

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Н.О.Якуніна, О.В.Дімарова

**ФІЗИКА-1. ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА 1
ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний
посібник для студентів закладів вищої освіти, які навчаються
за спеціальністю «Інформаційні системи та технології»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

УДК 537.8
ББК 22.33
Ф 48

Рецензент: В.Й Котовський, завідувач кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла КПІ ім. Ігоря Сікорського, доктор т.н., професор.

Відповідальний редактор: В.М. Локтєв В.М., завідувач кафедри загальної та теоретичної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського, академік, доктор фіз.-мат. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № від . .2021 р.)
за поданням Вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № від . 2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Якуніна Наталія Олександрівна, доцент кафедри загальної та теоретичної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.ф.-м. наук, доцент:

Дімарова Олена Володимирівна, старший викладач кафедри загальної та теоретичної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Ф 48 Загальна Фізика. Оптика. Лабораторний практикум . Навч. посібник / Н.О. Якуніна, О.В.Дімарова , – К. : Вид-во «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – 15 с.

У лабораторному практикумі представлені теоретичні відомості, опис лабораторної роботи з теми «Дослідження пружних властивостей твердих тіл та біологічних об'єктів», що викладається для майбутніх фахівців за спеціальністю «Інформаційні системи та технології», наведені методичні вказівки до виконання цієї роботи, містяться контрольні питання для самостійної роботи та підготовки до модульного контролю.

Посібник призначений для студентів, які навчаються у закладах вищої освіти і вивчають нормативну навчальну дисципліну «загальна фізика» з циклу математичної та природничо-наукової підготовки за спеціальністю «Інформаційні системи та технології».

Посібник може бути корисним для науково-педагогічних працівників, які викладають курс фізики, під час планування та підготовки завдань до лабораторних робіт та модульних контрольних робіт з навчальної дисципліни «Фізика-1. Загальна Фізика 1».

Лабораторна робота № 2 (1)

Дослідження пружних властивостей твердих тіл та біологічних об'єктів

Мета роботи: знайомство з фізикою процесів деформацій тіл різної фізичної природи, вивчення закону Гука, вимірювання модуля пружності твердих тіл та біологічних матеріалів.

Прилади і обладнання: пристрій для вивчення пружних властивостей матеріалів, сталений зразок та зразки інших матеріалів у формі пластин, важки, лінійка, штангенциркуль.

Короткі теоретичні відомості.

Функціонування опорно-рухового апарату, процеси деформації тканин і клітин, поширення хвиль пружної деформації, скорочення і розслаблення м'язів, рух рідких і газоподібних біологічних середовищ пов'язані з різними механічними явищами. В таких галузях медицини як хірургія і ортопедія, вивчення опорно-рухового апарату людини, протезування, важливим є знання пружних властивостей тканин організму і, в даному випадку, кісткової тканини.

До найбільш важливих механічних властивостей матеріалів відносять:

- пружність – здатність тіл відновлювати розміри (форму та об'єм) після зняття навантаження;
- еластичність – здатність матеріалу змінювати розміри під дією зовнішніх навантажень;
- жорсткість – здатність матеріалу протидіяти зовнішнім навантаженням;
- міцність – здатність тіл протидіяти руйнуванню під дією зовнішніх сил;
- пластичність – здатність тіл зберігати (повністю або частково) зміну розмірів після зняття навантажень;
- хрупкість – здатність матеріалу руйнуватися без виникнення помітних залишкових деформацій;
- в'язкість – динамічна властивість, яка характеризує здатність тіла протидіяти зміні його форми під дією тангенціальних напруг;
- текучість – динамічна властивість середовища, яка характеризує здатність окремих його шарів переміщуватися з деякою швидкістю в просторі відносно інших шарів цього середовища.

Зміна взаємного розташування точок тіла, яке призводить до зміни його форми та розмірів, називають **деформацією**. Деформації можуть бути спричинені зовнішніми діями (механічними, електричними, магнітними) або змінами температури тіла.

Розглянемо деформації, які виникають при дії на тіло сил.

В твердих тілах деформацію називають **пружною**, якщо після припинення дії сили вона зникає, тобто частинки твердого тіла, змістившись у процесі деформації, повертаються в своє початкове положення рівноваги і відновлюються початкові розміри і об'єм тіла. Якщо ж деформація зберігається і після припинення зовнішньої дії, то її називають **пластичною**. Проміжний випадок, тобто неповне зникнення деформації, називають пружно–пластичною деформацією.

При будь-якому з процесів деформації виникають сили, що намагаються відновити початкові розміри тіла. Ці сили називаються **силами пружності**.

