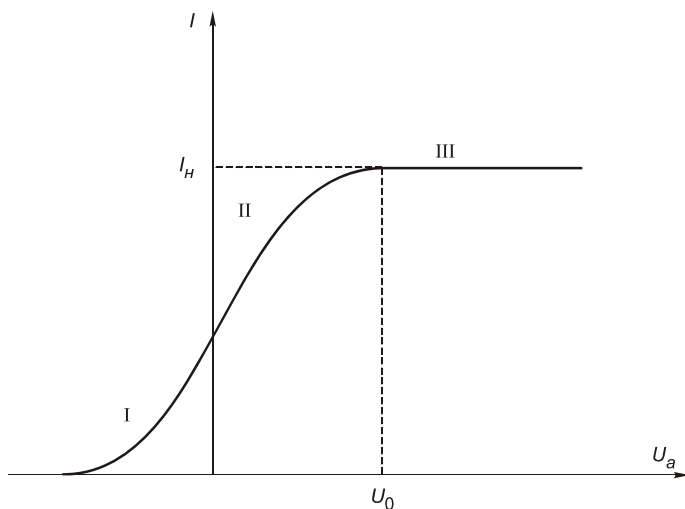


Рис. 8.7. Вольтамперная характеристика установки

Данную характеристику можно снять экспериментально, поддерживая напряжение накала постоянным и изменяя напряжение U_a . Она имеет вид, показанный на рис. 8.7.

На данной характеристике можно выделить три участка. Область I соответствует тому случаю, когда к электродам прикладывается задерживающая разность потенциалов (к аноду подключается отрицательный полюс батареи), т. е. поле E препятствует перемещению электронов к аноду. Однако ток в цепи всё же идёт, потому что часть электронов, вылетающих из раскалённой нити, обладает кинетической энергией, достаточной для преодоления задерживающей разности потенциалов. Эта часть вольтамперной характеристики называется *кривой задержки*.

Помимо электрического поля $E_{БН}$, создаваемого анодной батареей, между катодом и анодом существует также поле, обязанное своему возникновению летящим электронам. Они, двигаясь от катода к аноду, создают объёмный заряд, который тормозит другие электроны при их вылете из катода и ускоряет их при подлёте к аноду, если он заряжен положительно. При увеличении разности потенциалов U_a тормозящее поле будет уменьшаться. Поэтому всё большее количество электронов начинает долетать до анода и сила тока растёт (область II).

При некотором значении разности потенциалов $U_a = U_0$ все вылетающие при данной температуре из катода электроны уже будут достигать анода. Поэтому дальнейшее повышение напряжения U_a не приведёт к увеличению анодного тока I . Сила тока становится постоянной (область III). Такой ток называется *током насыщения*. Причём сила тока насыщения, при прочих равных условиях, всегда зависит от температуры эмиттера, с ростом температуры она увеличивается.

В самом деле, согласно квантовой теории, явление термонасыщения описывается формулой $j_{нас} = AT^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}}$, где $j_{нас}$ — плотность тока насыщения, теоретиче-

ское значение $A \approx 1.2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2\text{град}$, экспериментальное значение указанной величины является примерно в два раза меньшим. T — абсолютная температура, $e\phi$ — работа выхода, а k — постоянная Больцмана.

Термоэлектронная эмиссия находит широкое применение при работе электронных ламп и других электронных приборов.

8.5. Фотоэлектронная эмиссия. Красная граница фотоэффекта

Фотоэлектронная эмиссия — это испускание электронов твёрдыми телами или жидкостями под воздействием света или рентгеновского излучения. Данное явление впервые наблюдалось в 1887 году Г. Герцем. Схема установки и её вольтамперная характеристика показаны на рис. 8.8.

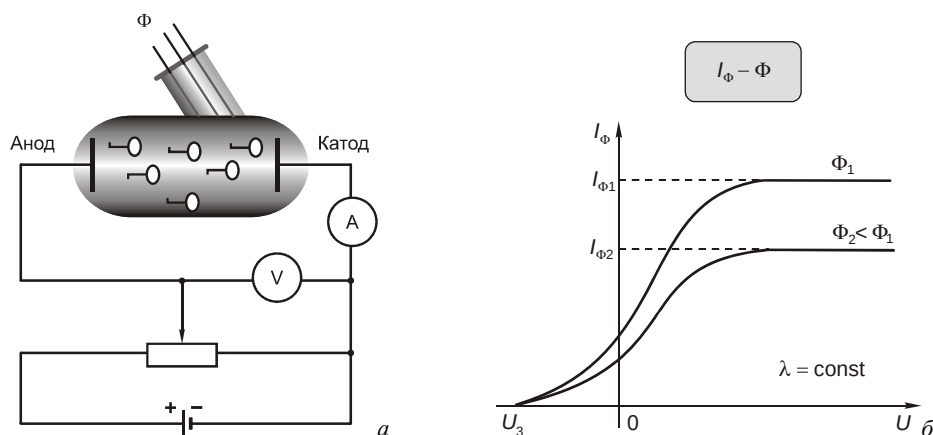


Рис. 8.8. Установка для измерения фотоэффекта (а) и её вольтамперная характеристика (б)

Суть явления заключается в следующем. Анод и катод лампы помещаются в стеклянный баллон, из которого выкачан воздух. Поэтому в обычных условиях между ними никаких носителей тока нет, а электрическая цепь разомкнута. Но как только на катод начинает падать световое излучение, такие носители возникают и в цепи появляется электрический ток. Отчего это происходит?

Фотоэффект можно представить как результат следующих процессов. Внутри материала катода имеется много свободных электронов. Падающие световые фотоны проникают на глубину катода и при встрече с электронами сообщают им дополнительную энергию. При этом часть данной энергии может рассеиваться в результате их взаимодействия с другими электронами или с дефектами металла, а также при столкновении с ионами его кристаллической решётки. А часть идёт на увеличение кинетической энергии электронов. Вследствие этого некоторые электроны получают возможность преодолеть потенциальный барьер на границе раздела металлов и окружающей среды, совершить работу выхода и вылететь за пределы

катода. Именно они и становятся носителями зарядов, осуществляющих электрическую связь катода с анодом.

Энергия $w = h\nu$, которую фотон сообщает электрону, затрачивается им на совершение работы выхода A и на кинетическую его энергию, т. е. $h\nu = A + mv^2/2$, где h — постоянная Планка, ν — частота колебаний фотона, m — масса электрона, а v — развиваемая им скорость после вылета из катода. При этом нетрудно видеть, что энергия фотонов зависит исключительно от частоты падающего света.

Как следует из приведённой на рис. 8.8 вольтамперной характеристики, эмитируемые электроны способны не только служить носителями электрического тока, но и двигаться против поля, когда заряды анода и катода меняются на противоположные. Такое может происходить только в том случае, когда кинетическая энергия вылетевших электронов способна преодолеть силы кулоновского отталкивания, создаваемые внешним источником тока. Причём в момент, когда кинетическая энергия движущихся электронов оказывается равной нулю, ток прекращается. Очевидно, что при этом $h\nu_0 = A$, где ν_0 — граничная частота фотонов, с которой возможно появление фототока. Её называют *красной границей фотоэффекта*, поскольку при меньших частотах светового излучения фототок возникнуть не может при любой интенсивности света. При этом у разных металлов красная граница фотоэффекта неодинакова.

Данную границу можно установить экспериментально, измеряя величину напряжения U_3 , при которой фототок прекращается, с помощью установки, приведённой на рис. 8.8. В таком случае $A = h\nu_0 = eU_3$, откуда следует $\nu_0 = eU_3/h$. И отсюда, подставляя полученное решение в приведённое ранее равенство, получаем:

$$\frac{mv^2}{2} = h(\nu - \nu_0).$$

Из данного выражения следует, что фототок возможен тогда и только тогда, когда частота падающих на катод фотонов оказывается большей, чем частота красной границы фотоэффекта. Если же энергия фотона (т. е. его частота) будет меньше значения, соответствующего красной границе фотоэффекта, тогда квантовый выход электронов из мишени равен нулю и фотоэффект не наблюдается.

Экспериментально доказано, что при увеличении частоты света квантовый выход вначале растёт, достигая максимума при некоторой частоте, а затем уменьшается. При ещё большем росте частоты фотонов может опять наблюдаться медленный рост квантового выхода. Указанный характер зависимости связан с энергетическими состояниями свободных электронов и наблюдается только у мишеней из металлов.

