



## **МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра механічної та біомедичної інженерії

### **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ  
“МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ” ДЛЯ ЗДОБУВАЧІВ  
ПЕРШОГО РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 132  
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Дніпро  
2022

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Механічні випробування матеріалів” для здобувачів першого рівня вищої освіти за спеціальністю 132 Матеріалознавство [Електронний ресурс] / Д.Л. Колосов, С.П. Панченко, В.Я. Кіба ; Міністерство освіти і науки України, Нац. тех. ун-т “Дніпровська політехніка”, 2022. – 45с.

Автори:

Д.Л. Колосов, д-р тех.наук, доц., зав. кафедри,

С.П. Панченко, доц.,

В.Я. Кіба, ст. викл..

Погоджено рішенням науково-методичної комісії спеціальності 132 Матеріалознавство (протокол №3 від 19.12.2022 р.) за поданням кафедри механічної та біомедичної інженерії (протокол № 9 від 30.11.2022 р.).

Затверджено до видання редакційною радою (протокол № 12 від 27.12.2022 р.) за поданням методичної комісії спеціальності 132 Матеріалознавство (протокол №3 від 19.12.2022 р.).

У наведених методичних рекомендаціях розглянуті приклади проведення лабораторних робіт з дисципліни “Механічні випробування матеріалів”.

Відповідальний за випуск ст. викладач кафедри механічної та біомедичної інженерії Кіба В.Я.

## ЗМІСТ

1. Лабораторна робота № 1	6
2. Лабораторна робота № 2	11
3. Лабораторна робота № 3	14
4. Лабораторна робота № 4	15
5. Лабораторна робота № 5	17
6. Лабораторна робота № 6	19
7. Лабораторна робота № 7	21
8. Лабораторна робота № 8	23
ДОДАТКИ	
9. Додаток №1	28
10. Додаток №2	30
11. Додаток №3	34
12. Додаток №4	37
13. Критерії оцінювання	40
14. Очікувані результати навчання	43
Список літератури	

## ВСТУП

Механічні характеристики конструкційних матеріалів, пружні характеристики визначаються шляхом випробувань матеріалів на спеціальному устаткуванні. Навчання студентів визначенню цих характеристик, а також методика визначення переміщень поперечних перерізів, напружень і деформацій, що виникають у зразках, є основною метою лабораторних робіт з механічних випробувань матеріалів. При описі лабораторних робіт наводяться необхідні теоретичні відомості, принципові схеми устаткування, порядок виконання, методики обробки результатів експериментів, форми звітів.

Відповідно до робочої програми курсу студенти механічних спеціальностей напрямків підготовки «Інженерна механіка» і «Машинобудування» виконують в рамках цієї дисципліни 12 лабораторних робіт. Список цих робіт складається з експериментальних робіт, які виконуються в учбовій лабораторії кафедри в груповому порядку, і віртуальних лабораторних роботах, що виконуються студентами на ЕОМ індивідуально відповідно до заздалегідь підготовлених завдань. Усі лабораторні роботи мають крізну нумерацію.

Наведені в даних методичних вказівках лабораторні роботи присвячені експериментальним дослідженням механічних характеристик міцності і пластичності мало вуглецевої сталі, характеристик міцності сірого чавуну і деревини.

Таким чином приведені лабораторні роботи дозволяють студенту отримати практичні навички визначення механічних властивостей, які можна використовувати при розрахунках елементів конструкції на міцність та оцінювати якість продукції матеріалу в реальних експлуатації.

## Лабораторна робота № 1

### Тема: Випробування сталевго зразка на розрив Мета: Визначення механічних характеристик сталі

При виконанні проектувальних робіт, перевірки міцності та жорсткості елементів конструкцій та деталей машин необхідно знати фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів. Для цього проводять експериментальні випробування зразків, виготовлених з досліджуваного матеріалу, на зсув, кручення, осьове розтягання та стискання тощо. У більшості випадків випробування виконують шляхом проведення стандартних досліджень властивостей матеріалів, випробовуючи зразки на розтягання при статичному навантаженні. Для цього існують спеціальні випробувальні машини. Випробування на розтягання використовуються також для контролю якості різних металів, сталей при їх виробництві і перевірки відповідності їх механічних характеристик вимогам ДСУ.

#### 1.1. Схема установки

Дослідження проводяться на випробувальній машині розривної дії з зусиллям в 4 тони ІМ-4Р (Рис.1.1). Машина має електромеханічний привід, але може бути використана також і в ручному режимі. При необхідності машину можна використовувати для проведення випробувань на стискання та зріз. Машина складається з рами, приводу і пристрою для викреслювання діаграм.

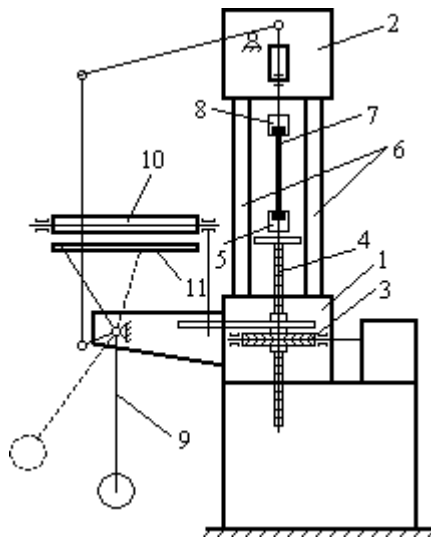


Рис. 1.1

Рама машини включає основу 1, верхню поперечину 2, сполучені між собою чотирма стійками 6. При випробуванні зразок 7 встановлюється в утримуючі пристрої машини 5 та 8. Від електродвигуна, встановленого в основі 1, або від ручного приводу через редуктор обертання передається зубчатій гайці

3, що втягує в себе гвинт 4, у верхній частині якого розташований утримуючий пристрій 5. Створюване при цьому зусилля передається через зразок 7 і утримуючий пристрій 8 на маятниковий вимірювач сили. Відхилення маятника пропорційно прикладеному навантаженню і фіксується на папері шляхом переміщення записуючого пристрою уздовж діаграмного барабана 10. Одночасно з цим рухома стрілка рухається уздовж встановленої під барабаном шкали 11 фіксуючи величину навантаження на зразок. Переміщення нижнього утримуючого пристрою 5 відповідає абсолютному подовженню зразка, через елементи записуючого пристрою передається на барабан поворот якого пропорційний подовженню зразка і записується на папері.

## 1.2. Ескіз зразка

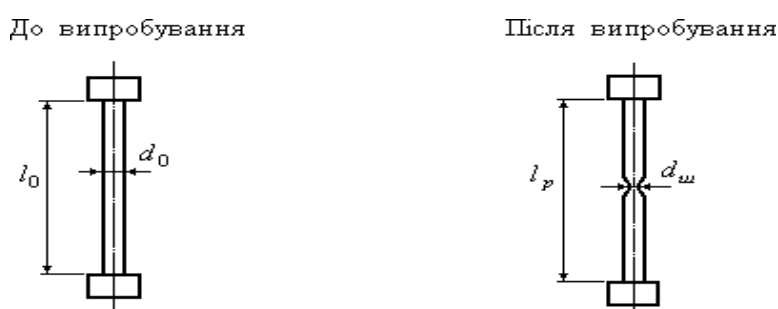


Рис. 1.2

## 1.3. Порядок виконання роботи

2. Виконати виміри зразка і результати вимірів занести в таблицю 1.2. Розрахункова довжина зразка  $l_0$  заміряється між його головками. При визначенні діаметра  $d_0$  діаметр заміряється в трьох різних місцях уздовж довжини зразка і по цим розмірам обчислюється середнє арифметичне значення.

Таблиця 1.1

### Дані виміру зразка

Найменування	Розміри	Найменування	Розміри
До випробування		Після випробування	
Довжина розрахункової частини	$l_0 =$ (мм)	Довжина розрахункової частини	$l_p =$ (мм)
Діаметр зразка	$d_0 =$ (мм)	Діаметр зразка	$d_0 =$ (мм)
Площа поперечного перерізу	$A_0 =$ (см <sup>2</sup> )	Площа поперечного перерізу	$A_{ш} =$ (см <sup>2</sup> )
Об'єм зразка	$V_0 =$ (см <sup>3</sup> )	Об'єм зразка	

3. Вставити папір в записуючий пристрій машини.

4. Закріпити зразок в машині за допомогою спеціальних утримуючих пристроїв і за допомогою електродвигуна або вручну, поволі навантажуючи зразок, провести необхідні вимірювання величини навантажень при досягненні

зразком відповідних характерних станів і занести у перший рядок таблиці 1.2. Судити про настання цих станів можна або по поведінці стрілки вимірювального пристрою, або по характеру поведінки записуючого пристрою при побудові діаграми розтягання. До таких навантажень слід віднести наступні

$P_{пц}$  -навантаження, що відповідає границі пропорційності;

$P_{пр}$  -навантаження, що відповідає границі пружності;

$P_T$  -навантаження, що відповідає границі текучості;

$P_{max}$  -максимальне навантаження, що виникає у зразку.

Навантаження в момент розриву практичного значення не має, тому і не вимірюється.

При вимірюванні зусилля у зразку за допомогою вимірювального пристрою слід знати, що 1 мм на вимірювальній шкалі машини відповідає 100Н.

Таблиця 1.2

**Заміряні зусилля у зразку**

$P_{пц}$ (кН)	$P_{пр}$ (кН)	$P_T$ (кН)	$P_{max}$ (кН)	$\Delta l_{повн}$ (мм)	$\Delta l_{пр}$ (мм)	$\Delta l_{зал}$ (мм)

5. Провести цикл “навантаження-розвантаження” на ділянці самозміцнення (Ділянка №4 діаграми розтягання. Рис.1.3). Явище, пов'язане зі зміною властивостей матеріалу при розвантаженні і повторному навантаженні на ділянці самозміцнення, отримало назву “наклеп”.

6. Після розриву зразка вийняти його частини з машини, скласти їх і виміряти довжину зразка і діаметр у шийці (з точністю до 0,1мм). При вимірюванні діаметру в шийці виміряти діаметр у двох взаємно перпендикулярних напрямках і узяти середнє арифметичне значення. Дані вимірювань занести в таблицю 1.1.

7. Вийняти діаграму розтягання з машини і обробити її. Через конструктивні особливості записуючого пристрою машини, діаграма розтягання має вигляд наведений на рис.1.3. Зазвичай, діаграму розтягання зображують зліва направо у вигляді дзеркального зображення рис.1.3 відносно вертикальноївісі. При обробці діаграми розтягання знайти початок відліку, як це показано на рис.1.3, і провести горизонтальну вісь абсолютних подовжень  $\Delta l$  і вертикальну вісь навантажень  $P$  (внутрішніх зусиль у зразку).

