

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
“УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СТУДЕНТІВ МЕХАНІЧНИХ
СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ

Затверджено на засіданні кафедри
матеріалознавства.

Протокол № 04 від 16.10.13.

Дніпропетровськ УДХТУ 2014

Методичні вказівки до виконання експериментальних лабораторних робіт з опору матеріалів для студентів механічних спеціальностей денної та заочної форм навчання / Укл. Г.В. Філатов. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2014. – 40 с.

Укладач Г.В. Філатов, доктор техн. наук

Відповідальний за випуск О.Б. Гірін, доктор техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання експериментальних лабораторних робіт з опору матеріалів для студентів механічних спеціальностей денної та заочної форм навчання

Укладач ФІЛАТОВ Георгій Венедиктович

Редактор Л.М. Тонкошкур
Коректор Л.Я. Гоцуцова

Підписано до друку 08.01.13. Формат 60×84^{1/16}. Папір ксерокс. Друк різнограф. Умовн.-друк. арк. 1,89. Облік.-видавн. арк. 1,94. Тираж 100 прим. Зам. № 76. Свідоцтво ДК № 303 від 27.12.2000.

ДВНЗ УДХТУ, 49005, Дніпропетровськ–5, просп. Гагаріна, 8
Видавничо-поліграфічний комплекс ІнКомЦентру

ВСТУП

Опір матеріалів є інженерною дисципліною, що викладає методи розрахунку елементів конструкцій і деталей машин на міцність, жорсткість і стійкість. При складанні розрахункової схеми, окрім геометрії об'єкту і навантажень велике значення мають властивості матеріалу, з якого виготовляється об'єкт. 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 опору матеріалів. При описі лабораторних робіт наводяться необхідні теоретичні відомості, принципіві схеми устаткування, порядок виконання, методики обробки результатів експериментів, форми звітів.

Відповідно до робочої програми курсу «Опір матеріалів» студенти механічних спеціальностей напрямків підготовки «Інженерна механіка» і «Машинобудування» виконують в рамках цієї дисципліни 16 лабораторних робіт. Список цих робіт складається з експериментальних робіт, які виконуються в учбовій лабораторії кафедри машинобудування в груповому порядку, і віртуальних лабораторних роботи, що виконуються студентами на ЕОМ індивідуально відповідно до задалегідь підготовлених завдань. Усі лабораторні роботи мають крізну нумерацію. Тому лабораторні роботи в даних методичних вказівках, починаючи з лабораторної роботи №7, мають подвійні номери – у дужках наведені номери у загальній нумерації.

Наведені в даних методичних вказівках лабораторні роботи присвячені експериментальним дослідженням механічних характеристик міцності і пластичності мало вуглецевої сталі, характеристик міцності сірого чавуну і деревини як одного з анізотропних матеріалів (ЛР №1-4). Експериментальним шляхом визначаються пружні характеристики сталі: модуль пружності першого роду і модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона (ЛР №5,6,10(14)). В ЛР № 7(9) експериментальним шляхом визначаються прогин і кут повороту перерізів статично визначуваної балки. В ЛР №8 (11) наводиться фізичне моделювання статично невизначуваної нерозрізної балки. Експериментальній перевірці теореми про взаємність робіт присвячена ЛР №9 (13). Визначення експериментальним шляхом критичної сили при стисканні стержня є темою ЛР №11(16).

Звіти оформляються у вигляді журналу лабораторних робіт відповідно до прикладів, наведених в даних методичних вказівках і у відповідному методичному пакеті електронного кейсу з опору матеріалів.

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 ГОСТів.

1.1. Схема установки

Дослідження проводяться на випробувальній машині розривної дії з зусиллям в 4 тони ИМ-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.

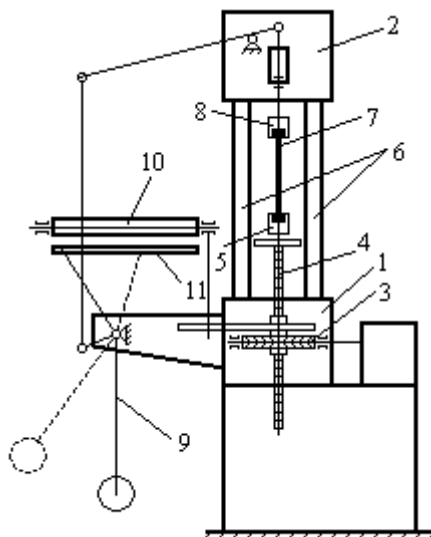


Рис. 1.1

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 вимірник 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, дорівнює абсолютному подовженню зразка, через елементи записуючого пристрою передається на барабан, поворот якого пропорційний подовженню зразка, і записується на папері.

Ескіз зразка

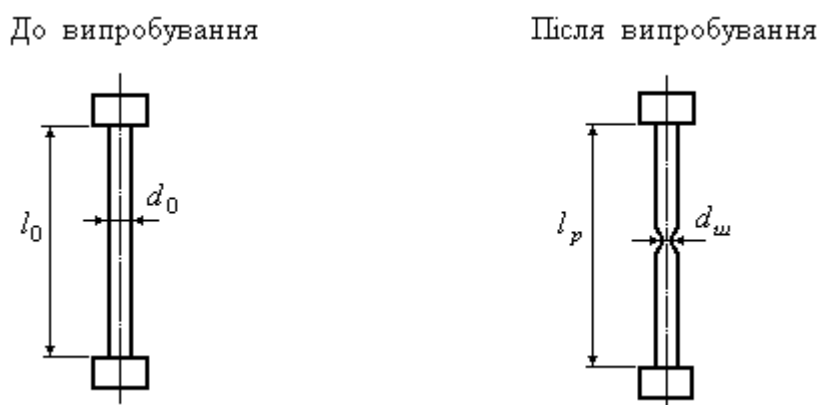


Рис. 1.2

1.2. Порядок виконання роботи

1. Виконати виміри зразка і результати вимірів занести в таблицю 1.2. Розрахункова довжина зразка l_0 замірюється між його головками. При визначенні діаметра d_0 діаметр вимірюється 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	$d_{ш} =$ (мм)
Площа поперечного перерізу	$A_0 =$ (см ²)	Площа поперечного перерізу	$A_{ш} =$ (см ²)
Об'єм зразка	$V_0 =$ (см ³)	Об'єм зразка	

2. Вставити папір в записуючий пристрій машини.

3. 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:

$P_{\text{пц}}$ – навантаження, що відповідає границі пропорційності;

$P_{\text{пр}}$ – навантаження, що відповідає границі пружності;

$P_{\text{Т}}$ – 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

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

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

5. 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.