Рассмотрим работу ранее приведённой установки рис. 8.8 более подробно. Пусть источник тока вначале отсутствует, т. е. $U = 0$. В таком случае из катода под действием фотонов вырывается часть электронов, по цепи течёт какой-то ток и катод заряжается положительно. Вылетевшие электроны образуют отрицательно заряженное облако вблизи катода, из которого большая часть электронов возвращается обратно на катод. И только часть электронов попадает на анод. Они и создают наблюдаемый ток.

Если увеличивать напряжение, тогда по мере его роста всё большее число электронов в секунду падает на анод. Вблизи катода облако из электронов редет, а ток в цепи растёт. При достаточно большом внешнем электрическом поле, направленном от катода, облако из электронов вблизи него исчезает полностью. Когда все электроны, вырывающиеся из металла катода, будут попадать на анод, наступает насыщение и дальнейшее усиление напряжения не приводит к увеличению тока. Таким образом, ток насыщения определяется тем количеством электронов, которые вырываются из металла. И только если интенсивность света увеличивается, растёт и ток насыщения.

При частоте света, меньшей красной границы, энергии фотонов не хватает на преодоление потенциального барьера и фотоэффект не наблюдается.

Отсюда можно сформулировать следующие основные законы фотоэффекта:

- количество электронов, испускаемых в единицу времени, пропорционально интенсивности света (закон Столетова);
- для каждого вещества при определённом состоянии его поверхности существует красная граница фотоэффекта. При более низкой частоте фотонов фотоэлектронная эмиссия отсутствует;
- максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растёт с частотой света и не зависит от его интенсивности (закон Эйнштейна).

Все сформулированные законы относятся к внешнему фотоэффекту. Но кроме него ещё может наблюдаться внутренний фотоэффект. При нём бомбардировка катодов осуществляется направленным потоком электронов или ионов. Но он в настоящей работе не рассматривается.

8.6. Контактная разность потенциалов

8.6.1. Внешняя контактная разность потенциалов

Данное явление представляет собой разность электрических потенциалов, возникающую между электронейтральными телами в условиях их термодинамического равновесия. В наибольшей мере оно характерно для металлов и полупроводников.

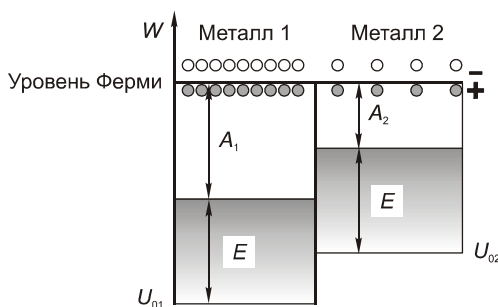


Рис. 8.9. Схема, поясняющая природу внешней контактной разности потенциалов

Рассмотрим физическую природу контактной разности потенциалов. Как известно, электроны в металлах располагаются в глубине потенциальной ямы, создаваемой двойным электрическим слоем вблизи их поверхности. Пусть у металла 1 и у металла 2 разные глубины потенциальных ям, а именно $U_{01} > U_{02}$. То есть работа выхода электронов A_1 у первого металла больше, чем у второго A_2 . Однако кинетические энергии электронов у обоих металлов E одинаковы, поскольку их температуры одни и те же. При этом отсчёт энергий будем вести от так называемого уровня Ферми, который определяется валентными зонами металлов и одинаков у каждого из них, как показано на рис. 8.9.

В результате при контакте металлов электроны из более высокого уровня металла 2 начнут переходить на более низкие уровни металла 1. Поэтому металл 1 заряжается отрицательно, а металл 2 — положительно. При этом одновременно происходит относительное смещение энергетических уровней: в металле, заряженном положительно, когда все уровни смещаются вниз. А в металле, заряженном отрицательно, — вверх.

Однако у самих соприкасающихся металлов работы выхода A_1 и A_2 электронов не меняются (они являются константами металлов и не зависят от того, находятся металлы в контакте или нет). Поэтому потенциальная энергия электронов в точках, лежащих вне металлов в непосредственной близости к их поверхности, будет неодинаковой. В результате между металлами устанавливается разность потенциалов, равная

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{A_1 - A_2}{e}.$$

Именно её и называют *внешней контактной разностью потенциалов*. Причём величина её может достигать несколько вольт.

На первый взгляд, данную разность потенциалов можно использовать в качестве бесплатного источника тока. То есть можно надеяться, будто включение между металлами электрической лампочки приведёт к её постоянному горению. Но на самом деле это не так. И объясняют данное обстоятельство следующими законами, сформулированными итальянским учёным А. Вольтом.

- Между двумя различными материалами возникает контактная разность потенциалов, величина которой зависит только от их свойств.
- При последовательном соединении нескольких проводников их общая контактная разность потенциалов определяется исключительно работами выхода первого и последнего проводников.

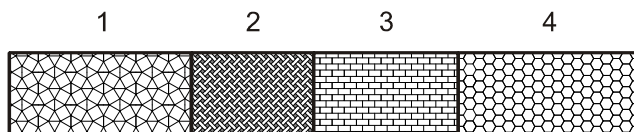


Рис. 8.10. К объяснению внешней контактной разности потенциалов системы последовательно соединённых проводников

В самом деле, рассмотрим систему проводников с разными работами выхода, как показано на рис. 8.10. При этом получаем: $\phi_{14} = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{A_2 - A_3}{e} + \frac{A_3 - A_4}{e} = \frac{A_1 - A_4}{e}$.

Поскольку любая электрическая цепь является замкнутой, тогда первый проводник с неизбежностью замыкается на самого себя, и поэтому общая разность потенциалов замкнутой цепи всегда равна нулю. Таким образом, использовать данный эффект в качестве бесплатного источника электрического тока не удастся.

Тем не менее внешняя контактная разность потенциалов играет громадную роль при работе металлов. В самом деле, наличие достаточно большой разности потенциалов на общей границе металлов приводит к тому, что эта граница интенсивно притягивает к себе всякие агрессивные компоненты из окружающей среды. В результате границы металлов становятся слабым местом любой инженерной конструкции, они быстрее всех корродируют, разрушаются.

Как пример, некоторые умельцы в недавнем прошлом припаивали медные листы к дну кузова своих автомобилей, наивно полагая, что это исключит ржавчину и продлит срок их эксплуатации. Каково же было их удивление, когда такой лист через самое короткое время вываливался из автомобиля целиком. То же самое происходит при соприкосновении титана и стали: титан буквально разъедает сталь. И при многих других случаях. Поэтому грамотному конструктору при проектировании всевозможных машин и механизмов следует стараться применять одни и те же материалы. А если это не удаётся, тогда, пользуясь соответствующими справочниками, нужно брать такие материалы, у которых различия внешних контактных разностей будут минимальными.

Заметим, что внешней контактной разностью потенциалов можно управлять путём соответствующей обработки их поверхности, защиты, применения специальных покрытий и сплавов.

8.6.2. Внутренняя контактная разность потенциалов

Кроме внешней существует также внутренняя контактная разность потенциалов, имеющая совсем другую природу. Её возникновение объясняется следующими обстоятельствами.

Как уже отмечалось, внутри металлов имеется громадное количество свободно перемещающихся электронов, поведение которых описывается обычными газовыми законами. Поэтому давления P_1 и P_2 , создаваемые электронными газами в первом и во втором проводниках, как и у всяких других газов, можно описывать формулами $P_1 = n_1 kT$ и $P_2 = n_2 kT$. Здесь n_1 и n_2 — плотности соответствующих газов, а именно число свободных электронов, заключённых в единице объёма вещества. И вполне естественно, что из металла, давление газа в котором больше, происходит некоторый отток электронов в тот металл, в котором их давление, т. е. концентрация, меньше.

Рассмотрим особенности проявления внутренней контактной разности потенциалов. Пусть имеется два соединённых друг с другом проводника 1 и 2, как пока-

зано на рис. 8.11. Места их контакта обозначим буквами a и b , причём каждый из контактов имеет свою температуру T_a и T_b . Тогда потенциал первого соединения, определяемый неодинаковой плотностью их зарядов, окажется равным $\phi_a = \frac{k}{e} T_a \ln \frac{n_1}{n_2}$, а второго — $\phi_b = \frac{k}{e} T_b \ln \frac{n_2}{n_1}$. В таком случае, принимая во внимание, что $\ln \frac{n_2}{n_1} = -\ln \frac{n_1}{n_2}$, для полученной разности потенциалов находим следующее решение:

$$\Delta\phi = \phi_a - \phi_b = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_a - T_b).$$

Величина $\frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$ у различных металлов примерно одна и та же и равна от 10^{-5} до 10^{-4} В/град, а у полупроводников она составляет примерно $1,5 \cdot 10^{-3}$ В/град. И хотя данная разность потенциалов меньше, чем создаваемая при внешней контактной разности, тем не менее именно она находит широкое применение.

