



В. Е. Чабанов

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

bhv®

**В. Е. Чабанов**

**К**урс 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 Капальгина</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<sup>1/16</sup>. 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

<b>Предисловие.....</b>	<b>1</b>
<b>Глава 1. Структуры конденсированных (твёрдых и жидких) тел.....</b>	<b>3</b>
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
<b>Глава 2. Характеристика жидкого состояния вещества.....</b>	<b>15</b>
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
<b>Глава 3. Строение кристаллических твёрдых тел .....</b>	<b>25</b>
3.1. Рост реальных кристаллов .....	25
3.2. Виды симметрии кристаллических решёток.....	28
3.3. Дефекты в кристаллах .....	30
<b>Глава 4. Физические свойства твёрдых тел .....</b>	<b>35</b>
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
<b>Глава 5. Механические характеристики твёрдых тел.....</b>	<b>47</b>
5.1. Деформация твёрдых тел .....	47
5.2. Упругость, пластичность и хрупкость твёрдых тел .....	50
5.3. Работа разрушения и остаточный ресурс материалов.....	53
<b>Глава 6. Физическая природа разрушения материалов .....</b>	<b>57</b>
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
<b>Глава 7. Ультразвук и его взаимодействие с веществом.....</b>	<b>73</b>
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
<b>Глава 8. Электрические явления в твёрдых телах .....</b>	<b>93</b>
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
<b>Глава 9. Техническое использование некоторых свойств     твёрдых тел .....</b>	<b>113</b>
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
<b>Заключение .....</b>	<b>129</b>
<b>Литература .....</b>	<b>131</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>133</b>

# 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, устającym 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.

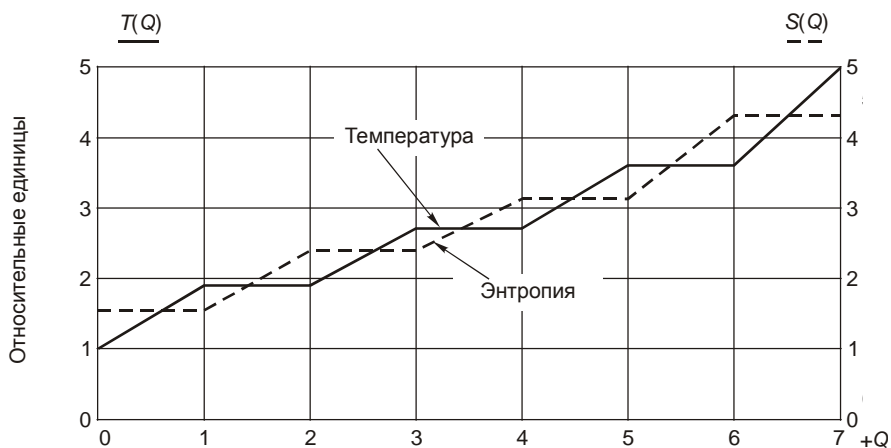


Рис. 1.1. Зависимость температуры  $T(Q)$  и энтропии  $S(Q)$  нагреваемых тел от количества получаемого ими тепла  $Q$



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  $\Delta S$  — изменение энтропии вещества,  $\Delta Q$  — 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  $\psi$  (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.