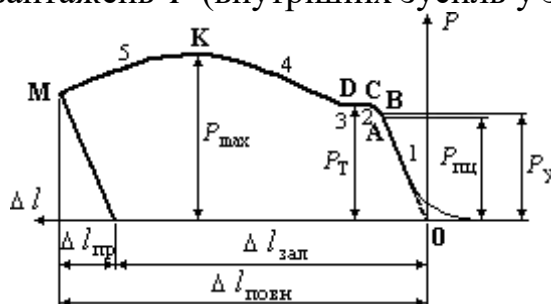


Рис. 1.3

8. Заміряти ординати які відповідають раніше заміряним навантаженням  $P_{пц}$ ,  $P_{пр}$ ,  $P_T$  і  $P_{max}$  та уточнити деякі з них. Уточнені значення навантажень занести в другий рядок таблиці 1.2. При вимірюванні на діаграмі розтягання навантажень слід зважати на те, що 1см на діаграмі відповідає 1кН навантаження.

9. Заміряти на діаграмі розтягання деформацію зразка:  $\Delta l_{повн}$  - повне абсолютне подовження в момент розриву;  $\Delta l_{пр}$  - пружна деформація, яка зникає після розриву зразка за рахунок пружних властивостей сталі;  $\Delta l_{зал}$  - залишкова деформація у зразку, яка не зникає після зняття навантаження. Результати вимірювань занести в таблицю 1.2.

10. Зобразити діаграму розтягання сталі зліва направо, використовуючи набуті уточнені значення навантажень і деформацій (Рис.1.4).

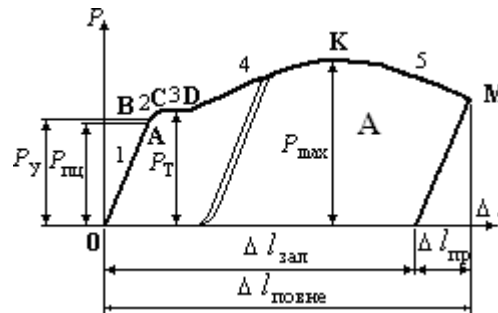


Рис. 1.4

11. Обчислити механічні характеристики міцності сталі:

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{A_0} = \quad \text{МПа - границя пропорційності;}$$

$$\sigma_{пр} = \frac{P_{пр}}{A_0} = \quad \text{МПа - границя пружності;}$$

$$\sigma_T = \frac{P_T}{A_0} = \quad \text{МПа - границя текучості;}$$

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{A_0} = \quad \text{МПа - границя міцності або тимчасовий опір.}$$

Дані розрахунку занести в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3

**Механічні характеристики міцності і пластичності сталі**

$\sigma_{пц}$ (МПа)	$\sigma_{пр}$ (МПа)	$\sigma_T$ (МПа)	$\sigma_B$ (МПа)	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)

12. Обчислити характеристики пластичності сталі:



$$\delta = \frac{\Delta l_{зал}}{l_0} \cdot 100\% = \quad = \quad \% \quad - \text{відносне залишкове подовження};$$

$$\delta = \frac{|A_{ли} - A_0|}{A_0} \cdot 100\% = \quad = \quad \% \quad - \text{відносне звуження зразка}.$$

Результати занести в таблицю 1.3.

13. За даними розрахунку побудувати діаграму напружень (Рис.1.5).

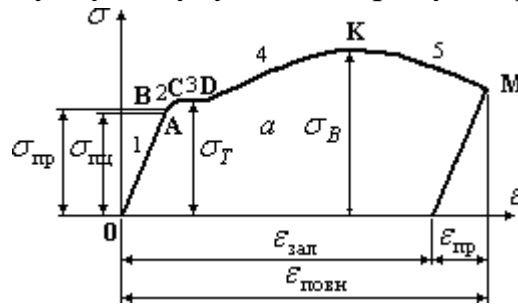


Рис.1.5

Вигляд цієї діаграми є умовним, оскільки при визначенні механічних характеристик міцності використовувалась початкова площа поперечного перерізу зразка, а не реальна. Відомо, що при розтяганні в зразку зменшуються розміри поперечних перерізів. Отже, реальна площа поперечних перерізів зразка на різних стадіях розтягання буде меншою за початкову площу до випробування. При побудові діаграми напружень заздалегідь слід знайти величини відносної деформації у різні моменти за формулами:

$$\varepsilon_{повн} = \frac{\Delta l_{повн}}{l_0}; \quad \varepsilon_{пр} = \frac{\Delta l_{пр}}{l_0}; \quad \varepsilon_{зал} = \frac{\Delta l_{зал}}{l_0};$$

Обчислити повну роботу, витрачену на розрив зразка, яка чисельно дорівнює площі діаграми розтягання (Рис.1.4). Її визначають за формулою:

$$A = \eta P_{\max} \Delta l_{Нм},$$

де  $\eta$ - коефіцієнт заповнення діаграми (для пластичної сталі  $\eta = 0,85$ ).

14. Обчислити питому роботу, витрачену на розрив одиниці об'єму матеріалу :

$$a = \frac{A}{V_0} = \text{Н} / \text{м}^2.$$

Цю саму роботу можна знайти як площу умовної діаграми напружень:

$$a = \eta \sigma_B \varepsilon_{повн} = \text{Н} / \text{м}^2.$$

#### 1.4 Висновки:

1. В результаті випробувань сталевого зразка на розрив були побудовані: діаграма розтягання і діаграма напруження сталі та визначені механічні характеристики сталі, характеристики міцності і пластичності (Таблиця 1.3).

2. Визначені значення повної і питомої роботи витраченої на розрив

зразка.

3. Результати випробувань дозволяють встановити марку сталі: маловуглецева сталь Ст.3.

## **Лабораторна робота № 2**

**Тема: Дослідження сірого чавуну на стискання.**

**Мета: Визначення границі міцності сірого чавуну при стисканні**

### **2.1. Загальні відомості**

Пластичні матеріали зазвичай не випробують на стискання, оскільки, по-перше, їх фізико-механічні характеристики при розтяганні і при стисканні майже однакові, а по-друге, пластичні матеріали при стисканні неможливо зруйнувати: циліндричний зразок перетворюється на диск при постійно зростаючій стискальній силі. Неможливо визначити при стисканні пластичних матеріалів і характеристик пластичності, таких як відносне залишкове подовження і відносне звуження зразка, зазвичай визначуваних при розтяганні. Тому випробування на стискання проводять зазвичай для крихких матеріалів таких, наприклад, як чавун, камінь, деякі сплави, скло, окремі види пластмас та ін. Справді, розподіл конструкційних матеріалів на пластичні і крихкі є умовним. За деяких умов крихкі матеріали набувають пластичних властивостей, наприклад, при всебічному стисканні скло набуває властивості пластичного матеріалу і руйнується як пластичний матеріал. І навпаки, деякі пластичні матеріали, наприклад, маловуглецева сталь при низьких температурах руйнуються як крихкий матеріал без утворення шийки. Так само поведуться деякі пластичні матеріали при радіоактивному опромінюванні. Тому правильніше говорити не про пластичні і крихкі матеріали, а про їх пластичний і крихкий стан.

При випробуваннях крихких матеріалів або матеріалів, що перебувають у крихкому стані, виготовляють зразки циліндричної або кубічної форми. При випробуваннях чавуну на стискання виготовляють зразки циліндричної форми незначної висоти, що дорівнює одному – трьом діаметрам зразка. Контактні поверхні зразка з плитами випробувальної машини зазвичай змащують парафіном, оскільки в місці контакту виникають сили тертя, які не дозволяють зразку збільшувати розміри в поперечному напрямку. Якщо контактні поверхні не змащувати, зразок після випробування набуває бочкоподібної форми. Руйнування чавунного зразка відбувається в результаті зсуву однієї частини по відношенню до іншої приблизно під кутом  $45^{\circ}$  через виникнення в зразку значних дотичних напружень.

### **2.2. Схема установки**

Випробування чавунного зразка на стискання виконується з застосуванням преса П-50. Схема преса наведена на рис.2.1.

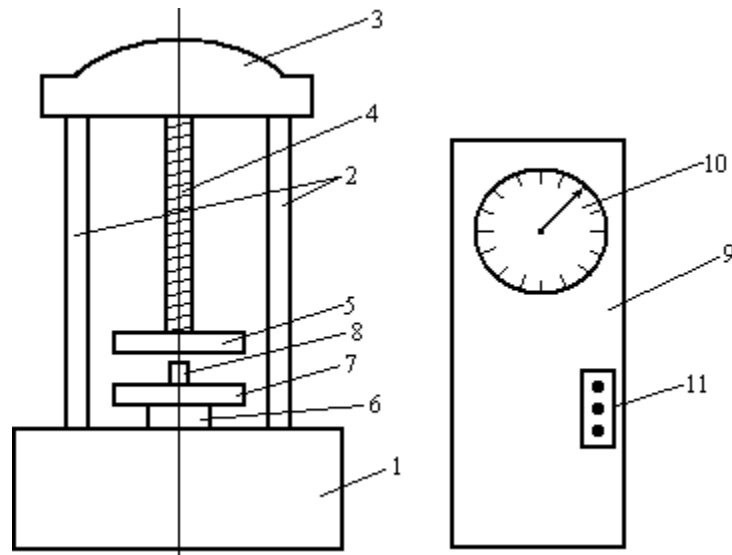


Рис. 2.1

Гідравлічний прес П-50 включає основу 1, в якій розташований гідроциліндр з поршнем 6, верхню траверсу 3, дві колони 2, затискний гвинт 4, нерухому плиту 5. При випробуванні зразок 8 встановлюється на плиту 7, закріплену на поршні, який при подачі масла в гідроциліндр, піднімається і притискує зразок 8 до нерухомої верхньої плити, положення якої фіксується затискним гвинтом 4, прикріпленим до верхньої траверси 3. Вимірювальний пристрій 9 фіксує зусилля (у тонах), що розвивається пресом, за допомогою стрілки на шкалі 10. Управління пресом відбувається за допомогою пульта 11. Максимальне зусилля, що розвивається пресом, дорівнює 50 т (500 кН).

### 2.3. Ескіз зразка

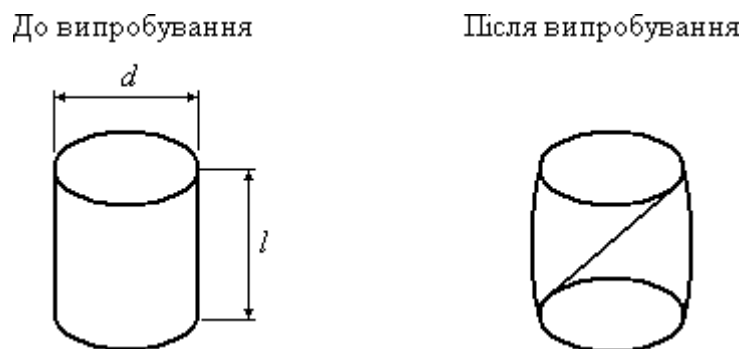


Рис. 2.2

### 2.4. Порядок виконання роботи

1. Обміряти зразок. Дані вимірювань занести в таблицю 2.1.
2. Встановити зразок на нижню плиту преса.
3. Навантажити зразок до руйнування і зафіксувати максимальне зусилля  $P_{\max}$ , що відповідає руйнуванню зразка. Дані вимірювань занести в таблицю 2.1.
4. Обчислити границю міцності чавуну за формулою:

5. Зобразити зразок після руйнування.
6. Зобразити діаграму стискання чавуну (Рис.2.3).

