

де S – це площа, яка є перпендикулярною до напрямку перенесення тепла, $\vec{W}$ – це тепловий потік. Густина теплового потоку – це вектор, кожна компонента якого дорівнює кількості теплоти, що передається за одиницю часу через одиницю площі, яка перпендикулярна до напрямку потоку перенесення тепла.

Тепловий потік – це фізична величина, яка визначає кількість теплоти, що проходить крізь ізотермічну поверхню за одиницю часу та спрямована в напрямку, який є протилежним до градієнта температури. Тепловий потік вимірюється в системі СІ у ватах (Вт). Тепловий потік, віднесений до одиниці площі ізотермічної поверхні, називається щільністю (густиною) теплового потоку, питомим тепловим потоком або тепловим навантаженням; позначається зазвичай $\vec{q}$, вимірюється у Вт/м².

2. Теоретичне обґрунтування методики експерименту

Метод визначення коефіцієнта теплопровідності металів, який застосовано у цій роботі, базується на вимірюванні кількості тепла Q , яке проходить за одиницю часу крізь поперечний переріз S металевго зразка. Як відомо з теорії теплопровідності:

$$Q = |\kappa \cdot S \cdot \nabla T|, \quad (3.66)$$

де κ – це коефіцієнт теплопровідності, ∇T – це градієнт температури металевго зразка в напрямку, який є перпендикулярним до площі перерізу.

Незмінність градієнта температури забезпечується нагріванням правого краю зразка в електричній печі зі сталою температурою T_H та одночасним охолодженням його лівого краю проточною водою, яка також має постійну температуру T_2 . Кількість тепла Q , що проходить крізь зразок і передається воді за одиницю часу, дорівнює:

$$Q = cm(T_3 - T_1), \quad (3.67)$$

де m – це маса води, що протікає за одиницю часу в системі; c – це питома теплоємність води; T_3 – це температура, до якої нагрівається вода, що використовується для охолодження одного з кінців металевго зразка; T_1 – це температура, з якою втікає вода для охолодження досліджуваного металу.

Нехтуючи втратами тепла крізь бокову поверхню металевго зразка, яку обгорнено у теплоізоляційний матеріал, та прирівнюючи один до одного праві частини формул (3.67) та (3.66), одержуємо наступний вираз для коефіцієнта теплопровідності:

$$\kappa = \left| \frac{cm(T_3 - T_1)}{S \nabla T} \right|, \quad (3.68)$$

У формулі (3.68) у якості градієнта температури слід обрати частку $|(T_6 - T_4)/l|$, де $T_{4,6}$ – це покази термометрів вздовж досліджуваного зразка, які відстоять один від одного на відстані l (див. рис. 3.9).

3. Опис лабораторної установки

Досліджуваний зразок являє собою виготовлений із червоної міді циліндричний стрижень, що має діаметр перерізу 26 мм. Один із торців зразка розміщено у нагрівачі 7, який закріплено на штативі (див. схему пристрою на рис. 3.9). Другий його торець крізь електроізолюючий корок введено до скляного холодильника 2, який тримається на штативі 10. Бокова поверхня стрижня має теплоізоляційне покриття 5, в якому зроблено два гнізда, куди поміщено термометри 4 та 6 відповідно. Проточна вода надходить до патрубку 9 скляного холодильника 2, де розташовано термометр 1, охолоджує один із кінців стрижня і виходить крізь трубку 8, у якій влаштовано гніздо для іншого термометра 3. Гумова трубка зв'язує холодильник з хімічним краном, що регулює витрати проточної води з водопровідної мережі.

У холодильника є спеціальний додатковий патрубок, який призначено для екстремального зливу води з холодильника.

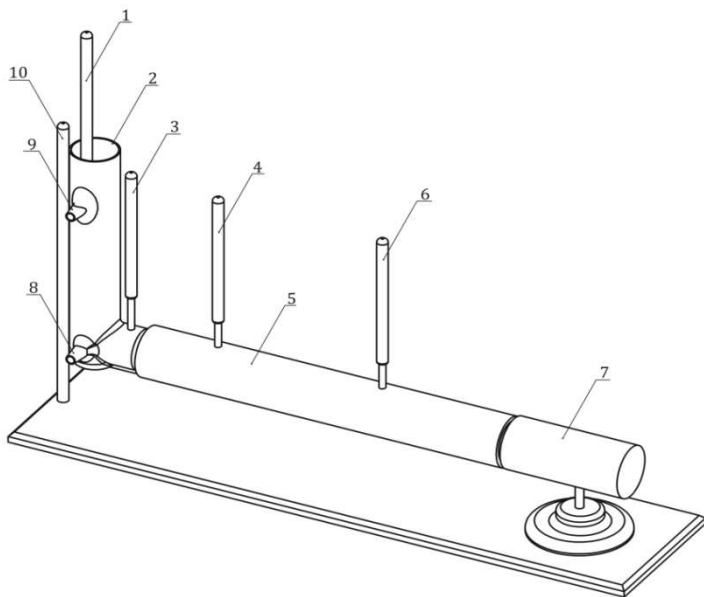


Рис. 3.9. Загальний вигляд лабораторного приладу для визначання коефіцієнта теплопровідності металів

Це убезпечить експериментаторів від випадкового переливу води через край холодильника, оскільки він відкритий зверху, а на початковій стадії досліджень можливі неконтрольовані перепади тиску у мережі водопостачання, тому слід ретельно відрегулювати приток води у систему охолодження.

У подальшому експериментаторам слід уважно слідкувати за рівнем води у холодильнику 2, маніпулюючи хімічним краном, доки там не встановиться стаціонарний рівень води.

4. Порядок виконання роботи

1. Записати до лабораторних зошитів відстань l між термометрами, що вимірюють температури металевго стрижня $T_{4,6}$ (див. рис. 3.10). Обчислити площу перерізу S стрижня, знаючи його діаметр 0.023 м.