6. 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 вертикальної осі. При обробці діаграми розтягання знайти початок відліку, як це показано на рис.1.3, і провести горизонтальну вісь абсолютних подовжень Δl і вертикальну вісь навантажень P (внутрішніх зусиль у зразку).

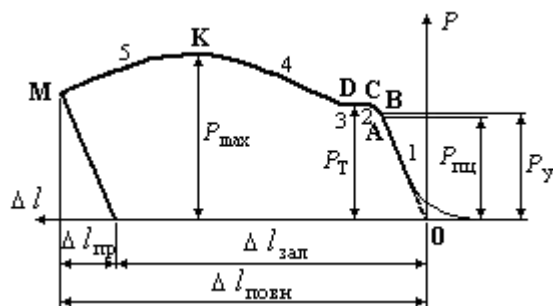


Рис. 1.3

6. Заміряти ординати, які відповідають раніше заміреним навантаженням $P_{щц}$, $P_{пр}$, P_T , P_{max} , і 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.

7. Заміряти на діаграмі розтягання деформації зразка: $\Delta l_{повн}$ – повне абсолютне подовження в момент розриву; $\Delta l_{пр}$ – пружна деформація, зникаюча 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.

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

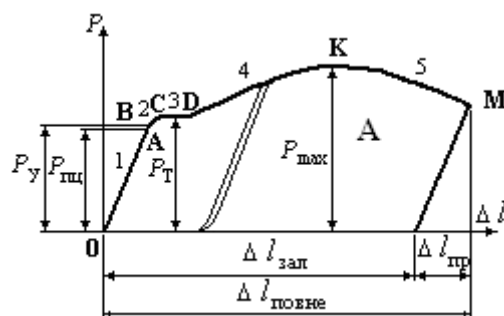


Рис. 1.4

9. Обчислити механічні характеристики міцності сталі:

$$\sigma_{щц} = \frac{P_{щц}}{A_0} = \quad = \quad \text{МПа} \quad \text{– границя пропорційності;}$$

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

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

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

Дані розрахунку занести в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3

Механічні характеристики міцності і пластичності сталі

$\sigma_{\text{пл}}$ (МПа)	$\sigma_{\text{пр}}$ (МПа)	σ_T (МПа)	σ_B (МПа)	δ (%)	ψ (%)

10. Обчислити характеристики пластичності сталі:

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

$$\psi = \frac{|A_{\text{ш}} - A_0|}{A_0} \cdot 100\% = \quad = \quad \% \text{ – відносне звуження зразка.}$$

Результати занести в таблицю 1.3.

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

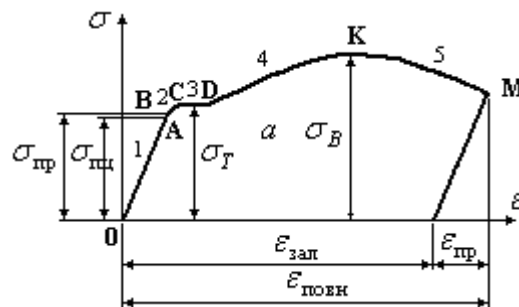


Рис. 1.5

Вигляд цієї діаграми є умовним, оскільки при визначенні механічних характеристик міцності використовувалася 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:

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

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

$$A = \eta P_{\text{max}} \Delta l = \quad = \quad \text{Нм},$$

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

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

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

Цю саму роботу можна знайти як площу умовної діаграми напружень:

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

Висновки:

1. В результаті випробувань сталевого зразка на розрив були побудовані діаграма розтягання та 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 руйнується 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 стани.

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° 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.

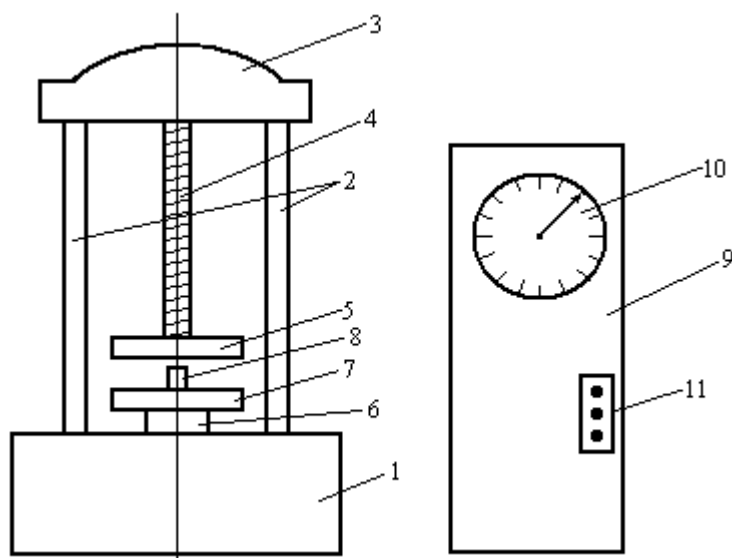


Рис. 2.1

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 нерухокої 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

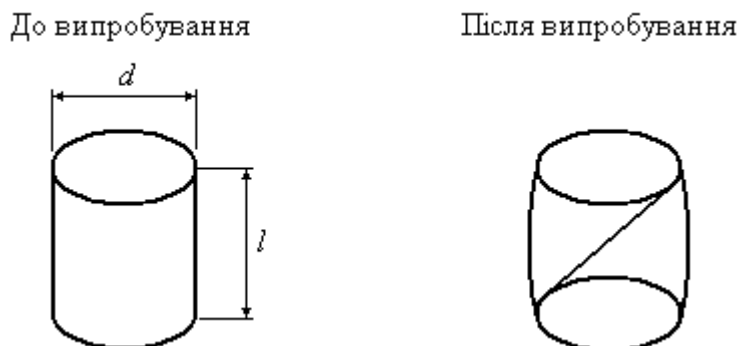


Рис. 2.2

2.4. Порядок виконання роботи

1. Обміряти випробовуваний 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:

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

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 ²)	P_{\max} (кН)	σ_B (МПа)

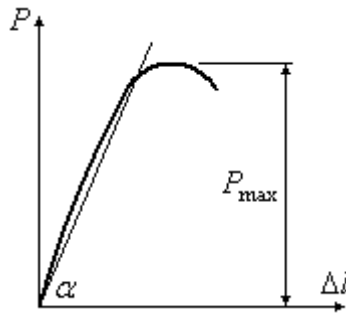


Рис. 2.3

Висновки :

1. Чавун є крихким матеріалом.
2. При випробуванні на стискання зразок з чавуну аж до руйнування деформується незначно, після чого руйнується раптово.
3. Причиною руйнування чавуну є виникнення у зразку деформації зсуву, поява значних дотичних напружень та розвиток тріщин, спрямованих приблизно під кутом 45° до утворюючої.
4. З аналізу діаграми стискання видно, що чавун є фізично нелінійним матеріалом. Модуль пружності чавуну визначається як тангенс кута нахилу січною 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 неоднаковість механічних властивостей анізотропних матеріалів залежно від напрямку волокон, ці матеріали зазвичай випробовують на стискання уздовж двох взаємно перпендикулярних напрямків. Наприклад, деревину випробовують 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).

