

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
З ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**Черкаси
ЧДТУ
2025**

УДК 539.3 (076)
С51

*Затверджено
вченою радою Черкаського державного
технологічного університету,
протокол № 11 від 29.05.2025.*

Автори:

Смоляр А.М. канд. техн. наук, доцент
Березань М.О. канд. техн. наук, доцент

Рецензенти:

О.В. Семко, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівництва та цивільної інженерії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

С.М. Жигилій, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

С51 Лабораторний практикум з опору матеріалів: навч. посіб. [Електронний ресурс] / А. М. Смоляр, М. О. Березань; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2025. – 131 с.

Викладено навчальні (навчально-методичного характеру) матеріали, наведено мету, обладнання, загальні відомості та послідовність виконання лабораторних робіт з дисципліни «Опір матеріалів», подано вимоги щодо їх виконання, контрольні питання та перелік рекомендованої літератури, надані журнали звітів з лабораторних робіт.

Для студентів спеціальності G19 «Будівництво та цивільна інженерія», G17 «Архітектура та містобудування», G9 «Прикладна механіка», G11 «Машинобудування» усіх форм навчання.

ЗМІСТ

Передумова	4
Вступ	5
Розділ 1. Загальні відомості про виконання лабораторних робіт	6
1.1. Правила техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт	6
1.2. Загальні вказівки до виконання лабораторних робіт	6
Розділ 2. Опис основних лабораторних приладів	8
2.1. Індикатор годинникового типу	8
2.2. Тензометри й електротензометри	9
Розділ 3. Курс лабораторних робіт з експериментального визначення механічних властивостей конструкційних матеріалів	14
3.1. Лабораторна робота №1. Випробування сталевих зразків на розтяг	14
3.2. Лабораторна робота №2. Визначення модуля поздовжньої пружності сталі	23
3.3. Лабораторна робота №3. Випробування чавунного зразка на стиск	26
3.4. Лабораторна робота №4. Випробування деревини на стиск	29
3.5. Лабораторна робота №5. Випробування деревини на скол	32
3.6. Лабораторна робота №6. Визначення ударної в'язкості сталі	34
Розділ 4. Курс лабораторних робіт по перевірці гіпотез та теорій опору матеріалів	38
4.1. Лабораторна робота №1. Дослідження осадки циліндричної гвинтової пружини	38
4.2. Лабораторна робота №2. Визначення переміщень двохопорної балки при згині	40
4.3. Лабораторна робота 3. Дослідження згину статично невизначуваної двохопорної балки	45
4.4. Лабораторна робота №4. Дослідження косого згину консольної балки	49
4.5. Лабораторна робота № 5. Дослідження позацентрового розтягу прямого стрижня	54
4.6. Лабораторна робота № 6. Коливання пружної системи	57
4.7. Лабораторна робота №7. Випробування сталевих зразків на кручення та визначення модуля зсуву	59
Література	63
Додатки	64
Додаток 1. Журнал звітів №1	64
Додаток 2. Журнал звітів №2	91
Додаток 3. Таблиця механічних характеристик для основних марок вуглецевих конструкційних сталей	125
Додаток 4. Таблиця модулів пружності та коефіцієнтів Пуассона	126
Додаток 5. Таблиця механічних характеристик чавуну	127
Додаток 6. Орієнтовні допустимі напруження на розтяг та стиск	128
Додаток 7. Орієнтовні допустимі напруження на зріз для заклепкових і зварних з'єднань	129
Додаток 8. Кутики сталеві рівнобокі	130

Передумова

Електронне навчальне видання «Опір матеріалів. Лабораторні роботи» підготовлено відповідно до навчального плану підготовки бакалаврів за спеціальністю G19 «Будівництво та цивільна інженерія» у Черкаському державному технологічному університеті. Посібник буде корисним також для студентів спеціальностей G17 «Архітектура та містобудування», G9 «Прикладна механіка», G11 «Машинобудування».

Метою посібника є забезпечення студентів доступним, структурованим і практикоорієнтованим матеріалом для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Опір матеріалів». Лабораторний практикум виступає важливою складовою навчального процесу, адже дозволяє глибше зрозуміти механізми деформування та руйнування матеріалів, оволодіти методами експериментального дослідження та критичного аналізу технічних результатів.

Зміст посібника розроблено з урахуванням:

- освітньо-професійної програми підготовки фахівців у галузі будівництва;
- сучасних вимог до інженерної освіти;
- матеріально-технічної бази лабораторій університету.