В частности, на рис. 8.12 показана термопара, которая может быть источником термо-ЭДС. В ней один край нагревается, а другой — охлаждается. И это позволяет получать постоянный электрический ток.

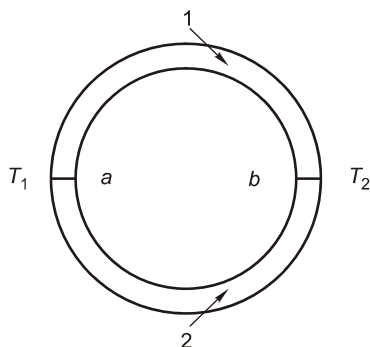


Рис. 8.11. К изучению внутренней контактной разности потенциалов

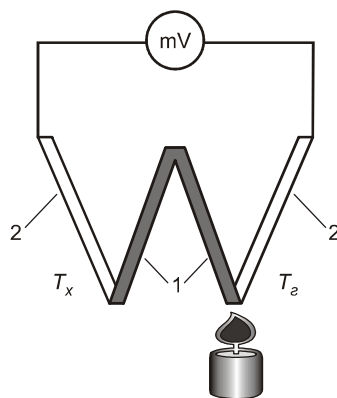


Рис. 8.12. Особенности работы термопары

Кстати, именно такая конструкция применяется для измерения высоких температур, в том числе в процессе выплавки сталей. Для этой цели один край термопары помещается в среду с фиксированной температурой, например в таящий лёд, а другой, изготовленный из тугоплавкого металла, — в расплав измеряемого расплавленного металла. И тогда возникающая при этом ЭДС позволяет с высокой точностью измерять температуру расплава, надёжно контролировать, таким образом, процессы нагрева и охлаждения его.

Но только этим использование данной конструкции не ограничивается. Если через термопару пропускать ток от внешнего источника, тогда один её конец нагревается, а другой — охлаждается. Например, если один её край поместить в помещение, а другой — наружу, тогда указанную конструкцию можно будет применять в качестве как нагревателя, так и холодильника. А управлять тем, на каком конце термопары желательно получать тепло, а на каком — холод, можно изменением направления тока. Причём чем выше окажется температура вне помещения, тем эффективнее будет охлаждаться само помещение. И наоборот. С другой стороны, если увеличить число последовательно соединённых проводов в термопаре, тогда указанный эффект соответствующим образом возрастет.

Тем не менее, для практических целей нагрева и охлаждения термопары применяют редко, поскольку их КПД обычно не превышает 0,5 %. Здесь более эффективными являются полупроводники, у которых КПД достигает 7 %. И в своё время для геологов, пастухов, кочевников и представителей других бродячих профессий выпускались керосиновые лампы, снабжённые соответствующими полупроводниковыми абажурами. Такие лампы не только позволяли освещать места проживания, но одновременно становились источниками тока для радиоприёмников, походных телевизоров и др.

Глава 9

Техническое использование некоторых свойств твёрдых тел

9.1. Полупроводники, их собственная проводимость

Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. По электрическим свойствам они отличаются от проводников сильной зависимостью от примесей, от температуры и от внешних излучений. А от диэлектриков — способностью переносить электрические заряды. К полупроводникам относятся многие элементы таблицы Д. И. Менделеева, в том числе кремний, германий, мышьяк, гелий, теллур и некоторые другие. Ими являются многие соединения, например оксиды, сульфиды, селениды, сплавы элементов различных групп и др.

В соответствие с рассмотренной ранее зонной теорией (см. разд. 8.1), полупроводниками являются вещества, ширина запрещённой зоны ΔE которых, как показано на рис. 9.1, не превышает нескольких электрон-вольт. Данное утверждение соответствует чистым полупроводникам, в которых нет посторонних примесей, а поэтому их кристаллические решётки не имеют искажений. При температуре $T = 0$ °К валентная зона полупроводников полностью занята электронами, в связи с чем в зоне проводимости электронов нет. Однако если температура полупроводников увеличивается, тогда некоторая часть электронов из-за их тепловых колебаний попадает в зону проводимости и полупроводник становится в некоторой степени проводящим.

С другой стороны, связь электронов с ионами в полупроводниках может быть разорвана не только их тепловым движением, но и различными внешними воздействиями: светом,

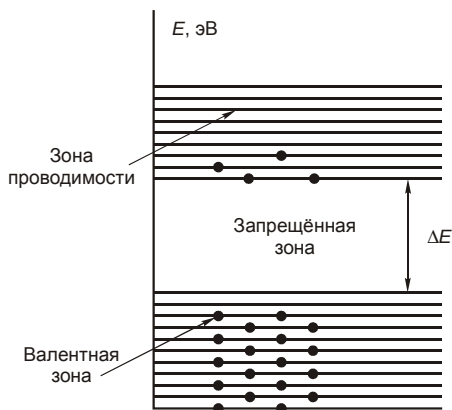


Рис. 9.1. Валентная зона и зона проводимости полупроводников, разделённые запрещённой зоной

потоком быстрых частиц, сильным электрическим полем и т. д. Кроме того, для кристаллов полупроводников характерна высокая чувствительность электропроводности от содержания в них примесей и дефектов. Из-за этого во многих случаях энергия ионизации ΔE для электронов, локализованных вблизи примесей или дефектов, оказывается существенно меньшей, чем в идеальных кристаллах. И всё это позволяет в широких пределах управлять электропроводностью полупроводников, изменением их температуры, введением в них примесей и т. д., явилось основанием для их многочисленных и разнообразных применений.

Кроме того, уход электрона от своего атома нарушает его нейтральность, превращает в положительно заряженный ион, получивший название "дырки". И в результате этого дырка становится вакантным местом, которое может быть занято одним из валентных электронов соседних атомов. А поэтому они, притягивая к себе электроны из других атомов, способны перемещаться внутри полупроводников точно так же, как и электроны. То есть аналогично последним, дырки также становятся носителями электрических зарядов.

Данное утверждение, на первый взгляд, представляется сомнительным, поскольку, в отличие от электронов, атомы, потерявшие заряд, сами по себе передвигаться не могут. На самом деле дырочная проводимость осуществляется следующим образом.

Предположим, что в первом ряду полностью заполненного театрального зала появилось пустое кресло. Тогда человек со второго ряда пересаживается на кресло первого ряда, а пустое кресло, таким образом, перемещается из первого ряда во второй. То же самое может проделать зритель с третьего ряда и пересесть во второй ряд. А с четвёртого — на освободившееся таким образом кресло в третьем ряду и так далее. На самом деле перемещаются люди, но зрителю, сидящему на балконе, будет казаться, будто по залу перемещается пустое кресло. И примерно то же самое происходит внутри полупроводников, движение дырок в них также носит эстафетный характер. Как и в случае с пустым креслом, в действительности перемещаются электроны, однако они создают подвижность вакантных положительных ионов, становящихся, таким образом, носителями соответствующих зарядов.

При этом отметим, что количество свободных электронов всегда равно числу образованных таким образом дырок, то есть сам полупроводник остаётся электрически нейтральным. Просто в одном случае повышенной подвижностью обладают электроны, а во втором — дырки.

При встрече друг с другом свободные электроны и дырки рекомбинируют, взаимно уничтожаются, образуя полноценные нейтральные атомы. Однако вероятность такого сценария не очень велика, а поэтому для чистых полупроводников характерна одновременно как электронная, так и дырочная проводимость.

Таким образом, если в металлах свободные носители имеются в большом количестве при любой температуре, то в полупроводниках они появляются только при условии сообщения энергии извне. Если в металлах ток переносится только электронами, то в полупроводниках и электронами, и дырками. В этом заключается качественное отличие электропроводности полупроводников от электропроводности металлов.

Если при обычной температуре полупроводник попадает в электрическое поле, тогда электроны, находящиеся в зоне проводимости, и дырки в валентной зоне приходят в упорядоченное движение. Причём если при этом дырки перемещаются в направлении электрического поля, то электроны — в обратном к нему направлении.