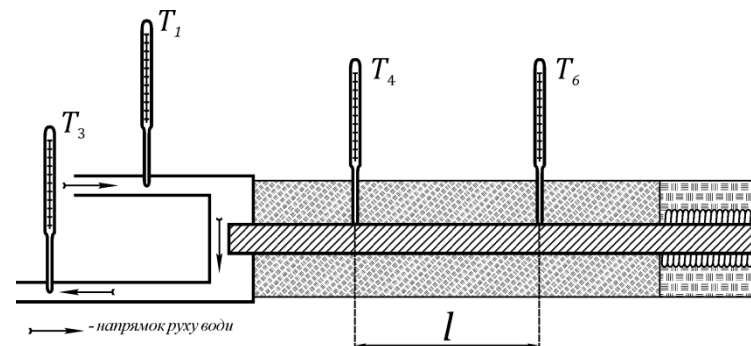


Рис. 3.10. Схема експерименту з визначання коефіцієнта теплопровідності металів

2. Почати пропускати воду крізь холодильник. За допомогою крана встановити певну сталу величину витрат води в холодильник, що вимірюється за допомогою секундоміра та мензурки з поділками. Встановити мензурку під злив води з холодильника та визначити час τ , за який до мензурки натече 50 мл води. Повторити це вимірювання не менше п'яти разів.
3. Підключити нагрівач до електромережі. Зачекати десять хвилин від початку протікання води крізь холодильник та записати показання термометрів.
4. Записувати показання термометрів $T_{4,6}$ кожні п'ять хвилин. Слід взяти до уваги, що експеримент триватиме довше години.
5. Експеримент завершиться тоді, коли покази термометрів $T_{4,6}$ припинять змінюватися. Саме ці показання потрібно буде використати при обчисленні коефіцієнта теплопровідності.
6. Вимкнути нагрівач. Повторно виміряти величину витрат води в холодильник. Перекрити воду.

5. Обробка здобутих результатів вимірювань

1. Маса m_t води, що протікає за одиницю часу крізь холодильник, дорівнює:

$$m_t = \rho V / \tau, \quad (3.69)$$

де V – це об'єм води, що виливається з холодильника за час τ , а ρ – це густина води.

2. Величина τ має як статистичну, так і інструментальну похибку (інструментальна похибка пов'язана виключно з вимірювальним інструментом або приладом). Тому щоб визначити абсолютну похибку для часу τ , слід скористатися спочатку формулою для визначення статистичної похибки:

$$\Delta S_{\tau} = t_{st} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\tau} - \tau_i)^2}{(n-1)n}}, \quad (3.70)$$

де t_{st} – це коефіцієнт Стюдента, $\bar{\tau}$ – це середнє значення часу τ , τ_i – це значення часу за результатом i -го вимірювання, n – це кількість вимірювань. Повна абсолютна похибка $\Delta\tau$ знаходиться так:

$$\Delta\tau = \sqrt{\Delta S_{\tau}^2 + \Delta\bar{X}_{\tau}^2}, \quad (3.71)$$

де $\Delta\bar{X}_{\tau}$ – це інструментальна похибка при вимірюванні часу τ .

3. Для визначення похибки m_t слід скористатися формулою (1.9), яка стосується випадку непрямих вимірювань:

$$\Delta f = \sum_{i=1}^k \left| \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \right| \Delta x_i, \quad (3.72)$$

де $f(x_i)$ – це функція, яка залежить від величини x_i , яка, в свою чергу, визначається з певною похибкою вимірювання.

4. Побудувати графіки залежності $T_4(t)$, $T_6(t)$. За графіками визначити час, починаючи з якого в системі встановився стаціонарний режим переносу тепла. Визначити значення $T_{4,6}$, що відповідають сталому режиму; ∇T в цьому режимі буде визначатися як частка: $|\nabla T| = |(T_6 - T_4)/l|$.

5. Підставивши значення $|\nabla T|$ та m_t до формули (3.68), отримаємо:

$$\kappa = \left| \frac{c\rho V(T_3 - T_1)}{S(T_6 - T_4)\bar{\tau}} \right|, \quad (3.73)$$

де $\bar{\tau}$ – це середнє значення часу, за який до мірної мензурки натікає 50 мл води.

6. Для визначення похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності слід скористатися формулою (3.72).

6. Представлення здобутих результатів

1. Представити графіки залежності $T_4(t)$, $T_6(t)$.
2. Знайти коефіцієнт теплопровідності міді, та обчислити його абсолютну та відносну похибку.
3. Порівняти отриманий результат з табличними даними.
4. Вказати, які недоліки має метод визначення теплопровідності металів, який реалізовано в цій роботі.

Контрольні питання

1. Яке явище називають теплопровідністю?
2. Що та в якому напрямку переноситься при цьому явищі?
3. Яка залежність коефіцієнта теплопровідності від температури для ідеального газу?
4. У чому полягає фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності? В яких одиницях він вимірюється?
5. Що дає внесок до коефіцієнта теплопровідності твердих тіл?
6. Порівняти значення коефіцієнтів теплопровідності металу та ідеального газу.
7. Як пов'язано коефіцієнт дифузії з коефіцієнтом теплопровідності ідеального газу?

3.7. Лабораторна робота «Визначення питомої теплоємності твердих тіл методом адіабатичного калориметра»

Мета роботи: визначити величину теплоємності твердого тіла, що розташовано в адіабатичному калориметрі.

Обладнання: короб із діелектричного матеріалу, стінки якого вкрито відносно товстим шаром теплоізолюючого матеріалу (адіабатичний калориметр); проста та диференціальна термопари, які оснащено відповідними мілівольтметрами; дві системи електричних нагрівачів, якими можна керувати; невелике тверде тіло, чия теплоємність слід виміряти.

1. Короткі теоретичні відомості

Питомою теплоємністю термодинамічної системи, наприклад, твердого тіла, називають кількість теплоти, яку слід надати одиниці маси цієї системи, аби нагріти її на один градус, тобто наступну величину:

$$C_m = \delta Q / (m \cdot dT), \quad (3.74)$$

де δQ – це елементарна кількість тепла, що передана термодинамічній системі під час певного елементарного процесу теплопередачі; dT – це елементарна зміна температури, що відбувається внаслідок передачі тепла δQ до цієї системи; m – це маса системи, яку нагрівають. У дослідах зазвичай визначають середню питому теплоємність якоїсь речовини C , що чисельно дорівнює кількості тепла ΔQ , яку слід надати одиниці маси цієї речовини, щоб підняти її температуру на один градус:

$$C = \Delta Q / (m \Delta T), \quad (3.75)$$

де ΔT – це різниця кінцевої та початкової температур досліджуваної речовини під час певного процесу теплопередачі. Зрозуміло, що ця величина залежить від способу передачі тепла до термодинамічної системи, якщо вона перебуває у газовій чи

рідинній фазі. Але для випадку твердих тіл різниця між результатами, які здобуто при різних процесах нагрівання, є неістотною через те, що вони слабко (порівняно з указаними вище агрегатними станами) змінюють свої розміри при зміні температури.

