

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЛІНІЙНОГО ТЕПЛОВОГО
РОЗШИРЕННЯ МЕТАЛЕВИХ І НЕМЕТАЛЕВИХ ТВЕРДИХ ТІЛ**

Удосконалена експериментальна установка для визначення коефіцієнта лінійного теплового розширення металевих і неметалевих твердих тіл.

Ключові слова: теплове розширення, ущільнення компресора, точність досліджень, металеві і неметалеві тверді тіла.

V. P. SVIDERSKIY, V. S. YAREMCHUK, YU. O. ZAKHARCHUK
Khmelnitskiy national university

**THE IMPROVEMENT OF EXPERIMENTAL DEVICE FOR DEFYING THE LINEAR THERMAL EXPANSION
COEFFICIENT OF METAL AND NON-METAL SOLID BODIES**

The advanced experimental device for defying the linear thermal expansion coefficient of metal and non-metal solid bodies allows to conduct researches both metals and non-metals.

The precision of conducted researches of the linear thermal expansion coefficient of antifriction material F4YB20 with the usage of the advanced experimental device increases in 2.5 times.

Key words: thermal expansion, compressor condensation, the precision of researches, metal and non-metal solid bodies.

Тверді тіла при нагріванні розширюються. Це може призвести до виникнення значних механічних напруг, а тому в техніці доводиться запобігати наслідкам теплового розширення твердих тіл, враховуючи їх. Так, при застосуванні ущільнюючих елементів з неметалевих матеріалів в компресорах без змщення необхідно детально розраховувати теплові зазори в ущільненнях, інакше при роботі компресора ущільнення в результаті теплового розширення може вийти з ладу [1].

Розширення твердого тіла при нагріванні пов'язане з характером теплового руху іонів і атомів, розміщених у вузлах кристалічної ґратки. Ці частинки при $T > 0$ К коливаються навколо своїх положень рівноваги. Якщо припустити, що на певну частинку діє сила тільки з боку найближчих сусідніх частинок, а ті у свою чергу вважати умовно нерухомими, то ця сила лінійно залежить від величини зміщення x вибраної частинки від її положення рівноваги [2]:

$$f = -kx, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, величина якого залежить від природи твердого тіла.

Таку силу називають квазіпружною, а частинку, що коливається під її дією, – гармонічним осцилятором. Потенціальна енергія гармонічного осцилятора визначається виразом:

$$U = \frac{kx^2}{2}. \quad (2)$$

Розглянемо поведінку двох частинок твердого тіла A та B при температурі $T = 0$ К (вони ж A' та B' при $T > 0$ К). При $T = 0$ К ці частинки умовно нерухомі, відстань між ними дорівнює r_0 , а потенціальна енергія кожної з них – U_0 . При $T > 0$ К частинки починають коливатися навколо положень рівноваги, їх потенціальна енергія зростає і $U_1 > U_2$ (див. рис. 1).

Для простоти вважатимемо, що коливання здійснює тільки частинка B' , тоді відстань r між частинками, зміщення частинки B' від положення рівноваги x та r_0 поєднані виразом $x = r - r_0$, а потенціальна енергія:

$$U_1 = \frac{k(r - r_0)^2}{2}. \quad (3)$$

З огляду на симетрію кривої $U(r)$ відносно прямої OO' , яка проходить через положення рівноваги частинки B при різних значеннях температури, відхилення зазначеної частинки праворуч і ліворуч збігаються за величиною: $x_1 = x_2$. Отже, нагрівання в такому випадку не могло би викликати розширення тіла, тому що підвищення температури призводило би тільки до збільшення амплітуди коливань частинок, а середня відстань між ними залишалася незмінною.

Насправді же в реальних твердих тілах кожна частинка зазнає впливу як з боку сусідніх частинок, так і більш віддалених. Тому залежність результуючої сили f , що діє на частинку, від її зміщення визначається співвідношенням:

$$f = -kx + \gamma x^2, \quad (4)$$

де k та γ визначається природою твердого тіла.