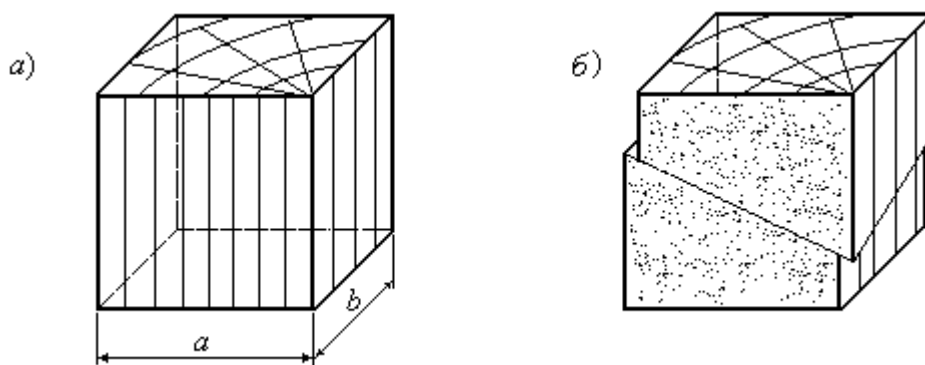


Рис. 3.1

3.2. Порядок виконання роботи

1. Обміряти випробовуваний 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:

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

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 A_0 (мм ²)	Максимальне зусилля P_{\max} (кН)	Границя міцності σ_B (МПа)
		a (мм)	b (мм)			
Деревина	П-50					

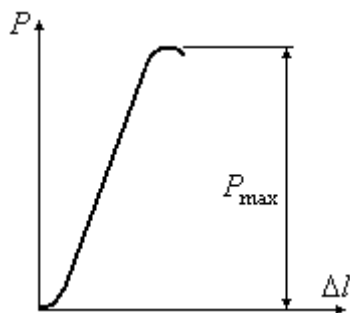


Рис. 3.2

Висновки :

1. Деревина є анізотропним матеріалом.
2. При випробуванні на стискання зразок з деревини уздовж волокон аж до руйнування деформується незначно, після чого 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 $\frac{1}{3}$ 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).

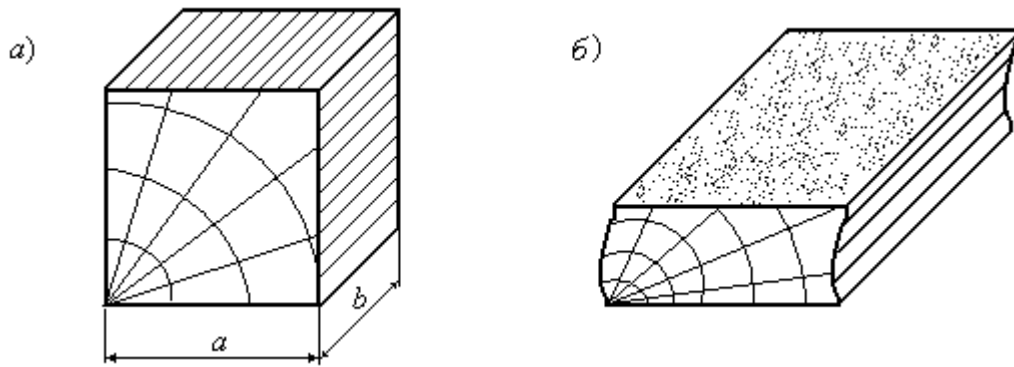


Рис. 4.1

4.2. Порядок виконання роботи

1. Обміряти випробовуваний 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 $\frac{1}{3}$ первинної висоти. Дані вимірювань занести в таблицю 4.1.
4. Обчислити границю міцності деревини упоперек волокон за формулою:

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

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 A_0 (мм ²)	Максимальне зусилля P_{\max} (кН)	Границя міцності σ_B (МПа)
		a (мм)	b (мм)			
Деревина	П-50					

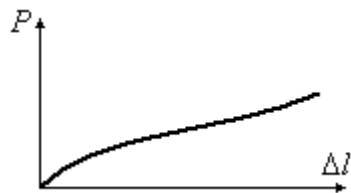


Рис. 4.2

Висновки :

1. Деревина є анізотропним матеріалом.
2. При випробуванні на стискання зразок з деревини уперек волокон деформується значно шляхом пресування волокон.
3. Міцність деревини уперек волокон значно менша за міцність уздовж волокон.

Лабораторна робота № 5

Визначення модуля пружності першого роду для сталі з випробування на розтягання

5.1. Ескіз установки

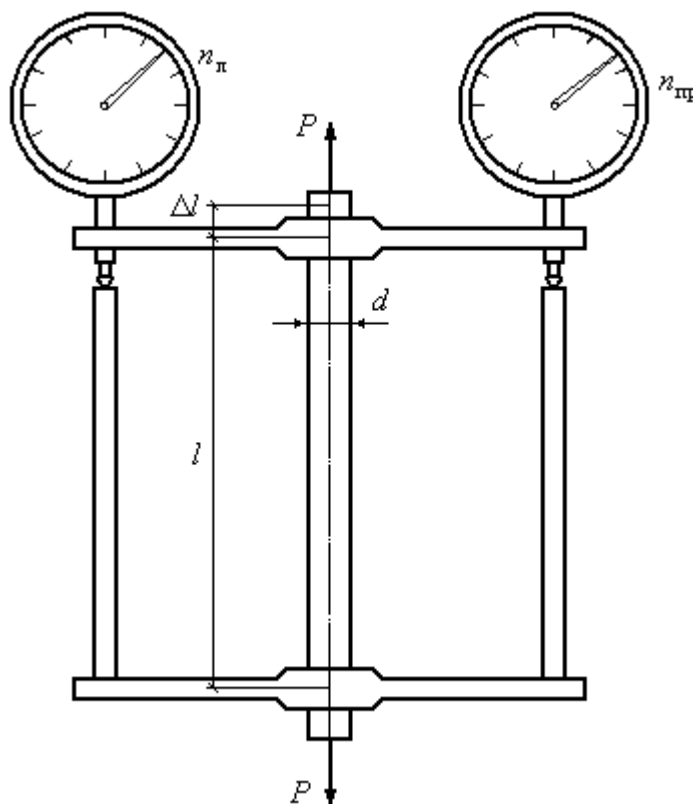


Рис. 5.1

5.2. Порядок виконання роботи

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

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

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

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

3. Випробування виконуємо на машині ИМ-4Р. Навантажуємо зразок на 3 кН для усунення зазорів і записуємо показники тензometrів. Коефіцієнт зменшення показників тензометра $k = 0,01$ мм; табличне значення модуля пружності для сталі $E_{\text{T}} = 2 \cdot 10^5$ МПа.