Для експериментального визначення теплоємності твердих тіл існують різні калориметричні методи. Одним із найбільш точних методів визначення теплоємності є метод адіабатичного калориметра. Ускладнення, які пов'язані з необхідністю врахування теплових втрат (які реально існують завжди) у калориметрах цього типу, усуваються тим, що вимірювання виконується за умов теплової рівноваги, тобто для однакових температур досліджуваного твердотілого зразка, що знаходиться в теплоізолюваному блоці (калориметрі), та середовища, з яким зразок безпосередньо контактує всередині калориметра. До переваг цього методу поряд із високою точністю належить також можливість визначення теплоємності твердих тіл у широкому температурному інтервалі, що особливо важливо в тому випадку, якщо з речовиною при нагріванні можуть відбуватися фазові перетворення.

Устрій адіабатичного калориметра схематично показано на рис. 3.11. Досліджуваний зразок міститься в керамічному блоці та разом із ним нагрівається електричним нагрівачем, що вмонтовано у блоці, який у свою чергу розташовано всередині калориметра. Сам зразок ще додатково нагрівається нагрівачем, який введено до внутрішньої області зразка. Після подачі електроенергії до електричного нагрівача керамічного блоку, температура зразка, який розташовано у ньому, починає підвищуватися, залишаючись при цьому дещо нижчою (через наявність процесу дисипації тепла) за температуру керамічного блоку.

Щоб установити рівність температур зразка та керамічного блоку, підключають додатковий нагрівач, який вставлено до внутрішньої області зразка. Тепер уже безпосередньо зразок нагрівається більш інтенсивно, ніж блок. Коли температура зразка стане трохи вище за температуру керамічного блоку, цей нагрівач вимикають.

Надалі підключення та вимикання цього внутрішнього

нагрівача відбувається періодично, так, щоби різниця температур ΔT зразка та блока впродовж усього часу проведення досліду змінювала свій знак. У той момент часу, коли ΔT дорівнює нулю (*при підключеному внутрішньому нагрівачеві!*), теплообмін між зразком та блоком відсутній, і вся кількість тепла ΔQ , яка виділяється внутрішнім нагрівачем, витрачається лише на нагрівання зразка. Тому в цей момент питому теплоємність можна визначити за формулою (3.75).

Кількість тепла, що виділяється на внутрішньому нагрівачу, визначається за формулою:

$$\Delta Q = IU \Delta t \text{ (Дж)}, \quad (3.76)$$

де I – це струм, що тече крізь цей нагрівач, U – це падіння напруги на ньому, Δt – це час нагрівання. За цих умов питома теплоємність зразка визначається формулою:

$$C = \frac{IU \Delta t}{m \Delta T} = \frac{IU}{m(dT/dt)}. \quad (3.77)$$

Температура у внутрішній області калориметра вимірюється термопарою. Для визначення температури калориметра використовують калібрувальну криву термопари, яка переводить поділки електронного мілівольтметра в градуси.

Різниця температур керамічного блока та твердотілого зразка вимірюється диференціальною термопарою. Різницю температур блока та цього зразка можна визначати у довільних величинах, навіть у поділках мілівольтметра, оскільки до розрахункової формули (3.77) ця величина не входить. Отже, у цьому експерименті потрібно лише помітити той момент часу, коли різниця температур блока та зразка змінює знак.

2. Опис лабораторного обладнання

Схему лабораторної установки наведено на рис. 3.11. Металевий зразок, чию теплоємність вимірюють, міститься всередині керамічного блока, який має вигляд трубки, яка гріється вмонтованими всередину блока електричними

провідниками внаслідок омичного нагрівання. До зразка безпосередньо підведено додатково ще один нагрівач. Обидві системи нагрівання підключено до різних виходів спільного блока електроживлення (БЖ).

Різницю температур зразка та блока вимірюють диференціальною термопарою, спаї якої прикріплено до цих складових дослідницького пристрою (на рис. 3.11 спаї диференціальної термопари позначено символами T_1 , T_2). Температуру керамічного блока вимірюють простою термопарою (на рис. 3.11 її спай позначено символом T_2); її підключено до електронного мілівольтметра.

Блок разом зі зразком змонтовано в калориметрі. Спочатку подається електрична напруга на електричний нагрівач, який безпосередньо знаходиться в керамічному блоці. Періодично вмикається та вимикається власне нагрівач, який

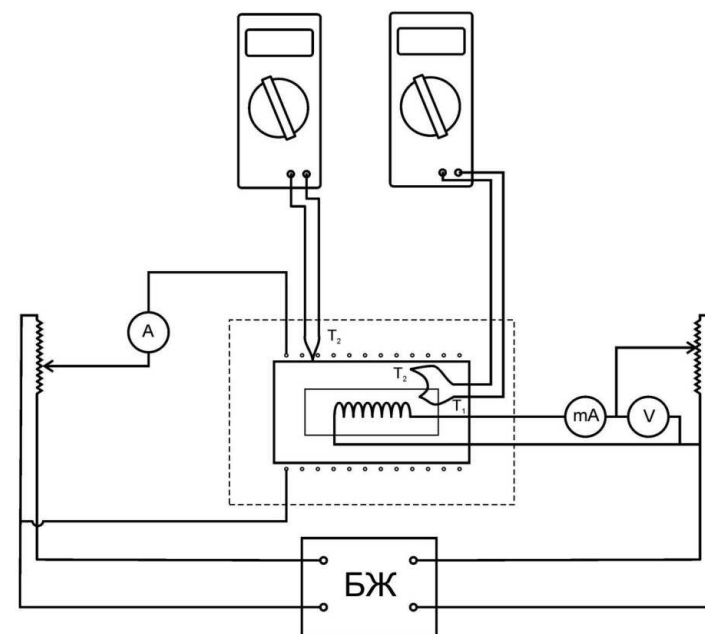


Рис. 3.11. Схема адіабатичного калориметра, який має електричні прилади для контролю процесу нагрівання металевого зразка у ньому

підведено до металевго зразка, при цьому записуються значення електричного струму та падіння напруги у цій електричній мережі.