Силою пружності (пружною силою) $\vec{F}_{\text{пр}}$ показує силу, яка виникає при деформації тіла, вона спрямована в бік, протилежний напрямку зміщення частинок тіла при деформації.

Виникає запитання: яка природа сил пружності?

Всі тіла складаються з атомів. Атоми являють собою позитивно заряджені ядра, навколо яких обертаються електрони. За нормальних умов обидва види зарядів в тілі зрівноважені так, що всі тіла є нейтральними. Між атомами всередині тіла існує сильна електрична взаємодія (сили відштовхування і притягування). Модулі цих сил залежать від відстані між атомами. На відстані, що приблизно дорівнює діаметру молекули, сили притягування між молекулами компенсуються силами відштовхування між ними ж, і рівнодійна сила дорівнює нулю. При розтягуванні тіла відстань між атомами збільшується, і сили притягування стають більшими (за модулем) за сили відштовхування. Сили притягування, які виникли, перешкоджають розтягнню тіла. При оберненому процесі – стисканні – переважають сили відштовхування між атомами, вони перешкоджають деформації тіла.

Розглянутий механізм деформації дозволяє зробити висновок про те, що *природа сил пружності – електромагнітна*.

Для кількісної характеристики деформації тіла слугують наступні фізичні величини:

абсолютна деформація ΔX – якщо при деформації тіла деяка величина, яка характеризує розміри або форму тіла (наприклад, довжина або об'єм), приймає значення X , то зміна цієї величини під дією прикладеної сили називається абсолютною деформацією:

$$\Delta X = X - X_0 ; \quad (1)$$

відносна деформація ε – показує відношення абсолютної деформації до початкового значення X_0 :

$$\varepsilon = \Delta X / X_0 . \quad (2)$$

При малих деформаціях ($|\Delta X| \ll X_0$) більшість тіл виявляють пружні властивості;

механічна напруга σ – фізична величина, яка чисельно дорівнює пружній силі $dF_{\text{пр}}$, яка припадає на одиницю площі перетину тіла dS :

$$\sigma = dF_{\text{пр}} / dS \quad (3)$$

При лінійному протіканні процесу механічна напруга визначається так:

$$\sigma = \Delta F_{\text{пр}} / \Delta S. \quad (4)$$

Якщо напруга постійна по всій площині, то

$$\sigma = F_{\text{пр}}/S. \quad (4a)$$

Напруга називається **нормальною**, якщо сила $\Delta F_{\text{пр}}$ перпендикулярна до площі перетину ΔS , і **дотичною**, якщо $\Delta F_{\text{пр}}$ спрямована по дотичній до ΔS .

Експериментально встановлено, що при пружних деформаціях виконується **закон Гука: механічна напруга σ прямо пропорційна відносному видовженню ε тіла:**

$$\sigma = E |\varepsilon| \quad (5)$$

Коефіцієнт пропорційності E називають **модулем пружності або модулем Юнга**.

Враховуючи (2) та (4a), запишемо цей закон в наступному вигляді:

$$F_{\text{пр}}/S = E |\Delta X/X_0| \quad (6)$$

Якщо відносне видовження $\varepsilon = 1$, то $\sigma = E$, тому модуль Юнга дорівнює напрузі, яка виникає в стержні при його відносному видовженні, що дорівнює 1. З (2) випливає, що при $\varepsilon = 1$, отримуємо $\Delta X = X_0$, а це означає, що *модуль Юнга дорівнює напрузі, яка виникає в тілі при подвоєнні довжини зразка*.

Практично будь-яке тіло (крім гуми) при пружній деформації не може подвоїти свою довжину: значно раніше воно розірветься. Чим більше модуль Юнга E , тим менше деформується тіло, при інших однакових умовах. Таким чином, модуль Юнга характеризує опір матеріалу пружної деформації, тобто характеризує пружні властивості тіла.

Експериментально отриману при деформації залежність напруги, яка виникає в зразку, від відносної деформації, називають *діаграмою деформації*. На рис. 1 наведено діаграму напруг для деформації розтягування металевго стрижня. Цю криву умовно поділяють на п'ять зон.

Зона *OA* називається *зоною пропорційності*. В межах цієї зони виконується закон Гука.

Зона *OB* – це *зона пружності*, оскільки в даній області деформації після зняття напруги тіло відновлює свої розміри і форму.

Зона *BC* називається *зоною загальної текучості*. В цій зоні подовження зразка відбувається без помітного збільшення напруги.

Зона *CD* – це *зона закріплення*, в цій зоні подовження зразка супроводжується зростанням напруги, на зразку з'являються місця майбутнього руйнування – *шийка*, формування якої (точка *D*) супроводжується процесом *місцевої текучості* в зоні *DE* і руйнуванням зразку.