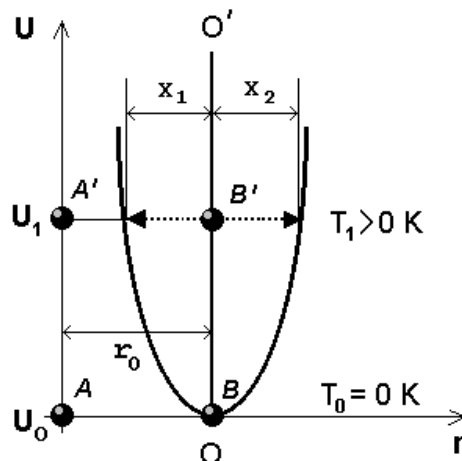


Рис. 1. Залежність потенціальної енергії частинок ідеального твердого тіла U від відстані між ними r при $T_1 > 0$ К

Ця сила вже не є квазіпружною, а коливання частинки під її впливом не є гармонічним. Таким чином, у реальних твердих тілах частинки виступають як ангармонічні осцилятори.

Залежність $U(r)$ для ангармонічного осцилятора зображена на рис. 2.

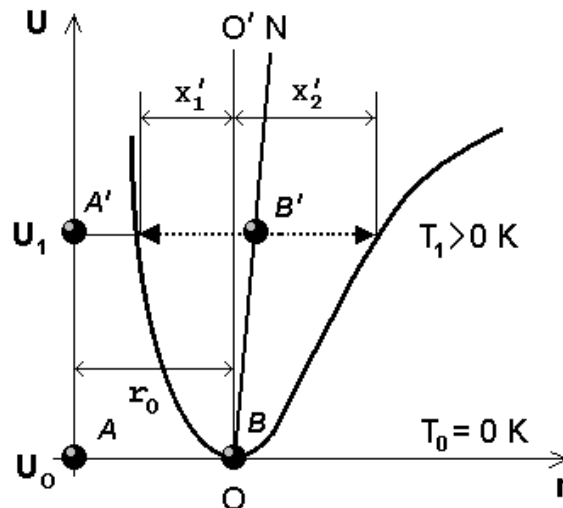


Рис. 2. Залежність потенціальної енергії (U) частинок реального твердого тіла від відстані (r) між ними при $T_1 > 0$ К

Несиметричний характер кривої ілюструє те, що при довільній $T > 0$ К відхилення від положення рівноваги частинки B у різних напрямках вздовж r виявляються неоднаковими. Тому середнє положення такої частинки вже не буде збігатися з положенням рівноваги для гармонічного осцилятора. З підвищенням температури величина цього зміщення збільшується, середні положення частинки B' для вищих температур будуть розташовані на прямій ON , а це означає збільшення середньої віддалі між частинками. Отже, тверді тіла при нагріванні розширюються.

Ступінь розширення твердого тіла визначається коефіцієнтом лінійного теплового розширення. Коефіцієнт лінійного теплового розширення α чисельно дорівнює відносній зміні лінійних розмірів тіла $\Delta L/L$, зумовленій зміною його температури на 1 К.

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{1}{T}. \tag{5}$$

Оскільки $\alpha = f(T)$, формула (5) дозволяє визначити тільки середнє значення α для певного інтервалу ΔT .

Коефіцієнт лінійного розширення при заданій температурі T , визначений для безмежно малого інтервалу зміни температури dT , називають істинним:

$$\alpha_i = \frac{dL}{L} \cdot \frac{1}{dT}. \tag{6}$$

Розв'язок диференційного рівняння (6) має вигляд: $\ln L = \alpha T + C$.

Константу інтегрування C знаходимо з початкових умов – за $T = 0$, $C = \ln L_0$.

Отже, основне рівняння твердих тіл:

$$L = L_0 e^{\alpha T}, \quad (7)$$

де L – довжина тіла за температури T ; L_0 – довжина тіла за абсолютного нуля.

Експериментально встановлено, що коефіцієнт α не є сталою величиною, а є функцією температури, що особливо помітно за низьких температур.

