

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 ТЕПЛОВІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

МЕТА РОБОТИ: ознайомитися з тепловими властивостями твердих тіл.

8.1 Теорія

При нагріванні твердого тіла збільшується амплітуда теплових коливань атомів, які знаходяться у вузлах кристалічної ґратки. Коливання будь-якого атома відносно положення рівноваги відбуваються під дією сили зв'язку з сусідніми атомами. Вважають, що ця сила пропорційна зміщенню атома відносно положення рівноваги (пружна сила).

$$F = -\beta x, \quad (8.1)$$

де β – коефіцієнт пружності, x – величина зміщення від положення рівноваги.

Колівання атома будуть гармонічні, а потенціальна енергія взаємодії з сусідніми атомами вповдовж напрямку $0x$ визначається функцією:

$$Y(x) = 1/2(\beta x^2) + Y_0, \quad (8.2)$$

В цьому випадку відхилення атома від положення рівноваги вправо чи вліво однакові, а середня віддаль між атомами залишається без змін.

Якщо вважати, що теплові коливання атомів будуть гармонічні, тобто відбуваються під дією пружної сили, то при нагріванні лінійні розміри твердих тіл будуть незмінними. Але це суперечить досліду. Це означає, що сила зв'язку між атомами відрізняється від пружної. Тому в формулу сили зв'язку до лінійного члена необхідно додати квадратичний:

$$F = -\beta x + \gamma x^2, \quad (8.3)$$

де γ – коефіцієнт ангармонічності.

Потенціальна енергія взаємодії атомів в цьому випадку має вигляд:

$$Y(x) = \frac{1}{2} \beta x^2 - \frac{1}{3} \gamma x^3 + Y(0). \quad (8.4)$$

Графік цієї функції вказаний на рис. 8.1.

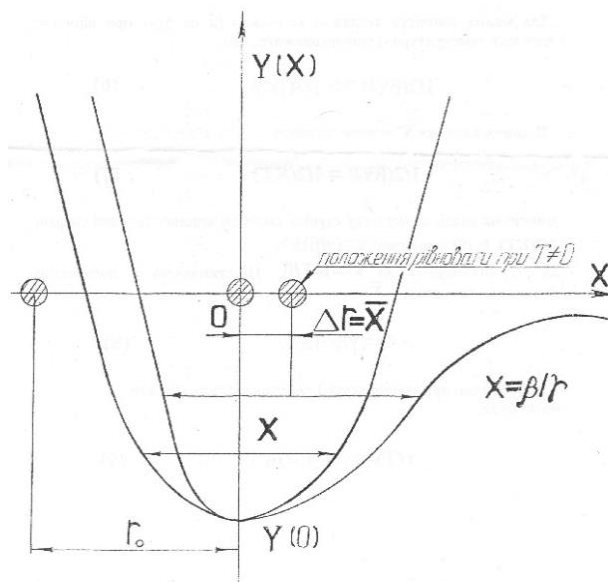


Рисунок 8.1

Відносно вертикальної лінії, що проходить через положення рівноваги ($X=0$), цей графік несиметричний. З підвищенням температури твердого тіла збільшується енергія коливального руху. Якщо атом має енергію $Y(x)$, то він зміщується відносно лінії $X=0$ вправо більше, ніж вліво. Це приводить до того, що середня координата атома \bar{X} не співпадає з положенням $X=0$, а зміщена вправо на величину Δr . При підвищенні температури це зміщення збільшується. Відшукаємо формулу для \bar{X} . Середнє значення сили, що діє на атом, повинно бути рівним нулю, тобто:

$$F = -\beta x + \gamma x^2 = 0. \quad (8.5)$$

Для малих амплітуд теплових коливань (а це буде при відносно низьких температурах) можна вважати, що:

$$\frac{1}{2} \beta x^2 \gg \frac{1}{3} \beta x^3. \quad (8.6)$$

В цьому випадку $\overline{X^2}$ можна визначити із співвідношення:

$$\frac{1}{2} \beta \overline{x^2} = \frac{1}{2} kT, \quad (8.7)$$

маючи на увазі, що на одну ступінь свободи випадає середня енергія $\frac{1}{2}(kT)$.

