

## Лабораторная работа № 13

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

**Цель работы:** знакомство с теорией и экспериментальное определение коэффициентов линейного расширения для различных металлов.

**Приборы и принадлежности:** металлические стержни, нагревательные элементы, термометры с градуировочными шкалами, милливольтметр.

#### Тепловое расширение и теплоемкость твердых тел

Твердыми телами называются тела, у которых форма и объем постоянны. Твердые тела по своим физическим свойствам разделяются на: 1) кристаллические и 2) аморфные.

*Кристаллы* – твердые тела, отличающиеся правильным периодическим расположением составляющих их частиц. Кристаллы ограничены плоскими гранями, сходящимися в ребрах и вершинах.

*Аморфными* называются вещества, не обладающие в конденсированном состоянии кристаллическим строением, т.е. в них не соблюдается дальний порядок в периодическом расположении атомов, а только, как у жидкостей, выполняется ближний порядок в их расположении.

Аморфными веществами являются неорганические стекла, плавленый кварц, каучук, резина, органические стекла, смолы.

Кристаллические тела *анизотропны*, т.е. их физические свойства (упругость, теплопроводность, электропроводность) по различным направлениям неодинаковы.

Тела, свойства которых одинаковы по всем направлениям, называются *изотропными*. Изотропными являются газы, почти все жидкости и аморфные тела. Причиной анизотропности кристаллов служит упорядоченное расположение частиц вещества: атомов, молекул, ионов, из которых они состоят. Упорядоченность расположения частиц вещества кристалла определяется тем, что они размещаются в узлах геометрически правильной пространственной решетки.

Твердые тела, кристаллическая структура которых обнаруживается непосредственно в их внешней форме, называются *монокристаллами*. Монокристаллы имеют форму правильных многогранников. Большинство же твердых тел, в том числе и металлы, существуют в виде поликристаллов, т.е. отличаются мелкокристаллической структурой.

Поликристаллы состоят из большого числа сросшихся мелких, хаотически расположенных отдельных кристаллов, называемых *кристаллитами*, или *зернами*. Размеры таких зерен в металле порядка  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  см, и зависят они от способа получения и обработки металлов.

Взаимное расположение и ориентация отдельных кристаллитов в поликристаллическом веществе обычно хаотическое и поэтому поликристаллы (в размерах больших кристаллитов) являются изотропными.

Металлы являются поликристаллами. Тип кристаллической решетки у металлов и соответственно тип кристалла называется металлическим. Во всех узлах металлического кристалла расположены положительные ионы металла. Между ними беспорядочно, подобно молекулам газа, движутся электроны, которые отщепились от атомов при образовании ионов. Эти электроны играют роль «цемента», удерживая вместе положительные ионы.

Большинство металлов имеет вид решеток, показанных на рис. 1 (а – кубическая объемно-центрированная, б – кубическая гранецентрированная, в – плотная гексагональная).

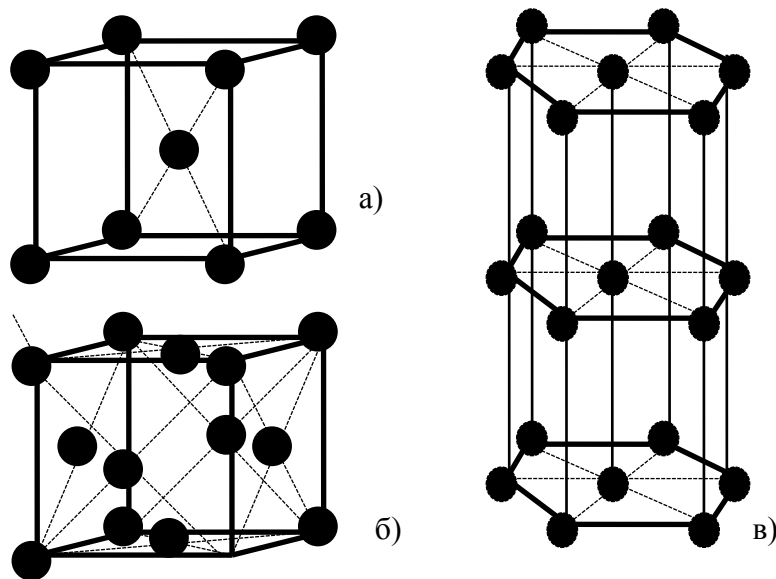


Рис. 1.