Якщо зменшити навантаження в зоні *BC*, то відповідний графік $\sigma = f(\varepsilon)$ піде паралельно *OA* і перетне вісь абсцис в деякій точці O_1 (ділянка CO_1). Відрізок OO_1 визначає залишкову деформацію $\varepsilon_{\text{зал}}$, яка характеризує пластичну деформацію зразка. Отримання діаграми деформації дозволяє визначити ряд найбільш важливих характеристик точок і відповідних їм величин:

- **межа пропорційності $\sigma_{\text{проп}}$** – найбільша напруга, при якій ще виконується закон Гука;

- **межа пружності $\sigma_{пр}$** – найбільша напруга, при якій немає залишкових деформацій;
- **межа текучості $\sigma_{тек}$** – найбільша напруга, при якій відбувається збільшення деформації без помітного збільшення напруги;
- **межа міцності σ_m** – є пороговою величиною статичного механічного напруження, найбільша напруга, яку може витримати зразок.

При деформації тіл часто проявляються вязко-пружні властивості, які полягають в тому, що напруга залежить не тільки від деформації (ϵ), а й від швидкості її зміни з часом, тобто похідної ϵ' .

Експериментальні дослідження показали, що для більшості біологічних тканин діаграми розтягування або стискання відрізняються від діаграми, яка показана на рис. 1. Для біологічних матеріалів, як правило, не виражена зона загальної текучості, хоча ця властивість чітко проявляється в процесі їх функціонування. Руйнування матеріалу також відбувається без помітних падінь напруги, яке характерне для зони *СД*.

У якості конкретного приклада розглянемо деформацію кісткової тканини. В загальних рисах, відмітимо, що будова кісткової тканини, досить складна за конструкцією. Вона являє собою композитний матеріал, який складається з органічних і неорганічних речовин, і виявляє анізотропні властивості (тобто її властивості залежать від напрямку). Ця тканина за своїми механічними властивостями близька до дерева, бетону, деяких металів, тобто до матеріалів, які використовуються в будівельних роботах.

На рис. 2 наведено діаграму розтягування і стиснення вздовж повздовжньої осі зразків, які були вирізані з кістки стегна.

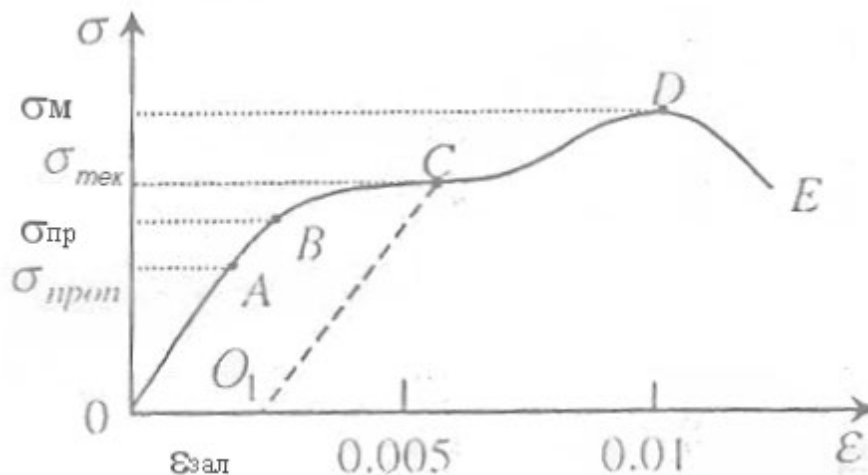


Рис. 1. Механічна діаграма розтягування для сталі

Як бачимо, порівняно з металічною пластинкою, деформація відбувається у великих межах – до 10% при стисненні і до 5% при розтягуванні. При

незначних деформаціях (менших за 2%) кістка поводить себе як “гуковське тіло”, для якого залежність $\sigma=f(\varepsilon)$ близька до лінійної. Зауважимо, що кістка краще “працює” на стиснення, ніж на розтягування – межа міцності і розміри деформацій при стисненні майже вдвічі перебільшують ті, що