Із формули (8.5) отримаємо:

$$\overline{X} = \frac{\gamma}{\beta} \overline{X^2} \quad (8.8)$$

Із (8.7) знаходимо, що

$$\overline{X^2} = \frac{kT}{\beta}. \quad (8.9)$$

Підставляючи (8.9) в (8.8) знаходимо \overline{X} :

$$\overline{X} = \frac{\gamma}{\beta^2} kT. \quad (8.10)$$

Таким чином, при температурі T середня віддаль між атомами буде:

$$r(T) = r_0 + \frac{\gamma}{\beta^2} kT \quad (8.11)$$

При зміні температури на ΔT отримаємо:

$$r(T + \Delta T) = r_0 + \frac{\gamma}{\beta^2} k(T + \Delta T) \quad (8.12)$$

Відносна зміна віддалі між атомами при зміні температури на один градус визначається виразом:

$$\alpha = (r(T + \Delta T) - r(T)) / \Delta T = \gamma k / (\beta^2 r_0) \quad (8.13)$$

Ця величина називається **температурним коефіцієнтом лінійного розширення**. Можна побачити, що вона не залежить від температури. Слід пам'ятати, що при виведенні цього виразу використали умову малих коливань (тобто малих температур).

Для визначення коефіцієнту ангармонічності γ і коефіцієнта β недостатньо знання величини α . Із рис. 8.1 видно, що при $x = \beta / \gamma$ функція потенціальної енергії досягає максимуму. Наближено можна вважати, що в цій точці потенціальна енергія дорівнює нулю. Тобто, температура настільки висока, що сила зв'язку вже не в змозі утримувати атоми разом і відбувається їх випаровування. Якщо $x = \beta / \gamma$, то із (8.4) отримаємо:

$$1/2 \beta (\beta / \gamma)^2 - 1/3 \gamma (\beta / \gamma)^3 + Y(0) = 0 \Rightarrow Y(0) = -\beta^3 / (6\gamma^2) \quad (8.14)$$

Ця величина потенціальної енергії повинна дорівнювати енергії випаровування, яку можна відшукати в довідковій літературі або по залежності тиску пари цього матеріалу від температури.

Залежність тиску пари деяких металів від температури наведена в табл. 8.1:

Таблиця 8.1

тиск елемент	Постійн а ґратки, Å	10 ⁻⁴ мм.рт.ст	10 ⁻³ мм.рт.ст	10 ⁻² мм.рт.ст	10 ⁻¹ мм.рт.ст	10 ⁰ мм.рт.ст
Алюміній	4.05 К	1245 К	1355 К	1490 К	1640 К	1830 К
Мідь	3.61 К	1300 К	1405 К	1530 К	1640 К	1890 К
Нікель	3.52 К	1430 К	1535 К	1655 К	1800 К	1970 К
Титан		1715 К	1850 К	2010 К	2210 К	2450 К
Залізо	2.87 К	1500 К	1615 К	1750 К	1920 К	2130 К

Для знаходження енергії випаровування по таблиці необхідно використати формулу (8.15) і в (8.14) замість $Y(0)$ поставити $E_{\text{вип}}$

$$P = P_0 \exp(-E_{\text{вип}} / KT) \quad (8.15)$$

$$E_{\text{вип}} = 1/6(\beta^3 / \gamma^2) \quad (8.16)$$

За допомогою формули (8.16) і (8.13), де необхідно визначити α експериментально, потрібно знайти β і γ . Це дасть можливість побудувати графік функції потенціальної енергії.

Для експериментального визначення α використовуються металеві стержні довжиною 120÷150 мм. Їх нагрівають в вертикальній циліндричній печі від кімнатної температури до 200° С. Видовження стержня вимірюється індикатором малих переміщень з точністю 0.01 мм. Температура стержня контролюється термопарою. Необхідно отримати не менше 5 значень, побудувати графік залежності $\Delta l = f(T)$ і визначити α . Розрахувати $E_{\text{вип}}$. За допомогою рівнянь (8.13) та (8.16) знайти β і γ . Побудувати графік функції $Y(x)$.

8.2 Завдання 1

- 1 Експериментально визначити коефіцієнт лінійного розширення α .
- 2 Обчислити коефіцієнт ангармонічності γ .
- 3 Побудувати функцію потенціальної енергії $Y(x)$.
- 4 Визначити точність експерименту шляхом порівняння одержаних результатів з довідковими даними, зробити висновок.

Прилади і обладнання

1. Індикатор малих переміщень.
2. Циліндрична піч.
3. Термопара.
4. Мілівольтметр.
5. Металеві стержні.