Узлы (рис. 1) кристаллической решетки определяют среднее положение частиц у металла – положительных ионов. Тепловое движение в твердых телах сводится к колебаниям частиц около этих средних положений. *Колебания частиц происходят ангармонично.* При повышении температуры кристалла (металла) увеличивается энергия

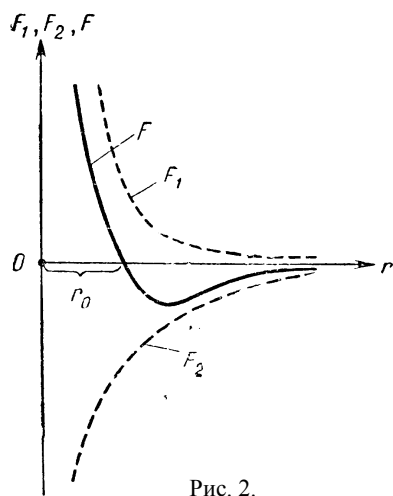


Рис. 2.

теплового движения, т.е. растет амплитуда колебания частиц. Если бы колебания частиц происходили строго гармонично, то увеличение амплитуды не привело бы к изменению среднего расстояния между частицами, при ангармоничных колебаниях частиц расстояния между ними меняются. При сближении частиц силы притяжения и силы отталкивания не симметричны. На рис. 2  $F_1$  – силы отталкивания,  $F_2$  – силы притяжения,  $F$  – результирующая сила взаимодействия,  $r_0$  – расстояние, на котором  $F_1$  и  $F_2$  взаимно уравновешиваются.

Из рисунка видно, что силы отталкивания при уменьшении расстояния между частицами растут намного быстрее, чем силы притяжения. Это приводит к тому, что при увеличении температуры рост сил отталкивания между частицами преобладает над силами притяжения и тела расширяются.

Объем твердых тел при нагревании меняется мало, поэтому для твердого тела не различают теплоемкости  $C_0$  и  $C_p$ , а берут просто  $C$ .

*Теплоемкостью твердого тела  $C$  называется физическая величина, численно равная внутренней энергии  $dU$  единицы массы (или одного киломоля) твердого тела при нагревании на один градус:*

$$C = dU/dT.$$

Запас внутренней энергии твердого тела представляет собой запас энергии колебаний частиц, из которых оно построено. Таким образом, теплоемкость является мерой изменения энергии колебаний частиц в зависимости от температуры.

Каждая частица может колебаться в узле в трех взаимно перпендикулярных направлениях, т.е. имеет три колебательных степени свободы. На каждую степень свободы одной частицы в среднем приходится энергия  $kT$ , где  $k$  – постоянная Больцмана. Следовательно, на каждую колеблющуюся частицу приходится энергия, равная  $3kT$ .

Внутренняя энергия 1 килограмм–атома твердого тела

$$U = 3N_a kT = 3RT, \quad N_a * k = R,$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $N_a$  – число атомов в килограмм-атоме (число Авогадро). Отсюда

$$dU / dt = C = 3R = 6 \text{ ккал}/(\text{кг} * \text{атом} * \text{град}).$$

Это выражение представляет собой закон Дюлонга–Пти: килограмм-атомная теплоемкость  $C$  для всех химически простых кристаллических твердых тел приблизительно равна 6 ккал/(кг\*атом\*град).

Закон выполним для многих веществ при комнатной температуре. Отклонения от него для низких и высоких температур объясняется тем, что при этом не учитывается квантование энергии колебательного движения и то обстоятельство, что в кристалле вследствие взаимодействия между частицами возникают гармонические упругие волны, имеющие различные частоты (в квантовой теории этим волнам соответствуют квазичастицы – фотоны; фононы были введены в связи с тем, что возникающие в твердом теле упругие волны являются акустическими и по аналогии с квантованием энергии электромагнитных волн квант энергии акустических волн был назван фононом).