З рівняння (7) видно, що із зміною температури довжина тіла змінюється за експоненціальним законом. Однак на практиці частіше всього використовують наближену формулу, яку одержують при розкладі множника $e^{\alpha T}$ в ряд. За $\alpha T \ll 1$, маємо: $e^{\alpha T} = 1 + \alpha T + \dots$. Нехтуючи членами із степенями вище першої за температурою, отримуємо: $L = L_0 (1 + \alpha T)$. Оскільки довжина досліджуваного тіла L_0 за абсолютного нуля практично не може бути визначена, то зручно, використовуючи експоненціальний закон, знайти довжини L_1 та L_2 за довільних температур: $L_1 = L_0 e^{\alpha T_1}$ та $L_2 = L_0 e^{\alpha T_2}$, звідки виходить, що $L_2 = L_1 e^{\bar{\alpha} \Delta T}$ або наближено:

$$L_2 = L_1 (1 + \bar{\alpha} \Delta T), \quad (8)$$

де $\bar{\alpha}$ – середній коефіцієнт лінійного розширення тіла в інтервалі температур ΔT .

На практиці частіше всього за T_1 беруть температуру танення льоду за нормальних умов, тобто 273,15 К (або $t = 0$ °С), а за L_1 відповідно довжину тіла L_0 за T_1 . Тоді довжина тіла L за будь-якої температури t (за шкалою Цельсія) може бути виражена рівнянням:

$$L = L_0 (1 + \bar{\alpha} t), \quad (9)$$

Визначивши експериментально $\bar{\alpha}$ довільного твердого тіла, можна на основі закону Гука розрахувати деформації і напруги, які виникають в деталях і конструкціях за їх теплового розширення. Оскільки $\bar{\alpha}$ залежить від T , то в багатьох практично важливих випадках виникає необхідність експериментально дослідити цю залежність.

Установка для визначення коефіцієнта лінійного розширення за методом Д.І. Менделєєва [3] має наступні недоліки:

а) в зв'язку відсутнім термостатуванням зразка цю установку застосовують в основному для визначення середнього коефіцієнта лінійного розширення ізотропних речовин – металів;

б) зміна довжини нагрітого зразка порівняно з його початковою довжиною (при кімнатній температурі) вимірюється індикатором годинникового типу з ціною поділки шкали 0,01 мм, що не забезпечує достатньо точне вимірювання.

Мета роботи полягає у розробці та удосконаленні установки для визначення коефіцієнта лінійного розширення з достатньо високою точністю і можливості її використання не тільки для металів, а й неметалів.

У вдосконаленій експериментальній установці застосування термостатуючого пристрою і охолоджуючої рідини “Тосол А 40” [4] з температурою кипіння 120 °С, що на 4/5 заповнює пробірку з дослідним зразком дозволяє забезпечити рівномірний нагрів зразка при 100 °С. Крім того, більш точне

визначення зміни довжини нагрітого зразка порівняно з його початковою довжиною (при кімнатній температурі) досягається за рахунок заміни індикатора годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм на важільно-зубчасту головку 2МИГ з ціною поділки 0,002 мм.

Опис експериментальної установки (рис. 3). Досліджуваний зразок 7 твердого тіла що заходить в скляній пробірці 5 нагрівають в охолоджувальній рідині “Тосол А 40” (з температурою кипіння 120 °С) [4] до температури 100 °С. Після цього за допомогою термостатуючого пристрою 16, з термопарою 17, зразок витримують при 100 °С протягом десяти хвилин. Зміна довжини нагрітого зразка порівняно з його початковою довжиною (при кімнатній температурі) вимірюється з