Таблиця 2.1

### Результати випробувань

Матеріал	Випробувальна машина	Розміри зразка		Площа поперечного перерізу	Максимальне зусилля	Границя міцності
Чавун	П-50	$d$ (мм)	$l$ (мм)	$A_0$ (мм <sup>2</sup> )	$P_{\max}$ (кН)	$\sigma_B$ (МПа)

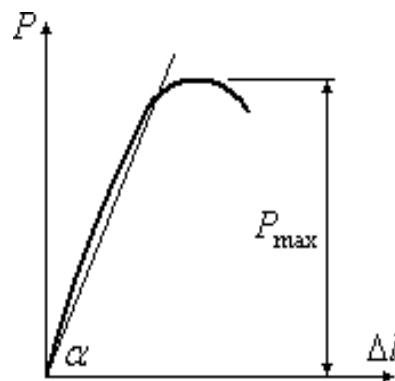


Рис. 2.3

### 2.5 Висновки :

1. Чавун є крихким матеріалом.
2. При випробуванні на стискання чавунного зразка до стану руйнування деформації відбуваються незначні, після чого руйнування відбувається раптово.
3. Причиною руйнування чавуну є виникнення у зразку деформації зсуву, поява значних дотичних напружень та розвиток тріщин, спрямованих приблизно під кутом  $45^{\circ}$  до утворюючої.
4. З аналізу діаграми стискання видно, що чавун є фізично нелінійним матеріалом. Модуль пружності чавуну визначається як тангенс кута нахилу січної до діаграми стискання:  $E = \operatorname{tg} \alpha$ .

## Лабораторна робота № 3

**Тема: Дослідження деревини на стискання уздовж волокон**  
**Мета: Визначення границі міцності деревини при стисканні уздовж волокон**

### 3.1. Загальні відомості

Деревина є анізотропним матеріалом, має різні механічні властивості залежно від напрямку волокон. При стисканні уздовж волокон деревина значно міцніша, ніж при стисканні упоперек волокон. До анізотропних матеріалів можна віднести такі матеріали, як папір, гетинакс, деякі види пластмас та ін. Враховуючи різноманітні механічні властивості анізотропних матеріалів залежно від напрямку волокон, ці матеріали зазвичай стискають уздовж двох взаємно перпендикулярних напрямків. Наприклад, деревину випробують на стискання уздовж і поперек волокон. При стисканні уздовж волокон зразок з деревини зазнає порівняно невеликі деформації і руйнується шляхом утворення поздовжніх тріщин.

Випробування зразка з деревини виконуються на пресі П-50. Схема преса і його принцип дії наведені в лабораторній роботі №2.

Зразки з деревини при випробуванні на стискання мають вигляд паралелепіпеда. На рис.3.1 наведений вигляд зразка при випробуванні деревини на стискання уздовж волокон до випробування (Рис.3.1,а) і після випробування(Рис.3.1,б).

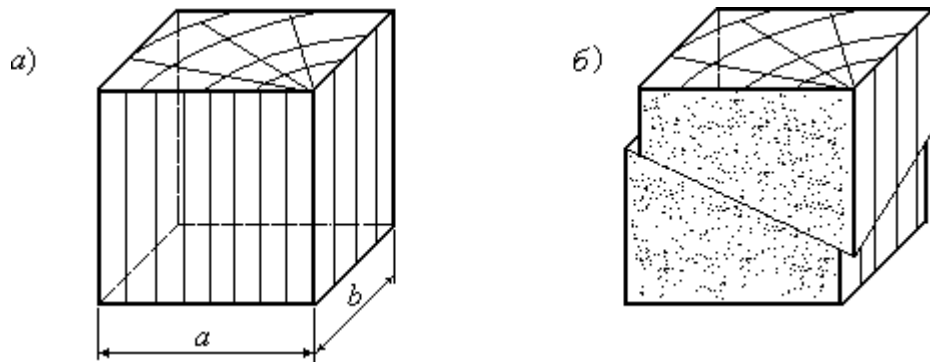


Рис. 3.1

### 3.2 Порядок виконання роботи

1. Обміряти зразок. Дані вимірювань занести в таблицю 3.1.
2. Встановити зразок на нижню плиту преса.
3. Навантажити зразок до руйнування і зафіксувати максимальне зусилля, що відповідає руйнуванню зразка. Дані вимірювань занести в таблицю 3.1.
4. Обчислити границю міцності деревини уздовж волокон за формулою:

5. Зобразити зразок після руйнування.
6. Зобразити діаграму стискання деревини уздовж волокон (Рис.3.2).

Таблиця 3.1

### Результати випробувань зразка

Матеріал	Випробувальна машина	Розміри зразка		Площа поперечного перерізу	Максимальне зусилля	Границя міцності
Деревина	П-50	$a$ (мм)	$b$ (мм)	$A_0$ (мм <sup>2</sup> )	$P_{\max}$ (кН)	$\sigma_B$ (МПа)

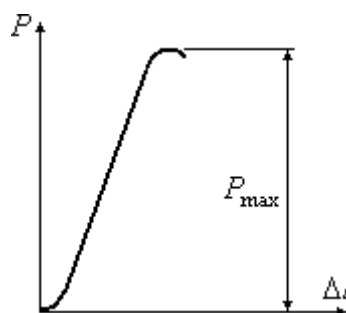


Рис. 3.2

### 3.3. Висновки :

1. Деревина є анізотропним матеріалом.
2. При випробуванні на стискання зразка з деревини уздовж волокон до стану руйнування - деформації будуть незначні, а при продовженні навантаження-руйнується раптово.
3. Причиною руйнування деревини уздовж волокон є виникнення у зразку деформації зсуву та розвиток тріщин.

## Лабораторна робота №4

**Тема: Дослідження деревини на стискання упоперек волокон**  
**Мета: Визначення границі міцності деревини при стисканні упоперек волокон**

### 4.1. Загальні відомості

При стисканні упоперек волокон у зразку з деревини відбувається значна деформація, волокна спресовуються і зразок довго не розколюється. Тому при випробуванні зразків з деревини упоперек волокон прийнято визначати умовну границю міцності, приймаючи за максимальне таке зусилля, при якому зразок стискається на 1/3 первинної висоти.

Випробування зразка з деревини виконуються на пресі П-50. Схема преса і принцип його дії наведені в лабораторній роботі №2. Зразки з деревини при

випробуваннях на стискання мають вигляд паралелепіпеда. На рис.4.1 наведений вигляд зразка при випробуванні деревини на стискання упоперек волокон до випробування (Рис.4.1,а) і після випробування (Рис.4.1,б).

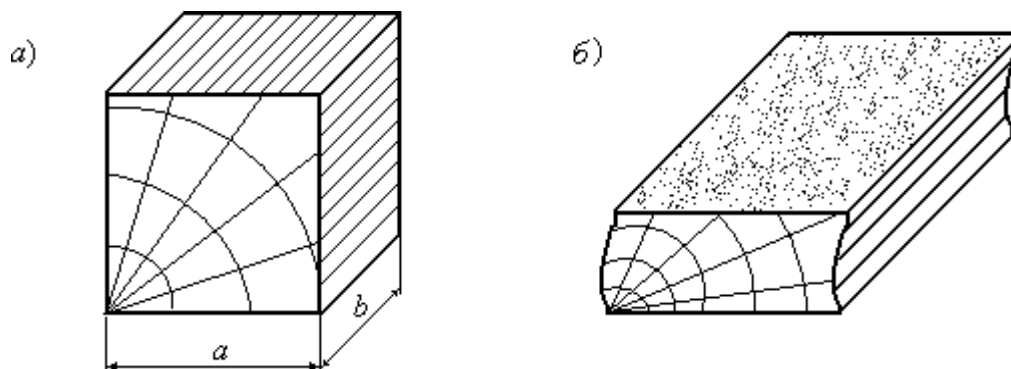


Рис. 4.1

#### 4.2 Порядок виконання роботи

1. Обміряти зразок. Дані вимірювань занести в таблицю 4.1.
2. Встановити зразок на нижню плиту преса.
3. Навантажити зразок і зафіксувати максимальне зусилля, що відповідає деформації зразка на 1/3 первинної висоти. Дані вимірювань занести в таблицю 4.1.
4. Обчислити границю міцності деревини упоперек волокон за формулою:

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{A_0} = \text{МПа.}$$

5. Зобразити зразок після випробувань.
6. Зобразити діаграму стискання деревини упоперек волокон (Рис.4.2).

Таблиця 4.1

#### Результати випробувань

Матеріал	Випробувальна машина	Розміри зразка		Площа поперечного перерізу	Максимальне зусилля	Границя міцності
		<i>a</i> (мм)	<i>b</i> (мм)			
Деревина	П-50	<i>a</i> (мм)	<i>b</i> (мм)	$A_0$ (мм <sup>2</sup> )	$P_{\max}$ (кН)	$\sigma_B$ (МПа)

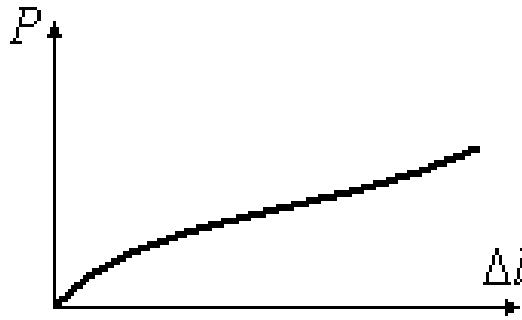


Рис. 4.2

#### 4.3. Висновки :

1. Деревина є анізотропним матеріалом.
2. При випробуванні на стискання зразка з деревини упоперек волокон-він значно деформується шляхом пресування волокон.
3. Міцність деревини упоперек волокон значно менша ніж міцність уздовж волокон.

### Лабораторна робота № 5

**Тема: Випробування сталевого зразка на розтяг**

**Мета:Визначення модуля пружності першого роду для сталі при випробуванні на розтягання**

#### 5.1. Ескіз установки

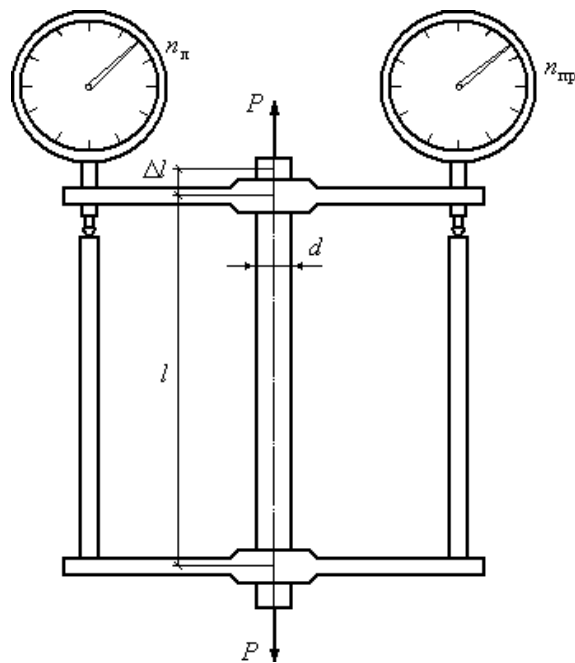


Рис 5.1

#### 5.2. Порядок виконання роботи

1. Обмірюємо зразок: база випробування  $l = 0,1$  м; діаметр поперечного



перерізу  $d = 7,7$  мм; площа поперечного перерізу:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 7,7 \cdot 10^{-6}}{4} = 46,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

2. Розраховуємо максимальне навантаження для зразка таким чином, щоб не вивести його за межі пропорційності:

$$P = \sigma_{\text{пц}} \cdot A = \sigma_{\text{пц}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,14 \cdot 7,7^2 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot 10^{-3} = 9,3 \text{ кН}.$$

3. Випробування виконуємо на машині ІМ-4Р. Навантажуємо зразок зусиллям 3 кН і для усунення зазорів записуємо показники тензометрів. Коефіцієнт зменшення показників тензометра  $k=0,01$  мм: табличне значення модуля пружності для сталі  $E_T=2 \cdot 10^5$  МПа.