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

Таблиця 5.1

Результати випробувань

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

5. Обчислюємо Δl : $\Delta l = k \cdot \Delta n = \quad = \quad$ см.

6. Визначаємо модуль пружності E для сталі:

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

7. Визначасмо 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 $E =$ МПа. Відносна похибка склала $\delta =$ %.

Лабораторна робота № 6

Визначення коефіцієнта Пуассона для сталі з випробування на розтягання

6.1. Ескіз установки

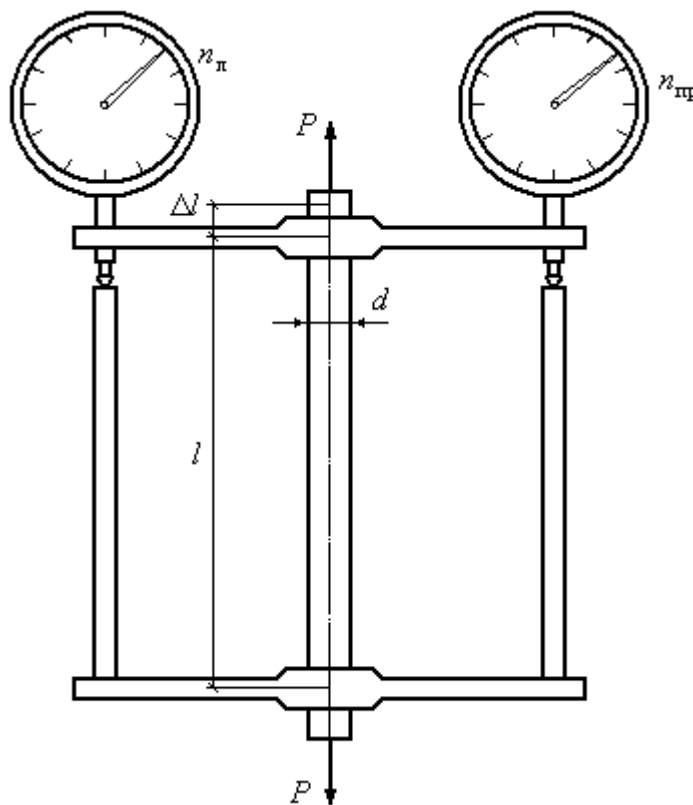


Рис. 6.1

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:

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

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

4. Навантажуємо зразок ступенями через $\Delta P = 1$ кН, знімаємо показники тензometrів і результати вимірювань заносимо в таблиці 6.1 і 6.2.

5. Обчислюємо Δl : $\Delta l = k \cdot \Delta n = \quad = \quad$ см.

6. Обчислюємо відносну поздовжню деформацію:

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

7. Обчислюємо відносну поперечну деформацію:

$$\varepsilon' = \frac{\Delta d_{\text{сп}}}{d} = \quad = \quad .$$

8. Визначаємо коефіцієнт Пуассона для сталі:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| = \quad = \quad .$$

9. Визначаємо відносну похибку:

$$\delta = \left| \frac{\mu_{\text{T}} - \mu}{\mu_{\text{T}}} \right| \cdot 100\% = \quad = \quad \%$$

Таблиця 6.1

**Результати визначення експериментальним шляхом
подовження зразка**

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

Таблиця 6.2

**Результати визначення експериментальним шляхом
поперечної деформації зразка**

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

3. Висновок:

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

Лабораторна робота № 7 (9)

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 стержневих систем з застосуванням стрілочних індикаторів (Рис.7.1).

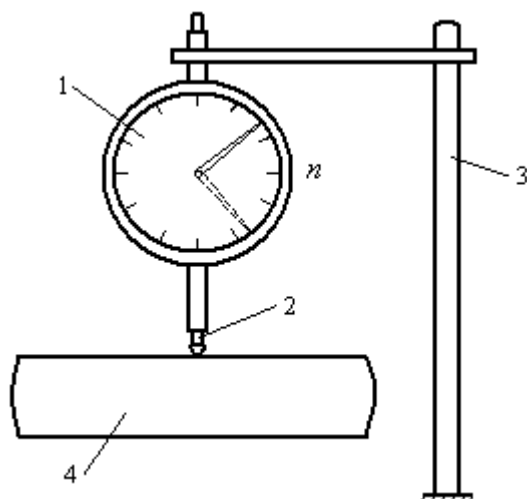


Рис. 7.1

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 і спричинює рух стрілки вимірювального пристрою. Індикатор вимірює лінійну деформацію (подовження, прогин та ін.). Визначити цю деформацію в одиницях довжини можна за формулою:

$$\Delta = k \cdot n, \quad (7.1)$$

де n – кількість поділок на шкалі індикатора; k – ціна однієї поділки. Для стрілочного індикатора $k = 0,01$ мм.

7.2. Схема установки

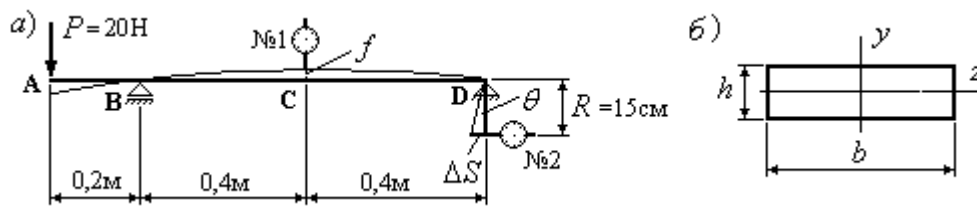


Рис. 7.2

Балка має прямокутний переріз з розмірами: $b = 40$ 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 утворилася при повороті прикріпленої в перерізі D вертикальної консолі на кут θ . 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 С і занести в таблицю 7.1:

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

5. Довжину дуги ΔS обчислити за формулою (7.1):

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

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

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

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

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)	θ_T (град)	δ_f (%)	δ_θ (%)

8. Обчислити відносні похибки експерименту:

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

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

Результати розрахунків занести в таблицю 7.1.