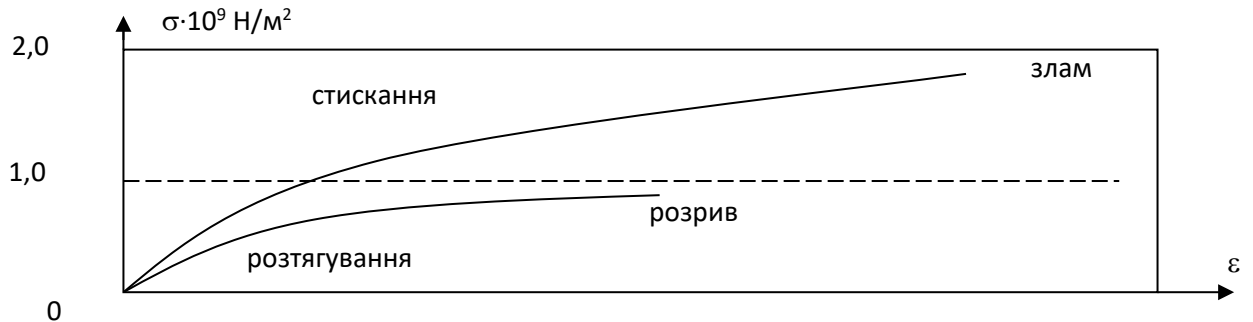


Рис. 2. Діаграма деформації для кістки

спостерігаються при розтягуванні.

У механіці виділяють наступні види деформації (рис. 3):

а) *об’ємна деформація*, яка виникає при рівномірному розподілі сил стиснення чи розтягування по поверхні тіла;

б) *деформація зсуву*, проявляється у відносному паралельному зміщенні шарів тіла один відносно іншого;

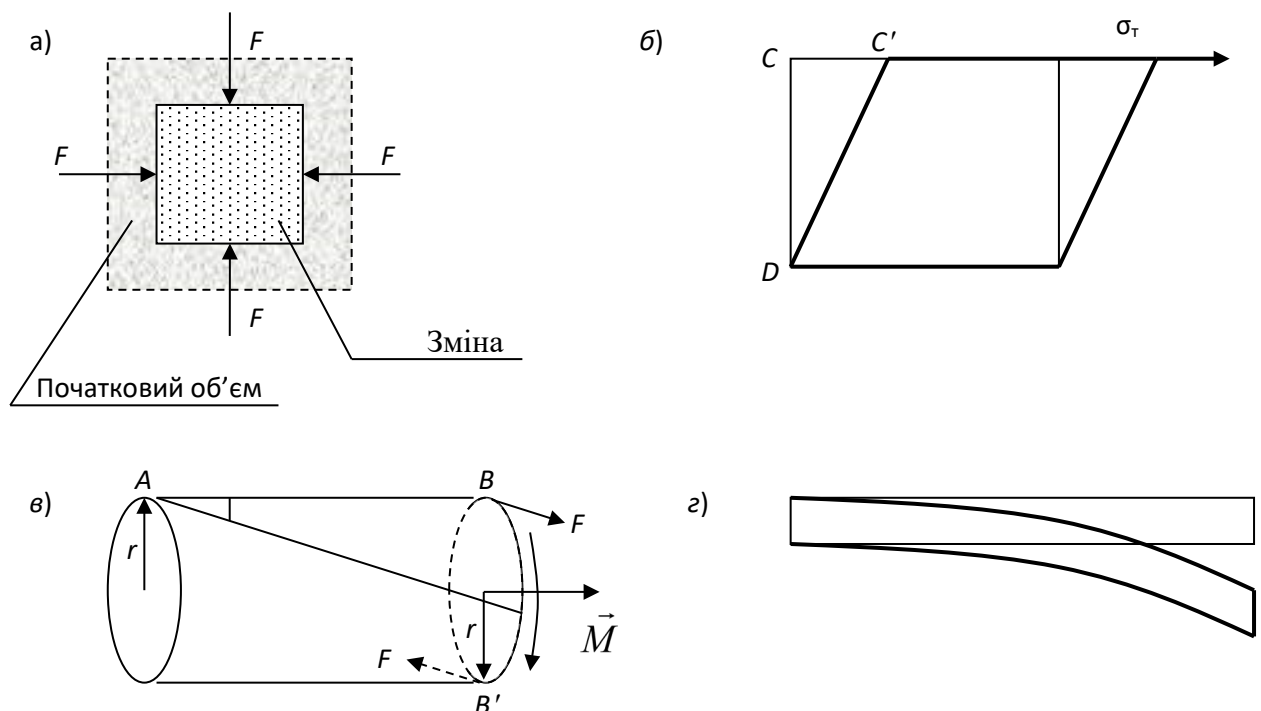


Рис. 3. Види деформації : а) об’ємна деформація, б) деформація зсуву,
в) кручення, г) згин

в) *деформація кручення*, виникає в зразку, коли один із його перетинів залишається нерухомим, а в іншому діє пара сил, момент $\vec{M}$ яких спрямований уздовж осі зразка ;

г) *деформація згину*;

Розглянемо більш детально деформацію згину. За міру деформації у випадку згину приймається зміщення середини прямого пружного