4. Навантажуємо зразок ступенями через  $\Delta P = 1$  кН, знімаємо показники тензометрів і результати вимірювань заносимо в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1

### Результати випробувань

$P$ , кН	$n_{\pi}$	$n_{\text{пр}}$	$\Delta P$ , кН	$\Delta n_{\pi}$	$\Delta n_{\text{пр}}$	$\Delta n_{\text{ср}}$	$\Delta n$	$\Delta l_e = k \cdot \Delta n$ см
3			1					$\cdot 10^{-3}$
4								
5								
6								
7								
8								

5. Обчислюємо  $\Delta l : \Delta l = k \cdot \Delta n = \text{см}$ .

6. Визначаємо модуль пружності  $E$  для сталі:

$$E = \frac{\Delta P \cdot l}{A \cdot \Delta l_e} = \text{Па} = \text{МПа}.$$

7. Визначаємо відносну похибку:

$$\delta = \left| \frac{E_T - E}{E_T} \right| \cdot 100\% = \quad \%$$

### 5.3 Висновок:

В результаті проведених випробувань, модуль пружності першого роду для сталі дорівнює  $E = \text{МПа}$ . Відносна похибка склала:  $\delta = \%$ .

**Лабораторна робота № 6**  
**Тема: Випробування сталевого зразка на розтяг.**  
**Мета :Визначення коефіцієнта**  
**Пуассона для сталі з випробуванням**  
**на розтягання**

**6.1. Ескіз установки**

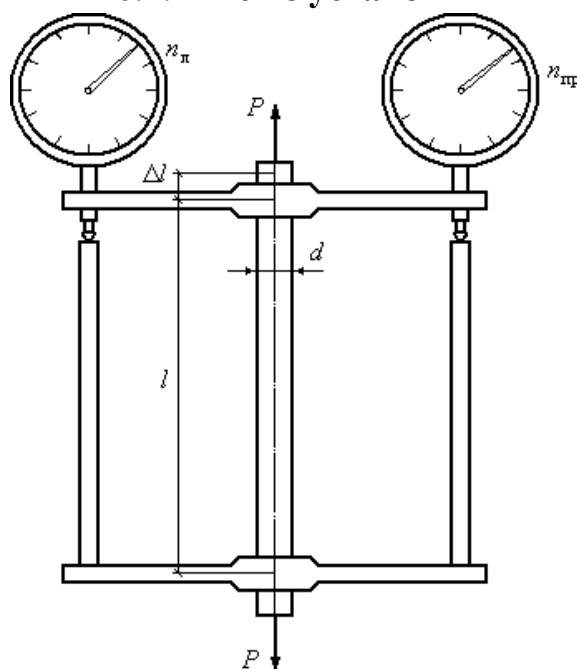


Рис.6.1

**6.2. Порядок виконання роботи**

1. Обмірюємо зразок: база випробування  $l = 0,1$  м; діаметр поперечного перерізу  $d = 7,7$  мм; площа поперечного перерізу:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 7,7^2 \cdot 10^{-6}}{4} = 46,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

2. Розраховуємо максимальне навантаження для зразка таким чином, щоб не вивести його за межі пропорційності:

3. Випробування виконуємо на машині ІМ-4Р. Навантажуємо зразок зусиллям - 3 кН для усунення зазорів і записуємо показники тензометрів. Коефіцієнт зменшення показників тензометру  $k = 0,01$  мм; табличне значення коефіцієнта Пуассона для сталі  $\mu = 0,3$ .

4. Навантажуємо зразок поступово ступенями через  $\Delta P = 1$  кН. Після чого знімаємо показники тензометрів і результати вимірювань заносимо в таблиці 6.1 і 6.2.

5. Обчислюємо  $\Delta l$ :  $\Delta l = k \cdot \Delta n = \text{см}$ .

6. Обчислюємо відносну поздовжню деформацію:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = .$$

7. Визначаємо коефіцієнт Пуассона для сталі:

$$\varepsilon' = \frac{\Delta d_{cp}}{d} = .$$

8. Визначаємо відносну похибку:

$$\delta = \left| \frac{\mu_T - \mu}{\mu_T} \right| \cdot 100\% = \%.$$

Таблиця 6.1

**Результати визначення подовження зразка-  
експериментальним шляхом**

$P, \text{кН}$	$n_{\pi}$	$n_{\text{пр}}$	$\Delta P, \text{кН}$	$\Delta n_{\pi}$	$\Delta n_{\text{пр}}$	$\Delta n_{\text{ср}}$	$\Delta n$	$\Delta l_{\varepsilon} = k \cdot \Delta n$ см
3			1					·10 <sup>-3</sup>
4			1					
5			1					
6			1					
7			1					
8			1					

Таблиця 6.2

**Результати визначення поперечної  
деформації зразка - експериментальним  
шляхом**

$P, \text{кН}$	$d, \text{мм}$	$\Delta P, \text{кН}$	$\Delta d, \text{мм}$	$\Delta d_{\text{ср}}, \text{мм}$
3		1		
4		1		
5		1		
6		1		
7		1		
8		1		

**6.3. Висновок:**

В результаті проведених випробувань визначено коефіцієнт Пуассона для сталі  $\mu =$  . Відносна похибка склала  $\delta =$  %.

## Лабораторна робота № 7

### Тема : Дослідження переміщення в балці при згині

### Мета: Визначення експериментальним шляхом переміщень в статично визначуваній балці

#### 7.1. Загальні відомості

Метою даної роботи є ознайомлення з методикою визначення прогинів і кутів повороту перерізів стрижневих систем з застосуванням стрілочних індикаторів (Рис.7.1).

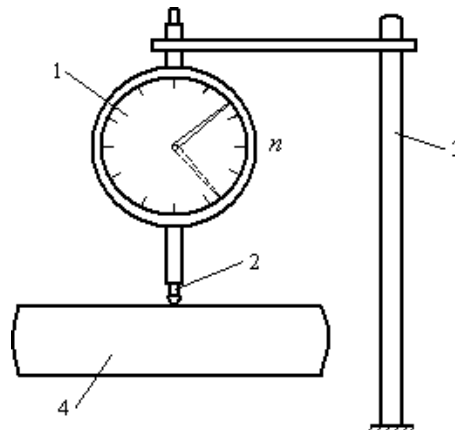


Рис. 7.1

Головними елементами стрілочного індикатора є вимірювальний пристрій у вигляді шкали з рухомою стрілкою 1 і рухомий штифт 2. При вимірюванні деформації індикатор жорстко закріплюється за допомогою спеціального зовнішнього пристрою 3, рухомий штифт індикатора упирається в тіло балки 4 і при її деформації починає переміщатися, що спричинює рух стрілки вимірювального пристрою. Індикатор вимірює лінійну деформацію (подовження, прогин та ін.). Визначити цю деформацію в одиницях довжини можна за формулою:

$$\Delta = k \cdot n.$$

де  $n$  - кількість поділок на шкалі індикатора;  $k$  - ціна однієї поділки.

Для стрілочного індикатора  $k = 0,01$  мм.

#### 7.2. Схема установки

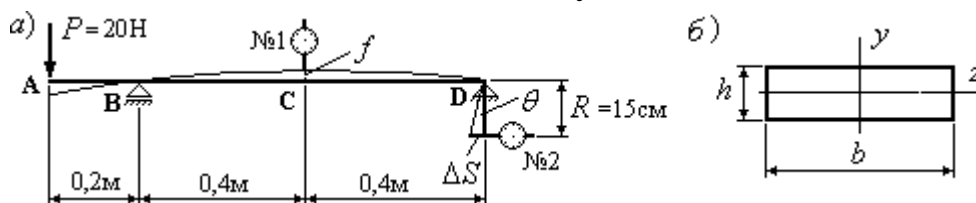


Рис. 7.2

Балка має прямокутний переріз з розмірами:  $b=10$  мм,  $h=6$  мм. Згинання балки відбувається відносно осі  $z$ .

#### 7.3 Порядок виконання роботи

1. Встановити стрілочні індикатори в перерізі С посередині прольоту балки і в перерізі D на правому кінці балки. Індикатор в перерізі D встановити на кінці вертикальної консолі довжиною  $R=15$  см.
2. Навантажити балку в перерізі А зосередженою силою  $P=20$  Н і за

допомогою індикатора №1 виміряти прогин посередині прольоту. Кількість поділок  $n_1$ , на які відхилилася стрілка на індикаторі №1, занести в таблицю 7.1.

3. За допомогою індикатора №2 виміряти довжину дуги що утворилась при повороті в перерізі D вертикальної консолі на кут  $\theta$ . Дані про кількість поділок  $n_2$  на шкалі індикатора №2 занести в таблицю 7.1.

4. За формулою (7.1) обчислити прогин балки посередині прольоту в перерізі C і занести в таблицю 7.1:

$$f_{\text{експ}} = k \cdot n_1 = \text{мм.}$$

5. Довжину дуги  $\Delta S$  обчислити за формулою (7.1):

$$\Delta S = k \cdot n_2 = \text{мм.}$$

6. Визначити експериментальне значення кута повороту перерізу D і занести в таблицю 7.1.

$$\theta_{\text{експ}} = \frac{\Delta S}{R} = \frac{k \cdot n_2}{R} = ..$$

7. Використовуючи формулу Мора-Сімпсона, визначити теоретичні значення прогину  $f_T$  в перерізі C і кута повороту  $\theta_T$  перерізу D. Результати розрахунків занести в таблицю 7.1. Теоретичні розрахунки прогину  $f_T$  і кута повороту  $\theta_T$  привести в додатку до даної лабораторної роботи.

Таблиця 7.1

### Результати випробувань та розрахунків

Кількість поділок на шкалі індикатора		Експериментальні значення переміщень		Теоретичні значення переміщень		Похибки експерименту	
$n_1$	$n_2$	$f_{\text{експ}}$ (мм)	$\theta_{\text{експ}}$ (град)	$f_T$ (мм)	$\theta_T$ (град)	$\delta_f$ (%)	$\delta_\theta$ (%)

8. Обчислити відносні похибки експерименту:

$$\delta_f = \frac{f_{\text{експ}} - f_T}{f_T} \cdot 100\% = \% ;$$

$$\delta_\theta = \frac{\theta_{\text{експ}} - \theta_T}{\theta_T} \cdot 100\% = \% .$$

Результати розрахунків занести в таблицю 7.1.