4. Висновки:

1. В результаті проведеного експерименту визначені експериментальні значення прогину посередині прольоту балки в перерізі С 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.

Додаток №1 до лабораторної роботи №7(9) “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. 7.3,а) і будуємо вантажну епюру згинальних моментів M_p в Нм (рис. 7.3,б).
2. Зображуємо перший одиничний стан балки (Рис.7.3,в) і будуємо одиничну епюру згинальних моментів для цього стану \bar{M}_1 (рис. 7.3,г)
3. Зображуємо другий одиничний стан балки (рис. 7.3,д) і будуємо одиничну епюру згинальних моментів для цього стану \bar{M}_2 (рис. 7.3,е).

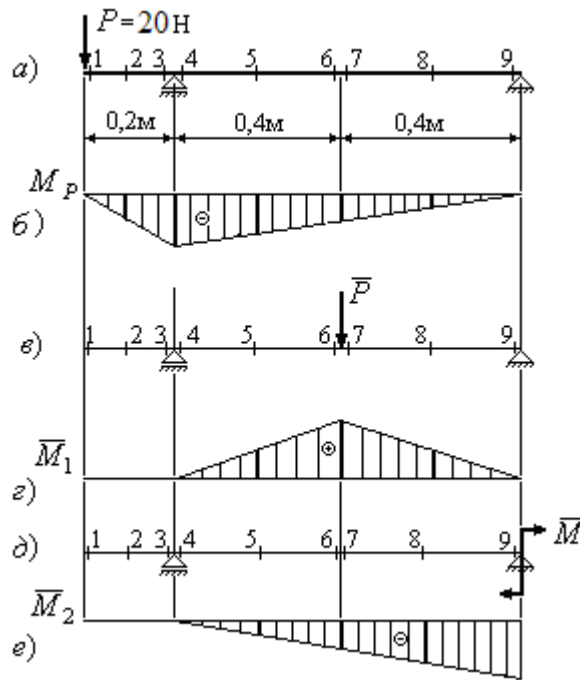


Рис. 7.3

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_τ . При визначенні прогину і кута повороту перерізів балки модуль пружності для матеріалу балки прийняти $E=2\cdot 10^5\text{МПа}$, момент інерції перерізу визначити, скориставшись формулою:

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

$$M_P^{(1)} = \text{Нм}; M_P^{(2)} = \text{Нм}; M_P^{(3)} = \text{Нм}; M_P^{(4)} = \text{Нм}; M_P^{(5)} = \text{Нм}; M_P^{(6)} = \text{Нм};$$

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

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

$$M_1^{(7)} = \quad ; M_1^{(8)} = \quad ; M_1^{(9)} = \quad .$$

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

=

5. Умножаємо за формулою Мора-Сімпсона вантажну епюру згинальних моментів M_P на другу одиничну епюру згинальних моментів \bar{M}_2 і визначаємо кут повороту θ_T перерізу D балки.

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

$$M_2^{(7)} = \quad ; M_2^{(8)} = \quad ; M_2^{(9)} = \quad .$$

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

=

Лабораторна робота № 8 (11)

Визначення експериментальним шляхом реакції проміжної опори в статично невизначуваній нерозрізній балці

8.1. 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.8.1,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.

8.2. Схема установки

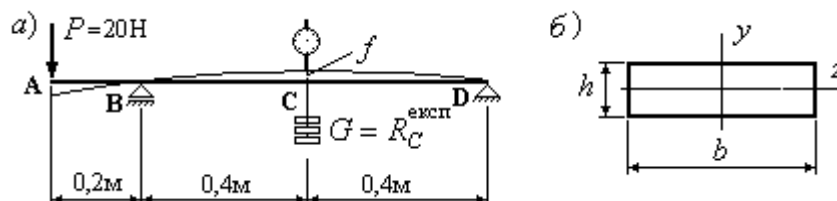


Рис. 8.1

Згинання балки відбувається відносно осі z (Рис.8.1,б). Розміри поперечного перерізу балки наступні: $b = 40$ мм; $h = 6$ мм. При проведенні експерименту застосовується стрілочний індикатор, пристрій і принцип роботи якого докладно описані в лабораторній роботі №7 (9).

8.3. Порядок виконання роботи

1. Встановлюємо стрілочний індикатор в перерізі С посередині прольоту балки і суміщаємо стрілку індикатора з нулем.

2. Навантажуємо балку в перерізі А зосередженою силою $P = 19,62$ Н. Балка зігнеться опуклістю вгору. Прогин балки в перерізі С 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 С 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^r (Додаток №1 до лабораторної роботи №8(11)).

8. Обчислюємо відносну похибку експерименту:

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

Результати спостережень і розрахунків заносимо в таблицю 8.1.

Таблиця 8.1

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^r (Н)	δ (%)

8.4. Висновки:

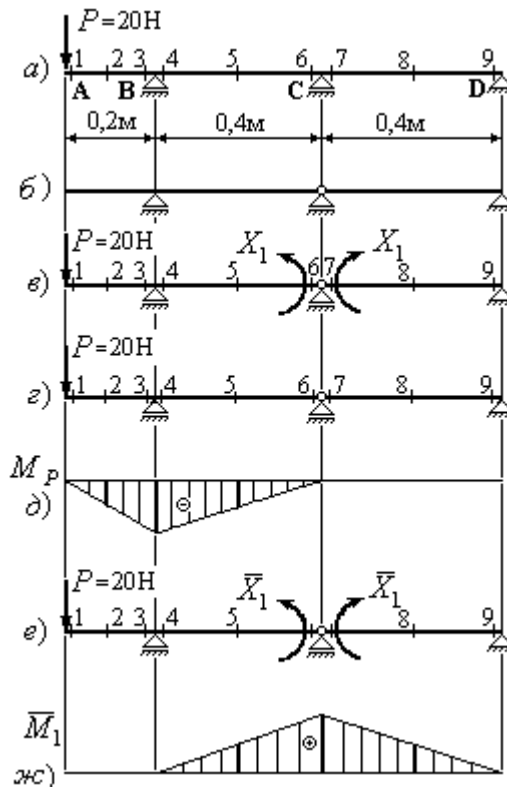
1. В результаті проведеного експерименту виконане моделювання статично невизначуваної нерозрізної балки і визначене експериментальне значення реакції проміжної опори в перерізі С.
2. Методом сил проведений розрахунок модельованою статично невизначуваною балкою, в результаті якого визначене розрахункове значення опорної реакції в перерізі С.
3. Визначена похибка експерименту. Встановлено, що похибка експерименту опинилася в межах, що допускаються для інженерних розрахунків.