До кожної лабораторної роботи подано:

- мету дослідження;
- необхідні теоретичні положення;
- опис лабораторного обладнання;
- поетапну методику проведення експерименту;
- вказівки з техніки безпеки;
- розрахункові формули;
- контрольні запитання для самоперевірки.

Посібник призначений для використання як у межах аудиторної роботи, так і для самостійної підготовки студентів, а також може бути корисним викладачам і аспірантам кафедри промислового та цивільного будівництва та інших дотичних спеціальностей.

Електронний формат видання забезпечує мобільний доступ до матеріалів практикуму, що є особливо актуальним в умовах впровадження змішаних і дистанційних форм навчання.

Авторський колектив висловлює подяку викладачам кафедри, рецензентам і технічному персоналу університету за сприяння у створенні цього посібника. Ми щиро віримо, що він стане надійним супутником у професійному зростанні майбутніх фахівців будівельної галузі.

Особлива подяка канд. техн. наук, доценту кафедри статистики та прикладної математики Ірині Мірошкіній за редакцію навчального посібника.

Велика подяка студенту групи Б-34 Роману Норкіну за оформлення рисунків у посібнику.

Вступ

Опір матеріалів – одна з найважливіших загально-технічних навчальних дисциплін, що складає основу фахової підготовки інженерів-будівельників, оскільки забезпечує фундаментальні знання щодо поведінки конструкцій та матеріалів під дією зовнішніх навантажень. Розуміння основних принципів міцності, жорсткості та стійкості конструктивних елементів є запорукою надійного проектування та експлуатації будівельних об'єктів [1].

Вивчення курсу «Опір матеріалів» включає не лише теоретичні аспекти, але й експериментальну перевірку закономірностей, які лежать в основі механіки деформованого твердого тіла. Саме тому лабораторний практикум є необхідною частиною освітнього процесу, яка дозволяє студентам поглибити знання та здобути практичні навички, що є вкрай важливими для їхньої майбутньої професійної діяльності.

Цей посібник покликаний допомогти студентам засвоїти методики проведення випробувань, навчитися критично мислити та аналізувати результати, а також самостійно вирішувати інженерні завдання в галузі опору матеріалів. Він створений з урахуванням потреб навчального процесу та орієнтований на формування сучасного фахівця, здатного приймати виважені технічні рішення в умовах реального виробництва.

Студенти до лабораторних робіт готуються самостійно. Окрім основних теоретичних положень, необхідних для виконання кожної лабораторної роботи, попередньо студенти ознайомлюються з методикою експериментальних досліджень, працюють із додатковою літературою, яка пропонується викладачем.

Усі записи, рисунки, графіки заносяться студентами до звіту з лабораторних робіт акуратно, з використанням креслярських знарядь. Основні надписи на кожній сторінці виконуються згідно вимог Єдиної системи конструкторської документації [2].

Викладач чи інший повноважний співробітник кафедри на першому лабораторному занятті ознайомлює студентів із правилами поведінки в навчальній лабораторії опору матеріалів та проводить інструктаж з техніки безпеки.

Сподіваємось, що матеріали посібника стануть ефективним інструментом навчання та стимулом до подальшого саморозвитку кожного студента.

Розділ 1. Загальні відомості про виконання лабораторних робіт

На лабораторних заняттях студенти ознайомлюються з методами експериментального дослідження *фізико-механічних властивостей* конструкційних матеріалів та методиками перевірки *відповідності* розрахункових формул опору матеріалів, набувають практичних навичок з використання вимірювальних приладів, обладнання, випробувальних машин при проведенні експериментальних досліджень [3].

1.1. Правила з техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт

Під час проведення експериментальних досліджень усі студенти знаходяться на місцях, які визначені викладачем чи навчальним майстром. Самостійна робота студентів відбувається тільки під наглядом викладача чи навчального майстра.

У лабораторії опору матеріалів студентам **забороняється**:

- 1) знаходитись у верхньому одязі, вішати одяг або розкладати свої речі на лабораторному обладнанні;
- 2) вмикати або вимикати випробувальні машини без дозволу викладача, який проводить заняття;
- 3) торкатись рухомих частин лабораторного устаткування.

При виникненні позаштатних ситуацій у лабораторії опору матеріалів учасники навчального процесу повинні вжити всіх необхідних заходів для нормалізації обстановки.

1.2. Загальні вказівки до виконання лабораторних робіт

Лабораторне заняття складається з підготовки до проведення випробування, проведення експериментального дослідження, а також обробки й аналізу здобутих результатів. Виконання лабораторної роботи вимагає від студентів самостійного й активного мислення й дій.