#### 7.4. Висновки:

1. В результаті проведеного експерименту визначені експериментальні значення прогину посередині прольоту балки в перерізі C і кута повороту перерізу D.

2. За допомогою методу Мора-Сімпсона отримані теоретичні значення прогину і кута повороту в тих самих перерізах.

3. Визначені похибки експерименту. Отримані похибки опинилися в межах, які допускаються в інженерних розрахунках.

## Лабораторна робота № 8

**Тема: Застосування формули Ейлера при поздовжніх випробуваннях на стискання**

**Мета: Визначення експериментальним шляхом критичної величини стискаючої сили**

### 8.1 . Загальні відомості

Критичною називається найменше значення стискаючої сили, при якій стиснутий стрижень втрачає первинну форму пружної рівноваги. Викривлення стиснутого стрижня при втраті стійкості відбувається по лінії, форма якої залежить від умов закріплення кінців стрижня. Якщо кінці стиснутого стрижня спираються за допомогою шарнірів, стрижень при втраті стійкості викривлюватиметься за синусоїдою (Рис.8.1,б).

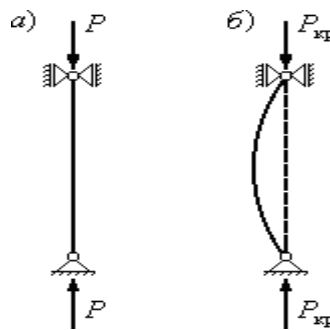


Рис. 8.1

Для стрижнів великої гнучкості ( $\lambda > \lambda_{пр}$ ) величина критичної сили визначається за формулою Ейлера:

$$P_{кр} = \frac{\pi \cdot EJ_{\min}}{(\nu \cdot l)^2},$$

де:  $E$  - модуль пружності першого роду;  $J_{\min}$  - мінімальний момент інерції поперечного перерізу стиснутого стрижня;  $\nu$  - коефіцієнт впливу умов закріплення кінців стрижня на величину критичної сили (для стрижня з шарнірним обпиранням кінців  $\nu = 1$ );  $l$  - довжина стрижня.

Мета даною лабораторної роботи полягає у визначенні величини критичної сили для стрижня великої гнучкості, кінці якого спираються вільно. Експеримент проводиться на випробувальному стенді (Рис.8.2). Стиснутий стрижень є смугою з розмірами поперечного перерізу  $b = 40$  мм;  $h = 4$  мм.

Довжина смуги складає  $l = 1,5$  м. Нижня щілинна опора забезпечує вільне обпирання стрижня, верхній кінець стрижня вільно входить в щілину на коромислі, що несе навантаження. Навантаження  $Q$  прикладається на вільному кінці коромисла. Тиск на стрижень здійснюється в перерізі В в місці його опори. Величина стискаючої сили в стрижні чисельно дорівнює опорній реакції, що виникає в коромислі. Поступово збільшуючи навантаження,

прикладене на вільному кінці коромисла, добиваємося такого стану стрижня, коли він, будучи виведеним з первинного прямолінійного стану, викривлюється і залишається в такому стані. З цього стану його рухом руки знову можна повернути в прямолінійний стан. Причиною виникнення такого стану стрижня є величина стискальної сили. У цей момент вона досягає критичної величини, а стрижень досягає стану біфуркації або розгалуження форм пружної рівноваги. У цьому стані стрижень може якийсь час існувати, не руйнуючись. Проте, достатньо будь-якої побічної сили, щоб стрижень миттєво втратив стійкість і придбав незворотні деформації і зруйнувався. Тому стан біфуркації або *критичний* стан стиснутого стрижня часто називають *нестійким* станом рівноваги. Допускати виникнення такого стану в реальних конструкціях у жодному випадку не можна, оскільки це дуже небезпечно.

## 8.2. Схема установки

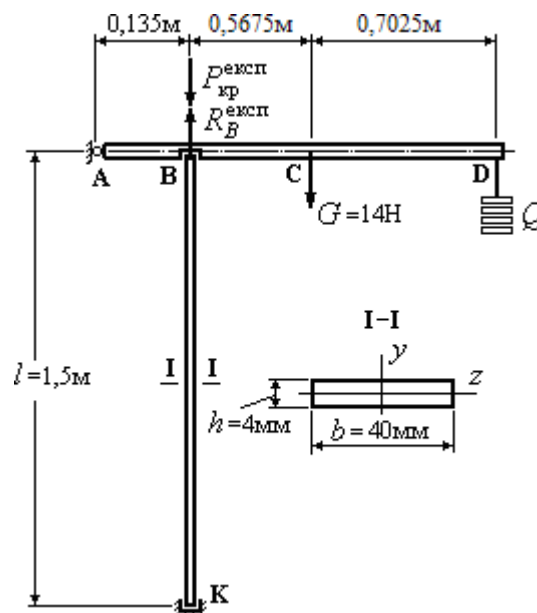


Рис. 8.2

## 8.3. Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку, навантажити стрижень ВК, прикладаючи в перерізі D вантаж  $Q$ , збільшуючи його до тих пір, доки стрижень не досягне критичного стану. Заносимо значення сили  $Q$  в таблицю 8.1.

2. Скласти рівняння моментів відносно точки А:

$$\sum M_A = R_B^{\text{експ}} \cdot 0,135 - G \cdot 0,7025 - Q \cdot 1,405 = 0.$$

Звідки знайти

$$R_B^{\text{експ}} = \frac{G \cdot 0,7025 + Q \cdot 1,405}{0,135} = \frac{14 \cdot 0,7025 + Q \cdot 1,405}{0,135} = \text{Н}.$$

3. Визначити експериментальну величину критичної сили. Для

коромисла стиснутий стрижень є опорою. Реакція  $R_B^{\text{експ}}$  виникає в стрижні ВК. На підставі третього закону Ньютона про дію і рівну йому протидію при взаємодії двох тіл з боку коромисла на стрижень діятиме така ж за величиною, але протилежна за напрямком сила  $P_{\text{кр}}^{\text{експ}}$ . Таким чином  $P_{\text{кр}}^{\text{експ.}} = R_B^{\text{експ.}}$ .

4. Визначити розрахункове значення критичної сили  $P_{\text{кр}}^{\text{T}}$ . Для цього знайти гнучкість стрижня. Обчислити мінімальний момент інерції і мінімальний радіус інерції поперечного перерізу стрижня. Стрижень при викривленні згинатиметься відносно вісі  $z$  (Рис.8.2).

Найменше значення момент інерції перерізу стрижня має відносно вісі  $z$ :

$$J_{\min} = J_z = \frac{bh^3}{12} = \frac{4 \cdot 0,4^3}{12} = 0,0213 \text{ см}^4.$$

Мінімальний радіус інерції дорівнює:

$$i_{\min} = i_z = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{0,0213}{4 \cdot 0,4}} = 0,1154 \text{ см.}$$

Гнучкість стрижня становить:

$$\lambda = \frac{v \cdot l}{i_{\min}} = \frac{1 \cdot 150}{0,1154} = 1300.$$

Результат розрахунку занести в таблицю 8.1.

5. Визначити і занести в таблицю 8.1 значення граничної гнучкості стрижня, враховуючи, що стиснутий стрижень виготовлений зі сталі з модулем пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа і границею пропорційності  $\sigma_{\text{пц}} = 200$  МПа:

$$\lambda_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{\text{пц}}}} = \sqrt{\frac{3,14^2 \cdot 2 \cdot 10^5}{200}} \approx 100.$$

6. Порівнюючи реальну гнучкість стрижня з граничною, дістаємо висновок, що реальна гнучкість стрижня значно більша за граничну, і, отже, для визначення критичної сили треба використовувати формулу Ейлера:

$$P_{\text{кр}}^{\text{T}} = \frac{\pi \cdot EJ_{\min}}{(vl)^2} = \frac{3,14^2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 0,0213 \cdot 10^{-8}}{(1 \cdot 1,5)^2} = 186,9 \text{ Н.}$$

Знайдену розрахункову величину критичної сили занести в таблицю 8.1.

7. Оцінити точність результатів експерименту. Для цього обчислити відносну похибку у вигляді:



$$\delta = \left| \frac{P_{кр}^T - P_{кр}^{експ}}{P_{кр}^T} \right| \cdot 100\% = \%.$$

Занести отриману похибку в таблицю 8.1.

Таблиця 8.1

### Результати випробувань і розрахунків

$Q$ (Н)	$P_{кр}^{експ}$ (Н)	$\lambda$	$\lambda_{пр}$	$P_{кр}^T$ (Н)	$\delta$ (%)

#### 8.4. Висновки:

1. Проведений експеримент з визначення критичної сили втрати стійкості стиснутого стрижня. Знайдено експериментальну величину критичної сили  $P_{кр}^{експ}$ .

2. Обчислена реальна гнучкість стиснутого стрижня, гранична гнучкість стрижня  $\lambda_{пр}$ , внаслідок чого встановлено, що для визначення критичної сили можна скористатися формулою Ейлера.

3. Визначене теоретичне значення критичної сили за формулою Ейлера  $P_{кр}^T$ .

4. Визначена відносна похибка експерименту  $\delta = \%$ .

## **ДОДАТКИ**

## Додаток №1

До лабораторної роботи №7

“Визначення експериментальним шляхом переміщень в статично визначуваній балці”.

**Мета цього додатку** – за допомогою методу Мора-Сімпсона визначити теоретичні значення прогину і кута повороту заданих перерізів.

### Порядок розрахунку:

1. Зображаємо балку у вантажному стані (рис. 1.1,а) і будуємо вантажну епюру згинальних моментів  $M_P$  в Нм (рис. 1.1,б).

2. Зображуємо перший одиничний стан балки (рис.1.1,в) і будуємо одиничну епюру згинальних моментів для цього стану  $\bar{M}_1$  (рис. 1.1,г).

3. Зображуємо другий одиничний стан балки (рис. 1.1,д) і будуємо одиничну епюру згинальних моментів для цього стану  $\bar{M}_2$  (рис. 1.1,е).