Додаток №1 до лабораторної роботи №8 (11) “Визначення експериментальним шляхом реакції проміжної опори в статично невизначуваній нерозрізній балці”.

Мета цього додатку – за допомогою методу сил визначити реакцію проміжної опори в модельованій статично невизначуваній нерозрізній балці.

Порядок розрахунку:

1. Зображуємо балку у вантажному стані (Рис.8.2,а) і визначаємо ступінь статичної невизначуваності за формулою: $n = C - U$, де C – кількість зв'язків; U – кількість незалежних рівнянь рівноваги.



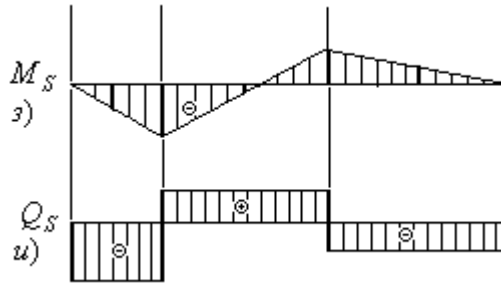


Рис. 8.2

2. Вибираємо основну систему (Рис.8.2,б).
3. Зображуємо еквівалентний стан системи (Рис.8.2,в).
4. Зображуємо вантажний стан системи (Рис.8.2,г) і будуємо вантажну епюру згинальних моментів M_P (Рис.8.2,д).
5. Зображуємо одиничний стан системи (Рис.8.2,е) і будуємо одиничну епюру згинальних моментів для цього стану \bar{M}_1 (Рис.8.2,ж)
6. Складаємо канонічне рівняння методу сил у вигляді:

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1P} = 0 \quad (8.1)$$

і визначаємо одиничний коефіцієнт, множачи за формулою трикутників одиничну епюру згинальних моментів саму на себе:

$$\delta_{11} = \sum_{j=1}^m \frac{kAa l}{EJ},$$

де m – кількість ділянок.

7. Визначаємо вантажний член Δ_{1P} канонічного рівняння методу сил (8.1), множачи вантажну епюру згинальних моментів на одиничну за формулою трикутників або за формулою Мора-Сімпсона:

$$\Delta_{1P} = \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{6EJ} (Aa + 4Cc + Bb)_j.$$

8. Розв'язуємо рівняння (8.1) щодо зайвої невідомої X_1 :

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11}}.$$

9. Визначаємо сумарні згинальні моменти в характерних перерізах балки, використовуючи вираз:

$$M_S^{(j)} = \sum_{j=1}^n \bar{M}_j^{(j)} X_j + M_P^{(j)}.$$

10. Будуємо епюру сумарних згинальних моментів M_S (рис. 8.2,з).
11. Методом вирізування ділянок визначаємо значення сумарних поперечних сил в характерних перерізах балки і будуємо епюру сумарних поперечних сил Q_S (Рис.8.2,і).
12. З епюри сумарних поперечних сил визначаємо розрахункове значення опорної реакції на проміжній опорі С:

$$R_C^T = |Q_S^{(6)}| + |Q_S^{(7)}|.$$

Лабораторна робота № 9 (13)

Перевірка експериментальним шляхом теореми про взаємність робіт (теореми Бетті)

9.1. 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:

$$P_1 \Delta_{12} = P_2 \Delta_{21}, \quad (9.1)$$

де: P_1 – узагальнене навантаження для першого стану; P_2 – узагальнене навантаження для другого стану; Δ_{12} – можливі переміщення, викликані силами другого стану (Рис.9.1,б); Δ_{21} – можливі переміщення, викликані силами першого стану (Рис.9.1а).

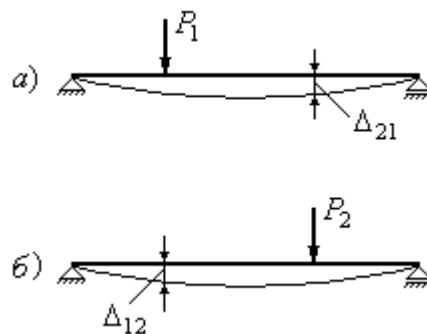


Рис. 9.1

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(9). 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.9.2. Потрібно визначити прогини в перерізах №1, №2 та №3 від дії сили, прикладеної в перерізі №4. На рис.9.3,б,в,г наведені схеми установки вимірювального пристрою і навантаження балки для другого (можливого) стану.

9.2. Схема установки

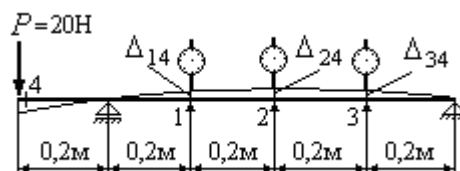


Рис. 9.2

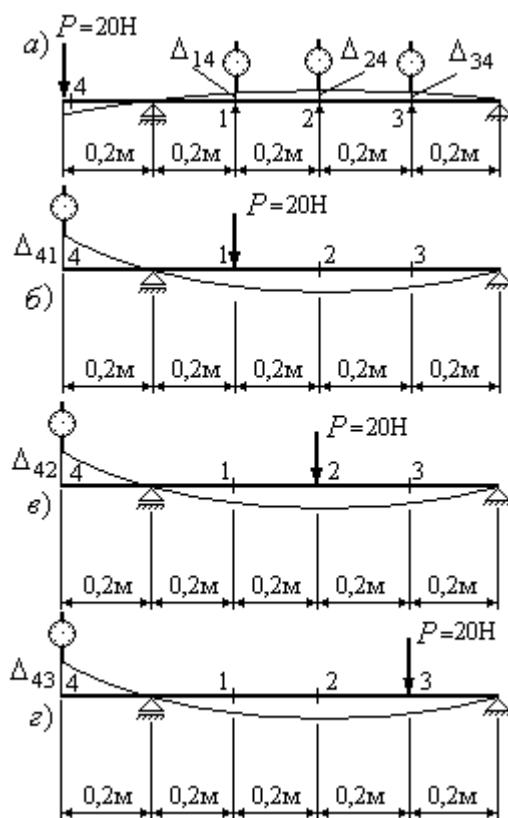


Рис. 9.3

9.3. 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 $P = 20 \text{ Н}$. Балка зігнеться опуклістю вгору. Прогини балки в перерізах №1, №2 і №3 дійсного стану балки позначені на рис.9.2,а відповідно як Δ_{14} , Δ_{24} та Δ_{34} . Виміряти ці переміщення і результати вимірювань занести в таблицю 9.1.