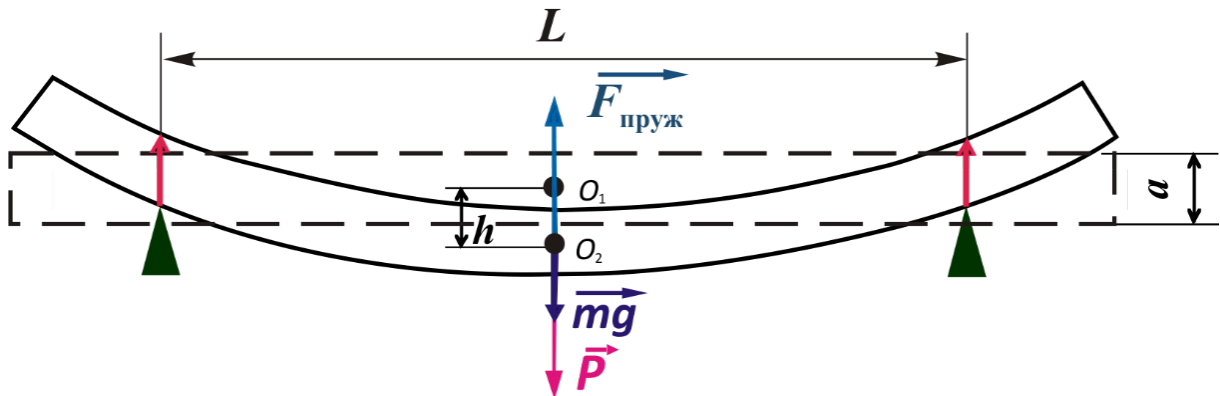


Рис.4 Схема реалізації деформації згину

стрижня: $h = O_1O_2$. Зміщення h , яке отримує середина стрижня називається *стрілою прогину* (рис. 4).

Вона тим більша, чим більше навантаження і залежить від форми та розмірів стрижня, а також від його модуля пружності.

У теорії пружності доводиться, що всі види деформації, в тому числі і згину, можуть бути зведені до діаграми розтягування (стискання) і згину. Дійсно, на опуклій стороні (рис. 5) матеріал розтягується, а тоді на увігнутій відбувається стискання. Причому, чим ближче шар який розглядається до середнього шару KN , тим розтягування і стискання стають меншими.

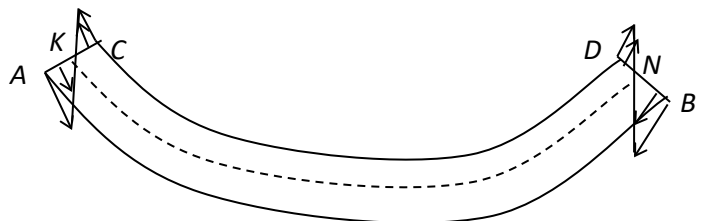


Рис. 5. Сили пружності при деформації згину

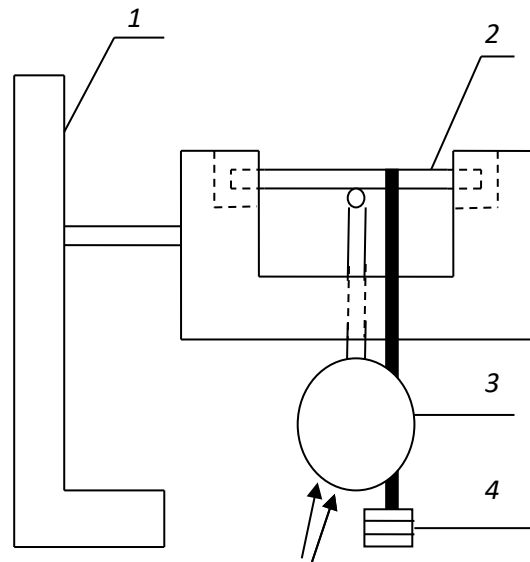
Шар KN , який не зазнає розтягування, або стискання, називається **нейтральним** (він лише викривляється). Так як шари AB і CD зазнають найбільшої деформації розтягування і стискання, то в них виникають найбільші сили пружності (сили пружності на рис. 5 показані стрілками). Від зовнішнього шару до нейтрального ці сили зменшуються. Внутрішній шар не зазнає помітних деформацій і не протидіє зовнішнім силам, а тому в розумінні деформації є “стороннім”. Цим пояснюється трубчастість кісток, яка забезпечує міцність і легкість “конструкції”.