Порядок виконання роботи

1. Уважно ознайомитись з теоретичною частиною роботи.
2. Виконати вимірювання теплового розширення. Для цього необхідно:
 - а) поставити металевий стержень з відомого металу в пічку;
 - б) закріпити індикатор малих переміщень так, щоб його шуп упирався в кінець стержня;
 - в) виставити шкалу індикатора на 0;
 - г) включити нагрівання і слідкувати за температурою та показаннями індикатора, записувати температуру через кожні 20° С і відповідні показання індикатора; нагрівати до 120÷130° С;
 - д) побудувати графік залежності видовження стержня від температури $\Delta l = f(T)$; вважаючи що $\Delta l = \alpha \Delta T$, визначити із графіка коефіцієнт лінійного розширення α .
3. Використовуючи формулу (8.15) та дані з таблиці тиску пари при різних температурах знайти енергію випаровування $E_{\text{вип}}$. Це можна зробити аналітично або графічно за допомогою графіка $\ln(p) = f(1/T)$.
4. Користуючись отриманими даними α та $E_{\text{вип}}$ за допомогою формул (8.13) та (8.16) знайти коефіцієнти β та γ . Перевірити і правильно записати їх розмірність.
5. За допомогою формули (8.4) (де $Y(0) = -E_{\text{вип}}$), та отриманих значень β і γ спочатку розрахувати величину потенціальної енергії $Y(x)$ для різних значень X . Для X пропонується такий ряд значень: $-3a, -2a, -1a, -0.5a, 0, 0.5a, 1a, 2a, 3a, 4a$.

де a – стала кристалічної ґратки для даного металу. Цю сталу можна відшукати в приведеній вище таблиці

8.1. Отримавши значення потенціальної енергії для різних X побудувати графік залежності $Y = f(x)$

6. Для спрощення роботи за п.5 пропонується використати обчислювальну техніку. При цьому необхідно розробити програму обчислень, та побудови графіка, ввести програму в ЕОМ, її графік на екран і показати ці результати викладачу.
7. Зробити висновки.

8.3 Завдання 2

- 1 Експериментально визначити питомий вигин A та коефіцієнт чутливості M спіралі біметалевого термометра.
- 2 Порівняти знайдені значення A і M з довідковими та визначити марку біметала з якого виготовлена спіраль біметалевого термометра.

Прилади і обладнання

1. Цифровий мультиметр DT-838 з термопарою – 1 шт.
2. Біметалевий термометр – 1 шт.
3. Чашка Петрі – 1 шт.

Дія **біметалевих термометрів** заснована на термометричній властивості теплового розширення різних твердих тіл. У біметалевих термометрах у якості чутливого елемента використовують пластинки або стрічки, що складаються з двох шарів різнорідних металів, які характеризуються різними коефіцієнтами теплового розширення. При зміні температури біметалевої пластинки вона деформується внаслідок неоднакового розширення окремих шарів пластинки (рис. 8.2).

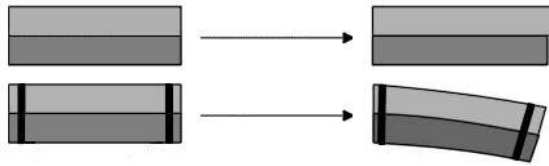


Рисунок 8.2

Якщо закріпити нерухомо один кінець пластинки, то по переміщенню іншого кінця, з'єднаного з покажчиком, можна судити про зміну температури. Чутливі елементи біметалічних термометрів зазвичай виконують у формі спіралей, що з'єднуються зі стрілочним покажчиком (рис. 8.3). Прикладом такого біметалевого термометра може служити кімнатний термометр з круглим циферблатом.

Чутливість до зміни температури біметалів характеризується двома параметрами: величиною питомого вигину і коефіцієнтом чутливості.

Питомий вигин A – це вигин вільного кінця пластинки термобіметала довжиною 100 мм і товщиною 1 мм при нагріванні на 1°C .

Коефіцієнт чутливості M – це умовна різниця коефіцієнтів теплового розширення активного та пасивного шарів термобіметалу.

Залежність між питомим вигином A і коефіцієнтом чутливості M визначається співвідношенням:

$$A = \frac{7500 \cdot M}{C}, \quad (8.17)$$

де $C = 1,15 \div 1,25$ – емпіричний поправочний коефіцієнт.

