

Лабораторная работа  
 “ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ОТВЕРДЕВАНИЯ (КРИСТАЛЛИЗАЦИИ) ВЕЩЕСТВА”

Отвердевание жидкости - это фазовый переход вещества из некристаллического жидкого в кристаллическое твердое состояние. Иными словами, когда при охлаждении жидкости она превращается в твердое тело, то происходит образование кристаллической решетки. А в кристалле частицы вещества – атомы или молекулы – располагаются так, чтобы их взаимная потенциальная энергия взаимодействия была минимальна. Получающаяся при этом избыточная энергия выделяется, переходя в кинетическую энергию беспорядочных тепловых движений. Это должно было бы привести к повышению температуры. Но так как одновременно происходит отвод энергии в окружающую среду, то выделяющаяся при кристаллизации энергия компенсирует этот отвод и температура вещества во время кристаллизации остается постоянной.

Наоборот, когда к твердому телу подводится энергия в форме теплоты, оно нагревается и при определенной температуре плавится, превращаясь в жидкость. Плавление означает разрушение кристаллической решетки, в результате чего потенциальная энергия взаимодействия частиц возрастает. На это, а не на повышение температуры тела и тратится подводимая теплота. Поэтому и во время плавления температура вещества остается постоянной.

Поглощаемую теплоту плавления и выделяющуюся теплоту отвердевания часто называют “скрытыми” теплотами соответственно плавления и отвердевания (кристаллизации) (“скрытыми” – потому что они не приводят к изменению температуры). У чистых однородных веществ температуры плавления и отвердевания совпадают. Равны друг другу и “скрытые” теплоты плавления и отвердевания. Выделение или поглощение “скрытых” теплот перехода – неперемный признак так называемых фазовых переходов первого рода. Именно таким фазовым переходом первого рода и являются переходы жидкость – твердое тело и твердое тело – жидкость.

Целью работы является опытное определение теплоты фазового перехода жидкость - твердое тело. Исследуемое вещество – олово.

### 1. Основы метода измерения теплоты отвердевания кристаллического вещества

Метод определения теплоты перехода основан на том, что при отвердевании выделяющаяся теплота кристаллизации компенсирует отвод теплоты от охлаждаемого вещества к внешней среде, и поэтому температура вещества во время кристаллизации остается постоянной.

Это означает, что теплота кристаллизации выделяется с такой же скоростью, с какой теплота отводится в окружающую среду. Непосредственно измерить скорость теплоотвода во время кристаллизации нельзя, так как температура при этом остается постоянной. Но можно определить скорость теплоотвода до начала кристаллизации и после ее окончания. Скорость же теплоотвода во время кристаллизации можно принять равной среднему арифметическому между ними.

Пусть расплавленное вещество (олово) содержится в тигле, масса которого равна  $m_t$ , а удельная теплоёмкость материала равна  $C_t$ . Пусть далее масса вещества в тигле равна  $M$ , а удельная теплоёмкость жидкого вещества равна  $C_{ж}$ . Тогда если за время  $d\tau_{ж}$  температура тигля с жидким веществом изменится на  $dt_{ж}$ , то скорость теплоотвода от тигля с жидким веществом будет равна

$$\frac{dQ_{ж}}{d\tau_{ж}} = (m_t C_t + M C_{ж}) \frac{dt_{ж}}{d\tau_{ж}} \quad (1.1)$$

Таким же образом скорость теплоотвода после того, как вещество отвердеет (кристаллизуется), равна

$$\frac{dQ_{тв}}{d\tau_{тв}} = (m_t C_t + M C_{тв}) \frac{dt_{тв}}{d\tau_{тв}}, \quad (1.2)$$

где  $C_{тв}$  – удельная теплоёмкость твердого вещества, а  $\frac{dt_{тв}}{d\tau_{тв}}$  – скорость изменения температуры тигля с твёрдым веществом.