Якщо до середини стрижня довжини L , ширини b і товщини a прикласти силу P (дивись рис. 4), то стріла прогину h буде визначатися відповідно до формули:

$$h = \frac{PL^3}{4ba^3E},$$

звідки

$$E = \frac{L^3P}{4ba^3h} \quad (7)$$



Експериментальна установка. Рис. 6. Схема експериментальної установки

Установка для визначення модуля пружності складається з масивної платформи 1 з двома стійками, на які поміщають зразок 2 (дивись рис. 4). На середині зразка є гачок для підвішування вантажів 4.

Між стійками поміщають стержень із закріпленими на ньому у вертикальному положенні мікрометром 3. При навантаженні під час дотику жала мікрометра 3, прикладеного до середини зразка, із контактною пластинкою (дивись рис. 6), стрілка мікрометра відхиляється.

Порядок виконання роботи

1. Штангенциркулем вимірюють ширину b , товщину a зразків (методика вимірювання штангенциркулем наведена в додатку)
2. Довжину L зразків вимірюють як відстань між точками опори.
3. Для кожного зразка вимірювання геометричних розмірів треба робити тричі в різних місцях зразка: отримуємо значення a_1, a_2, a_3 ; b_1, b_2, b_3 ; L_1, L_2, L_3 для кожного з трьох зразків.
4. Розрахувати середні значення $\langle b \rangle$, $\langle a \rangle$, $\langle L \rangle$ для кожного зразка.
5. Результати вимірювань і розрахунків занести в першу строку табл. 1.

Таблиця 1

Зразок	a_1 , м	a_2 , м	a_3 , м	$\langle a \rangle$, м	b_1 , м	b_2 , м	b_3 , м	$\langle b \rangle$, м	L_1 , м	L_2 , м	L_3 , м	$\langle L \rangle$, м
1												
2												
3												

6. Покласти зразок 1 на опори.
7. Годинниковий мікрометр встановити так, щоб вимірювальне жало мікрометра торкалось поверхні зразка. Зафіксувати таке положення жала.
8. Обертаючи рифлене кільце (6) за або проти годинникової стрілки встановити основну та додаткову стрілки мікрометра на «нуль».
9. Навантажити зразок вантажами P і зняти відповідні показання мікрометра, які є стрілою прогину h .
10. Послідовно навантажувати зразок вантажами різної маси m і записувати в табл.2 відповідні значення стріли прогину для кожного навантаження $P = mg$.

Таблиця 2 (для першого зразка)

Номер виміру	m , кг	P , Н	h , м	P/h , Н/м	E , Па	$\langle E \rangle$, Па	ΔE , Па
1.							
2.							
3.							

11. Обчислити P/h для кожного навантаження, обчислити модуль пружності E для кожного з трьох навантажень.
12. Знайти $\langle E \rangle$. Обчислити похибку вимірювання ΔE
13. Результати вимірювань і розрахунки занести до табл. 2.
14. Зробити аналогічні вимірювання і розрахунки для зразків інших матеріалів.

Таблиця 2 (для другого зразка)

Номер виміру	m , кг	P , Н	h , м	P/h , Н/м	E , Па	$\langle E \rangle$, Па	ΔE , Па
1.							
2.							
3.							

Таблиця 2 (для третього зразка)

Номер виміру	m , кг	P , Н	h , м	P/h , Н/м	E , Па	$\langle E \rangle$, Па	ΔE , Па
1.							
2.							
3.							

15. Порівняти модулі Юнга різних матеріалів. За результатами зроблених експериментальних дослідів зробити висновки.

Контрольні запитання:

1. Дайте визначення основним механічним властивостям тканини.
2. Що таке сила пружності?
3. Що таке деформація?
4. Які бувають види деформації? Проілюструйте відповідь.
5. Поясніть природу сили пружності.
6. Які величини кількісно характеризують деформацію?
7. Що називають механічною напругою?
8. Що показує відносна деформація?
9. Сформулюйте закон Гука.
10. Поясніть фізичний зміст модуля Юнга.
11. Намалюйте діаграму розтягування сталі і поясніть всі її зони.
12. Дайте визначення основним характеристичним точкам діаграми.
13. Що таке стріла прогину?
14. Поясніть, як трубчастість кістки впливає на її властивості.

Література

1. Поль Р.В. Механика, акустика и учение о теплоте. М., 1971
2. Савельев И.В. Курс общей физики. т.1. М., 1973
3. Упругость и неупругость металлов.- Сборник статей. М., 1954
4. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М., 1963
5. Ахматов А.С. Лабораторный практикум по физике: учебное пособие для студентов втузов. М., 1980
6. Пружні властивості кісткових тканин, Методичні вказівки/ Н.О. Якуніна, О.В.Дімарова, В.В.Федотов, І.О.Юрченко.-К.: НТУУ «КПІ», 2006, -12 с.