### Теория метода и описание установки

При нагревании тела расширяются. Существует следующая зависимость между величинами, характеризующими тепловое расширение твердых тел:

$$\frac{\bar{r} - r_0}{r_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha T,$$

где  $r$ ,  $r_0$  – среднее расстояние между колеблющимися частицами (см. введение)

$r_{\text{ср}} = \bar{r} = \frac{r_{\text{min}} + r_{\text{max}}}{2}$ ,  $\Delta l$  – приращение длины,  $T$  – температура,  $\alpha$  – коэффициент линейного

расширения.  $\alpha$  имеет различную величину для различных интервалов температур, поэтому берут средний коэффициент линейного расширения. Средним коэффициентом линейного расширения называется физическая величина, численно равная среднему удлинению каждой единицы первоначальной длины  $l_0$  при нагревании на  $1^\circ\text{C}$  в рассматриваемом интервале температур  $\Delta t$ :

$$\alpha_t = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t} = \frac{l_1 - l_0}{l_0 (t_1 - t_0)},$$

где  $\alpha_t$  – средний коэффициент линейного расширения в интервале температур  $\Delta t$ ,  $^\circ\text{C}$ ;  $l_0$  – первоначальная длина тела при температуре  $t_0$ ;  $l_1$  – длина тела при температуре  $t_1$ .

Величина  $\Delta l / \Delta t$  среднее удлинение тела при нагревании на  $1^\circ\text{C}$  в интервале  $\Delta t$ . Величина  $\Delta l / l_0$  – относительное удлинение, происходящее при нагревании на  $1^\circ\text{C}$ . Длина нагретого тела равна:

$$l = l_0 (1 + \alpha_t \Delta t).$$

Значение зависит от материала: для металлов имеет порядок  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  град.

В результате линейного расширения увеличивается и объем тела. Средний коэффициент объемного расширения  $\beta_v = 3\alpha_t$ :

$$\beta_v = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t},$$

где  $\Delta V$  – увеличение объема при нагревании на  $1^\circ\text{C}$ ,  $V_0$  – первоначальный объем,  $\Delta t$  – интервал температур.

Объем нагретого тела увеличивается и равен

$$V = V_0 (1 + \beta_v \Delta t).$$

В данной работе средний коэффициент линейного расширения металла определяется методом измерения удлинения испытуемого металлического стержня при нагревании. Удлинение стержня измеряется с помощью индекса часового типа.

### Порядок выполнения работы

1. Измерить первоначальную длину стержня  $l_0$  с помощью штангенциркуля:

$$l_{0\text{ Al}} = l_{0\text{ Cu}} = l_{0\text{ сталь}} = 14 \text{ см.}$$

2. Поместить стержень в муфельную печь, установить индикатор на «ноль» и с помощью термопары определить начальную температуру стержня (температуру уточнить по термометру в аудитории).

3. Нагревая муфельную печь, через каждые  $20^{\circ}$  определять изменение  $\Delta t$  температуры и увеличение длины стержня  $l$ . Нагревание проводить до  $120^{\circ}\text{C}$ . Градуировочный график дан в конце описания.

4. Заполнить по результатам измерений таблицу.

5. Опыт проделать с другими двумя стержнями. Температуру определить по градуировочному графику.

| Исследуемый материал |            |       |            |            |               |       |            |       |            |            |               |       |            |       |            |            |               |
|----------------------|------------|-------|------------|------------|---------------|-------|------------|-------|------------|------------|---------------|-------|------------|-------|------------|------------|---------------|
| Алюминий             |            |       |            |            |               | Медь  |            |       |            |            |               | Сталь |            |       |            |            |               |
| $l_0$                | $\Delta l$ | $t_0$ | $\Delta t$ | $\alpha_t$ | $\varepsilon$ | $l_0$ | $\Delta l$ | $t_0$ | $\Delta t$ | $\alpha_t$ | $\varepsilon$ | $l_0$ | $\Delta l$ | $t_0$ | $\Delta t$ | $\alpha_t$ | $\varepsilon$ |
|                      |            |       |            |            |               |       |            |       | 1          |            |               |       |            |       | 1          |            |               |

6. Указать с учетом погрешности измерений величину коэффициента линейного расширения для исследованных материалов и сравнить их с табличными данными.

### Контрольные вопросы

1. Объясните, как происходит увеличение размера тел при нагревании.
2. Выведите расчетную формулу для определения величины  $\beta$ .
3. Какова связь между  $\alpha$  и  $\beta$ ?
4. Сформулируйте закон Дюлонга–Пти.
5. Как можно объяснить различие в численных значениях коэффициента линейного расширения различных кристаллических тел?

### Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. – М.: Высшая школа, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М., 1984.
3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1980.