Зависимость концентрации электронов и дырок от температуры существенно влияет на электропроводность полупроводников при их нагревании. Указанную зависимость можно описать формулой: $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$, где σ — удельная электропроводность полупроводника, ΔE — ширина его запрещённой зоны, а σ_0 — константа, зависящая от вида полупроводника.

Пользуясь указанной формулой, можно определить значения σ_0 и ΔE для любого полупроводника. С этой целью будем последовательно нагревать его до температур T_1 и T_2 , одновременно измеряя соответствующие им электропроводности σ_1 и σ_2 . В результате находим:

$$\ln \sigma_1 = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{2kT_1}, \quad \ln \sigma_2 = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{2kT_2}.$$

Откуда следует:

$$\Delta E = \frac{2k \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}{T_2^{-1} - T_1^{-1}}; \quad \sigma_0 = \sigma_1 \exp \left(\frac{\ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}{\frac{T_1}{T_2} - 1} \right).$$

Таким образом, можно экспериментально определять как ширину запрещённой зоны ΔE проводников, так и их базовую электропроводность σ_0 .

Концентрация свободных носителей заряда в полупроводниках, оставаясь в миллионы раз меньше концентрации свободных носителей тока в проводниках, увеличивается при возрастании температуры, что приводит к росту их электропроводности. В общем случае величина σ в полупроводниках зависит не только от концентрации свободных носителей зарядов, но также от механизма их рассеяния, которое может происходить на тепловых колебаниях атомов (ионов), на нейтральных и заряженных точечных дефектах, на линейных, поверхностных и объёмных дефектах кристаллической решётки.

9.2. Примесная проводимость полупроводников

До недавнего времени полупроводники, с точки зрения использования их электропроводящих свойств, считались бесполезными. Действительно, их нельзя было применять в качестве проводников, поскольку их электропроводность по сравнению с таковой у металлов была ничтожна, а чрезмерная зависимость её от различных обстоятельств делала такие проводники крайне нестабильными. С другой сто-

роны, как электроизоляторы они не выдерживают никакой критики по сравнению с диэлектриками. И только использование специальных примесей сделало полупроводники одними из самых востребованных материалов электротехники.

В самом деле, характерным качеством полупроводников является их сильная чувствительность к примесям. В этой связи рассмотрим поведение четырёхвалентного германия, когда в его кристаллы внедрены атомы других веществ.

Для этого воспользуемся атомами мышьяка, которые являются пятивалентными. При их внедрении в германий, имеющий четыре валентных электрона, пятый валентный электрон мышьяка оказывается незанятым. Он не связан непосредственно с соседними атомами, а поэтому легко отрывается от своего атома, начинает свободно перемещаться внутри кристалла германия. В результате атом мышьяка, потерявший свой электрон, превращается в малоподвижный положительный ион, расположенный в узле кристаллической решётки, а освободившийся таким образом электрон становится свободно перемещающимся носителем тока.

В общем случае примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла, называют **донорной**. Схематически поведение внедрённого таким образом пятивалентного атома примеси показано на рис. 9.2. В результате её внедрения в кристаллах появляется значительное число свободных электронов, что приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводников. Например, если в германий ввести 0,001 % мышьяка, тогда его электропроводность возрастает в 10000 раз.

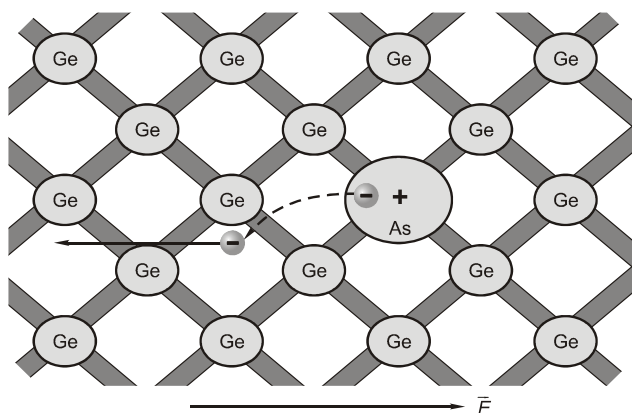


Рис. 9.2. Атом мышьяка в решётке германия. Полупроводник n-типа

Принято считать, что такого рода полупроводники обладают проводимостью n-типа от английского слова negative — отрицательный.

Дырочная проводимость возникает, когда в кристаллы германия вводятся трёхвалентные атомы, например, индия (рис. 9.3). При этом на образование связи с четвёртым атомом германия у атома индия электрона нет. Поэтому такой электрон может быть захвачен атомом индия только из ковалентной связи соседних атомов

германия. И тогда атом индия превращается в малоподвижный отрицательный ион, расположенный в узле кристаллической решётки.

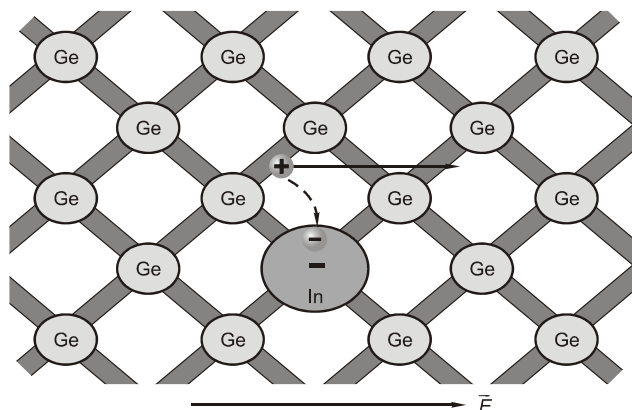


Рис. 9.3. Атом индия в решётке германия. Полупроводник р-типа

Примесь атомов, способных захватывать электроны, называется **акцепторной**. В результате её внедрения в кристалле разрываются ковалентные связи и образуются **вакантные места**, называемые **дырками**. На них могут переходить электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к хаотическому блужданию дырок по кристаллу. Указанные материалы принято называть полупроводниками р-типа от английского слова positive (положительный).

С другой стороны, чем больше атомов примеси, тем большей является электропроводность полупроводников. Но при этом увеличивается их собственная проводимость, что создаёт существенные помехи работе. А поэтому для практического применения полупроводников в них используют минимально необходимое количество примесей.

Рассмотрим тот же самый процесс с точки зрения зонной теории. Согласно ей, внедрение донорных и акцепторных примесей означает введение в полупроводник материалов, валентная зона электронов которых располагается внутри запрещённой зоны полупроводника, как показано на рис. 9.4. В частности, если в германий при ширине его запрещённой зоны $\Delta E = 0,7$ эВ внедряется примесь из донорного мышьяка, энергетический уровень которого отстоит от зоны проводимости германия всего на 0,01 эВ, тогда возникает полупроводник n-типа. Указанная разница энергий настолько ничтожна, что электроны от атомов мышьяка практически свободно переходят в зону проводимости германия, формируя, таким образом, его электронную проводимость.

А если добавляется индий, энергетический уровень которого располагается на 0,01 эВ от валентной зоны германия, тогда образуется полупроводник р-типа. И в таком случае электроны последнего без труда переходят в энергетическую зону индия, образуя, таким образом, дырочную проводимость в самом материале полупроводника.

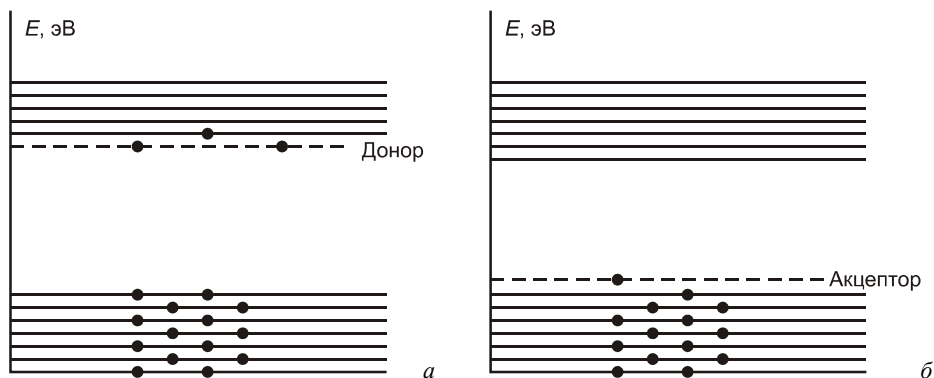


Рис. 9.4. Энергия донорных и акцепторных примесей в полупроводниках

При этом отметим одно важное обстоятельство. Вне зависимости от типа проводимости, все полупроводники остаются электронейтральными. Это значит, что всякому подвижному электрону в полупроводниках *n*-типа соответствует практически неподвижный положительно заряженный ион. А каждой подвижной дырке полупроводника *p*-типа — соответствующий отрицательно заряженный неподвижный ион. Дело, таким образом, заключается не в сообщении полупроводникам того или иного знака избыточного заряда, т. е. превращения его в источник тока, а в возможности делать неподвижными и подвижными те или иные носители тока.