Доповнення до лабораторної роботи

«Дослідження пружних властивостей твердих тіл та біологічних об'єктів»

Для вимірювання лінійних розмірів, визначення величини відхилень від заданої геометричної форми чи взаємного розташування поверхонь використовуються різні індикатори. Найбільш відомі з них – штангенциркуль та мікрометр.

Штангенциркуль - вимірювальний інструмент для вимірювання лінійних розмірів, зовнішнього і внутрішнього діаметрів, довжини, товщини, глибини тощо..

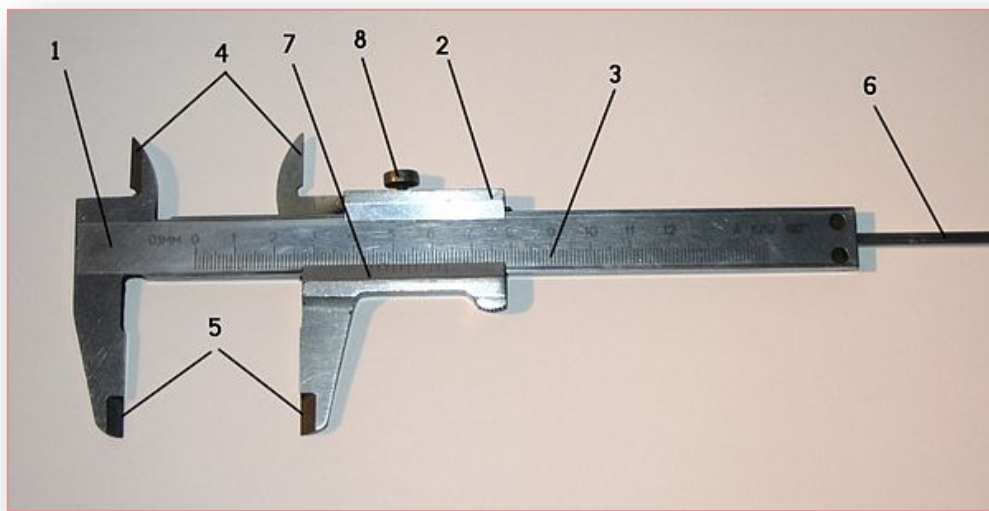


Рис.7

На рис.7 зображено штангенциркуль марки ШЦ-1 з ноніусом, який має такі складові частини: 1. штанга рухома; 2. рамка; 3. шкала штанги; 4. губки для внутрішніх вимірювань; 5. губки для зовнішніх вимірювань; 6. лінійка глибиноміра; 7. ноніус; 8. гвинт для фіксації рамки.

Штанга - це вимірювальна лінійка з градацією 1 мм, довжина якої 150 мм. Тобто максимальний розмір вимірюваної поверхні не повинен перевищувати 15 см. Але є і такі штангенциркулі, довжина штанги яких більше 15 см. Рамка штангенциркуля рухлива і призначена для переміщення губок. За допомогою рамки їх можна розширювати або звужувати до необхідного розміру. Гвинтом (поз.8) рамку можна фіксувати. Це потрібно для того, щоб після вимірювання деталі не втратити потрібне положення рамки. Ноніус - це допоміжна шкала на штангенциркуле. Ноніус має 10 поділок з розміром 1,9

мм. Таким чином, загальна довжина шкали дорівнює 19 см. Допоміжну шкалу використовують для того, щоб дізнатися розмір з точністю до 0,1 мм.

Як робити виміри за допомогою штангенциркуля. Значення вимірювань визначає взаємне розташування двох шкал: основної і ноніусної. Поверхня шкали ноніуса має скіс для кращого поєднання з основною шкалою.

Для початку слід оцінити ціле число мм на основній шкалі, яке розташовується зліва від початкової позначки ноніуса. Наприклад, якщо нульова точка ноніуса зупинилася між поділами 23 мм і 24 мм, то ціле число в мм одно 23. Далі визначають кількість десятих часток вимірювальних одиниць. Для цього на шкалі ноніуса знаходять штрих, який чітко збігається з будь-якої відміткою на основній шкалі. Тут важливо саме точний збіг! Значення збігається штриха на розподілі ноніуса - це десята частина мм. Якщо таких збігів кілька, то враховують ту цифру, яка ближче до нульової точки ноніуса. Наприклад: на шкалі ноніуса два співпадаючих штриха: на відмітках 6 і 7. То враховують значення «6».