У посібнику до лабораторних робіт містяться загальні відомості – опис випробувальних машин та приладів, відомості для підготовки й проведення лабораторних робіт, послідовність виконання лабораторних робіт, контрольні запитання та журнали звітів з курсів лабораторних робіт.

Кожен студент самостійно готує звіт до лабораторної роботи в «Журналі звітів». Звіт складається з реферативного опису загального матеріалу до лабораторної роботи та описово-розрахункової частини, що відповідає порядку виконання лабораторної роботи. Закінчується кожен звіт висновками. Реферативний опис загального матеріалу до лабораторної роботи базується на інформації, що приведена в методичних матеріалах та додатковій літературі [1, 4, 5]. Звіт до лабораторної роботи виконується студентом вручну. Текст пишеться в чорному чи синьому кольорі, рисунки виконуються олівцем під лінійку.

Перед виконанням лабораторної роботи студенти ознайомлюються з методичними матеріалами до відповідної роботи та готують звіт до лабораторної роботи. Для цього у «Журналі звітів» до початку виконання кожної лабораторної роботи студенти заповнюють розділ «Загальні відомості» та дають відповіді на контрольні запитання.

Допуском студенту до виконання лабораторної роботи слугує наявність заповненого розділу звіту «Загальні відомості» лабораторної роботи та відповідей на контрольні запитання до лабораторної роботи.

Студенти, які *не мають звіту* до лабораторної роботи та не відповіли на контрольні запитання, до виконання лабораторної роботи *не допускаються*.

Протоколи лабораторних робіт перевіряються майстром, а лабораторні роботи захищаються у викладача.

Розділ 2. Опис основних лабораторних приладів

При проведенні лабораторних робіт використовується значна кількість різноманітних приладів та пристроїв.

Основними приладами, що використовуються при проведенні лабораторних робіт, є прилади для вимірювання переміщень та напружень. Ці прилади поділяються на механічні та електричні, розглянемо їх [4, 5].

2.1. Індикатор годинникового типу

Індикатор годинникового типу – це прилад для вимірювання лінійного переміщення точки конструкції відносно нерухомого предмета. Його кінематична схема показана на рис. 2.1.

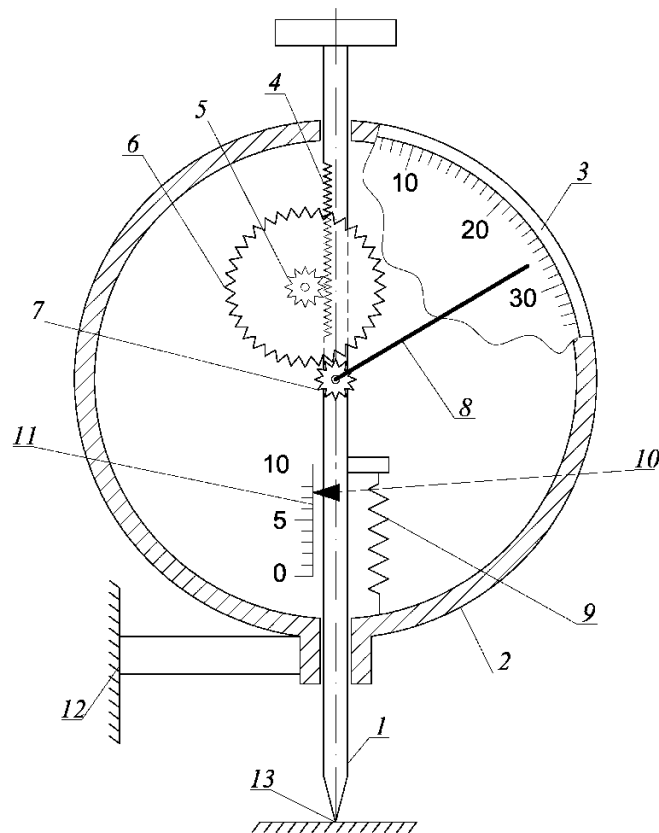


Рис. 2.1. Схема індикатора годинникового типу

Принцип роботи індикатора годинникового типу наступний. Мірний стрижень 1 може зміщуватися відносно корпусу 2, до якого прикріплений циферблат зі шкалою 3 (показано частково); при цьому, завдяки системі зубчатих елементів 4, 5, 6, 7, кінець стрілки 8 переміщується по шкалі (мірний стрижень 1 не контактує із зубчастим колесом 7 і його віссю). Взаємне переміщення мітки 10 відносно корпусу 2 на 1мм викликає повний оберт стрілки 8. Шкалу розбито на 100 поділок. Отже, одна поділка відповідає переміщенню 0,01мм. Пружина 9 утримує стрижень 1 у крайньому нижньому положенні. Повні оберти стрілки реєструються міткою 10 на шкалі 11, нанесеній на циферблат у вигляді шкали малого діаметра з окремою стрілкою.