Упродовж проведення досліду записуються дані для побудови графічних залежностей T температури блока та ΔT (різниці температур блока та зразка) від часу. Для визначення кутового коефіцієнта dT/dt , що входить до формули (3.77), слід побудувати дотичну лінію. Саме за значенням кутового коефіцієнта у точці, де ΔT змінює знак (тобто коли встановлюється теплова рівновага між блоком та зразком), і слід обчислювати питому теплоємність зразка, скориставшись формулою (3.77).

Слід записати в лабораторному журналі, що знайдене значення теплоємність відноситься саме до тієї температури, яку потрібно підрахувати за даними простої термопари саме в той момент, коли різниця температур блоку та зразка змінює знак.

3. Порядок виконання роботи

1. Побудувати графіки залежності $\Delta T(t)$ для трьох значень фонові температури (температури керамічного блока).
2. Побудувати графік залежності температури блока $T(t)$ від часу, позначити на ньому точками температури, за яких визначено теплоємність зразка.
3. Обчислити за формулою (3.77) величину теплоємності досліджуваного металевго зразка.
3. Порівняти здобуте значення теплоємності з близькими за величиною табличними даними.

Контрольні питання

1. Що таке теплоємність термодинамічної системи?
2. За яких умов ця величина має певний фізичний зміст?
3. Яким чином теплоємність твердих тіл залежить від температури?
4. Чому на графіку $T(t)$ змінюється нахил дотичної в «нульовій» точці різниці температур за різних значень фонові температури (температури блока)?

5. В яких одиницях вимірюється теплоємність?
6. Як теплоємність ідеального газу залежить від температури?
7. Як застосовується квантова теорія до розрахунку теплоємності твердих тіл? (за Ейнштейном, за Дебаєм).

3.8. Лабораторна робота «Визначення коефіцієнтів пружності при поздовжній та поперечній деформаціях»

Мета роботи: визначити величини коефіцієнтів пружності металевих зразків при поздовжній та поперечній деформаціях.

Обладнання: для визначення модуля Юнга використовують прилад Лермонтова з набором тягарців та освітлювальним пристроєм; для визначення модуля зсуву використовують обертовий маятник та додатковий тягарець у вигляді масивного кільця з вузьким прорізом.

1. Короткі теоретичні відомості

Під дією зовнішніх сил змінюється взаємне розташування атомів твердого тіла, вони зміщуються зі своїх рівноважних положень, які відповідають мінімумам їхньої потенціальної енергії. Через це в твердих тілах виникають сили, що обумовлені міжатомною взаємодією, які прагнуть повернути атоми твердих тіл до їхніх первісних положень. Ці внутрішні сили, за третім законом Ньютона, протидіють зовнішнім силам, а при досягненні певного рівноважного стаціонарного стану вони врівноважують зовнішні сили.

Якщо зовнішні сили не перевищують певного рівня, що змінюється в досить широкому діапазоні для кристалів різних твердих тіл, то зсув частинок та ті деформації, що виникають унаслідок цього, є лінійними та після зняття напруження лінійні розміри тіл повертаються до первісних значень. Такі деформації називають пружними. При пружній деформації після зняття дії зовнішніх сил кристал під дією внутрішніх сил повертається до свого первісного стану. У пружно деформованому стані про величину і характер деформації можна судити по зміні

зовнішньої форми кристала. А величину внутрішніх напружень можна визначити за величиною зовнішніх напружень, що діють на тверде тіло.

Енергію пружної деформації, яку накопичено твердим тілом, можна визначити, обчисливши роботу, що виконано при деформації тіла зовнішніми силами. Лінійна залежність між силою та пружною деформацією для твердих тіл свідчить про те, що криву потенціальної енергії при малих зсувах можна приблизно замінити параболою. Це відповідає моделі твердого тіла (кристала) у вигляді квазіпружних вібраторів (див. рис. 3.12).

Пружні властивості ізотропних твердих тіл визначаються двома константами: модулем Юнга E та модулем зсуву G . Важливою властивістю пружної деформації є лінійна залежність величини деформації від прикладеної зовнішньої сили F . Пружна деформація видовження ізотропного твердого тіла (для таких тіл їхні пружні властивості є однаковими вздовж усіх напрямків) вздовж однієї осі (рис. 3.13) кількісно описується законом Гука (1635–1703 р.):

$$F = ES \cdot \Delta l / l, \quad \text{або} \quad \sigma = E\varepsilon, \quad (3.78)$$

де l та S – рівноважні значення (такі, що відповідають відсутності дії зовнішньої сили) довжини та площі поперечного перерізу досліджуваного твердотілого зразка, σ – це

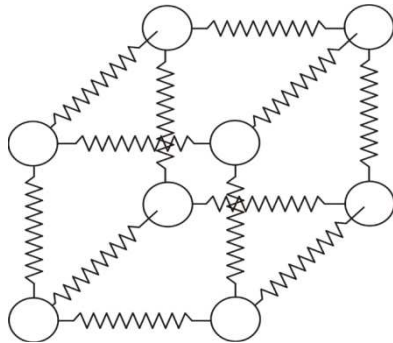


Рис. 3.12. Моделювання елементарної ґратки твердого тіла квазіпружним вібратором

напруження поздовжньої деформації видовження, $\varepsilon = \Delta l / l$ – це відносне поздовжнє видовження. Зазначимо, що в межах лінійної теорії все, що було сказано про деформацію видовження, стосується і випадку деформації стискання. Тому ми не будемо далі в цій роботі окремо виділяти процес деформації стискання.

Іншим типом деформації є деформація зсуву. При лінійному зсуві (рис. 3.14) зв'язок між силою та поперечною деформацією Δl задається аналогічним лінійним співвідношенням:

$$F = GS \cdot \Delta l / h = GS \cdot \tan(\alpha) \approx GS\alpha, \quad \text{або} \quad \tau = G\alpha, \quad (3.79)$$

де S – це площа перерізу зразка в площині зсуву, h – це товщина зразка у напрямку, перпендикулярному площі зсуву, α – це кут зсуву, τ – це напруження зсуву, або тангенціальне напруження.

Якщо механічне напруження (байдуже, поздовжнє чи поперечне) стає завеликим, то закон Гука не виконується. Потенціальна енергія пружної деформації при великих видовженнях або кутах зсуву перестає бути квадратичною функцією цих змінних: при її розкладанні в ряд Маклорена за ε або α (для поздовжньої та поперечної деформації, відповідно) слід урахувати наступні доданки (кубічні тощо).