9.3. Полупроводниковые приборы

9.3.1. Диоды

Полупроводниковые диоды состоят из двух типов полупроводников — дырочного и электронного. При контакте между ними из области полупроводника *n*-типа в область полупроводника *p*-типа перемещается некоторое число высокоподвижных электронов, которые рекомбинируют с дырками. Вследствие этого в приграничной области полупроводника *n*-типа возникает недостаток электронов, а в такой же зоне *p*-типа — их избыток. Поэтому в области полупроводника *p*-типа возникает некомпенсированный заряд из отрицательных ионов, а в области полупроводника *n*-типа — такой же заряд из положительных ионов. В этой связи между двумя полупроводниками разных типов устанавливается электрическое поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов из одного типа полупроводника к другому, величина которого достигает 0,3—0,6 В.

Если такой диод включить в электрическую цепь, как показано на рис. 9.5, тогда в первом случае отрицательный потенциал источника подключается к полупроводнику *p*-типа, а положительный — к полупроводнику *n*-типа. Поэтому дырки из первого полупроводника и электроны из 2-го полупроводника устремляются к их клеммам, на границе между полупроводниками образуется недостаток зарядов и ток в цепи прекращается.

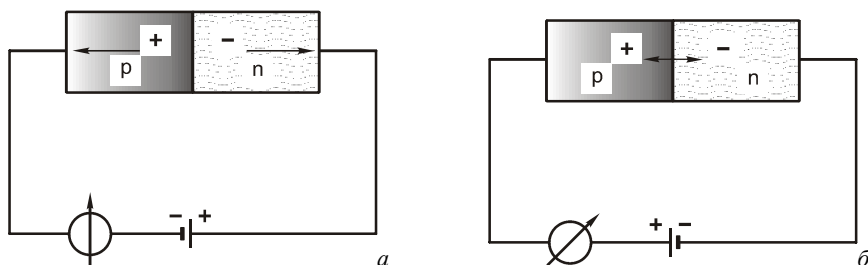


Рис. 9.5. Особенности работы диодов в электрических цепях, образованные различным образом включёнными источниками

Во втором случае и дырки, и электроны бегут навстречу друг другу и рекомбинируют между собой. Однако при этом недостаток и тех, и других не образуется, поскольку указанные заряды в полной мере компенсируются источником. И тогда в цепи течёт устойчивый электрический ток.

В настоящее время полупроводниковые диоды изготавливают из германия, кремния, селена и из других полупроводниковых материалов. Они широко применяются, прежде всего, для выпрямления переменного электрического тока в различных радиосхемах, поскольку по сравнению с лампами, используемыми для этого раньше, обладают рядом преимуществ. Так, такие устройства не требуют специальной цепи накала катода, миниатюрны, недороги и обладают большим сроком службы. Кроме того, их также применяют и для других целей.

9.3.2. Транзисторы

Они представляют собой полупроводниковые устройства, которые состоят из двух областей с полупроводниками р- или n-типа, между которыми располагается область с полупроводником противоположного типа. Таким образом, в транзисторе одновременно присутствуют области и р-n-, и n-p-перехода.

Рассмотрим один из видов транзисторов, изготовленных из германия или кремния с введёнными в них донорными и акцепторными примесями. Распределение примесей в них таково, что они создают очень тонкую (порядка нескольких микрон) прослойку полупроводника n-типа, расположенную между двумя слоями полупроводника р-типа. Данную тонкую прослойку называют основанием или базой.

В результате в кристалле образуются два р-n-перехода, направления токопроводности которых противоположны друг другу. Такие конструкции называют транзисторами р-n-p-типов. Но могут применяться также полупроводниковые приборы, в которых периферические области состоят из полупроводников n-типа, а база — р-типа. Они образуют транзисторы n-p-n-типа. Три вывода от областей с различными типами проводимости позволяют включать транзистор в различные электрические схемы.

При показанном на рис. 9.6 включении левый р-n-переход является прямым и отделяет базу от области с проводимостью р-типа, называемую *эмиттером*. Если бы не было правого n-p-перехода, тогда в цепи эмиттер — база существовал бы ток, зависящий только от напряжения источников (т. е. от батареи B_3 и от ис-

точника переменного напряжения U_{ex}), а также от сопротивления цепи R_{ex} , включая малое сопротивление прямого перехода эмиттер — база.

Батарея B_K включена так, что правый n - p -переход в схеме является обратным. Он отделяет базу от правой области с проводимостью p -типа, называемую *коллектором*. В случае отсутствия левого p - n -перехода сила тока в цепи коллектора была бы близка к нулю, поскольку сопротивление обратного перехода на границе база — коллектор очень велико. Однако при появлении тока в левом p - n -переходе возникает также ток и в цепи коллектора. Причём сила тока в коллекторе лишь немного меньше силы тока в эмиттере.

Происходит это следующим образом. При наличии напряжения между эмиттером и базой основные носители полупроводника p -типа — дырки проникают в базу, где они становятся главными носителями тока. Поскольку толщина базы очень мала и число основных носителей (электронов) в ней невелико, попавшие в неё дырки почти не рекомбинируют с электронами базы и по инерции проскакивают в коллектор. При этом правый p - n -переход закрыт для основных носителей заряда базы, т. е. электронов, но не для дырок. Поэтому в коллекторе дырки увлекаются электрическим полем и замыкают цепь. Таким образом, эмиттер в транзисторе является источником носителей тока, а коллектор преобразует их в полезные сигналы.

Сопротивление резистора $R_{вых}$ мало влияет на ток в коллекторе, поэтому его можно сделать достаточно большим. Управляя током эмиттера с помощью источника переменного напряжения, включённого в его цепь, получают синхронное ему изменение напряжения на резисторе. Поэтому при большом сопротивлении резистора изменение напряжения на нём может в десятки тысяч раз превышать изменение сигнала в цепи эмиттера. Таким образом, в приведённой электрической схеме транзистор выступает как усилитель напряжения, но не тока.

В самом деле, усиления по току при данной схеме включения триода не получается, поскольку ток, идущий через правый переход, оказывается меньше тока, идущего через левый переход. Но, тем не менее, вследствие усиления по напряжению здесь происходит увеличение мощности. И поэтому на нагрузке $R_{вых}$ можно получать электрические сигналы, мощность которых за счёт энергии источника B_K во много раз превосходит мощность, поступающую в цепь эмиттера.

Действие транзистора, таким образом, можно сравнить с управлением плотиной. С помощью постоянного источника (течения реки) и плотины создаётся перепад уровня воды. Поэтому затрачивая очень небольшую энергию на вертикальное перемещение затвора, можно управлять потоком воды большей или меньшей мощности.

Срок службы полупроводниковых триодов и их экономичность во много раз превышает таковые у электронных ламп, а стоимость их изготовления значительно

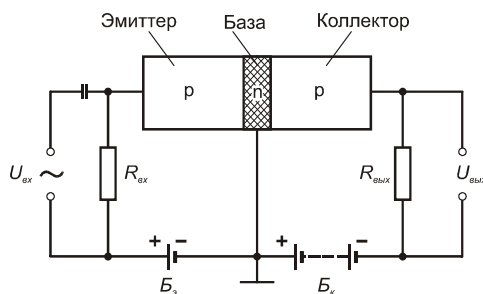


Рис. 9.6. Схема подключения транзистора

ниже. За счёт этого транзисторы нашли широкое применение в микроэлектронике, в теле-, видео-, аудио-, радиоаппаратуре и, конечно же, в компьютерах. Они заменяют электронные лампы во многих электрических цепях научной, промышленной и бытовой аппаратуры.

Более того, за последнее время получены впечатляющие успехи в направлении микроминиатюризации, в результате которых триоды состоят всего из нескольких молекул полупроводников и, таким образом, формируются целые электронные цепи, занимающие ничтожные объёмы и способные производить самые разнообразные операции. Причём основными материалами, из которых изготавливают современные триоды, являются кремний и германий.

Но наряду с положительными качествами, триоды имеют и свои недостатки. В частности, по сравнению с лампами они очень чувствительны к повышению температуры, к электрическим перегрузкам и к различного рода проникающим излучениям.