Скорость отвода тепла во время кристаллизации можно записать в виде

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{1}{2} \left[ (m_m C_m + M C_{жс}) \frac{dt_{жс}}{d\tau_{жс}} + (m_m C_m + M C_{мс}) \frac{dt_{мс}}{d\tau_{мс}} \right] \quad (1.3)$$

Учитывая приблизительно линейный характер зависимости  $t(\tau)$ , можно записать

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = \frac{1}{2} \left[ (m_m C_m + M C_{жс}) \frac{\Delta t_{жс}}{\Delta \tau_{жс}} + (m_m C_m + M C_{мс}) \frac{\Delta t_{мс}}{\Delta \tau_{мс}} \right] \quad (1.4)$$

С другой стороны, для этой же скорости теплоотвода известно соотношение

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = \frac{qM}{\tau} \quad (1.5)$$

где  $q$ - удельная скрытая теплота отвердевания (кристаллизации),  $\tau$  – время кристаллизации. Отсюда

$$q = \frac{\tau}{M} \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} \quad (1.6)$$

Далее, используя выражение (1.4), получим окончательную расчётную формулу для определения скрытой теплоты кристаллизации:

$$q = \frac{\tau}{2M} \left[ (m_m C_m + M C_{жс}) \frac{\Delta t_{жс}}{\Delta \tau_{жс}} + (m_m C_m + M C_{мс}) \frac{\Delta t_{мс}}{\Delta \tau_{мс}} \right] \quad (1.7)$$

## 2. Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки для определения удельной скрытой теплоты отвердевания олова представлена на *рис.1*.

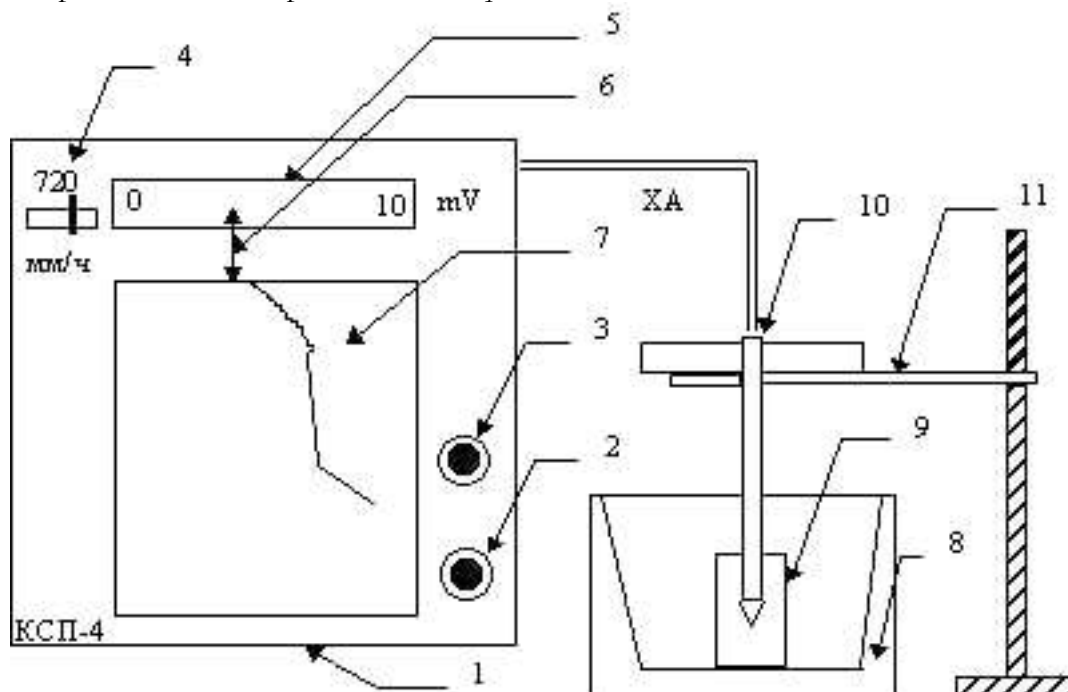
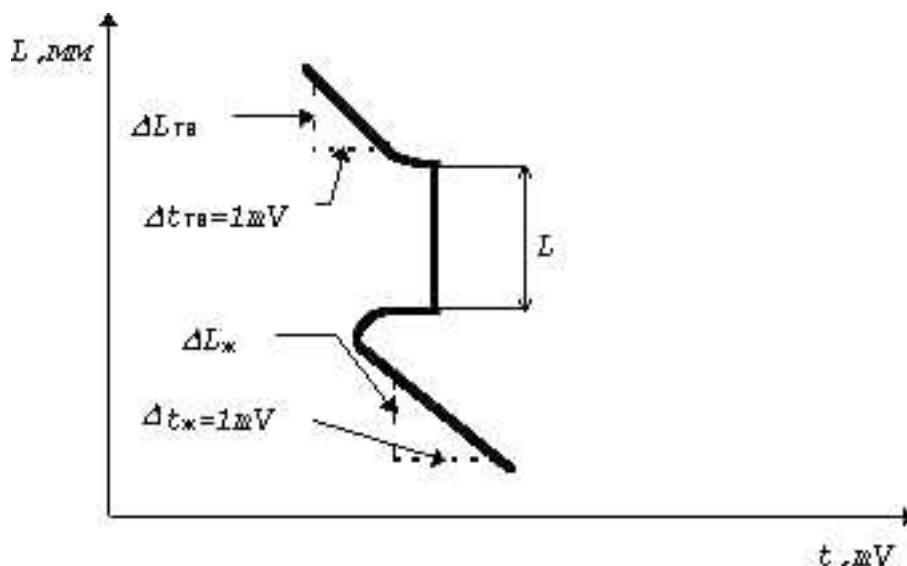


