

**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 DETERMINING THE LINEAR THERMAL EXPANSION  
COEFFICIENT OF METAL AND NON-METAL SOLID BODIES**

*The advanced experimental device for determining 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 змашення 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  $\gamma$  визначається природою твердого тіла.

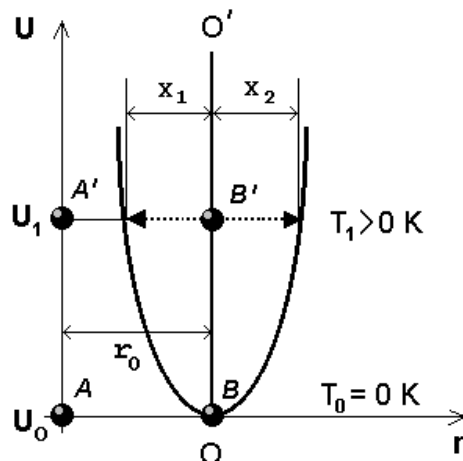


Рис. 1. Залежність потенціальної енергії частинок ідеального твердого тіла  $U$  від відстані між ними  $r$  при  $T_1 > 0$  K

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.

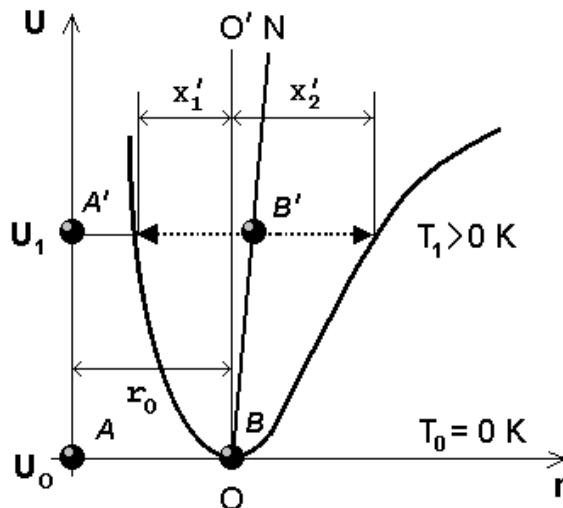


Рис. 2. Залежність потенціальної енергії ( $U$ ) частинок реального твердого тіла від відстані ( $r$ ) між ними при  $T_1 > 0$  K

Несиметричний характер кривої ілюструє те, що при довільній  $T > 0$  K 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  $\alpha$  чисельно дорівнює відносній зміні лінійних розмірів тіла  $\Delta L/L$ , зумовленій зміною його температури на 1 K.

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{1}{T}. \quad (5)$$

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

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

$$\alpha_i = \frac{dL}{L} \cdot \frac{1}{dT}. \quad (6)$$

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  $\alpha$  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, отримаємо:  $L = L_0 (1 + \alpha T)$ . 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  $\Delta T$ .

На практиці частіше всього за  $T_1$  беруть температуру танення льоду за нормальних умов, тобто 273,15 К (або  $t = 0^\circ \text{C}$ ), 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;

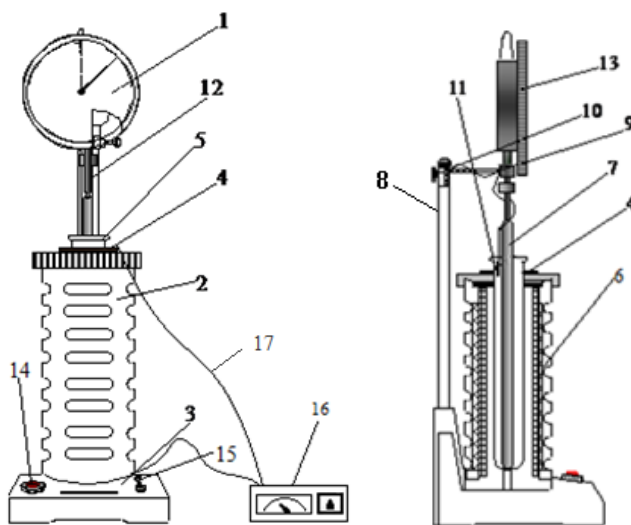
б) зміна довжини нагрітого зразка порівняно з його початковою довжиною (при кімнатній температурі) вимірюється індикатором годинникового типу з ціною поділки шкали 0,01 мм, що не забезпечує достатньо точне вимірювання.

**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  $120^\circ \text{C}$ , що на 4/5 заповнює пробірку з дослідним зразком дозволяє забезпечити рівномірний нагрів зразка при  $100^\circ \text{C}$ . 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  $120^\circ \text{C}$ ) [4] до температури  $100^\circ \text{C}$ . Після цього за допомогою термостатуючого пристрою 16, з термopарою 17, зразок витримують при  $100^\circ \text{C}$  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 – шток; 13 – оберտальна шкала; 14 – індикаторна лампа; 15 – кнопка вимикача; 16 – термостатуючий пристрій; 17 – термopара

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  $\Delta L$  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;  $\Delta L$  – зміна довжини тіла, мм;

2. Визначаємо вибіркве середнє значення коефіцієнта лінійного розширення зразків:

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

де  $\alpha_i$  – відповідний коефіцієнт лінійного розширення за даними одного заміру;  $n$  – кількість замірів;

3. Знаходимо вибіркву 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 вибірквий 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 | $\Delta L_i$ , мм | $\alpha_i \cdot 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup> | $\bar{\alpha} \cdot 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup> | $\sigma^2 \cdot 10^{-12}$ , 1/К <sup>2</sup> | $\sigma \cdot 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup> | $\gamma$ , % |
|-------|-------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|--------------|
| 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 | $\Delta L_i$ , мм | $\alpha_i \cdot 10^{-6}$ , $K^{-1}$ | $\bar{\alpha} \cdot 10^{-6}$ , $K^{-1}$ | $\sigma^2 \cdot 10^{-12}$ , $1/K^2$ | $\sigma \cdot 10^{-6}$ , $K^{-1}$ | $\gamma$ , % |
|-------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| 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. Пластилин. – 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. Plastinin. – 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.