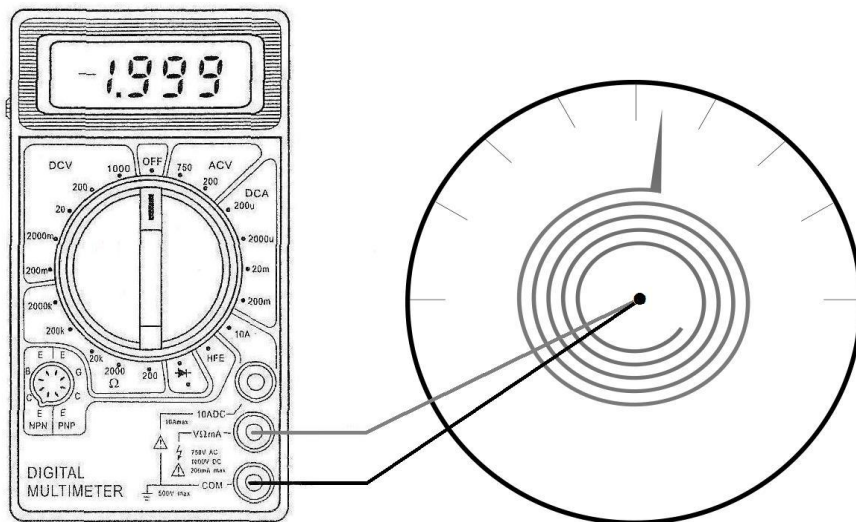


Рисунок 8.3

Порядок виконання роботи

1. Зібрати робочу схему згідно з монтажною, рис. 8.3.
2. Виставити межу вимірювань на DT-838 „ТЕМП °С”.
3. Налити у чашку Петрі орієнт. Починаючи з температури 80° С реєструємо кутові переміщення покажчика біметалевого термометра через кожні 5° С та заносимо до табл. 8.2:

Таблиця 8.2

№, п/п	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$T, ^\circ\text{C}$	$n,$ поділок	$\varphi, ^\circ$	$A, 1/^\circ\text{C}$	$M, 1/^\circ\text{C}$
1	80					
2	75					
...	...					
12	25					

4. Перевести поділки шкали n у кутові градуси φ положення стрілки біметалевого термометра, вважаючи, що 120 поділок – 360°. Занести розраховані значення φ до табл. 8.2.
5. Побудувати графік залежності кутового положення стрілки біметалевого термометра від температури: $\varphi = f(T)$, де $T = t_k + \Delta t$; t_k – кімнатна температура; Δt – різниця між поточною температурою біметалевої стрічки та кімнатною.
6. Вважаючи, що залежність між φ та T на графіку лінійна, та користуючись формулою:

$$\varphi = \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{A \cdot l}{d} \cdot (t_k + \Delta t) = \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{A \cdot l}{d} \cdot T, \quad (8.18)$$

де φ – кут на який повертається стрілка термометра при зміні температури на Δt ; $l = 110$ мм та $d = 0,1$ мм – довжина та товщина стрічки спіралі (при кімнатній температурі), відповідно; $\pi = 3,14$;

розрахувати питомий вигин A біметалевої спіралі.

7. Знаючи A , із співвідношення (8.17) знайти коефіцієнт чутливості M .
8. Порівняти знайдені значення A та M з довідковими (табл. 8.3) та визначити марку біметала, з якого виготовлена спіраль біметалевого термометра, який використовується у роботі.
9. Написати висновки.

Таблиця 8.3. Фізико-механічні властивості термобіметалу та його складових

Параметр	Марка термобіметала						
	ТБ2013	ТБ1613	ТБ1523	ТБ1423	ТБ1323	ТБ1353	ТБ1254
Марка стопу складових :							
Активний шар	75ГНД	75ГНД	20НГ	24НХ	19НХ	Л62	Л90
Пасивний шар	36Н	45НХ	36Н	36Н	36Н	36Н	36Н
Питомий вигин A , $1/^\circ\text{C}$	0.20	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.12
Коефіцієнт чутливості M , $\cdot 10^{-6}$, $1/^\circ\text{C}$	30-36	23-28	21-25	20-24	18.5-22.5	19.5-25	19-24

Контрольні запитання

1. Які вам відомі теплові властивості і явища твердих тіл?
2. Що називають лінійним коефіцієнтом теплового розширення?
3. Що таке гармонічні та ангармонічні коливання?
4. Який вигляд має формула для сили взаємодії між атомами при ангармонічних коливаннях?
5. Які теплові коливання слід вважати малими? Що можна сказати про величину амплітуди таких коливань?
6. Що таке теплоємність та теплопровідність твердого тіла?

Література

1. Говорун Т.П. Фізика конденсованого стану матеріалів / Т.П. Говорун, В.О. Пчелінцев, В.М. Радзівський, Л.В. Носонова. навч. посіб. - Суми: СумДУ, 2015. - 236 с.
2. Поплавко Ю. М. Фізичне матеріалознавство, Ч. 3. Провідники та магнетики. /Ю. М. Поплавко, С. О. Воронов, Ю. І. Якименко.. Навчальний посібник. К.: НТУУ «КПІ», 2011. - 372 с.
3. Подопрігора Н.В., Садовий М.І., Трифонова О.М.. Фізика твердого тіла / Н.В. Подопрігора, М.І. Садовий, О.М. Трифонова: навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів, – Кіровоград: ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2014. – 416 с. Д
4. Кшнякин, В.С. Основи фізичного матеріалознавства [Електронний ресурс] / В.С. Кшнякин, А.С. Опанасюк, К.О. Дядюра. - Електронне вид. каф.: Електроніки і комп'ютерної техніки; ПМіТКМ. - Суми: СумДУ, 2015. - 466 с.