Для кристалів та інших анізотропних середовищ залежність між механічним напруженням і деформацією виявляється більш складною, ніж це описується формулами (3.78) та (3.79). Значення пружних модулів E та G залежать від

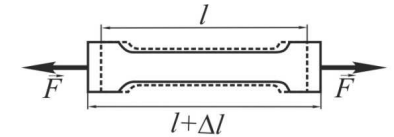


Рис. 3.13. Схематичне зображення поздовжньої деформації ізотропного твердого тіла

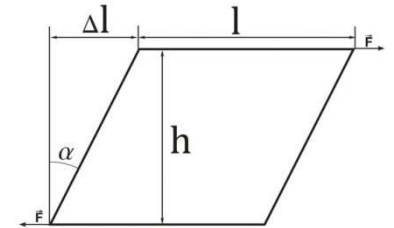


Рис. 3.14. Схематичне зображення поперечної деформації ізотропного твердого тіла

розташування поверхонь зразка відносно кристалографічних осей, а зв'язані вони між собою коефіцієнтом Пуассона μ , що характеризує поперечне стискання твердого тіла при його поздовжньому розтягуванні.

Найпростіший зв'язок цих констант реалізується для ізотропних твердих тіл:

$$G = E / [2(1 + \mu)] . \quad (3.80)$$

Кількість пружних констант для кристала є більшою, ніж для ізотропного тіла, їхня кількість залежить від симетрії кристала. Основними видами деформації ізотропних твердих тіл, до яких зводяться всі інші види деформації (вигин, кручення тощо), є поздовжня деформація (лінійне розтягування або стискання) (див. рис. 3.13) та простий зсув (див. рис. 3.14). При розтягуванні сталевго зразка в пристроях захоплення розривної машини до нього прикладають силу F , під дією якої в зразку виникає поздовжнє напруження σ , що обумовлює виникнення відносної деформації ε .

Залежність $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ для ізотропних твердих тіл представлено на рис. 3.15. З довідникових даних відомо, що при поздовжніх напруженнях сталевих матеріалів від нуля до ~ 0.2 ГПа залежність між напруженням та деформацією подовження для них є прямолінійною та оборотною, тобто вона не залежить від напрямку дії сили. В цьому інтервалі напружень деформація матеріалу описується законом Гука, а величина модуля Юнга є сталою, яка залежить тільки від матеріалу стрижня.

При збільшенні напруження до приблизно 0.25 ГПа оборотність деформацій сталевго стрижня зберігається, але закон Гука вже не виконується: частка σ/E вже не є сталою, хоча як і раніше, не залежить від напрямку вектора $\vec{\sigma}$. Ця

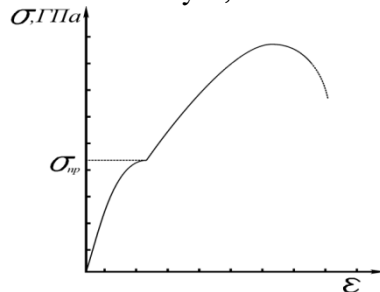


Рис. 3.15. Залежність механічного напруження від величини поздовжньої деформації

ділянка графіка відноситься до інтервалу нелінійної пружності. Найбільше напруження, за якого закон Гука ще є справедливим, називають границею лінійної пружності.

Напруження ж, за якого деформації перестають бути оборотними, називають межею пружності. При напруженнях, що перевершують межу пружності, спостерігається нове явище: тверде тіло деформується так, що деформація ε не зникає повністю після зняття зовнішньої сили. Процес деформації має тут особливий характер: при незмінному за величиною $\vec{\sigma}$ стрижень повільно подовжується, ніби тече. Така деформація називається пластичною, її широко використовують у техніці. Йдеться про такі технологічні процеси, як волочіння, пресування, кування. В цих процесах до матеріалу прикладають такі напруження, за яких тіло стає пластичним та набуває потрібної форми.

Для низки матеріалів, головним чином, металів, після пластичної деформації спостерігається зміцнення матеріалу. Це явище використовується в техніці: відбивання вістря коси молотком зміцнює її; прокатаний метал є жорсткішим, ніж непрокатаний, і т.д. Такий процес зміцнення зветься гартування (від hard – англійською – твердий).

При подальшому збільшенні величини ε пластична деформація припиняється, видовження нелінійно зростає. Нарешті настає розрив – руйнування матеріалу (спадаюча частина кривої на рис. 3.15). Для сталі межею міцності є величина ≈ 0.8 ГПа.

Сказане вище стосується, головним чином, металів. Інші матеріали мають інші властивості. Такі матеріали, як гума, різні пластмаси і т. д., задовольняють закону Гука лише при дуже малих напруженнях, вище яких пропорційність між деформацією та механічною напругою відсутня (реалізується нелінійна залежність механічної напруженості від деформації).

2. Опис лабораторної установки для визначення модуля Юнга

У даній роботі модуль Юнга визначають статичним методом, шляхом розтягування дроту в установці Лермонтова

(рис. 3.16), яка укомплектована освітлювачем зі шкалою, тягарцями, лінійкою, штангенциркулем, мікрометром.

Прилад Лермонтова складається з вертикально закріпленої на стіні дошки 1. Досліджуваний дріт 2 жорстко закріплюється в кронштейні 3 і натягується за допомогою металевго тягарця 4. У нижній частині тягарця 4 є гачок для підвішування різних додаткових тягарців. На дерев'яній платформі 5 є дві стійки 6, у яких може вільно обертатися стрижень з укріпленням на ньому дзеркальцем 7. Цей стрижень жорстко зв'язаний з важелем 8, що закінчується кільцем, у яке вкручується гвинт 9, що спирається на тягарець 4. Така конструкція є зручною тим, що фіксує взаємне розташування дзеркальця 7 і важеля 8.

Для зняття показів використовується метод дзеркальця та шкали (рис. 3.17). Цей метод є надзвичайно поширеним при вимірюванні невеликих кутів, на які повертаються рухливі частини в приладах, наприклад, кут повороту котушки в гальванометрі і т. п. При цьому, до обертової частини приладу кріплять плоске дзеркальце M . Для вимірювання кутів φ повороту дзеркальця можна скористатися суб'єктивним чи об'єктивним відліком величини кута повороту.