Корпус індикатора прикріплюється до конструкції 12, а мірний стрижень упирається в ту точку конструкції 13, переміщення якої слід виміряти.

Індикатор годинникового типу зручний у використанні, досить точний, дуже поширений прилад. Індикатор годинникового типу може бути виготовлений лише на заводі. Він часто використовується як складова частина інших вимірювальних приладів, окремі деталі яких піддаються виготовленню за межами заводу.

2.2. Тензометри й електротензометри

Тензометрією називається процес отримання значень напружень дослідним шляхом. Приладів, що безпосередньо визначають напруження, не існує. Тому напруження обчислюються за деформаціями, що вимірюються на поверхні тіла.

Деформації більшості матеріалів на етапі пружної роботи дуже малі, тому для їхнього вимірювання використовуються спеціальні прилади – *тензометри*.

Схема отримання нормального напруження за лінійного напруженого стану, тобто при умові виконання закону Гука, має вигляд:

$$D_1 \rightarrow \Delta l = k D_1 \rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \rightarrow \sigma = \varepsilon E, \quad (2.1)$$

де k – ціна поділки тензометра; D_1 – різниця показів тензометра; Δl – поздовжнє переміщення за напрямом головного напруження $\sigma \neq 0$; ε – відносне подовження (середнє у межах бази тензометра); E – модуль пружності матеріалу.

На рис. 2.2 показана схема одного з найпростіших тензометрів – шарнірно-важільного. За допомогою струбцини (на рис. не показана) тензометр прикріплюється до конструкції, упираючись у неї двома загостреннями 2 та 3. Загострення 2 нерухомо закріплене в корпусі 1, а загострення 3, що представляє собою ромбічну призму, прикріплене до важеля 4. Призма 3 одним кінцем упирається у виріз на корпусі 1, а другим – у конструкцію. Відстань l між загостреннями 2–3 називається базою тензометра.

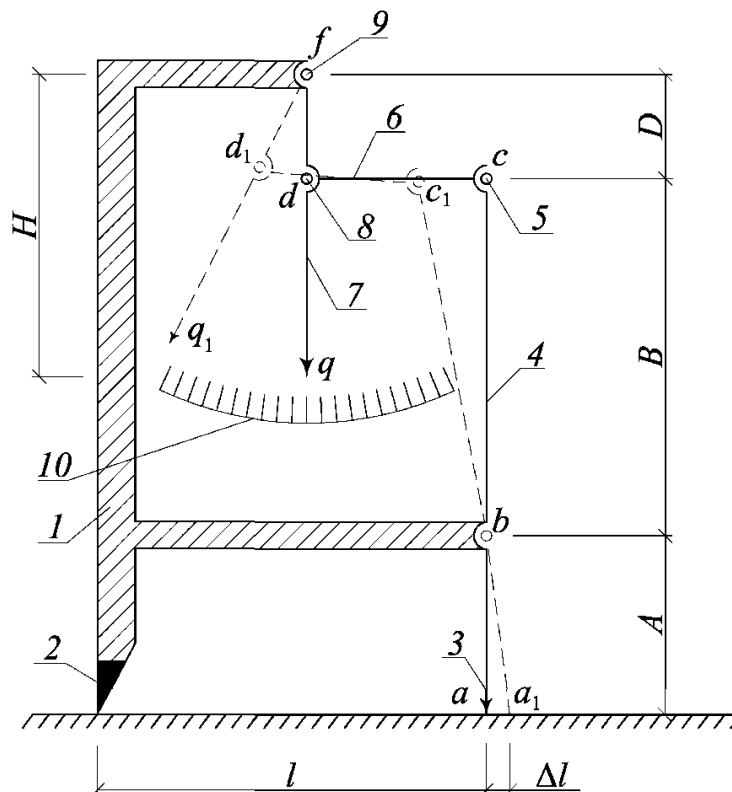


Рис. 2.2. Схема важільного тензометра

Деформація зразка призводить до повороту призми 3, а значить і важеля 4, з'єднаного за допомогою штифта 5 із коромислом 6, яке другим кінцем опирається на штифт 8 стрілки 7. Стрілка 7 може повертатися навколо осі 9. Отже, поворот важеля 4 призводить до руху коромисла 6 і повороту стрілки 7, нижній кінець якої показує на шкалі 10 величину лінійного переміщення у відносних одиницях. Для визначення абсолютного переміщення Δl потрібно величину відносного переміщення помножити на ціну поділки тензометра k . Обчислимо k , виходячи з будови шарнірно-важільного механізму тензометра.