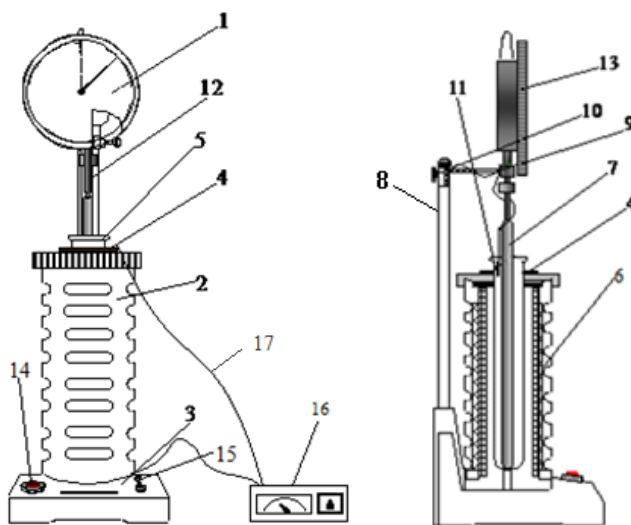


Рис. 3. Удосконалена експериментальна установка для визначення коефіцієнта лінійного теплового розширення металів і неметалів: 1 – важільно-зубчаста головка; 2 – корпус; 3 – основа; 4 – прокладка; 5 – пробірка; 6 – нагрівач; 7 – досліджуваний зразок; 8 – стійка; 9 – кронштейн; 10 – гвинт; 11 – кришка; 12 – штوك; 13 – оберտальна шкала; 14 – індикаторна лампа; 15 – кнопка вимикача; 16 – термостатуючий пристрій; 17 – термопара

допомогою важільно-зубчастої головки 2МИГ з ціною поділки 0,002 мм і границею вимірювань 0–2 мм – 1, яка має шток 12, що рухається вгору та вниз. Прилад складається з корпусу 3, всередині захисного корпусу 2 знаходиться нагрівач 6, до якого під'єднаний термостатуючий пристрій 16. При проведенні дослідів в нагрівач через прокладку 4 та отвір в кришці приладу 11 вводять скляну пробірку 5 із дослідним стрижнем 7. На корпусі приладу встановлено стійка 8 з кронштейном 9, що може повертатись навколо осі на 90°. Кронштейн фіксують гвинтом 10.

Проведення експерименту

1. Пробірки з комплекту приладу на 4/5 наповнити охолоджувальною рідиною “Тосол А 40” кімнатної температури, опустити в кожну досліджуваній стрижень, сферичним кінцем у низ. Лабораторним термометром виміряти температуру води t_1 .

2. В кронштейн 9 встановити важільно-зубчасту головку 2МИГ і відвести її на чверть обороту в бік до упору. Пробірку з досліджуваним стрижнем через гумову прокладку 4 та отвір в кришці приладу 11 ввести в нагрівач. Встановити в пробірку термопару 17.

3. Відтягнути шток важільно-зубчастої головки, встановити її над пробіркою, повертаючи кронштейн до упору в протилежному напрямку. Опустити шток в заглиблення на торці стрижня і зафіксувати кронштейн гвинтом.

4. За допомогою обертальної шкали важільно-зубчастої головки 13 встановити стрілку на нульову поділку. Після цього можна ввімкнути прилад в електромережу (загоряється індикаторна лампа 14).

5. Збільшення довжини зразка ΔL визначають за відхиленням стрілки важільно-зубчастої головки від початкового до кінцевого положення термостатування зразка при 100 °С протягом 10 хв. Для більш точного визначення коефіцієнта лінійного розширення $\bar{\alpha}$ проводять 3–5 відліки, які ведуть з точністю до половини ціни поділки шкали важільно-зубчастої головки 2МИГ (1 мкм).

6. Кнопкою вимикача 15 вимкнути живлення приладу, вийняти нагріту пробірку із зразком. Повторити операції пунктів 1–6 для іншого зразка, а результати вимірювань занести в таблицю.