Рис.1. Принципиальная схема установки:

- 1 - автоматический самопишущий потенциометр; 2 - тумблер включения прибора;
- 3 - тумблер включения перемещения диаграммы; 4 - переключатель скорости движения диаграммной бумаги; 5 - шкала потенциометра; 6 - перо самописца; 7 - диаграммная бумага; 8 - электрическая печь; 9 - тигель; 10 - термопара; 11 - устройство для поддержания тигля и термопары

Олово, помещённое в фарфоровом или алундовом тигле, сначала расплавляют в электрической печи и перегревают его несколько выше температуры плавления. За температурой олова следят по показанию термопары, погруженной в олово, по шкале самопишущего потенциометра. После расплавления и перегрева термопара вынимается из олова, а тигель с оловом с помощью устройства для поддержания тигля и термопары вынимается из печи. Термопара снова погружается в расплавленное олово. Перо самописца приводят в контакт с диаграммной бумагой, включают тумблер перемещения диаграммы и снимают кривую охлаждения олова, т.е. зависимость температуры олова от времени.

Кривая имеет вид, подобный изображенному на *рис.2*. Вертикальный участок графика относится к процессу кристаллизации (  $t_{кр} = const$  ).



*Рис.2. Кривая охлаждения олова на диаграммной бумаге*

Для подсчёта скорости изменения температуры тигля с жидким и твёрдым оловом  $\Delta t_{ж} / \Delta t_{ж}$  и  $\Delta t_{тв} / \Delta t_{тв}$  нужно на нижнем и верхнем наклонных участках кривой плавления построить прямоугольные треугольники. Лучше всего это сделать так, чтобы горизонтальные катеты были равны  $\Delta t_{ж} = \Delta t_{тв} = 1 \text{ мВ}$ . Тогда длина соответствующих вертикальных катетов определяется измерительным инструментом (линейкой, штангенциркулем). Для подсчёта характерных времен  $\Delta \tau_{тв}$ ,  $\tau$ ,  $\Delta \tau_{ж}$  необходимо длину соответствующего вертикального катета на диаграммной бумаге разделить на скорость её перемещения  $\vartheta$  (обычно  $\vartheta = 720 \text{ мм/ч} = 0,2 \text{ мм/с}$ ):

$$\Delta \tau_{тв} = \frac{\Delta L_{тв}}{\vartheta}; \quad \Delta \tau_{ж} = \frac{\Delta L_{ж}}{\vartheta}; \quad \tau = \frac{L}{\vartheta}. \quad (2.1)$$