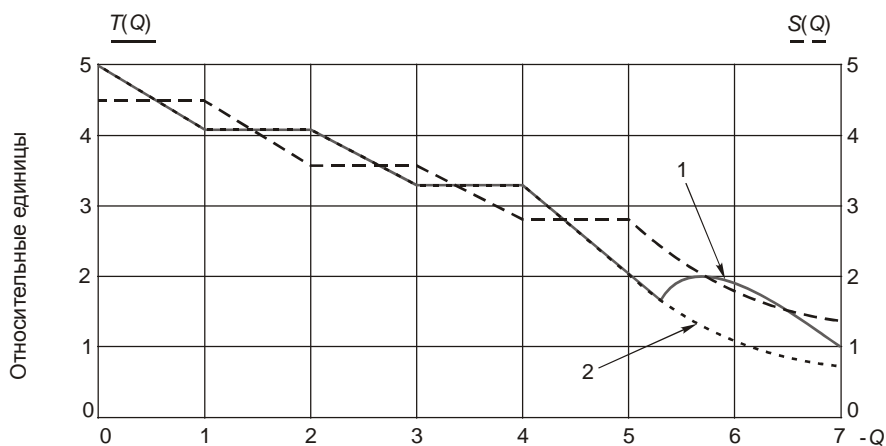


Рис. 1.2. Изменение температуры  $T(Q)$  и энтропии  $S(Q)$  тел при их охлаждении

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 ( $-269^{\circ}\text{C}$ ).

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.

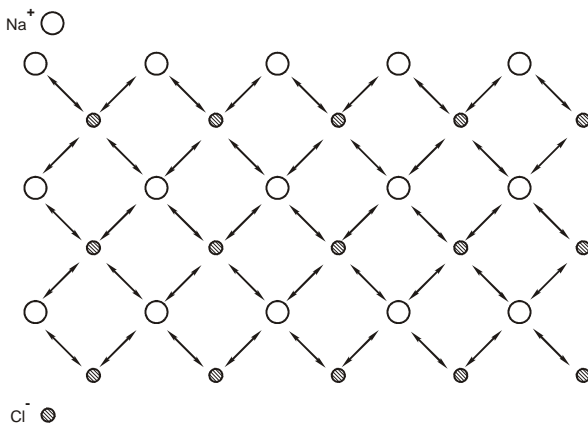


Рис. 1.3. Ионная связь между молекулами кристаллов

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  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{LiF}$ , нитраты, фосфаты, сульфаты и многие другие вещества. Ионные связи достаточно сильны, на что указывает высокая температура плавления образованных с их помощью материалов. Например, у  $\text{NaCl}$  она равна  $801^\circ\text{C}$ .

## 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 меньше, 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.

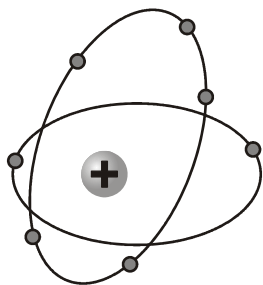


Рис. 1.4. Схема атома

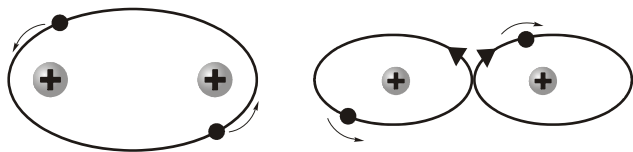


Рис. 1.5. Виды валентной связи

Данная связь может быть образована атомами одного и того же вещества, и тогда она становится неполярной. В частности, таковыми являются молекулы  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{Cl}_2$  и др. Ковалентная связь может возникать также между атомами разных элементов, сходных по химическому составу, и тогда она оказывается полярной ( $\text{NF}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$  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.

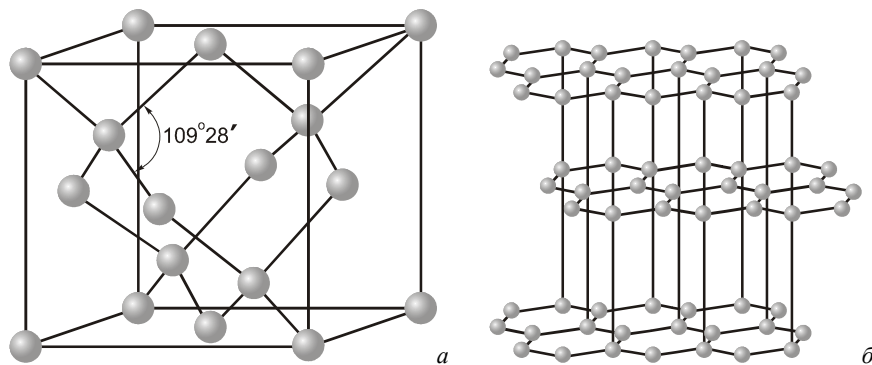


Рис. 1.6. Кристаллические решётки алмаза (а) и графита (б)