У даній роботі використовується об'єктивний відлік кута, що полягає в наступному: джерело світла A направляє промінь на дзеркальце M . Після відбиття від нього промінь потрапляє на

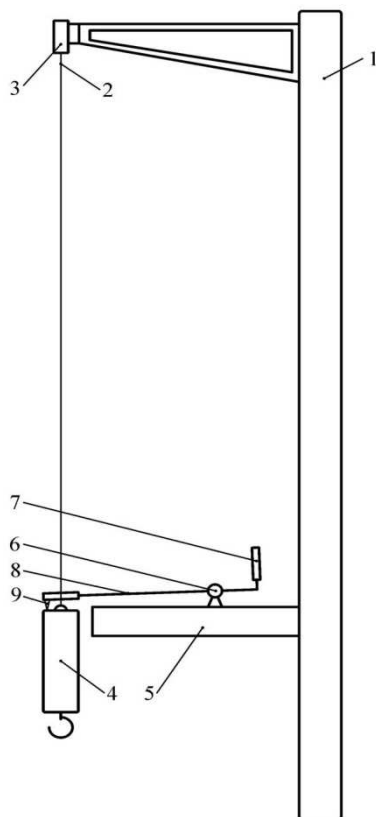


Рис. 3.16. Прилад Лермонтова

шкалу лінійки K , утворюючи світлу пляму n_0 . При цьому (див. рис. 3.17), якщо дзеркальце повернути на деякий кут φ , то кут між падаючим і відбитим променями становитиме 2φ . Цей факт використовується для збільшення чутливості у випадках малих переміщень.

Переміщення тягарця 4 на відстань Δl під дією сили тяжіння викликає поворот важеля 8 та дзеркальця 7 на кут φ . Тоді, як видно з рис. 3.17, величину цього кута можна пов'язати з видовженням дроту:

$$\operatorname{tg} \varphi = \Delta l / r, \quad (3.81)$$

де Δl визначає довжину абсолютного видовження дроту, r – це довжина важеля 8.

Формула (3.81) є справедливою, якщо важіль 8 у початковому положенні був горизонтальним. При малих φ рівняння (3.81) можна переписати так:

$$\varphi = \Delta l / r. \quad (3.82)$$

Унаслідок повороту дзеркальця 7 (на рис. 3.17 воно позначено літерою M) на кут φ той кут, що утворився світловим променем до повороту та після повороту дзеркальця 7, зміниться на 2φ та на шкалі промінь зупиниться на поділці n_1 (рис. 3.17). Якщо позначити через α той кут, що утворено напрямком променя від поділки n_0 до дзеркальця M та від дзеркальця до джерела світла A , то можна написати:

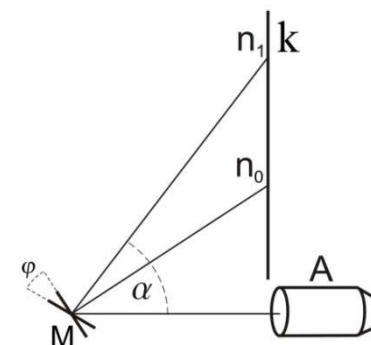


Рис. 3.17. Схема ходу променя світла від джерела світла A до дзеркальця M , а після відбиття – до екрану K

$$\frac{n_0 - n_1}{\sin(2\varphi)} = \frac{L}{\sin(\pi/2 + \alpha - 2\varphi)}, \quad (3.83)$$

де L – це відстань між дзеркальцем та світловою плямою на вимірювальній лінійці. З рівняння (3.83) випливає, що:

$$\sin(2\varphi) = (N_0 - N_i) \cos(\alpha - 2\varphi) / L. \quad (3.84)$$

Якщо вважати аргументи синуса та косинуса малими, тобто $\alpha - 2\varphi \ll 1$, $2\varphi \ll 1$, тоді формулу (3.84) можна переписати, скориставшись розкладанням гармонічних функцій в ряд за малим значенням їхніх аргументів так:

$$\varphi = (n_0 - n_1) / (2L). \quad (3.85)$$

Порівнявши формули (3.82) та (3.85), одержуємо:

$$\Delta l = r(n_0 - n_1) / (2L). \quad (3.86)$$

Підставляючи до формули (3.78) в якості зовнішньої сили вагу P_i тягарців та використовуючи вираз (3.86), одержуємо значення модуля Юнга для матеріалу, з якого виготовлено дріт:

$$E = 2LP_i / [r(N_0 - N_i)S]. \quad (3.87)$$

Тут P_i – це певна вага тягарців, якій відповідає визначений зсув $N_0 - N_i$ світлової плями по лінійці K , S – це площа перерізу дроту.

3. Порядок виконання роботи з визначення модуля Юнга

1. Увімкнути освітлювач A та підібрати відстань від A до шкали K так, щоб на K було видно чіткий світловий промінь.
2. Визначити початкові покази N_0 світлового променя на шкалі.
3. Штангенциркулем виміряти довжину r важеля 8.
4. Мікрометром виміряти діаметр дроту, порахувати площу його перетину S .
5. За допомогою нитки виміряти довжину l дроту 2.
6. Тим самим способом виміряти відстань L від дзеркальця 7 до поділки N_0 на шкалі K .
7. На гак тягарця 4 обережно підвісити послідовно, один за одним, тягарці відомої маси (загальне навантаження на дріт не

повинно перевищувати 4 кг!), на шкалі беруться відповідні покази N_1, N_2, N_3, N_4 .

8. Повторити вимірювання подовження дроту в зворотному порядку: при послідовному зніманні тягарців.

9. Обчислити середнє значення частки $P_i / (N_0 - N_i)$, підставити його до (3.87), знайти модуль Юнга.

10. Визначити відносну похибку $\Delta E / E$.

4. Визначення модуля зсуву G

Теоретичне обґрунтування цієї роботи в основному викладено раніше, в підрозділі 1. Тут необхідно додати лише наступне. Якщо жорстко закріпити верхній кінець дроту, а з боку вільного кінця прикласти невелику за величиною пару сил з моментом M , то кут закручування φ буде пропорційним до прикладеного моменту і дорівнюватиме:

$$\varphi = M / f. \quad (3.88)$$

Модуль кручення f визначається модулем зсуву G та геометричними розмірами дроту:

$$f = \pi r^4 G / 2L, \quad (3.89)$$

де r та L – це радіус та довжина дроту, відповідно. Для визначення модуля зсуву в роботі використовується метод обертових коливань, який зв'язує характеристики обертального руху маятника з модулем кручення його підвісу.