3. Встановити стрілочний індикатор в перерізі №4 першого можливого стану балки і прикласти силу $P = 20 \text{ Н}$ в перерізі №1. Виміряти переміщення Δ_{41} перерізу №4, викликане цією силою. Результат вимірювання занести в таблицю 9.1.

4. Встановити стрілочний індикатор в перерізі №4 другого можливого стану балки і прикласти силу $P = 20 \text{ Н}$ в перерізі №2. Виміряти переміщення Δ_{42} перерізу №4, викликане цією силою. Результат вимірювання занести в таблицю 9.1.

5. Встановити стрілочний індикатор в перерізі №4 третього можливого стану балки і прикласти силу $P = 20 \text{ Н}$ в перерізі №3. Виміряти переміщення Δ_{43} перерізу №4, викликане цією силою. Результат вимірювання занести в таблицю 9.1.

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 9.1, 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 9.1.

Таблиця 9.1

Результати випробувань і розрахунків

Переміщення перерізів №1, №2, №3 (мм)			Переміщення перерізу (мм) №4			Відносні похибки вимірювань(%)		
Δ_{14}	Δ_{24}	Δ_{34}	Δ_{41}	Δ_{42}	Δ_{43}	δ_1	δ_2	δ_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.

Лабораторна робота № 10 (14)

Визначення модуля пружності при зсуві з випробування на кручення

10.1. 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):

$$\tau = G\gamma, \quad (10.1)$$

де: τ – дотичне напруження; γ – кут зсуву або відносний зсув.

На зсув працюють болтові, заклепкові, клейові і зварні з'єднання. Деформація зсуву виникає при згинанні і крученні, 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:

$$\varphi = \frac{M_{кр} l}{GJ_p}, \quad (10.2)$$

де: $M_{кр}$ – крутний момент; l – довжина ділянки, 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 випробування на кручення. Експеримент проводиться на спеціальній випробувальній машині, призначеній для проведення випробувань на кручення. Схема випробувальної машини наведена на рис.10.1, 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 хомута 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.

10.2. Схема установки

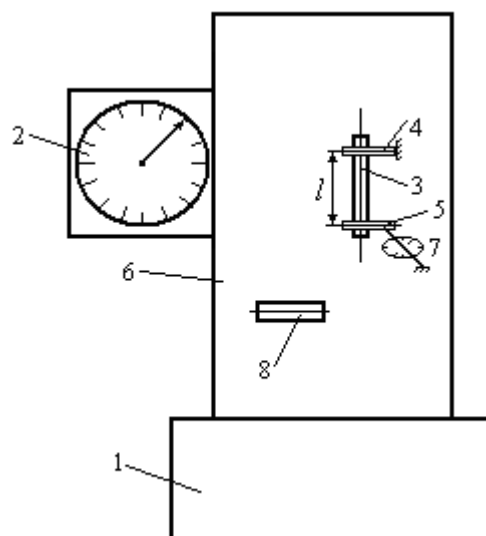


Рис. 10.1

10.3. Ескіз зразка

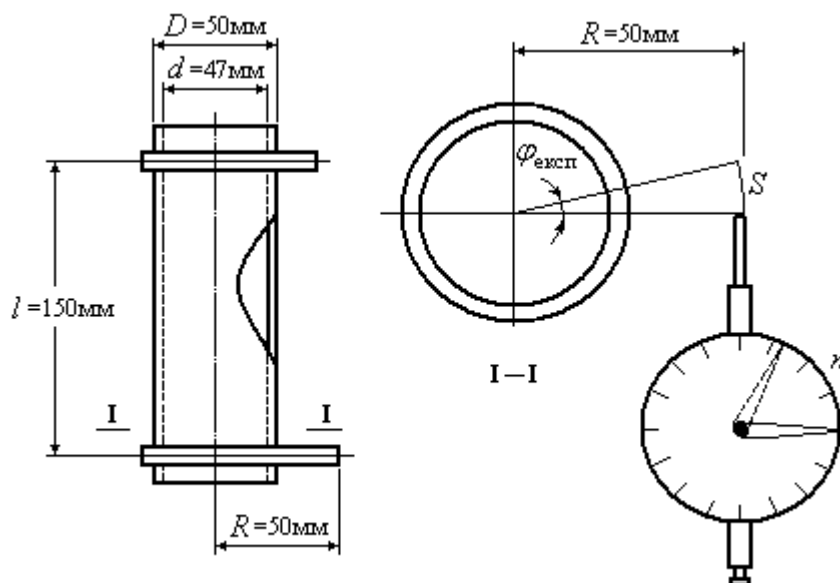


Рис. 10.2

В якості об'єкта для проведення експерименту приймається сталеві тонкостінна труба з зовнішнім діаметром $D=50\text{мм}$ і внутрішнім діаметром $d=47\text{мм}$. Таким чином, товщина стінки труби складає $t=1,5\text{мм}$. Ескіз зразка наведений на Рис.10.2.

10.4. 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 $M=100\text{Нм}$ до $M=400\text{Нм}$ через $\Delta M=100\text{Нм}$ і зафіксувати на шкалі стрілочного індикатора кількість поділок, що відповідають кожній зміні навантаження через $\Delta M=100\text{Нм}$. Дані вимірювань занести в таблицю 10.1. Не слід навантажувати зразок навантаженням більше рекомендованого, оскільки інакше можна викликати у зразку незворотні деформації.

3. Після досягнення навантаженням величини $M=100\text{Нм}$ зафіксувати кількість поділок на шкалі індикатора і виконати розвантаження зразка до $M=100\text{Нм}$, фіксуючи через кожні $\Delta M=100\text{Нм}$ кількість поділок на шкалі індикатора. Дані вимірювань занести в таблицю 10.1.

4. Обчислити кількість поділок на шкалі індикатора, що приходяться на кожні $\Delta M=100\text{Нм}$ окремо при навантаженні, окремо при розвантаженні зразка. обчислити середню кількість поділок, що приходяться на кожні $\Delta M=100\text{Нм}$. Дані обчислень занести в таблицю 10.1.

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

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

Результати розрахунків занести в таблицю 10.1.