### 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.

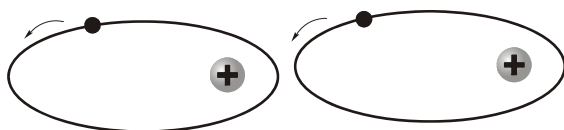


Рис. 1.7. Молекулярные связи

К материалам, формируемым указанными связями, относятся вода  $\text{H}_2\text{O}$ , углекислый газ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ , 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.

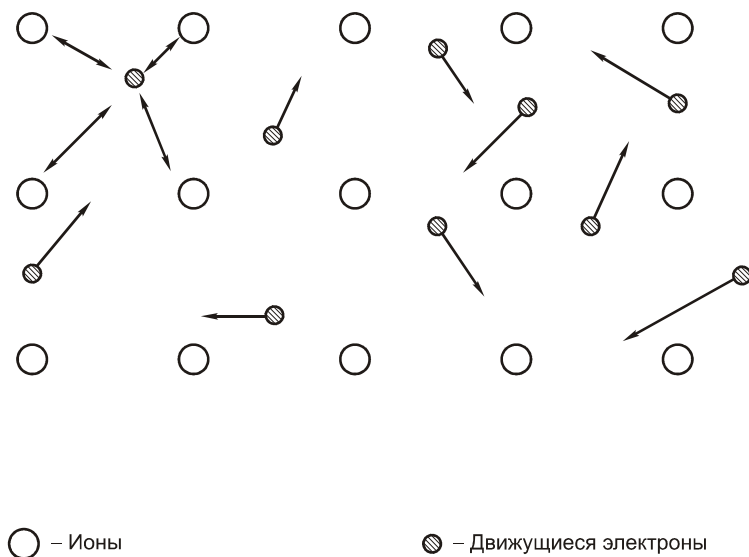


Рис. 1.8. Металлическая связь между молекулами



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  $r_0$ .