5. Опис лабораторної установки з визначення модуля зсуву

Лабораторна установка складається з обертового маятника та доданих до нього металевого кільця з прорізом, лінійки, мікрометра, штангенциркуля, секундоміра.

Схематично установку зображено на рис. 3.18. До верхньої частині дугоподібної опори 1, що стоїть на підставці 2, причеплено дріт 3. Цей дріт верхнім краєм закріплюється в спеціальному поворотному механізмі 4, що дає можливість передати йому обертальний момент, а його інший край запаяно

в центрі масивного суцільного диска 5.

Якщо цій системі надати обертальний рух, повернувши на невеликий кут гвинт 4, то виникнуть гармонічні коливання з періодом T :

$$T = 2\pi\sqrt{I/f}, \quad (3.90)$$

де I – момент інерції диска 5. Для того щоб із формули (3.90) визначити модуль кручення f , знаючи T , необхідно визначити невідомий момент інерції I . З цією метою на диск 5 акуратно, в симетричний спосіб кладеться додаткове тіло у вигляді кільця, момент інерції I_0 якого вважається відомим з теорії обертального руху, а тому визначається за формулою:

$$I_0 = m(R_1^2 + R_2^2)/2, \quad (3.91)$$

де m – це маса кільця, R_1 та R_2 – це його внутрішній та зовнішній радіуси відповідно.

Потім, беручи до уваги адитивність моменту інерції, вимірюється новий період коливань, коли диск коливається разом із покладеним на нього кільцем:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{(I + I_0)/f}. \quad (3.92)$$

Використовуючи формули (3.90)–(3.92), маємо можливість знайти момент інерції диска:

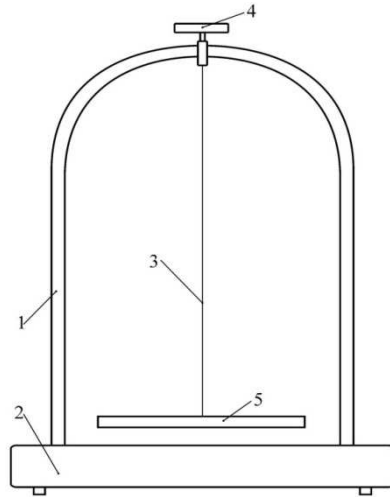


Рис. 3.18. Зображення лабораторного пристрою для визначення модуля зсуву

$$I = \frac{I_0 T^2}{T_1^2 - T^2} = \frac{m(R_1^2 + R_2^2)T^2}{2(T_1^2 - T^2)}. \quad (3.93)$$

Підставивши (3.89) та (3.93) до (3.90), здобуємо вираз для модуля зсуву:

$$G = \frac{4\pi Lm(R_1^2 + R_2^2)}{r^4(T_1^2 - T^2)}. \quad (3.94)$$

Отже, знаючи геометричні характеристики дроту, на якому висить диск обертового маятника, механічні параметри допоміжного кільця та періоди коливань маятника з цим кільцем та без нього, можна знайти модуль зсуву металу, з якого виготовлено підвіс маятника.

6. Порядок виконання роботи з визначення величини G

1. Визначити довжину дроту, на якому висить диск, лінійкою, а діаметр – мікрометром.
2. Виміряти штангенциркулем зовнішній та внутрішній радіуси допоміжного кільця.
3. Для визначення періоду коливань ненавантаженого та навантаженого кільцем диска повертають диск поворотним механізмом 4 на невеликий кут і відпускають його. За допомогою секундоміра визначають час 20÷30 коливань, стежачи за відхиленням по мітці на диску. Маса кільця є константою приладу.
4. Порахувати модуль зсуву G .
5. Знайти відносну похибку вимірювання модуля зсуву $\Delta G / G$.

Контрольні питання

1. Яка залежність спостерігається між пружною деформацією та механічним напруженням у кристалах та чому?
2. Як слід розуміти модель кристала, що складається з квазіпружних вібраторів?
3. Що таке межі пружності та міцності, які приклади використання їх у техніці?

4. Яка деформація називається пластичною? Навести приклади використання її в техніці.
5. Наведіть приклади методів зміцнення металів. За рахунок яких фізичних процесів це відбувається?
6. Як виконується закон Гука для твердих тіл, що не мають кристалевої ґратки?
7. Вивести формулу, що пов'язує модуль зсуву з модулем Юнга.

3.9. Лабораторна робота «Вимірювання тиску газу в вакуумній камері, що відкачується форвакуумним насосом»

Мета роботи:

1. Вивчити елементарні основи вакуумної техніки, методи попередньої відкачки балонів з газовим середовищем, одержання форвакууму.
2. Здобути навички вимірювання величини залишкового тиску газів за допомогою вакуумметрів, визначення швидкості натікання газу до об'єму відкачування та швидкості дії форвакуумного насосу.

Обладнання: металевий балон із системою спеціальних шлангів для відкачування газів із нього та напуску газу до нього, форвакуумний ротаційний масляний насос, вакуумметр іонізаційно-термопарний (ВІТ-2), секундомір.

1. Короткі теоретичні відомості

Якщо довжина вільного пробігу молекул перевищує лінійні розміри посудини, тоді говорять, що в посудині досягнуто стан вакууму. Газ у цьому випадку вважають ультрарозрідженим. Хоча в буквальному значенні слово «вакуум» означає «порожнеча», в ультрарозрідженому газі міститься досить велика кількість молекул в одиниці об'єму. Так, при тиску в 10^{-6} мм рт. ст. у 1 м^3 міститься 10^{16} молекул. Більше того, в дуже малих об'ємах стан, визначений нами вище як вакуум, можна досягти навіть за умов атмосферного тиску. Нагадаємо, що таким прикладом є капіляри рослин. Але

в більшості випадків властивості вакууму виявляються, починаючи з тисків 1×10^{-3} мм рт. ст.

1.2. Вакуумні насоси

Вакуумні насоси служать для відкачування повітря і пари з вакуумного об'єму. Для створення розрідження з тиском до 10^{-3} мм рт. ст. застосовуються різні способи відкачки, що використовують або механічне видалення газів з вакуумного об'єму за допомогою механічних вакуумних насосів, або насоси, в основі яких лежить низькотемпературна конденсація і фізична чи хімічна адсорбція газів та пари за допомогою охолоджених до низьких (порядку $77 \text{ }^\circ\text{K}$) температур сорбентів, таких як активоване вугілля, цеоліти або силікагель.