9.4. Источники рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, длины которых располагаются в пределах от 10^{-14} до 10^{-8} м. Они наблюдались впервые профессором Вюрцбургского университета Вильгельмом Рентгеном в ноябре 1895 года и произвели настоящую сенсацию.

Для их возбуждения до настоящего времени используется трубка, в которой электроны, излучаемые катодом с использованием термоэлектронной эмиссии, разгоняются электрическим полем до высоких скоростей и бомбардируют анод, как показано на рис. 9.7. Здесь использованы следующие обозначения: X — рентгеновские лучи, K — катод, являющийся источником электронов, A — анод (иногда называемый антикатодом), C — система теплоотвода, необходимая для охлаждения анода, нагреваемого электронами при их поглощении анодом. U_h — напряжение накала катода, U_a — ускоряющее электроны напряжение, W_{in} — направление потока водяного охлаждения, W_{out} — выпуск водяного охлаждения.

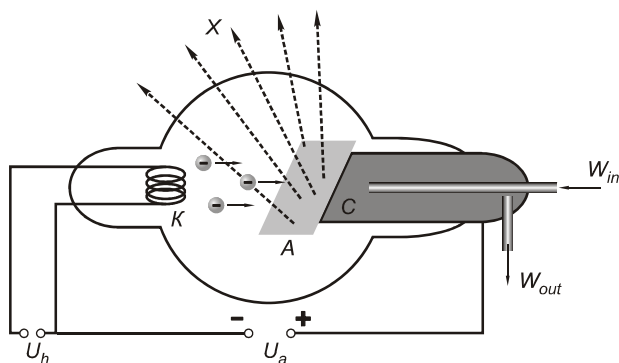


Рис. 9.7. Схематическое изображение рентгеновской трубки

Рентгеновские лучи возникают либо при сильном замедлении заряженных частиц, либо при высокоэнергетичных переходах в электронных оболочках атомов или молекул. Происходит это следующим образом.

Электроны, испускаемые катодом, ускоряются под действием разности электрических потенциалов между анодом и катодом и поступают на анод, представляющий собой мишень. При этом большая часть их кинетической энергии преобразуется в тепло, и только небольшая её доля, обычно меньше 1 %, преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Внутри мишени электроны быстро тормозятся, из-за чего возникает непрерывная часть спектра рентгеновского излучения, показанного на рис. 9.8.

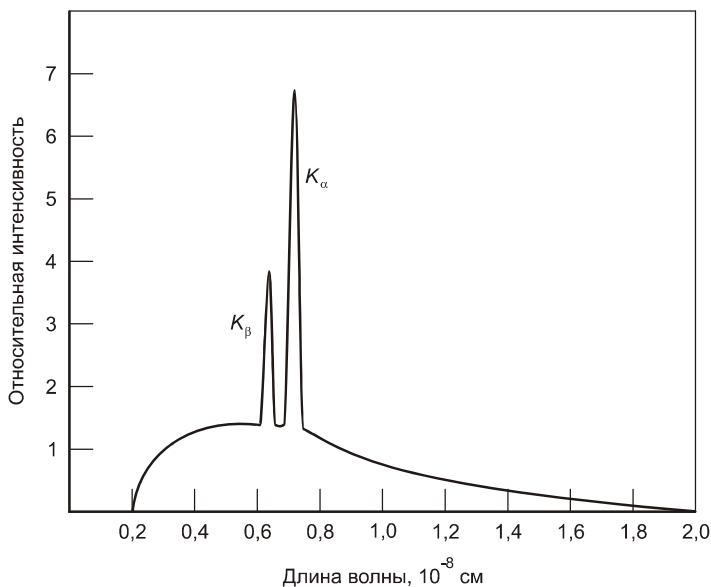


Рис. 9.8. Типичный спектр рентгеновского излучения

С другой стороны, при движении электроны соударяются с атомами вещества, из которого изготовлена мишень, и переводят их электроны на более высокие энергетические уровни. Опустевшие места занимают электроны из других уровней, которым соответствует большая энергия. Однако долгое время в перевозбуждённом состоянии такие атомы находиться не могут, вследствие чего электроны возвращаются на свои первоначальные места, освобождая при этом избыточную энергию в виде квантов рентгеновского излучения (см. рис. 9.9). А поскольку электроны имеют дискретные значения энергии, как показано на рис. 8.1, возникающие рентгеновские фотоны также обладают дискретным спектром, получившим название характеристического. Ему соответствуют острые максимумы излучения, длины волн которых зависят от материала мишени (см. пики K_β и K_α на рис. 9.8).

Таким образом, от каждого анода можно получить два типа излучения, характеристическое и тормозное, каждое из которых играет по-своему важную роль. Одно

из них (дискретное, жёсткое) применяется для получения мощного рентгеновского излучения, а другое (непрерывное) — для излучения сравнительно слабого. Мягкий рентген характеризуется наименьшей энергией фотонов и низкой частотой излучения (т. е. наибольшей длиной волны). Он применяется преимущественно для медицинских целей.

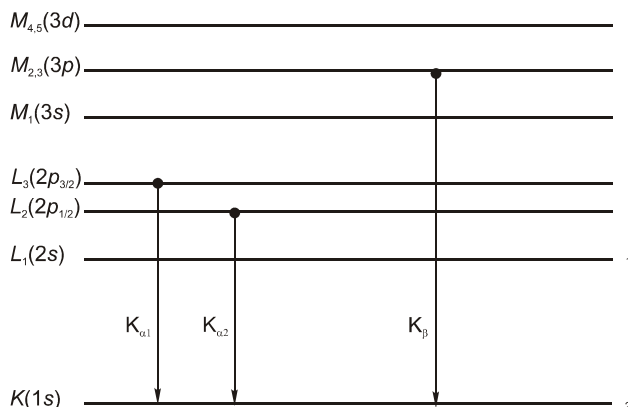


Рис. 9.9. К объяснению характеристического спектра рентгеновского излучения

Жёсткий рентген обладает большей энергией фотонов и высокой частотой излучения (малой длиной волны), используется в основном для промышленных целей. В целом фотоны рентгеновского излучения имеют энергию от 100 эВ до 250 кэВ, что соответствует их излучению с частотой от $3 \cdot 10^{16}$ до $6 \cdot 10^{19}$ Гц и длиной волны от 0,005 до 10 нм.

Рентгеновские лучи обладают целым комплексом свойств. В частности, они способны у некоторых веществ вызывать свечение (т. е. флюоресценцию). Этот эффект используется в медицинской диагностике при наблюдении их изображения на флюоресцирующем экране и при рентгеновской съёмке. Подобно обычному свету, рентгеновские лучи способны засвечивать фотографическую эмульсию. В полупроводниковых диодах они могут производить пары электрон-дырка и др.

При помощи рентгеновских лучей можно "просветить" человеческое тело, в результате чего получают изображения костей, посторонних включений, а в современных приборах также и внутренних органов, как показано на рис. 9.10. Кроме обычных приборов, которые дают двумерную проекцию исследуемого объекта,



Рис. 9.10. Снимок ступни человека, выполненный с помощью рентгеновских лучей

существуют компьютерные томографы, которые позволяют получать объёмное изображение внутренних органов человека, а также реальную геометрию посторонних включений.

Приборы рентгеновского излучения широко применяются для выявления дефектов в самых различных изделиях, в том числе в рельсах, в сварных соединениях и т. д. Их используют для определения структуры веществ на атомном уровне, в том числе для рентгеноструктурного анализа кристаллов твёрдых тел, для наблюдения за структурой ДНК и пр. Кроме того, при помощи рентгеновских лучей можно определять химический состав вещества. В аэропортах применяются рентгено-телевизионные интересоскопы, позволяющие просматривать содержимое ручной клади и багажа в целях визуального обнаружения на экране монитора предметов, представляющих опасность и т. д.

9.5. Оптические квантовые генераторы (лазеры)

Лазер (англ. laser, сокp. от **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation — усиление света посредством вынужденного излучения) представляет собой оптический квантовый генератор и является устройством, преобразующим световую, электрическую, тепловую или химическую энергию в энергию когерентного, монохроматического и узконаправленного излучения.

Обычные источники света, такие как огонь, лампы накаливания и др., излучают свет в разных направлениях с широким диапазоном длин волн. Они некогерентны, то есть частоты и фазы излучаемых ими электромагнитных волн подвержены случайным флуктуациям. Поэтому такие источники без применения специальных мер не могут создавать устойчивую интерференционную картину. Кроме того, излучение незлазерных источников не обладает явно выраженной поляризацией. Напротив, излучение лазера монохроматично и когерентно, а также может быть поляризованным.