Так як стрижні $a-b-c$, $c-d$, $f-d-q$, з якими має зв'язок загострення a , є шарнірно-важільною системою, то зміщення загострення a на величину подовження Δl просто пов'язується з переміщенням стрілки по шкалі з положення q в положення q_1 .

У межах малих деформацій і, відповідно, малих переміщень важільного механізму будуть справедливі співвідношення:

$$\frac{aa_1}{cc_1} = \frac{A}{B}; \quad \frac{qq_1}{dd_1} = \frac{H}{D},$$

так як

$$dd_1 = cc_1 \text{ і } aa_1 = \Delta l, \text{ то } \Delta l = qq_1 \frac{A \cdot D}{B \cdot H}.$$

Позначимо переміщення стрілки $qq_1 = D_1$, а відношення $\frac{A \cdot D}{B \cdot H} = k$. Тоді формула для визначення переміщення набуде вигляду: $\Delta l = kD_1$.

Для даного типу тензометрів ціна поділки дорівнює $k = 0.001 \text{ мм}$ (для кожного екземпляра тензометра уточнюється за технічним паспортом).

Відомі й інші типи тензометрів, наприклад, дзеркальний. Складовою частиною деяких типів тензометрів є індикатор годинникового типу. Загальна назва всіх згаданих типів тензометрів – механічні тензометри.

Електротензометрія – це тензометрія з використанням електротехніки. Основним елементом електротензометрії є датчик одного опору – *тензорезистор*, що складається із двох шарів паперу або плівки із вклеєною дровою решіткою (рис. 2.3). Тензорезистор наклеюється на випробувану конструкцію і разом із нею деформується.

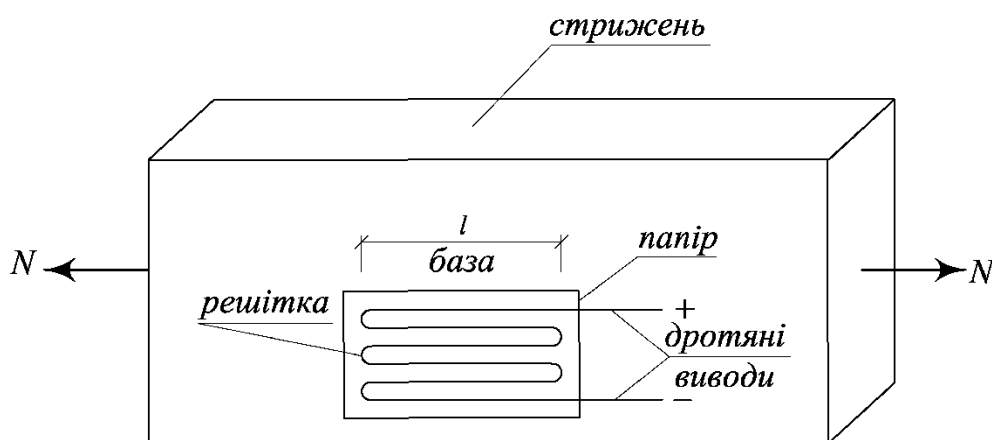


Рис. 2.3. Схема тензорезистора, розміщеного на стрижні

Решітка робиться з тонкого дроту (0.02...0.5 мм) з високим опором (ніхром, манганін, константан тощо). Відстань l називається базою датчика. Звичайна база

складає 5...20 мм. У разі необхідності базу тензорезистора можна значно зменшити, або збільшити.

Датчик наклеюється так, щоб прямі ділянки його дротової решітки збігалися за напрямом вимірюваної деформації. При умові спільної деформації конструкції і датчика, база тензорезистора змінюється на величину Δl , яка є абсолютним подовженням як дроту, так і конструкції (у місці наклейки датчика). Відносне подовження дроту $\varepsilon = \Delta l / l$ також збігається з відносним подовженням у точці конструкції (з точністю до припустимих зсувів у шарі клею), що розглядається. Але зміна довжини провідника (а також перерізу внаслідок поперечної деформації) змінює його опір електричному струму. Хоч ця зміна й невелика, але вона дозволяє досить точно судити про деформацію конструкції і напруження в ній.