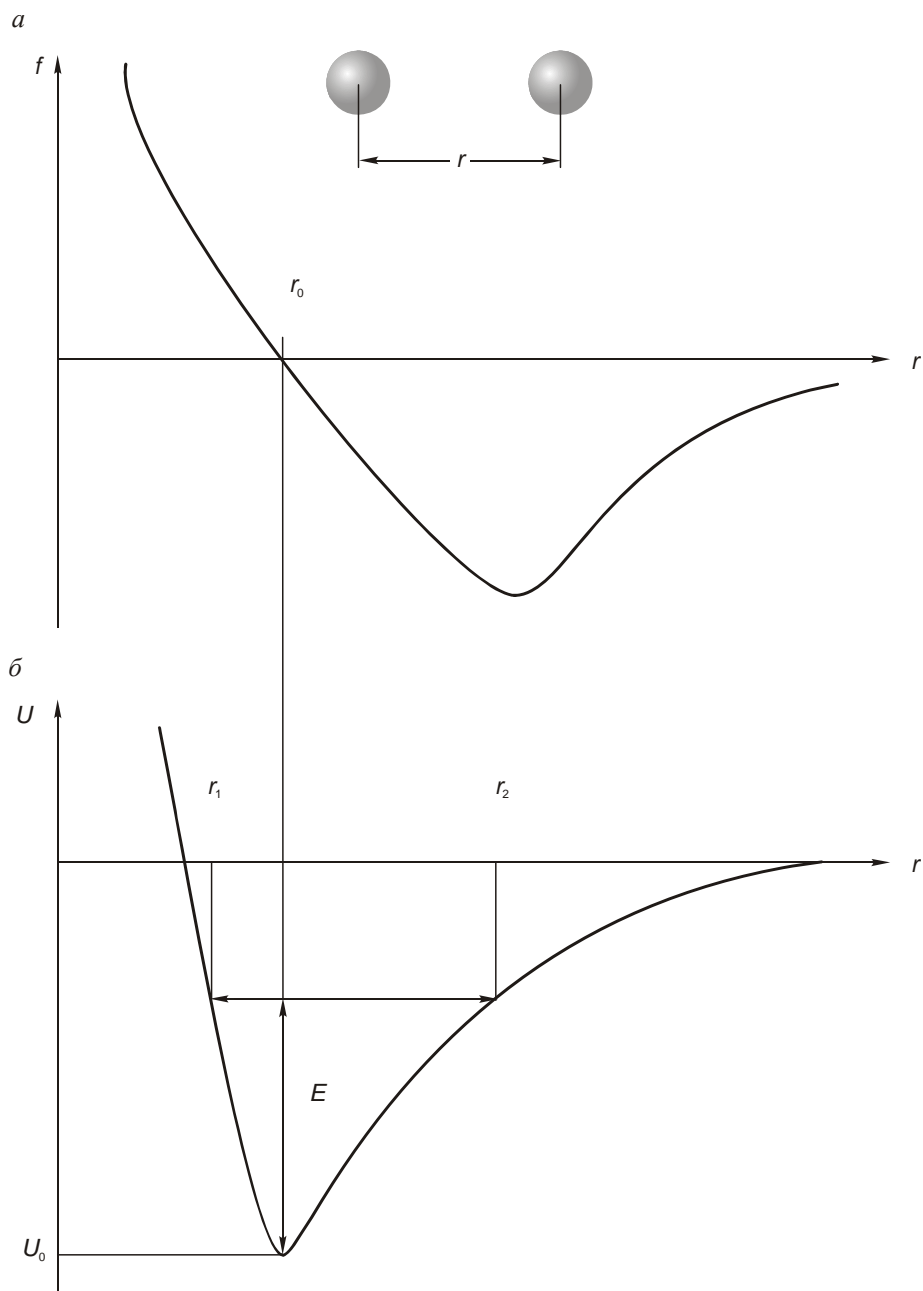


Рис. 1.9. Зависимость сил и энергий от расстояний между молекулами

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.

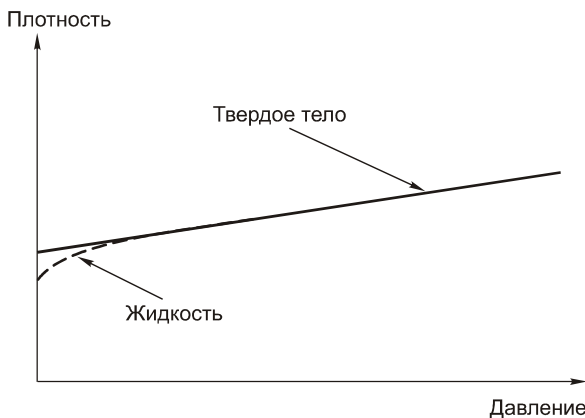


Рис. 2.1. Зависимость плотности твёрдых и жидких тел от давления

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.

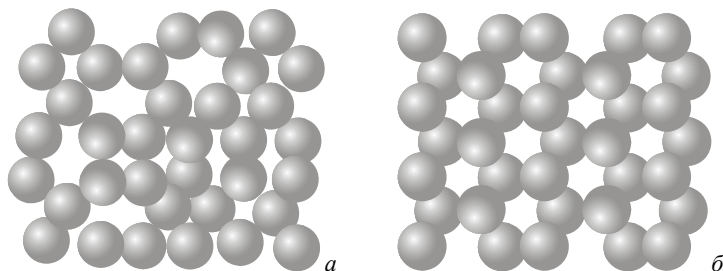
С другой стороны, если давление, передаваемое какими-либо силами твёрдому телу, зависит от направления действия этих сил, то в жидкости оно передаётся одинаковым образом по всем направлениям. Данное обстоятельство описывается законом Паскаля, который справедлив также и для газов. Данная особенность жидкостей,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