Для подсчёта разности температур  $\Delta t_{тв}$  и  $\Delta t_{ж}$  необходимо показание термопары в  $\text{мВ}$  перевести в градусы. Поскольку зависимость ЭДС термопары (  $E, \text{мВ}$  ) от температуры (  $t, ^\circ\text{C}$  ) линейная, то лучше всего это можно сделать следующим образом: значению  $E_{ком} = 0 \text{ мВ}$  соответствует комнатная температура (  $t_{ком}$  ), а значению ЭДС термопары при кристаллизации олова (  $E_{кр}, \text{мВ}$  ) (вертикальный участок кривой на *рис.2*.) соответствует температура кристаллизации (плавления) олова (  $t_{кр}$  ), равная  $232^\circ\text{C}$ . Тогда

$$1 \text{ мВ} = \frac{t_{кр} - t_{ком}}{E_{кр}}, \quad ^\circ\text{C}. \quad (2.2)$$

Зная  $\Delta t$  и  $\Delta \tau$ , можно подсчитать скорости теплоотвода, а следовательно, и удельную скрытую теплоту кристаллизации олова.

### 3. Методика проведения эксперимента

#### Подготовка к опыту

Ознакомиться с описанием и лабораторной установкой. Убедиться, что в самописец вставлена диаграммная бумага и перо самописца пишет.

Внимание! Питание электропечи и автоматического самопишущего потенциометра осуществляется напряжением  $220\text{ В}$ , помните, что температура жидкого олова в тигле больше  $232^{\circ}\text{C}$ , соблюдайте осторожность при работе!

#### Задание

В настоящей работе необходимо измерить удельную теплоту кристаллизации олова.

1. Сначала тигель с содержащимся в нем твёрдым оловом взвесить на весах, чтобы определить массу ( $M$ ) олова. Масса тигля  $m_m$  известна.
2. Поместить тигель с оловом в устройство для поддержания тигля. Путём осторожного перемещения в вертикальном направлении поместить термопару непосредственно над поверхностью твёрдого олова.
3. Поместить тигель вместе с устройством в электрическую печь.
4. Включить печь и потенциометр в сеть. Включить тумблер 2 потенциометра. Привести перо самописца в контакт с диаграммной бумагой (с помощью рычажка, находящегося на самописце). Убедиться, что перо самописца пишет.
5. После того как олово расплавится, погрузить термопару в жидкое олово и продолжать нагрев до тех пор, пока термоЭДС термопары не достигнет  $10\text{ мВ}$ . (Не допускать зашкаливания пера самописца вправо за  $10\text{ мВ}$ .)
6. После этого вынуть устройство из печи, развернуть его на штативе и включить тумблер 3 перемещения диаграммы. Все эти операции провести быстро, но осторожно.
7. Подождать пока перо самописца нарисует кривую охлаждения олова. Выключить тумблер 3. После этого поместить тигель в печь и повторить опыт. Всего провести три опыта.
8. По окончании опытов поместить тигель с термопарой в печь, расплавить олово, вынуть термопару из олова так, чтобы она с ним не контактила. Посыпать поверхность жидкого олова щепоткой канифоли. Все эти операции делать при выключенных тумблерах 2 и 3.
9. Аккуратно, чтобы не нарушить крепление диаграммной бумаги отрезать бумагу с полученными данными.
10. Пользуясь формулами (1.7), (2.1), (2.2), подсчитать  $q$ . Погрешность результата подсчитать как случайную по разбросу конечных результатов каждого опыта. Получить формулу для оценки систематической погрешности измерения из выражения (1.7).
11. Сравнить полученный средний результат со справочными данными. Сделать выводы.

#### 4. Контрольные вопросы

1. Почему фазовый переход 1-го рода сопровождается выделением или поглощением теплоты?
2. На чём основан метод определения теплоты перехода в лабораторной работе?
3. Одинаковы ли наклоны на графике охлаждения жидкого и твёрдого олова? Почему?
4. Что следует сделать, чтобы уменьшить относительные погрешности определения скоростей теплоотвода?

#### Список литературы

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1987.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 1979.
3. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978.
4. Енохович А.С. Краткий справочник по физике. М.: Высш. шк., 1976.