Таблиця 10.1

M (Нм)	$n_{\text{н}}$	$n_{\text{р}}$	ΔM (Нм)	$\Delta n_{\text{н}}$	$\Delta n_{\text{р}}$	$\Delta n_{\text{ср}}$	$n_{\text{ф}}$	$\varphi_{\text{експ}}$ (рад)
100			100					
200			100					
300			100					
400			100					

6. Обчислити полярний момент інерції поперечного перерізу зразка:

$$J_P = \frac{\pi \cdot D^4}{32} (1 - \alpha^4) = \quad = \quad \text{М}^4.$$

де $\alpha = \frac{d}{D} = \quad = \quad .$

7. Підставляючи у формулу (10.2) 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 10.2 експериментальне значення модуля зсуву (модуля пружності другого роду):

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

8. Обчислити і занести в таблицю 10.2 відносну похибку результатів проведеного експерименту, беручи до уваги, що нормативне значення модуля пружності другого роду дорівнює $G_{\text{норм}} = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$:

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

Результати випробувань і розрахунків

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

10.5. Висновки:

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

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

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

Лабораторна робота № 11 (16)**Визначення експериментальним шляхом критичної величини стискальної сили****11.1. Загальні відомості**

Критичною називається найменше значення стискальної сили, при якій стиснутий стержень втрачає первинну форму пружної рівноваги. Викривлення стиснутого стержня при втраті стійкості відбувається по лінії, форма якої залежить від умов закріплення кінців стержня. Якщо кінці стиснутого стержня спираються за допомогою шарнірів, стержень при втраті стійкості викривлюватиметься за синусоїдою (Рис.11.1,б).

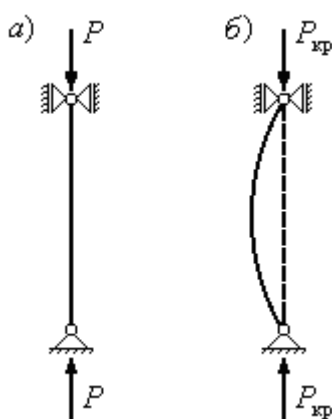


Рис. 11.1

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

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 EJ_{\text{min}}}{(v \cdot l)^2}, \quad (11.1)$$

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

Мета даною лабораторної роботи полягає у визначенні величини критичної сили для стержня великої гнучкості, кінці якого спираються вільно. Експеримент проводиться на випробувальному стенді (Рис.11.2). Стиснутий стержень 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 стержня, верхній кінець стержня вільно входить в щілину на коромислі, що несе навантаження. Навантаження Q прикладається на вільному кінці коромисла. Тиск на стержень здійснюється в перерізі В в місці його опори. Величина стискальної сили в стержні чисельно дорівнює опорній реакції, що виникає в коромислі. Поступово збільшуючи навантаження, прикладене на вільному кінці коромисла, добиваємося такого стану стержня, 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 стержня є величина стискальної сили. У цей момент вона досягає критичної величини, а стержень досягає стану біфуркації або розгалуження форм пружної рівноваги. У цьому стані стержень може якийсь час існувати, не руйнуючись. Проте, достатньо будь-якої побічної сили, щоб стержень миттєво втратив стійкість і придбав незворотні деформації і зруйнувався. Тому стан біфуркації або *критичний* стан стиснутого стержня часто називають *нестійким* станом рівноваги. Допускати виникнення такого стану в реальних конструкціях у жодному випадку не можна, оскільки це дуже небезпечно.

11.2. Схема установки

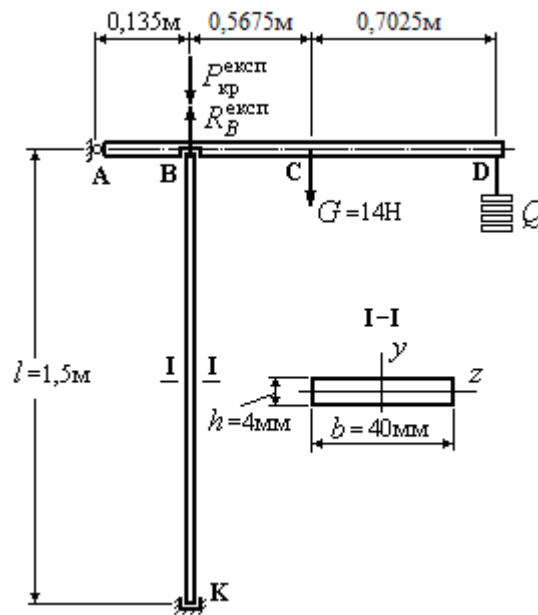


Рис. 11.2

11.3. Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку, навантажити стержень ВК, прикладаючи в перерізі D вантаж Q , збільшуючи його до тих пір, доки стержень не досягне критичного стану. Заносимо значення сили Q в таблицю 11.1.

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

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

3. Визначити експериментальну величину критичної сили. Для коромисла стиснутий стержень є опорою. Реакція $R_B^{\text{експ}}$ виникає в стержні ВК. На третього підставі закону Ньютона про дію і рівну йому протидію при взаємодії двох тіл з боку коромисла на стержень 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 $P_{\text{кр}}^{\text{т}}$. Для цього знайти гнучкість стержня. Обчислити мінімальний момент інерції і мінімальний радіус інерції поперечного перерізу стержня. Стержень при викривленні згинатиметься відносно осі z (Рис.11.2).

Найменше значення момент інерції перерізу стержня має відносно осі 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 стержня становить:

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

Результат розрахунку занести в таблицю 11.1.

5. Визначити і занести в таблицю 11.1 значення граничної гнучкості стержня, враховуючи, що стиснутий стержень виготовлений з сталі з модулем пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа і границею пропорційності $\sigma_{\text{пц}} = 200$ МПа:

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

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

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

Знайдену розрахункову величину критичної сили занести в таблицю 11.1.

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

$$\delta = \left| \frac{P_{\text{кр}}^{\text{т}} - P_{\text{кр}}^{\text{експ}}}{P_{\text{кр}}^{\text{т}}} \right| \cdot 100\% = \quad = \quad \%$$

Занести отриману похибку в таблицю 11.1.

Результати випробувань і розрахунків

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

4. Висновки:

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

2. Обчислена реальна гнучкість стиснутого стержня, гранична гнучкість стержня $\lambda_{пр}$, 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 $\delta =$ % .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Афанасьев А.М., Марьян В.А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. – М.: Наука, 1975. – 125 с.
2. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 608 с.
3. Рубашкин А.Г. Лабораторные работы по сопротивлению материалов. – М.: Наука, 1979. – 114 с.
4. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів. – К.: Вища шк., 1993. – 656 с.
5. Тарновский В.И., Дейкун В.И., Лузан Н.А. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Сопротивление материалов» для студентов 2-3 курсов механических специальностей. – Днепропетровск: ДХТИ, 1981. – 44 с.