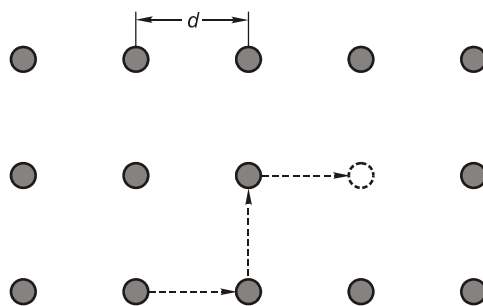
Однако указанные отличия характерны только для кристаллических тел. В случае аморфных твёрдых тел их кристаллическая структура оказывается такой же, как и у жидкостей. Именно поэтому их называют отвердевшими жидкостями. Но в отличие от жидкости, из-за своей высокой вязкости аморфные тела не обладают 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 решётку 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  $\tau$ , 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,  $\tau_0$  — 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

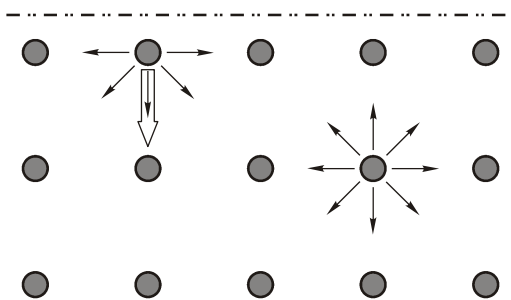


Рис. 2.4. Внутренние и поверхностные силы в веществе

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

$$U = \alpha S .$$

В данном выражении  $\alpha$  — 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  $1 \text{ м}^2$ . Однако кроме энергетического определения данного коэффициента нередко используют также его силовое определение, которое соответствует силе, действующей на единицу длины контура  $\vec{l}$ , ограничивающего свободную поверхность вещества, т. е.  $\vec{f} = \alpha / \vec{l}$ . 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  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  коэффициент поверхностного натяжения равен  $7,29 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^2$ , у жидкого железа при температуре  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$  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 —  $1 \text{ мкм}$ , тогда указанное давление внутри шарика оказывается равным  $1,46 \cdot 10^5 \text{ Па}$  или составляет почти полторы атмосферы ( $1 \text{ атм}$  равна  $10^5 \text{ Па}$ ).

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

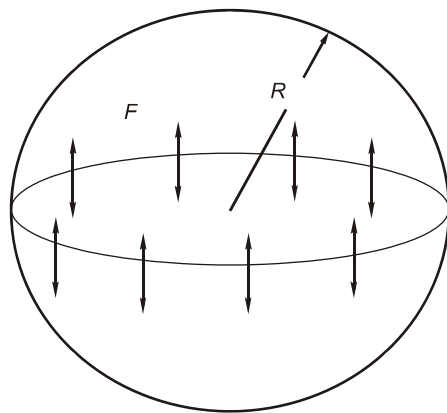


Рис. 2.6. Схема капли жидкости

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:

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

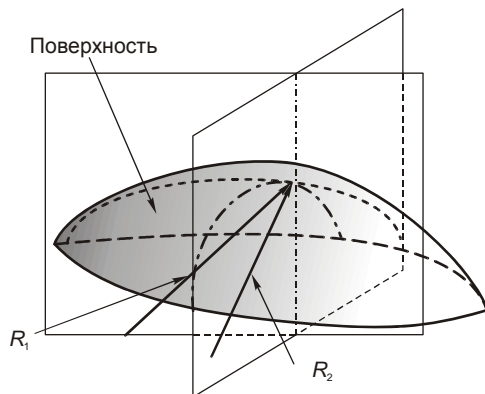


Рис. 2.7. Положение радиусов кривизны поверхности

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.