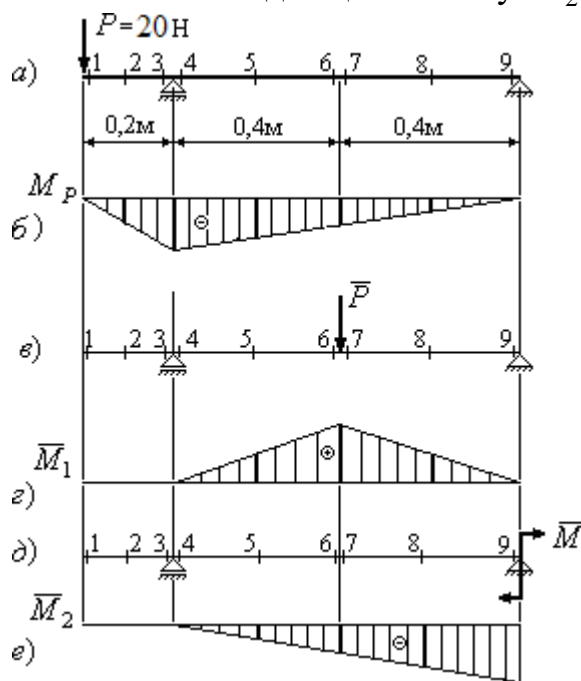


Рис. 1.1

4. Умножаємо за формулою Мора-Сімпсона вантажну епюру згинальних моментів на першу одиничну епюру згинальних моментів  $\bar{M}_1$  і визначаємо прогин балки посередині прольоту  $f_T$ . При визначенні прогину і кута повороту перерізів балки модуль пружності для матеріалу балки прийняти  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, момент інерції перерізу визначити, скориставшись формулою:

$$J_z = \frac{bh^3}{12} = \frac{4 \cdot 0,6^3}{12} = 0,072 \text{ см}^4.$$

$$M_P^{(1)} = \text{Нм}; \quad M_P^{(2)} = \text{Нм}; \quad M_P^{(3)} = \text{Нм}; \quad M_P^{(4)} = \text{Нм}; \quad M_P^{(5)} = \text{Нм};$$

$$M_P^{(6)} = \text{Нм}; M_P^{(7)} = \text{Нм}; M_P^{(8)} = \text{Нм}; M_P^{(9)} = \text{Нм}.$$

$$M_1^{(1)} = \quad ; M_1^{(2)} = \quad ; M_1^{(3)} = \quad ; M_1^{(4)} = \quad ; M_1^{(5)} = \quad ; M_1^{(6)} = \quad ; M_1^{(7)} = \quad ; \\ M_1^{(8)} = \quad ; M_1^{(9)} = \quad .$$

$$f_T = \frac{0,4}{6EJ_z} (4 \cdot M_P^{(5)} \cdot \bar{M}_1^{(5)} + M_P^{(6)} \cdot \bar{M}_1^{(6)}) + \frac{0,4}{6EJ_z} (M_P^{(7)} \cdot \bar{M}_1^{(7)} + 4 \cdot M_P^{(8)} \cdot \bar{M}_1^{(8)}) = .$$

5. Умножаємо за формулою Мора-Сімпсона вантажну епюру згинальних моментів  $M_P$  на другу одиничну епюру згинальних моментів  $M_2$  і визначаємо кут повороту  $\theta_T$  перерізу  $D$  балки.

$$M_2^{(1)} = \quad ; M_2^{(2)} = \quad ; M_2^{(3)} = \quad ; M_2^{(4)} = \quad ; M_2^{(5)} = \quad ; M_2^{(6)} = \quad ; M_2^{(7)} = \quad ; \\ M_2^{(8)} = \quad ; M_2^{(9)} = \quad .$$

$$\theta_T = \frac{0,4}{6EJ_z} (4 \cdot M_P^{(5)} \cdot \bar{M}_2^{(5)} + M_P^{(6)} \cdot \bar{M}_2^{(6)}) + \frac{0,4}{6EJ_z} (M_P^{(7)} \cdot \bar{M}_2^{(7)} + 4 \cdot M_P^{(8)} \cdot \bar{M}_2^{(8)}) = .$$

## Додаток №2

### Тема: Експериментальне дослідження нерозрізної балки Мета : Визначення експериментальним шляхом реакції проміжної опори в статично невизначуваній нерозрізній балці

#### 2.1. Загальні відомості

Метою даної роботи є ознайомлення з методикою фізичного моделювання статично невизначуваних нерозрізних балок. Методика фізичного моделювання полягає у наступному: на тілі статично визначуваної балки в місці можливої опори встановлюється стрілочний індикатор, рухомий штифт якого упирається в зовнішню поверхню балки. Балка навантажується (Рис.2.1,а) силою  $P = 20\text{ Н}$ , прикладеною на кінці консолі, балка згинається опуклістю вгору, тисне на штифт і на індикаторі стрілка переміститься в нове положення. У місці можливої опори підвішується вантаж, під дією якого стрілка індикатора повертається в первинне положення. Величина цього вантажу і буде дорівнювати величині реакції проміжної опори реальної статично невизначуваної нерозрізної балки, яка має ті самі геометричні і фізичні параметри, що і статично визначувана балка, що використовується в експерименті.

#### 2.2. Схема установки

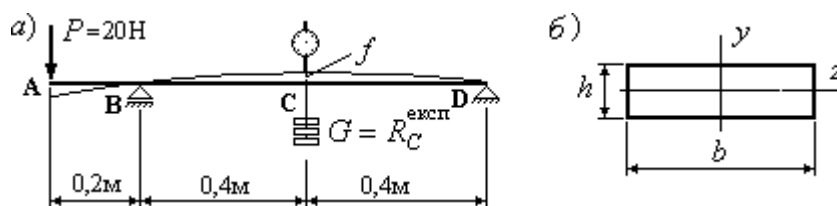


Рис. 2.1

Згинання балки відбувається відносно осі  $z$  (Рис.2.1,б). Розміри поперечного перерізу балки наступні:  $b = 40\text{ мм}$ ,  $h = 6\text{ мм}$ . При проведенні експерименту застосовується стрілочний індикатор, пристрій і принцип роботи якого докладно описані в лабораторній роботі №7.

#### 2.3. Порядок виконання роботи

1. Встановлюємо стрілочний індикатор в перерізі  $C$  посередині прольоту балки і суміщаємо стрілку індикатора з нулем.
2. Навантажуємо балку в перерізі  $A$  зосередженою силою  $P = 19,62\text{ Н}$ . Балка зігнеться опуклістю вгору. Прогин балки в перерізі  $C$  позначений на рис.8.1 а, літерою  $f$ .
3. Стрілка індикатора при згинанні балки повернеться в нове

положення. Фіксуємо кількість поділок  $n$  на шкалі індикатора при новому положенні стрілки.

4. Навантажуємо балку, поступово нарощуючи вантаж  $G$  в перерізі  $C$  до тих пір, доки стрілка індикатора не повернеться в первинне положення, тобто суміститься з нулем.

5. Привласнюємо реакції на проміжній опорі модельованої статично невизначуваної балки значення, що дорівнює величині вантажу  $G$ :  $R_C^{\text{експ}} = G$ .

6. Виконуємо розрахунок модельованої статично невизначуваної балки, використовуючи метод сил, і визначаємо розрахункове значення реакції проміжної опори  $R_C^T$ . (Додаток №1) до лабораторної роботи №8.

7. Обчислюємо відносну похибку експерименту:

$$\delta = \left| \frac{R_C^{\text{експ}} - R_C^T}{R_C^T} \right| \cdot 100\%.$$

Результати спостережень і розрахунків заносимо в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

### Результати випробувань і розрахунків

Кількість поділок	Вага вантажу	Експериментальне значення опорної реакції	Розрахункове значення опорної реакції	Похибка експерименту
$n$	$G$ (Н)	$R_C^{\text{експ}}$ (Н)	$R_C^T$ (Н)	$\delta$ (%)

#### 2.4. Висновки

1. В результаті проведеного експерименту виконане моделювання статично невизначуваної нерозрізної балки і визначене експериментальне значення реакції проміжної опори в перерізі  $C$ .

2. Методом сил проведений розрахунок модельованої статично невизначуваної балки, в результаті якого визначено розрахункове значення опорної реакції в перерізі  $C$ .

3. Визначена похибка експерименту. Встановлено, що похибка експерименту опинилася в межах, що допускаються для інженерних розрахунків.

### Додаток №3

#### Тема: Застосування теореми Бетті при згині

#### Мета: Перевірка експериментальним шляхом теореми про взаємність робіт(теореми Бетті)

### 3.1. Загальні відомості

Теорема про взаємність робіт вперше була сформульована і доведена італійським вченим Енріко Бетті (1823 - 1892). Теорема відноситься до загальних теорем про пружні системи, в основі яких лежать два основні принципи механіки: закон збереження енергії і принцип можливих переміщень. Формулюється теорема Бетті таким чином: *можлива робота зовнішніх (або внутрішніх) сил стану 1 на переміщеннях, викликаних силами стану 2, дорівнює можливій роботі зовнішніх (або внутрішніх) сил стану 2 на переміщеннях, викликаних силами стану 1*. Математичний вигляд теореми надається виразом:

$$P_1\Delta_{12} = P_2\Delta_{21}. \quad (3.1)$$

де:  $P_1$  - узагальнене навантаження для першого стану;  $P_2$  - узагальнене навантаження для другого стану;  $\Delta_{12}$  - можливі переміщення, викликані силами другого стану (Рис.3.1,б);  $\Delta_{21}$  - можливі переміщення, викликані силами першого стану (Рис.3.1,а).

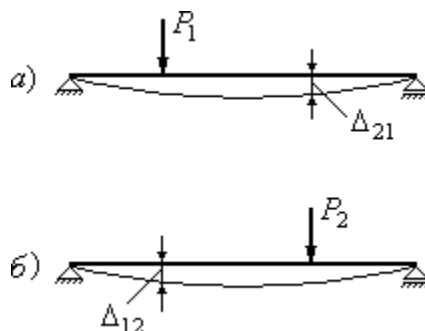


Рис 3.1

Теорема про взаємність робіт має велике прикладне значення, зокрема, при провадженні дослідів з визначення переміщень. Відомо, що при визначенні переміщень зазвичай використовують різні механічні пристрої, наприклад, стрілочні індикатори, принцип дії яких докладно описаний в лабораторній роботі №7. При великій кількості перерізів, у яких необхідно визначити переміщення, використовують відповідно значну кількість індикаторів або користуються одним індикатором, переміщуючи його з одного перерізу до іншого. І перший і другий підходи мають декілька серйозних недоліків. Використовуючи перший підхід, необхідно мати достатню кількість справних і перевірених індикаторів, таких, щоб отримані результати вимірювань виявилися

достовірними. Якщо вимірювання переміщень потрібно визначити в десятках перерізів, то такий підхід виявляється неможливим через нестачу необхідної кількості індикаторів. При другому підході порушується точність вимірювань при переустановленні стрілочних індикаторів в нове положення.

Застосування теореми Бетті при визначенні переміщень знімає всі наведені вище проблеми, оскільки дозволяє використовувати всього один індикатор, встановлений в перерізі, де прикладена сила в першому (початковому) стані системи. Переміщувати необхідно силу, прикладаючи її в другому (можливому) стані в тих перерізах, у яких слід визначити переміщення. Таким чином, при використанні теореми про взаємність робіт (теореми Бетті) слід зовнішню силу прикладати в тих перерізах можливого стану балки, у яких визначаються дійсні переміщення, а вимірювання кожного разу виконувати в одному і тому ж перерізі можливого стану балки, де встановлений вимірювальний пристрій.

Метою даної роботи є перевірка теореми Бетті. Схема навантаження і установки приладів в першому (дійсному) стані, наведена на рис.3.2. Потрібно визначити прогини в перерізах №1, №2 та №3 від дії сили, прикладеної в перерізі №4. На рис.3.3,б,в,г наведені схеми установки вимірювального пристрою і навантаження балки для другого (можливого) стану.