У межах малих деформацій можна прийняти, що відносна зміна опору $\Delta R / R$ пропорційна відносній деформації $\varepsilon = \Delta l / l$:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon.$$

Коефіцієнт пропорційності k називається коефіцієнтом тензочутливості датчика, він приймає значення $k = 1 - 3$. Його можна обчислити теоретично або визначити дослідним шляхом (таруванням датчиків). Чим k більший, тим датчик більш чутливий.

Пристрій для вимірювання деформацій будується за принципом мосту Уїтсона (рис. 2.4).

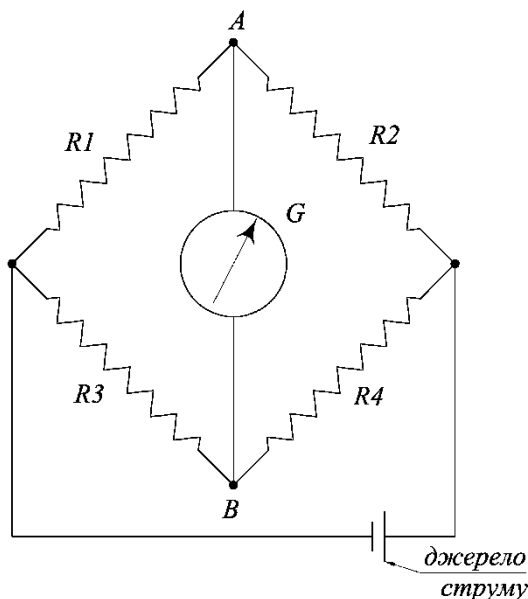


Рис. 2.4. Схема мосту Уїтсона

Міст складається з опорів $R1, R2, R3, R4$, названих плечами мосту, і провідника AB , названого діагоналлю мосту. Якщо дібрана величина опору задовольняє співвідношенню:

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4} \quad (2.2)$$

то в діагоналі мосту AB струму не буде. Стрілка гальванометра, увімкнутого в діагональ AB , залишиться в нульовому положенні. У цьому разі говорять, що міст збалансований. Але найменше порушення рівності (2.2) призводить до розбалансування мосту. У діагоналі AB виникає струм, стрілка гальванометра G відхиляється.

Найпростішу електричну схему пристрою для вимірювання деформацій показано на рис. 2.5.

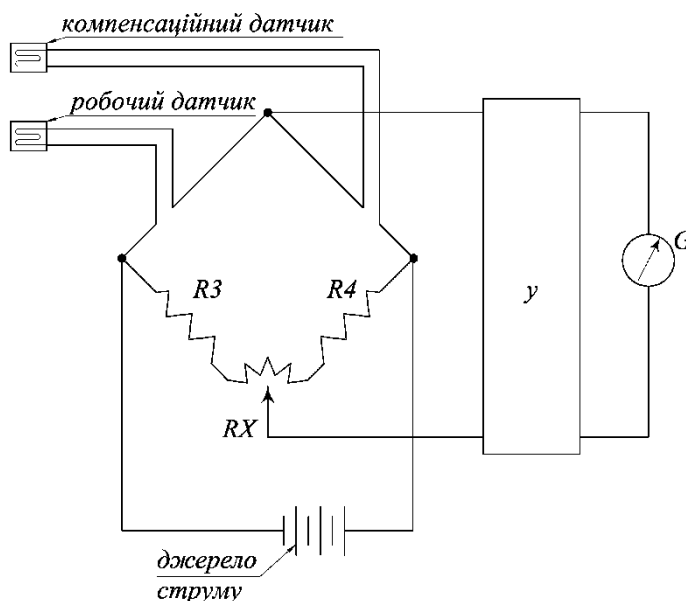


Рис. 2.5. Електрична схема пристрою для вимірювання деформацій

Порівнюючи її зі схемою на рис. 2.4, помічаємо наступне:

- опором $R1$ слугує датчик, що наклеюється на випробовувану конструкцію (робочий, або активний датчик);
- опором $R2$ є також датчик (компенсаційний). Це такий же датчик, як і робочий, розміщений біля нього, але не наклеєний на конструкцію. Призначення компенсаційного датчика полягає в тому, щоб не допустити розбалансованості мосту внаслідок коливань температури. Справді, якщо змінюється температура, ці датчики змінюють свій опір однаково й рівність (2.2) не порушується;
- між опорами $R3$ і $R4$, знаходиться реохорд R_X (змінний опір). Обертаючи ручку реохорда, можна змінювати опори $R3$ і $R4$ та їхнє співвідношення. Це дозволяє встановлювати стрілку гальванометра в нульове положення.