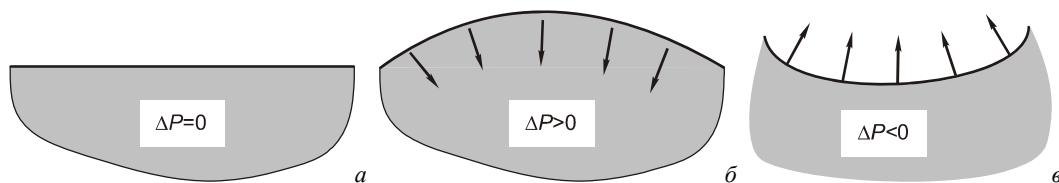


Рис. 2.8. Избыточное давление, возникающее под мениском жидкого или твёрдого тел

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 *a*). 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.

Продемонстрируем оба вида взаимодействий жидкого и твёрдого вещества друг с другом. Значение смачиваемости поверхности принято определять углом  $\Theta$ , 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, *a*). 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  $\rho$ . 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  $F_T = mg = \rho h \pi r^2 g$ ,  $F_H = \alpha_{жс} 2\pi r \cos \theta$ . Отсюда следует  $h = \frac{2\alpha_{жс} \cos \theta}{\rho g r}$ .

Откуда, принимая во внимание решение, полученное в предыдущем разделе, находим:

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

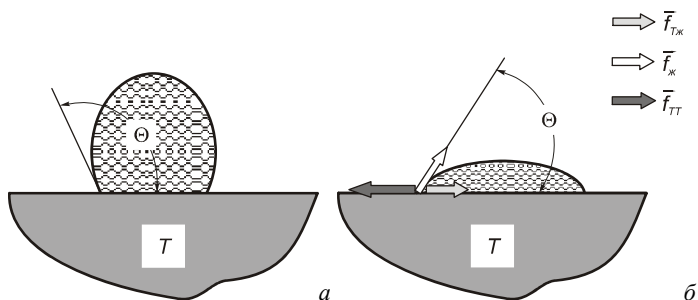


Рис. 2.9. Особенности смачивания и несмачивания твёрдой поверхности жидкостью

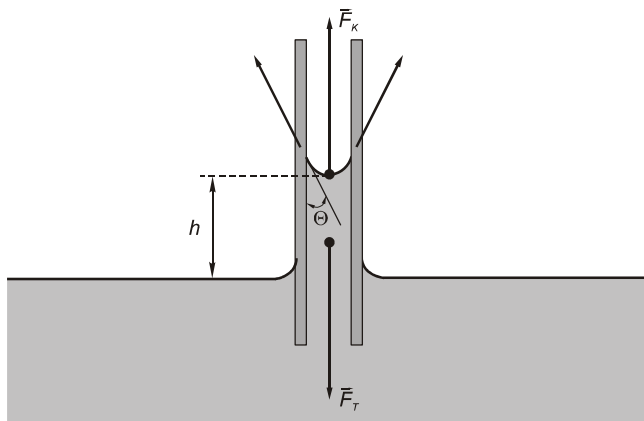


Рис. 2.10. Подъём смачивающей жидкости в капилляре

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  $\alpha$  — коэффициент поверхностного натяжения, а  $\Delta S$  — площадь одной грани куба (см. положение молекул на рис. 3.1, *a*).

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.

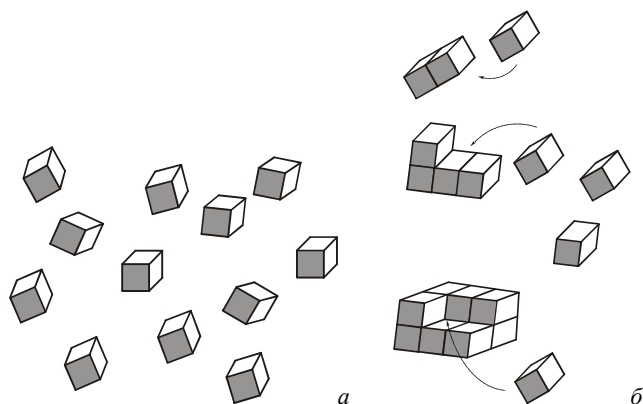


Рис. 3.1. Особенности роста кристаллов



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,