У даній роботі передбачається, що відкачка виконується механічним вакуумним насосом. У механічних вакуумних насосах робочі органи періодично захоплюють визначений об'єм

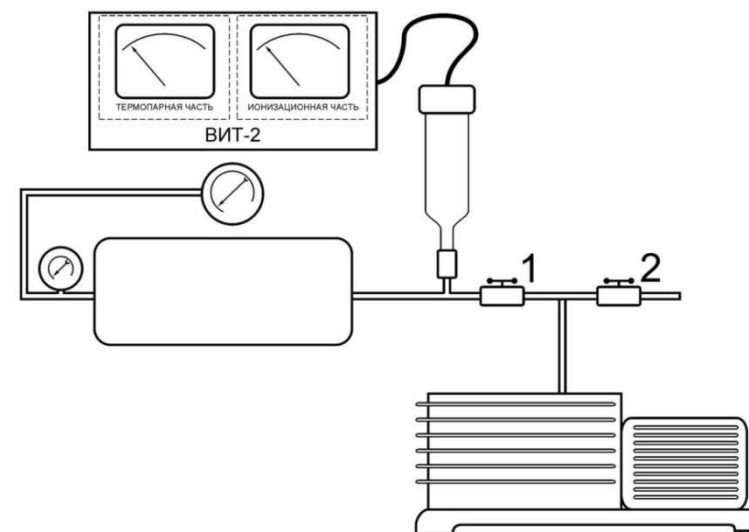


Рис. 3.19. Схематичне зображення лабораторної установки для вимірювання тиску газу у балоні, що відкачується форвакуумним насосом

газу, відокремлюють його від вакуумного балона, стискають і виштовхують (зазвичай до атмосфери).

Такий процес відбувається внаслідок періодичної зміни об'єму робочої камери, утвореної циліндром і рухомими частинами насоса. Робоча камера при збільшенні об'єму з'єднується з вхідним отвором насоса і «засмоктує» газ із вакуумного балона. При досягненні робочою камерою найбільшого значення свого об'єму вона від'єднується від вхідного отвору насоса; потім об'єм робочої камери зменшується, газ стискається і виштовхується убік вихлопу.

За своїми конструктивними особливостями механічні насоси можуть бути поділені на такі групи: а) зворотно-поступальні, в яких об'єм робочої камери змінюється за рахунок

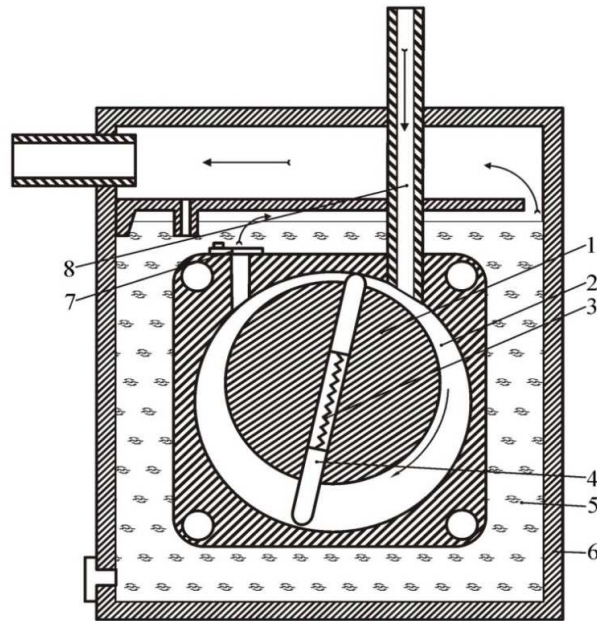


Рис. 3.20. Схема форвакуумного насоса. Цифрами позначено:
1 – ротор; 2 – камера; 3 – пружини; 4 – пластина; 5 – ванна з мастилом;
6 – клапан вихлопу; 7 – впускний клапан, 8 – впускний пацівок (штуцер)

зворотно-поступального руху частин (металевого чи рідинного поршня); б) обертальні (ротаційні), в яких об'єм робочої камери змінюється внаслідок обертального руху частин (рис. 3.20).

Швидкість дії насоса – це об'єм газу, що відкачується насосом в одиницю часу (він вимірюється при тому тиску, при якому газ надходить до насосу). Оскільки процес відкачки є майже ізотермічним, можна записати:

$$PV = \text{Const} \Rightarrow d(PV) = 0. \quad (3.95)$$

Далі можна вважати, що швидкість відкачування $C = dV / dt$ не залежить від тиску і що трубопровід, який з'єднує вакуумний балон із насосом, не впливає на швидкість відкачування газу.

Тому з рівняння (3.95) можна, поділивши змінні, здобути:

$$C \cdot P dt = -V dP \Rightarrow -C \cdot dt / V = dP / P. \quad (3.96)$$

Інтегрування рівняння (3.96) за допомогою методу поділу змінних дає наступні вирази для залежності тиску в форвакуумному балоні від часу відкачування, та швидкості відкачування:

$$P = P_0 \exp(-Ct / V), \quad C = \ln(P_0 / P) \cdot (V / t), \quad (3.97)$$

У (3.97) P_0 – це початковий тиск.

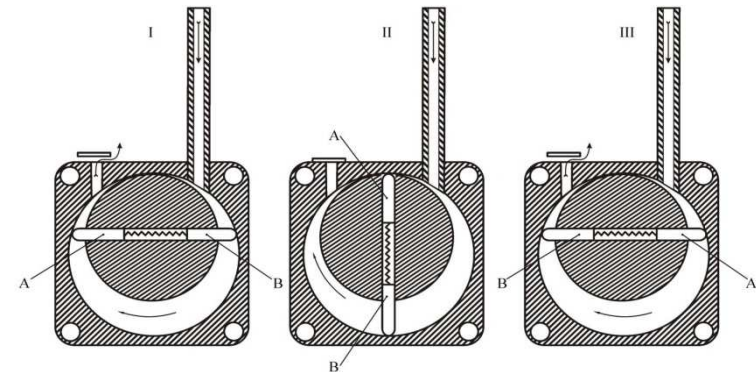


Рис. 3.21. Принцип дії ротаційного форвакуумного насоса