Електричні сигнали, перед тим як надійти до гальванометра, пропускаються через підсилювач u , що значно підвищує чутливість приладу.

При проведенні досліду, спочатку стрілка гальванометра поворотом ручки реохорда встановлюється на нуль, що свідчить про збалансованість мосту й відсутність струму в його діагоналі. Потім випробовувана конструкція завантажується. Деформація робочого датчика призводить до зміни його опору. При цьому баланс мосту порушується. У його діагоналі з'являється струм. Стрілка гальванометра відхиляється від нульового положення. Обертанням ручки реохорда, стрілка знову повертається на нуль (поновлюється баланс мосту). За числом поділок, на які повернулася ручка, обчислюється деформація матеріалу в місці наклейки датчика. Один вимірювальний пристрій може обслуговувати не один, а кілька (навіть значну кількість) датчиків, які вмикаються по чергові (виконується так зване опитування датчиків).

Окрім дровових датчиків використовуються ще фольгові, напівпровідникові тощо.

До переваг електротензометрії належить можливість постановки великої кількості датчиків, у тому числі у важкодоступних місцях конструкції, на рухомих

деталях, на віддалених об'єктах – снарядах, ракетах, космічних кораблях (з передачею сигналів по радіо). Разом з осцилографом можна реєструвати швидко змінювані динамічні деформації (під час ударів, коливань). Деформації можна виміряти в широкому діапазоні (як пружні, так і пластичні), у тому числі поверхні, нагрітої до 1000°C.

Електротензометрія дозволяє швидко визначити діючу силу F , якщо датчик наклеєний на зразок з відомою залежністю $F - \varepsilon$ (еталонний елемент). Це є основою «електричного вимірювання неелектричних величин», таких як вага, тиск, прискорення тощо.

Розділ 3. Курс лабораторних робіт з експериментального визначення механічних властивостей конструкційних матеріалів

Досліди, що виконуються в опорі матеріалів, можна поділити на дві основні групи: дослід з визначення фізико-механічних властивостей матеріалів і дослід з перевірки гіпотез та теорій [3].

У результаті проведення експериментів, що відносяться до дослідів першого типу, здобуваються величини, виражені в числах, які характеризують фізико-механічні властивості досліджуваного матеріалу. Такими, необхідними для розрахунків на міцність величинами, є межа плинності, межа міцності, модуль пружності, коефіцієнт поперечної деформації тощо. Ці величини можна отримати лише дослідним шляхом.

Пропонований курс лабораторних робіт присвячений визначенню фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів – пластичної сталі, чавуну, деревини тощо.

На лабораторних заняттях студенти знайомляться з принципами організації механічних випробувань конструкційних матеріалів, набувають практичних навичок у використанні вимірювальних приладів, випробних машин та обладнання, знайомляться з порядком проведення експериментальних досліджень.

3.1. Лабораторна робота №1. Випробування сталевго зразка на розтяг

Мета роботи: експериментально визначити характеристики міцності й пластичності сталі при випробуванні сталевго зразка на розтяг.

Обладнання: розривна машина Р–5, сталевий зразок.

Загальні відомості

Фізико-механічні характеристики матеріалу визначаються, як правило, при проведенні експериментальних досліджень. Найчастіше матеріал досліджується в умовах найпростіших напружених станів – розтягу (стиску), кручення, зсуву, згину тощо.

Механічні властивості сталі визначаються завдяки випробуванню спеціальних зразків на розтяг. Зразки для випробувань виготовляються циліндричної (рис. 3.1, а), або плоскої (рис. 3.1, б) геометричної форми. Плоскі зразки виготовляються з листового матеріалу [1].

Оскільки результати випробувань на розтяг значною мірою залежать від співвідношення розмірів зразка, то, для забезпечення умов існування цього напруженого стану, між розрахунковою довжиною зразка l_0 і діаметром робочої частини d_0 має виконуватися співвідношення для довгих зразків – $l_0 = 10d_0$.

Для плоских довгих зразків установлене таке співвідношення $l_0 = 11.3\sqrt{A_0}$, де A_0 – площа поперечного перерізу робочої частини зразка.

Зразки діаметром $d_0=20$ мм і довжиною $l_0=200$ мм називається нормальними.