### 3.2.Схема установки

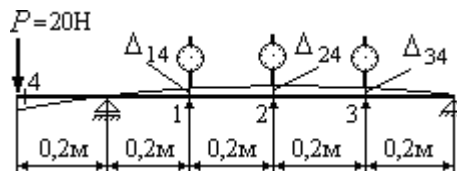


Рис .3.2

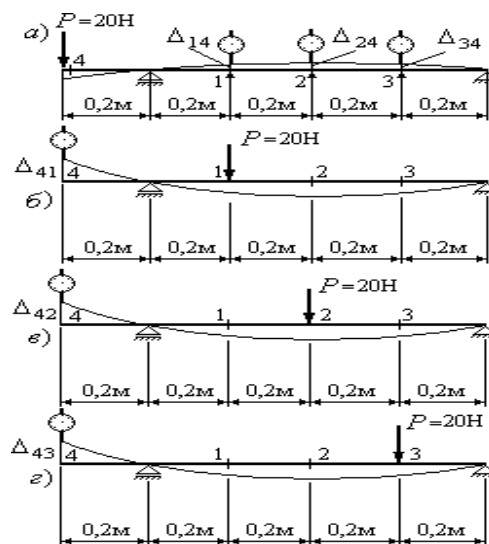


Рис.3.3



### 3.3.Порядок виконання роботи

1 Встановити стрілочні індикатори в перерізах №1, №2 і №3 і сумістити стрілки індикаторів з нулем.

2 Навантажити балку в перерізі №4 зосередженою силою  $P = 20$  Н. Балка зігнеться опуклістю вгору. Прогини балки в перерізах №1, №2 і №3 дійсного стану балки позначені на рис.3.2.а, б відповідно як  $\Delta_{14}$ ,  $\Delta_{24}$  та  $\Delta_{34}$ . Виміряти ці переміщення і результати вимірювань занести в таблицю 3.1.

3 Встановити стрілочний індикатор в перерізі №4 першого можливого стану балки і прикласти силу  $P = 20$  Н в перерізі №1. Виміряти переміщення  $\Delta_{41}$  перерізу №4, викликане цією силою. Результат вимірювання занести в таблицю 3.1.

4 Встановити стрілочний індикатор в перерізі №4 другого можливого стану балки і прикласти силу  $P = 20$  Н в перерізі №2. Виміряти переміщення  $\Delta_{42}$  перерізу №4, викликане цією силою. Результат вимірювання занести в таблицю 3.1.

5 Встановити стрілочний індикатор в перерізі №4 третього можливого стану балки і прикласти силу  $P = 20$  Н в перерізі №3. Виміряти переміщення  $\Delta_{43}$  перерізу №4 викликане цією силою. Результат вимірювання занести в таблицю 3.1.

6 З теореми Бетті при однаковій величині сили  $P$ , маємо отримати:

$$\Delta_{41} = \Delta_{14}; \Delta_{42} = \Delta_{24}; \Delta_{43} = \Delta_{34}.$$

7 Порівняти набуті експериментальні значення переміщень, наведених в таблиці 3.1, і визначити величину відносних похибок:

$$\delta_1 = \frac{|\Delta_{41} - \Delta_{14}|}{\Delta_{14}} \cdot 100\% = \quad ; \delta_2 = \frac{|\Delta_{42} - \Delta_{24}|}{\Delta_{24}} \cdot 100\% = \quad ; \delta_3 = \frac{|\Delta_{43} - \Delta_{34}|}{\Delta_{34}} \cdot 100\% = \quad ;$$

Результати занести в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

#### Результати випробувань і розрахунків

Переміщення перерізів №1, №2, №3 (мм)			Переміщення перерізу (мм) №4			Відносні похибки вимірювань(%)		
$\Delta_{14}$	$\Delta_{24}$	$\Delta_{34}$	$\Delta_{41}$	$\Delta_{42}$	$\Delta_{43}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$

### 3.4.Висновки

1. В результаті проведеного експерименту виконана перевірка теореми про взаємність робіт (теорема Бетті).

2. Аналіз результатів експерименту дозволяє дійти висновку, що величина похибок перебуває в межах, що допускаються в інженерних розрахунках. Отже, теорема Бетті підтверджується експериментом.

## Додаток №4

### Тема: Випробування сталевго зразка на кручення Мета: Визначення модуля пружності при зсуві з випробуванням на кручення

#### 4.1. Загальні відомості

Модуль пружності при зсуві  $G$  (модуль пружності другого роду) характеризує ступінь впливу фізичних властивостей матеріалу на його здатність чинити опір деформаціям. В межах пружності при зсуві залежність між напруженням і деформаціями описується наступним законом (законом Гука при зсуві):

$$\tau = G\gamma, \quad (4.1)$$

де:  $\tau$  – дотичне напруження;  $\gamma$  – кут зсуву або відносний зсув.

На зсув працюють болтові, заклепкові, клейові і зварні з'єднання. Деформація зсуву виникає при згинанні, крученні та складних видах деформації. Зазвичай зсув супроводжується іншими видами деформації, наприклад, деформацією згинання. У чистому вигляді зсув зустрічається тільки при крученні тонкостінних труб. При крученні таких труб сусідні перерізи повертаються на взаємний кут, абсолютна величина якого вимірюється в радіанах або градусах і дорівнює:

$$\varphi = \frac{M_{кр}l}{GJ_p},$$

де:  $M_{кр}$  - крутний момент ;  $l$ -довжина ділянк, що скручується;  $J_p$ -полярний момент інерції поперечного перерізу вала;  $GJ_p$  – жорсткість поперечного перерізу вала при крученні.

Мета даної лабораторної роботи полягає у визначенні модуля пружності при зсуві з випробуванням на кручення. Експеримент проводиться на спеціальній випробувальній машині, призначеній для проведення випробувань на кручення. Схема випробувальної машини наведена на рис.4.1, де цифрами позначені: 1 - основа машини; 2 - корпус машини; 3 - випробовуваний зразок; 4 - нерухомий хомут; 5 - рухомий хомут; 6 - вимірювальний пристрій;  $l$  - довжина розрахункової частини. В нижній рухомий хомут упирається штифт стрілочного індикатора 7, розташованого горизонтально. При повороті рухомого хомути індикатор вимірює довжину дуги, яку описує точка упору штифта індикатора. Знаючи відстань цієї точки від вертикальної осі вала, можна визначити експериментальне значення кута закручування. Машина має барабан для побудови діаграми закручування 8 і забезпечена електричним і ручним приводом.

## 4.2.Схема установки

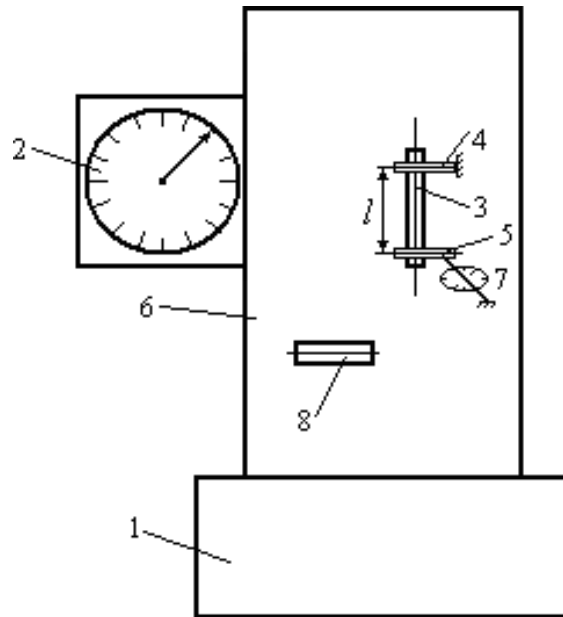


Рис. 4.1

## 4.3.Ескіз зразка

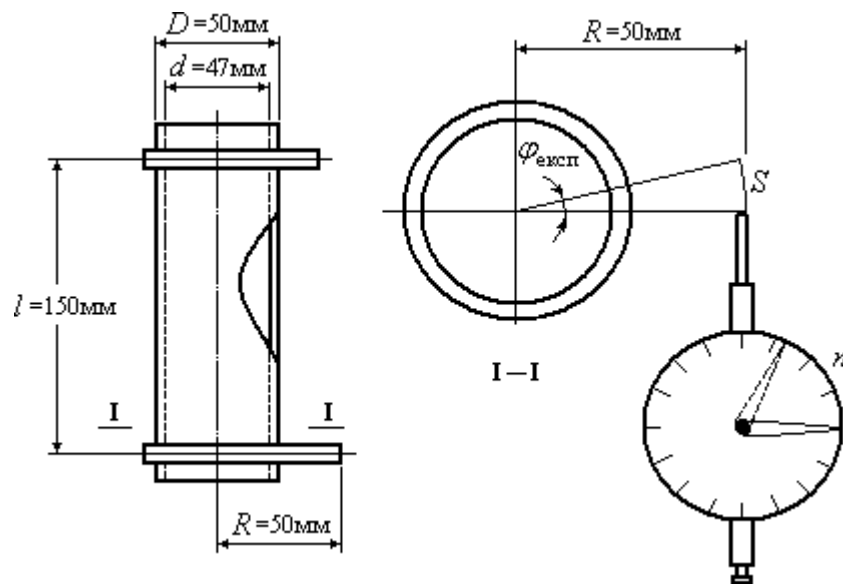


Рис. 4.2

В якості об'єкта для проведення експерименту приймається сталеві

тонкостінна трубка з зовнішнім діаметром  $D = 50$  мм і внутрішнім діаметром  $d = 47$  мм. Таким чином, товщина стінки труби складає  $t = 1,5$  мм. Ескіз зразка наведений на Рис.4.2.

#### 4.4.Порядок виконання роботи

1. Встановити стрілочний індикатор упираючи рухомий штифт в нижній рухомий хомут і сумістити стрілку індикатора з нулем.

2. Навантажити зразок за допомогою ручного приводу послідовно прикладаючи до нього зовнішні моменти починаючи з  $M = 100$  Нм до  $M = 400$  Нм через  $\Delta M = 100$  Нм і зафіксувати на шкалі стрілочного індикатора кількість поділок, які відповідають кожній зміні навантаження через  $\Delta M = 100$  Нм. Дані вимірювань занести в таблицю 4.1. Не слід навантажувати зразок навантаженням більше рекомендованого, оскільки інакше можна викликати у зразку незворотні деформації.

3. Після досягнення навантаженням величини  $M = 100$  Нм зафіксувати кількість поділок на шкалі індикатора і виконати розвантаження зразка до  $M = 100$  Нм, фіксуючи через кожні  $\Delta M = 100$  Нм кількість поділок на шкалі індикатора. Дані вимірювань занести в таблицю 4.1.

4. Обчислити кількість поділок на шкалі індикатора, що приходяться на кожні  $\Delta M = 100$  Нм окремо при навантаженні, окремо при розвантаженні зразка обчислити середню кількість поділок, що приходяться на кожні  $\Delta M = 100$  Нм Дані обчислень занести в таблицю 4.1.