Обробка результатів

1. Після закінчення роботи з приладом підраховують чисельне значення коефіцієнта лінійного розширення зразка за формулою:

$$\alpha_i = \frac{L_2 - L_1}{L_1(t_2 - t_1)} = \frac{\Delta L}{L_1 \Delta t}, \quad (10)$$

де t_1 та t_2 – початкова та кінцева температура тіла, °С; L_1, L_2 – довжини тіла, що відповідають цим температурам, відповідно, мм; ΔL – зміна довжини тіла, мм;

2. Визначаємо вибіркоче середнє значення коефіцієнта лінійного розширення зразків:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n}, \quad (11)$$

де α_i – відповідний коефіцієнт лінійного розширення за даними одного заміру; n – кількість замірів;

3. Знаходимо вибіркочну дисперсію і середнє квадратичне відхилення коефіцієнта лінійного розширення відповідно:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2, \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}. \quad (13)$$

4. Визначаємо вибіркочний коефіцієнт варіації:

$$\gamma = \frac{\sigma}{\bar{\alpha}} \cdot 100 \%. \quad (14)$$

Наведемо умовний приклад визначення коефіцієнта лінійного розширення сталюого зразка із застосуванням стандартної установки [3].

Стальний стрижень (сталь 45) довжиною $L = 160$ мм, встановлено в пробірку наполовину заповнену водою при температурі $t_1 = 20$ °С. Результати п'яти дослідів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Експериментальні та розрахункові дані

№ з/п	ΔL_i , мм	$\alpha_i \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	$\bar{\alpha} \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	$\sigma^2 \cdot 10^{-12}$, 1/К ²	$\sigma \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	γ , %
1	0,150	11,72	11,95	0,1217	0,349	2,92
2	0,150	11,72				
3	0,160	12,50				
4	0,155	12,11				
5	0,150	11,72				

Приклад визначення коефіцієнта лінійного розширення антифрикційного матеріалу Ф4УВ20 [5] із застосуванням удосконаленої установки. Результати п'яти дослідів наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові дані

№ з/п	ΔL_i , мм	$\alpha_i \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	$\bar{\alpha} \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	$\sigma^2 \cdot 10^{-12}$, 1/К ²	$\sigma \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	γ , %
1	0,861	67,3	66,94	0,608	0,78	1,16
2	0,845	66,0				
3	0,870	68,0				
4	0,850	66,4				
5	0,858	67,0				

Висновки

1. Удосконалена експериментальна установка для визначення коефіцієнта лінійного теплового розширення твердих тіл дає можливість проводити дослідження як металів, так і неметалів.

2. Точність виконаних досліджень коефіцієнта лінійного теплового розширення антифрикційного матеріалу Ф4УВ20 з застосуванням удосконаленої установки зростає в 2,5 разів.

Література

1. Фотин Б. С. Поршневые компрессоры / Б. С. Фотин, И. Б. Пирумов, И. К. Прилуцкий, П. И. Пластинин. – М. : Машиностроение, 1987. – 372 с.
2. Савельев І. В. Курс загальної фізики / І. В. Савельєв. – М. : Освіта. – 1996. – Т. 1. – С. 58–95.
3. Кортнев А. В. Практикум з фізики / А. В. Кортнев, Ю. В. Рубанов, А. Н. Куценко. – М. : Вища школа, 1993. – С. 154–156.
4. Милованов А. В. Топливо и смазочные материалы : учеб. пособие / А. В. Милованов, С. М. Ведищев. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2003. – 80 с.
5. Сиренко Г. А. Антифрикционные карбопластики / Г. А. Сиренко. – К. : Техника, 1985. – 195 с.

References

1. Fotin B. S. Sucker compressor / B. S. Fotin, I. B. Pirumov, I. K. Prilutskiy, P. I. Platinin. – M. : Mashinostroenie, 1987. – 372 p.
2. Saveliev I. V. Course of general physics / I. V. Saveliev. – M. : Osvita. – 1996. – V. 1. – P. 58–95.
3. Kortniev A. V. Practice of physics / A. V. Kortniev, Yu. V. Rubanov, A. N. Kutsenko. M. : Vyscha schkola, 1993. – P. 154–156.
3. Milovanov A. V. Fuel and lubricant materials : school-book / A. V. Milovanov, S. M. Vedishev. – Tambov : TSTU PH, 2003. – 80 p.
5. Sirenko G. A. Antifriction carboplastics / G. A. Sirenko. – K. : Tekhnika, 1985. – 195 p.

Рецензія/Peer review : 4.3.2013 р. Надрукована/Printed :23.4.2013 р.

Рецензент: д. т. н. Каплун В. Г.