

укладывают на специальные катки; металлы для впайки в стекло подбирают так, чтобы коэффициенты линейного расширения металла и стекла были одинаковыми, и т. д. С другой стороны, в технике используют те усилия, которые связаны с тепловым расширением или сжатием твердых тел. Приведем несколько примеров. При горячей клепке ножка заклепки, остывая, укорачивается, и заклепка сжимает шов. При устройстве термографов (приборов, записывающих температуру) пользуются биметаллическими пластинками, которые состоят из двух наложенных друг на друга и спаянных между собой пластинок, изготовленных из металлов с различными коэффициентами линейного расширения. При нагревании биметаллическая пластинка изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения.

### § 15.3. Теплопроводность твердых тел

1. Хорошая теплопроводность — один из отличительных признаков металлов. У других типов твердых тел (например, у кристаллических диэлектриков) коэффициенты теплопроводности значительно меньше, чем у металлов. Опыты показали, что теплопроводность металлов тем больше, чем больше их электропроводность, поэтому естественно сделать вывод о том, что процесс теплопроводности в металлах в основном осуществляется за счет переноса энергии свободными электронами. Это явление описывается тем же уравнением Фурье, которое было установлено для теплопроводности газов (см. табл. 8). Коэффициент теплопроводности металлов  $K$  можно подсчитать по формуле:

$$K = \frac{1}{3} c_v \rho \langle \lambda \rangle \langle u \rangle,$$

где  $\langle \lambda \rangle$  — средняя длина свободного пробега электронов, а  $\langle u \rangle$  — средняя скорость их теплового движения. Считая, что свободные электроны в металле ведут себя подобно одноатомному газу, получаем:

$$c_v \rho = \frac{3}{2} k n_0,$$

где  $k$  — постоянная Больцмана, а  $n_0$  — число свободных электронов в единице объема металла.

Помимо электронной теплопроводности, в металлах имеется также теплопроводность, осуществляемая кристаллической решеткой (решеточная теплопроводность). Однако она не играет существенной роли в общей теплопроводности металлов.

Теплопроводность большинства чистых металлов медленно уменьшается с повышением их температуры. Для сплавов обычно имеет место обратное явление.

2. Механизм теплопроводности кристаллических решеток твердых тел, не содержащих свободных электронов, качественно отличен от механизма теплопроводности металлов. Теплопроводность таких твер-

дых тел тесно связана с характером теплового движения частиц, образующих их кристаллические решетки. Дело в том, что эти частицы связаны друг с другом силами взаимодействия, зависящими от расстояния между ними. Поэтому тепловые колебания одних частиц передаются другим. Например, упругие колебания частицы *A* в одномерной решетке, которую можно схематично представить в виде частиц, связанных между собой пружинами (рис. 15.4), будут передаваться соседним частицам *B*, *C*, *D* и т. д. Таким образом, в кристалле должны распространяться **упругие волны**, переносящие энергию тепловых колебаний от одних узлов к другим. Из курса физики средней школы известно, что таков же механизм распространения в твердом теле у п о р я д о ч е н н ы х колебаний частиц, соответствующих звуко-



Рис. 15.4.

вым волнам. Скорость этих волн (скорость звука) в твердых телах имеет величину порядка нескольких километров в секунду. Казалось бы, с такой же скоростью должны распространяться в твердом теле и возмущения температуры, т. е. решеточная теплопроводность кристаллов должна быть очень большой. Между тем, как показывают опыты, коэффициенты теплопроводности кристаллических диэлектриков сравнительно малы и зависят от температуры, уменьшаясь при ее возрастании. Лишь при очень низких температурах коэффициент теплопроводности достигает значительной величины. Решеточная теплопроводность твердых тел невелика из-за того, что тепловые колебания частиц этих тел не являются строго гармоническими. Упругие волны, порождаемые высокочастотными тепловыми колебаниями частиц твердого тела, в отличие от значительно более низкочастотных акустических волн, встречая на своем пути ангармонически колеблющиеся частицы, рассеиваются и ослабляются ими.

Рассеяние упругих волн возрастает с ростом амплитуды негармонических колебаний частиц решетки, т. е. растет с повышением температуры. При этом теплопроводность тела уменьшается. Можно учесть рассеяние упругих волн, если ввести понятие о средней длине свободного пробега этих волн в кристалле. Тогда все происходит так, как будто волна обрывается после определенного пробега и вместо нее возникает новая, с другим направлением распространения. При этом перенос энергии от нагретой части кристалла к холодной сильно затрудняется. Похожее явление имеет место в случае теплопроводности газов. Пусть длина свободного пробега молекулы во много раз меньше линейных размеров сосуда, противоположные стенки которого поддерживают при различных температурах. Тогда молекулы, испытывая частые соударения друг с другом, медленно диффундируют от

нагретой стенки к холодной, двигаясь по сложному зигзагообразному пути.

Количественная теория теплопроводности кристаллических решеток выходит за рамки нашего курса. Заметим только, что согласно этой теории коэффициент теплопроводности кристаллического диэлектрика при не слишком низких температурах обратно пропорционален первой степени абсолютной температуры.

#### § 15.4. Теплоемкость твердых тел

1. Различие между теплоемкостью при постоянном давлении и теплоемкостью при постоянном объеме сказывается для твердых тел только при достаточно высокой температуре. Поэтому можно говорить просто о теплоемкости твердого тела, связывая ее с изменением внутренней энергии единицы массы (или одного моля) твердого тела при нагревании на один градус. Для неметаллических решеток внутренняя энергия представляет собой суммарную энергию частиц, образующих решетку.

2. Тепловые колебания частиц (атомов, молекул или ионов) в узлах решетки можно считать гармоническими, если ограничиться колебаниями с небольшими амплитудами. При этом колеблющаяся частица обладает как кинетической, так и потенциальной энергиями, которые, в среднем, равны друг другу.

Рассмотрим теплоемкость твердых тел, имеющих атомную решетку. Каждый атом может колебаться в узле в трех взаимно перпендикулярных направлениях, т. е. имеет три колебательные степени свободы. Следовательно, используя закон равномерного распределения энергии по степеням свободы (§ 11.5), можно записать энергию моля твердого тела следующим образом:

$$U = 3N_A \langle w \rangle, \quad (15.10)$$

где  $\langle w \rangle$  — средняя энергия, приходящаяся на одну колебательную степень свободы атома,  $N_A$  — число атомов в моле (число Авогадро).

На каждую колебательную степень свободы приходится в среднем кинетическая энергия  $kT/2$  и, кроме того, равная ей средняя потенциальная энергия  $kT/2$ . Таким образом, средняя энергия

$$\langle w \rangle = kT. \quad (15.11)$$

Поэтому внутренняя энергия моля твердого тела

$$U = 3N_A kT = 3RT. \quad (15.12)$$

Дифференцируя энергию  $U$  по абсолютной температуре, получаем