5. Скласти середні значення поділок, що приходяться на кожні  $\Delta M = 100$  Нм, і поділити їх суму на кількість інтервалів зміни навантаження. Отриману кількість поділок  $n_{cp}$  помножити на ціну поділки індикатора ( $k = 0,01$  мм). В результаті отримуємо довжину дуги  $S = k \cdot n_{cp}$ , на яку перемістилася точка на рухомому хомуті, яка розташована на відстані  $R = 50$  мм від осі вала і в якій проводилися вимірювання. Експериментальне значення кута закручування визначити за формулою:

$$\varphi_{\text{експ}} = \frac{S}{R} = \frac{k \cdot n_{cp}}{R} = .$$

Результати розрахунків занести в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

$M$ (Нм)	$n_k$	$n_p$	$\Delta M$ (Нм)	$\Delta n_k$	$\Delta n_p$	$\Delta n_{cp}$	$n_{cp}$	$\varphi_{\text{експ}}$ (рад)
100			100					
200			100					
300			100					
400			100					

6. Обчислити полярний момент інерції поперечного перерізу зразка:

$$J_p = \frac{\pi \cdot D^4}{32} (1 - a^4) = \text{м}^4.$$

де  $a^4 = \frac{d}{D} = .$

7. Підставляючи у формулу (4.2) експериментальне значення кута закручування  $\varphi_{\text{експ}}$ , довжину зразка  $l$ , полярний момент інерції поперечного перерізу зразка  $J_p$  і приріст моменту  $\Delta M = 100 \text{ Нм}$ , визначити і занести в таблицю 4.2 експериментальне значення модуля зсуву (модуля пружності другого роду):

$$G_{\text{експ}} = \frac{\Delta M \cdot l}{J_p \varphi_{\text{експ}}} = \text{МПа}.$$

8. Обчислити і занести в таблицю 4.2 відносну похибку результатів проведеного експерименту, беручи до уваги, що нормативне значення модуля пружності другого роду дорівнює  $G_{\text{норм}} = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ :

$$\delta = \frac{|G_{\text{експ}} - G_{\text{норм}}|}{G_{\text{норм}}} \cdot 100\% = .$$

Таблиця 4.2

### Результати випробувань і розрахунків

Експериментальне значення модуля зсуву	Нормативне значення модуля зсуву	Похибка експерименту
$G_{\text{експ}}$ (МПа)	$G_{\text{норм}}$ (МПа)	$\delta$ (%)

#### 4.5.Висновки:

1. Проведений експеримент з визначення модуля пружності другого роду (модуль зсуву). В якості об'єкта дослідження приймалася сталева тонкостінна трубка, що зазнає деформації кручення.

2. В результаті проведеного експерименту знайдене експериментальне значення модуля зсуву.

3. Визначена похибка експерименту. Похибка експерименту склала  $\delta = \quad \%$ .

## Критерії оцінювання.

Оцінювання навчальних досягнень студентів НТУ «ДП» здійснюється за рейтинговою (100-бальною) та конвертаційною шкалами. Остання необхідна (за офіційною відсутністю національної шкали) для конвертації (переведення) оцінок здобувачів вищої освіти різних закладів.

### *Шкали оцінювання навчальних досягнень студентів НТУ «ДП»*

Рейтингова	Конвертаційна
90...100	відмінно / Excellent
74...89	добре / Good
60...73	задовільно / Satisfactory
0...59	незадовільно / Fail

Кредити навчальної дисципліни зараховується, якщо студент отримав підсумкову оцінку не менше 60-ти балів. Нижча оцінка вважається академічною заборгованістю, що підлягає ліквідації відповідно до Положення про організацію освітнього процесу НТУ «ДП».

### *Загальні критерії досягнення результатів навчання для 6-го кваліфікаційного рівня за НРК (бакалавр)*

Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки
<b><i>Знання</i></b>		
♦ концептуальні наукові та практичні знання, критичне осмислення теорій, принципів, методів і понять у сфері професійної діяльності та/або навчання	Відповідь відмінна – правильна, обґрунтована, осмислена. Характеризує наявність: - концептуальних знань; - високого ступеню володіння станом питання; - критичного осмислення основних теорій, принципів, методів і понять у навчанні та професійній діяльності	95-100
	Відповідь містить негрубі помилки або описки	90-94
	Відповідь правильна, але має певні неточності	85-89
	Відповідь правильна, але має певні неточності й недостатньо обґрунтована	80-84
	Відповідь правильна, але має певні неточності, недостатньо обґрунтована та осмислена	74-79
	Відповідь фрагментарна	70-73
	Відповідь демонструє нечіткі уявлення студента про об'єкт вивчення	65-69
	Рівень знань мінімально задовільний	60-64
	Рівень знань незадовільний	<60
<b><i>Уміння/навички</i></b>		
♦ поглиблені когнітивні та практичні уміння/навички, майстерність та інноваційність на	Відповідь характеризує уміння: - виявляти проблеми; - формулювати гіпотези; - розв'язувати проблеми; - обирати адекватні методи та інструментальні засоби; - збирати та логічно й зрозуміло інтерпретувати	95-100

Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки
рівні, необхідному для розв'язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем у сфері професійної діяльності або навчання	інформацію; - використовувати інноваційні підходи до розв'язання завдання	
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності з негрубими помилками	90-94
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності, але має певні неточності при реалізації однієї вимоги	85-89
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності, але має певні неточності при реалізації двох вимог	80-84
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності, але має певні неточності при реалізації трьох вимог	74-79
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності, але має певні неточності при реалізації чотирьох вимог	70-73
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності при виконанні завдань за зразком	65-69
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання при виконанні завдань за зразком, але з неточностями	60-64
	рівень умінь/навичок незадовільний	<60
<b>Комунікація</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ донесення до фахівців і нефахівців інформації, ідей, проблем, рішень, власного досвіду та аргументації;</li> <li>♦ збір, інтерпретація та застосування даних;</li> <li>♦ спілкування з професійних питань, у тому числі іноземною мовою, усно та письмово</li> </ul>	<p>Вільне володіння проблематикою галузі. Зрозумілість відповіді (доповіді). Мова:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- правильна;</li> <li>- чиста;</li> <li>- ясна;</li> <li>- точна;</li> <li>- логічна;</li> <li>- виразна;</li> <li>- лаконічна.</li> </ul> <p>Комунікаційна стратегія:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- послідовний і несуперечливий розвиток думки;</li> <li>- наявність логічних власних суджень;</li> <li>- доречна аргументації та її відповідність відстоюваним положенням;</li> <li>- правильна структура відповіді (доповіді);</li> <li>- правильність відповідей на запитання;</li> <li>- доречна техніка відповідей на запитання;</li> <li>- здатність робити висновки та формулювати пропозиції</li> </ul>	95-100
	<p>Достатнє володіння проблематикою галузі з незначними хибами. Достатня зрозумілість відповіді (доповіді) з незначними хибами. Доречна комунікаційна стратегія з незначними хибами</p>	90-94
	<p>Добре володіння проблематикою галузі. Добра зрозумілість відповіді (доповіді) та доречна</p>	85-89

Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки
	комунікаційна стратегія (сумарно не реалізовано три вимоги)	
	Добре володіння проблематикою галузі. Добра зрозумілість відповіді (доповіді) та доречна комунікаційна стратегія (сумарно не реалізовано чотири вимоги)	80-84
	Добре володіння проблематикою галузі. Добра зрозумілість відповіді (доповіді) та доречна комунікаційна стратегія (сумарно не реалізовано п'ять вимог)	74-79
	Задовільне володіння проблематикою галузі. Задовільна зрозумілість відповіді (доповіді) та доречна комунікаційна стратегія (сумарно не реалізовано сім вимог)	70-73
	Часткове володіння проблематикою галузі. Задовільна зрозумілість відповіді (доповіді) та комунікаційна стратегія з хибами (сумарно не реалізовано дев'ять вимог)	65-69
	Фрагментарне володіння проблематикою галузі. Задовільна зрозумілість відповіді (доповіді) та комунікаційна стратегія з хибами (сумарно не реалізовано 10 вимог)	60-64
	Рівень комунікації незадовільний	<60
<b><i>Відповідальність і автономія</i></b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ управління складною технічною або професійною діяльністю чи проектами;</li> <li>◆ спроможність нести відповідальність за вироблення та ухвалення рішень у непередбачуваних робочих та/або навчальних контекстах;</li> <li>◆ формування суджень, що враховують соціальні, наукові та етичні аспекти;</li> <li>◆ організація та керівництво професійним розвитком осіб та груп;</li> <li>◆ здатність продовжувати навчання із значним</li> </ul>	<p>Відмінне володіння компетенціями менеджменту особистості, орієнтованих на:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) управління комплексними проектами, що передбачає: <ul style="list-style-type: none"> <li>- дослідницький характер навчальної діяльності, позначена вмінням самостійно оцінювати різноманітні життєві ситуації, явища, факти, виявляти і відстоювати особисту позицію;</li> <li>- здатність до роботи в команді;</li> <li>- контроль власних дій;</li> </ul> </li> <li>2) відповідальність за прийняття рішень в непередбачуваних умовах, що включає: <ul style="list-style-type: none"> <li>- обґрунтування власних рішень положеннями нормативної бази галузевого та державного рівнів;</li> <li>- самостійність під час виконання поставлених завдань;</li> <li>- ініціативу в обговоренні проблем;</li> <li>- відповідальність за взаємовідносини;</li> </ul> </li> <li>3) відповідальність за професійний розвиток окремих осіб та/або груп осіб, що передбачає: <ul style="list-style-type: none"> <li>- використання професійно-орієнтованих навичок;</li> <li>- використання доказів із самостійною і правильною аргументацією;</li> <li>- володіння всіма видами навчальної діяльності;</li> </ul> </li> <li>4) здатність до подальшого навчання з високим рівнем автономності, що передбачає: <ul style="list-style-type: none"> <li>- ступінь володіння фундаментальними знаннями;</li> <li>- самостійність оцінних суджень;</li> </ul> </li> </ol>	95-100



Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки
ступенем автономії	- високий рівень сформованості загальнонавчальних умінь і навичок; - самостійний пошук та аналіз джерел інформації	
	Упевнене володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано дві вимоги)	90-94
	Добре володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано три вимоги)	85-89
	Добре володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано чотири вимоги)	80-84
	Добре володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано шість вимог)	74-79
	Задовільне володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано сім вимог)	70-73
	Задовільне володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано вісім вимог)	65-69
	Рівень відповідальності і автономії фрагментарний	60-64
	Рівень відповідальності і автономії незадовільний	<60

## **ОЧІКУВАНІ ДИСЦИПЛІНАРНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ**

1. Уміти експериментувати та аналізувати дані.
2. Уміти поєднувати теорію і практику для розв'язування завдань матеріалознавства.
3. Знати основні групи матеріалів, їх загальні властивості, основні фізико-механічні характеристики, умови застосування та оцінювати їх.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів. – К.: Вища шк., 2004. – 655 с.
2. Цурпал І.А. Механіка матеріалів і конструкцій : Навч. посібник.- К.:Вища освіта, 2005 .367 с.
3. . Гурняк Л.І. Опір матеріалів /Л.І Гурняк, Ю.В. Гуцуляк, Т.В. Юзьків-Львів: “Новий світ-2000”, 2006.-364 с.

**Колосов Дмитро Леонідович**  
**Панченко Сергій Павлович**  
**Кіба В`ячеслав Якович**

**Методичні рекомендації до проведення лабораторних робіт**  
**механічних випробувань матеріалів для студентів**  
**спеціальності 132 Матеріалознавство**

Видається в авторській редакції

Підписано до видання 27.12.2022  
Електронний ресурс Авт. арк. 2,2

Розроблено і видано в  
Національному технічному університеті