Физика работы лазеров заключается в следующем. Известно, что, если валентному электрону, находящемуся на основном энергетическом уровне E_n , каким-либо образом сообщить достаточно большую энергию, тогда атом возбуждается и указанный электрон переходит на один из выше расположенных свободных энергетических уровней. Однако долгое время в таком перевозбуждённом состоянии атом находиться не может. А поэтому перевозбуждённый электрон **спонтанно** (т. е. самопроизвольно) переходит на один из нижележащих уровней, излучая при этом разницу энергии в виде кванта света (фотона).

При этом частота ν_{mn} излучаемого фотона определяется разностью энергии начального E_m и конечного состояния E_n электрона, т. е. $\nu_{mn} = (E_m - E_n)/h$. Именно такие спонтанные процессы излучения происходят в нагретых телах и в светящихся газах, применяемых в настоящее время в качестве искусственных источников света. Нагревание или электрический разряд в них переводят часть атомов вещества в возбуждённое состояние, а при обратных спонтанных переходах они излучают свет. Однако такие кванты не согласованы между собой, имеют разную фазу и не могут быть когерентными.

При этом время, в течение которого электрон способен находиться в перевозбуждённом состоянии до самопроизвольного его разряжения, обычно не превышает 10^{-8} с. Вместе с тем имеется целый ряд материалов, как твёрдых, жидких, газообразных, так и плазменных, в которых атомы могут быть в таком состоянии примерно 10^{-3} с, т. е. на пять порядков дольше. Материалы, обладающие указанными свойствами, называют средой с инверсной населённостью уровней энергии. Такое состояние вещества получило название метастабильного.

С другой стороны, наряду со спонтанным излучением возбуждённых атомов существует **вынужденное** (или индуцированное) излучение. При его возникновении возбуждённые электроны способны переходить в первоначальное состояние и излучать свет не самопроизвольно, а под воздействием других фотонов. Причём энергии падающих фотонов для этого должны быть строго идентичны энергиям квантов света, излучаемых электронами, находящимися в метастабильном состоянии.

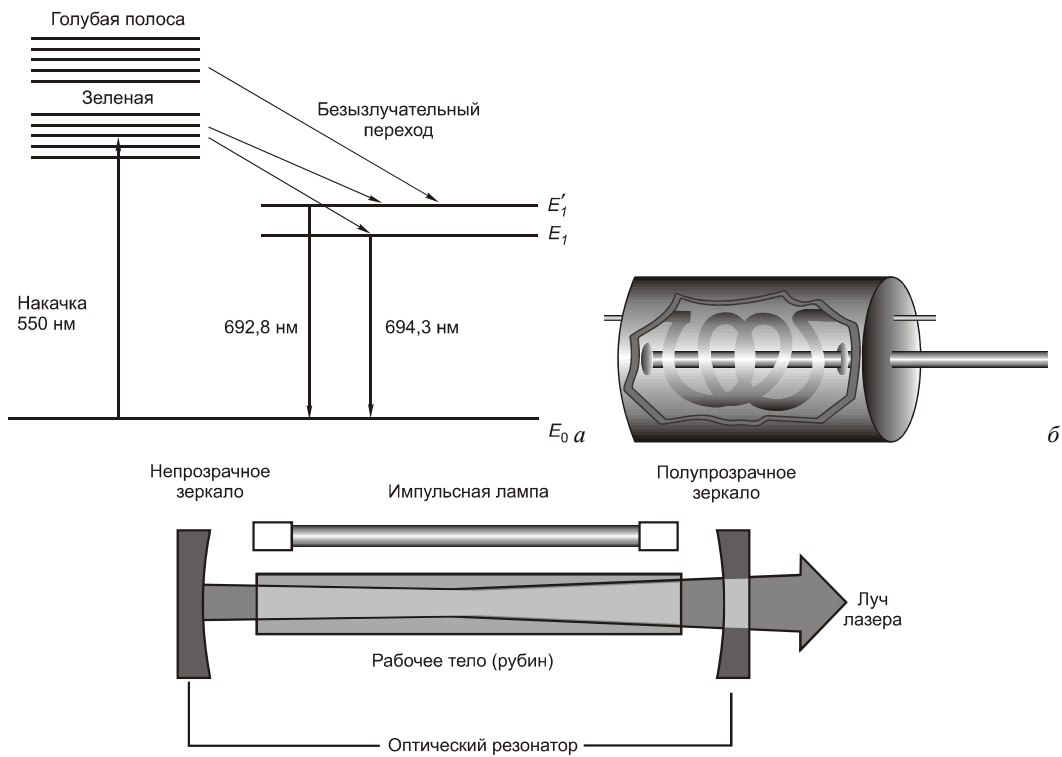
При этом происходит следующее. Как только сторонний квант света попадает на возбуждённый атом, он практически мгновенно заставляет этот атом излучить запасённую им избыточную энергию. И тогда уже одновременно начинают распространяться два фотона, падающий и излучённый. Причём данные кванты оказываются не только когерентными, но и одинаково поляризованными. Более того, они распространяются строго в том же направлении, что и падающие фотоны. То есть таким образом происходит умножение, энергетическое усиление световой волны.

Данные свойства нашли использование в лазерах. В качестве примера рассмотрим конструкцию лазера, представленную на рис. 9.11. В нём в качестве рабочего тела применяют рубин, который представляет собой окись алюминия Al_2O_3 , в котором часть атомов замещена атомами хрома Cr_2O_3 . Причём активным веществом служат ионы хрома, именно от его содержания в кристалле зависит его окраска. Обычно используют бледно-розовый рубин, содержащий около 0,05 % хрома.

Для создания инверсной населённости рабочего тела лазера используются различные источники. В частности, в твёрдотельных лазерах она осуществляется за счёт облучения мощными газоразрядными лампами, как показано на рис. 9.11 и демонстрируется на рис. 9.12, либо сфокусированным солнечным излучением, воздействием других лазеров (например, полупроводниковых). В газовых и жидкостных лазерах используется накачка электрическим разрядом.

Такие лазеры работают в непрерывном режиме. Накачка химических лазеров происходит посредством протекания в их активной среде химических реакций. Существуют и другие методы возбуждения. При этом энергия накачки должна превышать определённый порог. Иначе потери в резонаторе будут превышать усиление и выходная мощность окажется незначительной.

Под их воздействием в рубиновых лазерах атомы хрома приобретают энергию, достаточную для перехода в голубую и зелёную зоны, как показано на рис. 9.11, а затем переходят на метастабильные уровни энергии E_1 . Часть атомов, находящихся на указанном энергетическом уровне, самопроизвольно разряжается, испуская при этом фотоны в разных направлениях. Причём те из них, которые распространяются строго вдоль оси рубинового стержня, попадают в оптический резонатор, а остальные теряются или возвращаются обратно на стержень с помощью специальных оптических систем.



Рубиновый лазер

6

Рис. 9.11. Схема работы (а) и конструкции рубинового лазера (б, в)

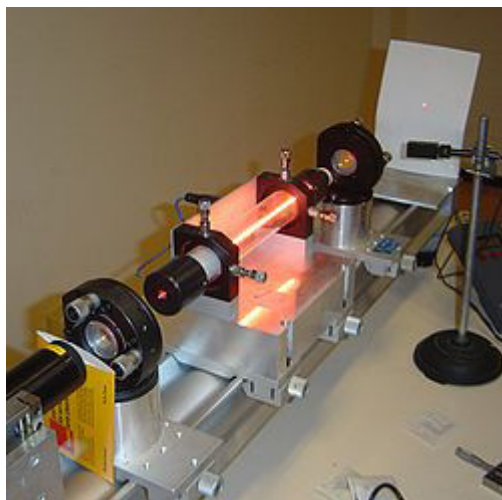


Рис. 9.12. Вид работающего лазера

Оптический резонатор представляет собой два прямых или подфокусированных зеркала, расположенных строго параллельно друг другу. И попадая между ними, фотоны начинают бегать вдоль рубинового стержня, разряжая, таким образом, другие возбуждённые атомы и экспоненциально размножаясь. А поскольку у одного зеркала резонатора отражающая способность достигает 100 %, а у другого — примерно 90 %, лучи света начинают выходить через второе стекло за пределы оптического резонатора.

Кроме описанных, имеются и активно применяются также полупроводниковые лазеры, но они имеют другую конструкцию.