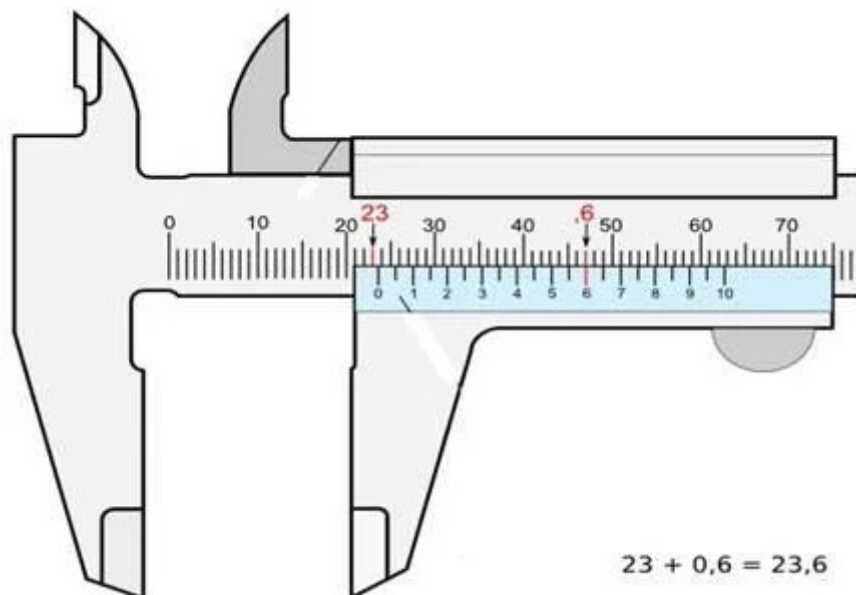


Рис.8

Складаючи цілу частину і десяти частки, отримують показання вимірювань. Отже, в описаному прикладі отримуємо загальний результат вимірювань: 23,6 мм(дивись малюнок 8).

Мікрометр годинникового типу(у технічній літературі його називають *годинниковий індикатор*) - прилад для вимірювання лінійних розмірів, у якому шкала має колову форму (форму циферблата), на якій значення вимірюваної величини зчитується за показом стрілки (стрілок)(рис.9).

Індикатори найчастіше оснащуються зубчастою передачею завдяки якій вказівна стрілка може виконувати декілька обертів у діапазоні вимірювань.



Рис.9

Конструкція індикатора годинникового типу являє собою вимірювальну голівку з поздовжнім пересуванням вимірювального наконечника 9. Основою індикатора є корпус, усередині якого змонтовано перетворювальний механізм — рейково-зубчаста передача. Крізь корпус у втулці 7 проходить вимірювальний стрижень 8 із наконечником 9 (рис.10).

На стрижні нарізано рейку. Рухи вимірювального стрижня-рейки 8 передаються зубчастими колесами основній стрілці 5, величина повороту

якої відлічується за круглою шкалою — циферблатом. Для установки на «0» кругла шкала повертається обідком .

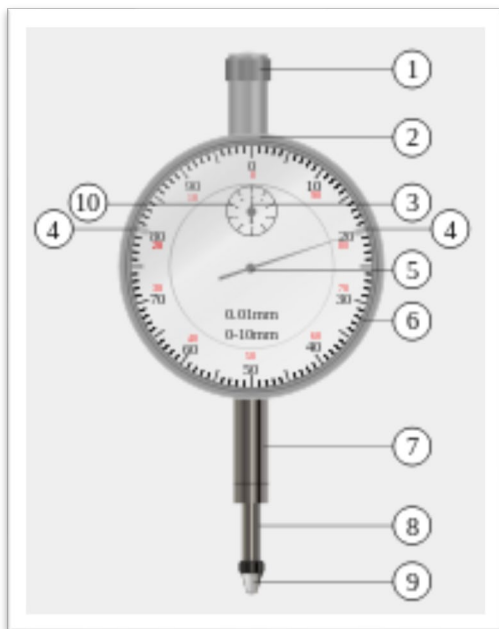


Рис.10

Діапазон вимірювань такого індикатора становить 0...10 мм. Шкала 6 індикатора разом із обідком при установці шкали на нульову поділку повертається відносно великої стрілки 5.

Як робити виміри за допомогою мікрометра. На лицьовому боці циферблата індикатора є дві стрілки і дві шкали; велика стрілка 5 над оцифрованою круговою шкалою 6 і мала стрілка 3 над відліковою (мала) шкалою 10. Кругова шкала індикатора має ціну поділки 0,01 мм, а відлікова шкала — 1 мм. Пересування вимірювального стрижня 8

на 1 мм викликає поворот стрілки 1 на 100 поділок (один повний оберт), а стрілки 4 на одну поділку.

Допустима похибка вимірювань становить від 0,5 поділки в діапазоні ± 10 поділок до 2-х поділок у повному діапазоні вимірювань.