Генерируемое лазером излучение является монохроматическим (с одним или с дискретным набором длин волн). Лазеры способны генерировать свет как в инфракрасной, так и в видимой, и в ультрафиолетовой областях спектра. Но они могут работать и в других частотных диапазонах, даже в рентгеновском. Причём лучи лазера могут быть непрерывными, с постоянной амплитудой или импульсными. Для этого используются различные приборы (лампы-вспышки, вращающиеся призмы, нелинейные стёкла, ячейки Керра и др.), позволяющие быстро выключать и включать обратную связь и уменьшать, тем самым, длительность импульсов, создавая излучение очень большой мощности.

В некоторых схемах рабочий элемент лазера используется в качестве оптического усилителя излучения другого источника. Другие типы лазеров, например, на растворах красителей или полихроматические твердотельные, могут генерировать целый набор частот (т. е. мод оптического резонатора) в широком спектральном диапазоне. Габариты лазеров разнятся от микроскопических до лазеров, имеющих размеры, соизмеримые с футбольным полем.

С момента своего изобретения лазеры зарекомендовали себя как "готовые решения ещё не известных проблем". В силу уникальных свойств излучения они широко применяются во многих отраслях науки и техники, а также в быту (проигрыватели компакт-дисков, лазерные принтеры, считыватели штрихкодов, лазерные указки и пр.). В промышленности лазеры используются для резки, сварки и пайки деталей из различных материалов. Высокая температура, создаваемая лазерными лучами, позволяет с их помощью сваривать материалы, которые невозможно спаивать обычными способами (к примеру, керамику с металлом).

Лучи лазеров могут быть сфокусированы в точку диаметром порядка микрона, что позволяет использовать их в микроэлектронике. Лазеры используются для получения поверхностных покрытий материалов (лазерное легирование, лазерная наплавка, вакуумно-лазерное напыление) с целью повышения их износостойкости. Широкое применение получила лазерная маркировка промышленных образцов и гравировка изделий из различных материалов. При лазерной обработке веществ на них не оказывается механическое воздействие, поэтому возникают лишь незначительные термические деформации. Кроме того, весь технологический процесс может быть полностью автоматизирован, в связи с чем он характеризуется высокой точностью и производительностью.

Лазеры применяются в голографии для создания голограмм и для получения объёмного изображения. Лазеры на красителях способны генерировать монохроматические сигналы практически любой длины волны. При этом импульсы излучения

могут иметь длительность 10^{-16} с, а следовательно, излучать огромные мощности. Эти свойства лазеров используются в спектроскопии, а также при изучении нелинейных оптических эффектов. С использованием лазера удалось измерить расстояние до Луны с точностью до нескольких сантиметров, а также установить его фибрилляцию при прохождении Луна над впадинами Земли либо над её горами. В настоящее время изучается возможность с помощью лазеров управлять термоядерным синтезом. В медицине лазеры применяются как бескровные скальпели, при лечении различных заболеваний и пр. Бурно развивается лазерная связь, в том числе по оптическому волокну. Лазеры используются в военных целях, например, в качестве дальномеров, средств наведения и прицеливания. Рассматриваются варианты создания на основе мощных лазеров боевых систем защиты воздушного, морского и наземного базирования.

Таким образом, всякое вновь открытое физическое явление, составляющее основу твёрдых тел, приводит к получению невиданных ранее практических результатов.

Заключение

В настоящее время особенности твёрдых тел изучаются в рамках самых различных дисциплин, в том числе механики, акустики, оптики, электротехники и др. Их применяют для разработки самых разнообразных приборов и оборудования.

В данной книге представлено рассмотрение характеристик твёрдых тел с точки зрения классической физики. А поэтому оно может быть полезным для инженеров, занимающихся изучением и реализацией их свойств применительно к решению самых разнообразных проблем во всех возможных отраслях хозяйства, представляет информацию для разработки и внедрения самых смелых проектов.

Литература

1. Абрикосов А. А. Основы теории металлов. — Наука, 1987.
2. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. — Наука, 1978.
3. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твёрдого тела. Т. 1, 2. — Мир, 1979.
4. Бонд В. А. Технология кристаллов. — Недра, 1980.
5. Васильев Д. М. Кристаллография: учебник для вузов. — СПбГПУ, 2003.
6. Верещагин И. К., Кокин С. М., Никитенко С. М. Физика твёрдого тела. — Высшая школа, 2001.
7. Винтайкин Б. Е. Физика твёрдого тела. — Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
8. Гуревич А. Г. Физика твёрдого тела. — БХВ-Петербург, 2004.
9. Гутов В. А., Осауленко Р. Н. Физика твёрдого тела для инженеров. — Техносфера, 2007.
10. Жданов Г. С., Хунджуа А. Г. Лекции по физике твёрдого тела. — М.: МГУ, 1988.
11. Звелто О. Принципы лазеров. — Мир, 1979.
12. Зиненко В. И., Сорокин Б. П., Турчин П. П. Основы физики твёрдого тела. — Физматлит, 2001.
13. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твёрдых тел: учебное пособие для втузов. — Высшая школа, 2001.
14. Китель Ч. Введение в физику твёрдого тела. — Наука, 1978.
15. Кривцов А. М. Деформирование и разрушение твёрдых тел с микроструктурой. — Физматлит, 2007.
16. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник под ред. В. В. Клюева. — Машиностроение, 1995.
17. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твёрдого тела. — Высш. Шк., 2000.
18. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. — Наука, 2007.
19. Ультразвуковые технологии. Сборник под ред. Б. А. Агранта. — Металлургия, 1974.
20. Физика твёрдого тела для инженеров: учебное пособие для вузов под ред. Л. А. Алешина. — Техносфера, 2007.

Предметный указатель

А

Агрегатное состояние
вещества 3
Акустическая кавитация 80
Акцептор 117
Аморфное тело 6, 50
Анизотропия 6, 7

В

Валентные электроны 93
Волны Дебая 44
Волны плотности 16
Вольтамперная характеристика
установки 103

Г

Гидродинамическая
кавитация 81

Д

Диод 118
Добротность колебательной системы 70
Долговечность тела 50
Донор 116
Дырка 117

З

Закон Гука 48
Закон Дюлонга и Пти 42
Закон Столетова 107
Закон Эйнштейна 107
Законы фотоэффекта 107
Зона проводимости 95

К

Капиллярные явления 22
Кинетическая энергия 4
Ковалентные силы 9
Коллектор 120
Коэффициент поверхностного
натяжения 19
Коэффициент Пуассона 49
Красная граница
фотоэффекта 106
Кристаллит 26, 60
Кристаллическая решётка 28
Кристаллическое тело 6, 50

Л

Лазер 124
Линейные дефекты
в кристаллах 31
Линии Людерса 51

М

Магнитострикция 76
Металлические усы 7
Методы ультразвукового
контроля 83
Модуль Юнга 48
Монокристаллические тела 7

Н

Нагревание тел 3
Напряжения второго рода 60
Напряжения первого рода 58
Напряжения третьего рода 62
Неровности поверхности 37

О

Объёмные дефекты в кристаллах 33
Остаточный ресурс материалов 53
Охлаждение тела 5

П

Пластическая деформация 48
Пластичность тела 51
Плоскостные искажения
кристаллов 33
Поликристаллические тела 7, 35
Полупроводник n-типа 116
Полупроводник p-типа 117
Полупроводники 113
Постоянная Больцмана 50

Р

Растяжение твёрдых тел 47
Рентгеновское излучение 121
Решётки Браве 29

С

Скорость распространения
продольных волн 75
Скорость релаксации жидкости 18
Смачиваемость 22

Т

Температура Дебая 42
Тепловое расширение тел 38
Теплоёмкость 41
Теплоёмкость молярная 41
Теплоёмкость удельная 41
Теплопроводность 43

Термонапряжение 57
Термоэлектронная эмиссия 103
Ток насыщения 104
Точечные дефекты в кристаллах 30
Травитель 32
Транзистор 119
Трещина Гриффитса 67
Триод 120

У

Ударная вязкость 55
Ультразвук 73
Упругие волны 73
Упругость тела 50
Усталость металла 62

Ф

Фонон 45
Формула Лапласа 21
Фотоэлектронная эмиссия 105

Х

Хрупкость тела 51

Э

Электронная эмиссия 102
Электропроводность 114
Электропроводность металлов 97
Эмиттер 119
Энергия сублимации 13
Энтропия вещества 4

Я

Ядро дислокации 32