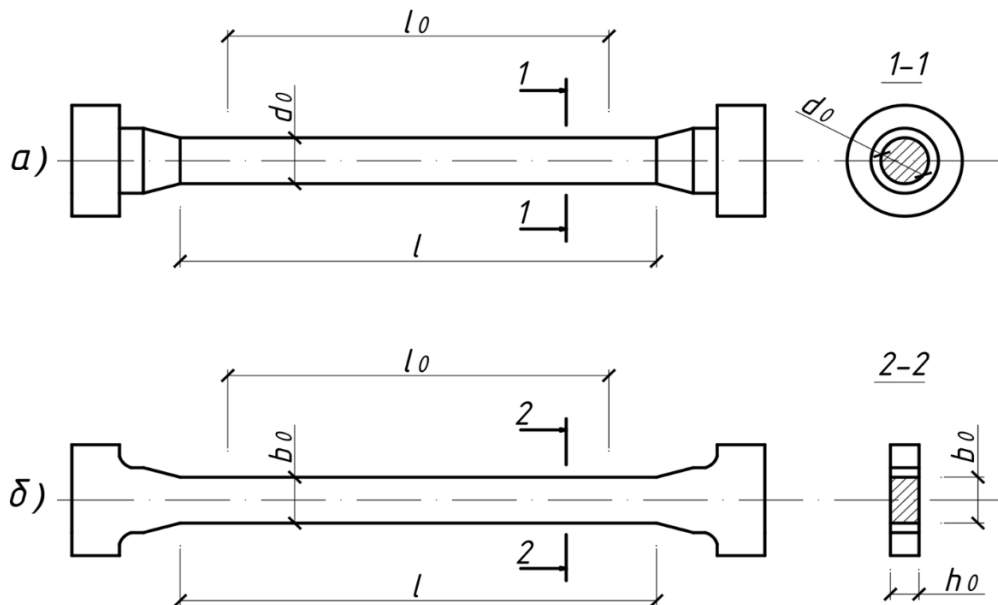


Рис. 3.1 а, б. Круглий (а) та плоский (б) сталеві зразки для випробування на розтяг

Опис випробної машини Р-5

Випробування виконуються на універсальній машині Р-5, схема конструкції якої зображена на рис. 3.2.

Машина призначена для випробувань на розтяг і стиск силою до 50 кН. Вона відноситься до типу машин з механічним завантаженням і важільно-маятниковим силовимірником.

Машина приводиться у дію від ручного приводу чи від електричного двигуна. За ручної роботи крутять ручку 13, від якої, через ланцюгову передачу, рух передається у завантажувальний вузол 5. Якщо завантаження механічне, то електродвигун *М* передає оберти на той самий завантажувальний вузол 5.

Одним з основних елементів завантажувального механізму є масивна гайка, яка не має вертикального переміщення. Обертаючись, ця гайка втягує в себе гвинт 6, нарізка якого входить у нарізку отвору гайки. Гвинт 6 закінчується масивним захватом 4, в який встановлюється зразок 1, що випробовується на розтяг. Зусилля від зразка передається на верхній захват 3. Зразок у захватах 3 і 4 закріплюється за допомогою клинів 2.

Рукоятка 12, з конічною зубчастою передачею, використовується для швидкого переміщення нижнього захвату 4 догори або донизу під час установки зразка у захвати.

Для вимірювання зусилля розтягу (стиску) використовується система важільно-маятникового врівноваження. Верхній захват 3 шарнірно прикріплений до короткого плеча важеля *СЕ* з точкою опори *Д*. До довгого плеча важеля *СЕ* прикріплена тяга *ЕF*. Нижній кінець тяги шарнірно прикріплений в точці *Л* до виступу стрижня 14 з вантажем 7. Система 14–7 є маятником, який обертається навколо осі *К*.

Відповідно до позначень, що використані на рис. 3.2, рівняння рівноваги моментів відносно точки *К* від зусилля в тязі *ЕЛ* та від ваги *Q* маятника має вигляд:

$$F_{EL} \cdot r_3 = Q \cdot \Delta,$$

де зусилля в тязі EL дорівнює $F_{EL} = \frac{r_1}{r_2} F$ (F – зусилля розтягу (стиску) зразка). Після підстановки останньої F_{EL} в рівняння моментів, вираз для зусилля розтягу (стиску) зразка запишеться наступним чином:

$$F = Q \frac{r_2}{r_1 r_3} \Delta = k \cdot \Delta,$$

тобто горизонтальне переміщення маятника Δ прямо пропорційне зусиллю, прикладеному до зразка.

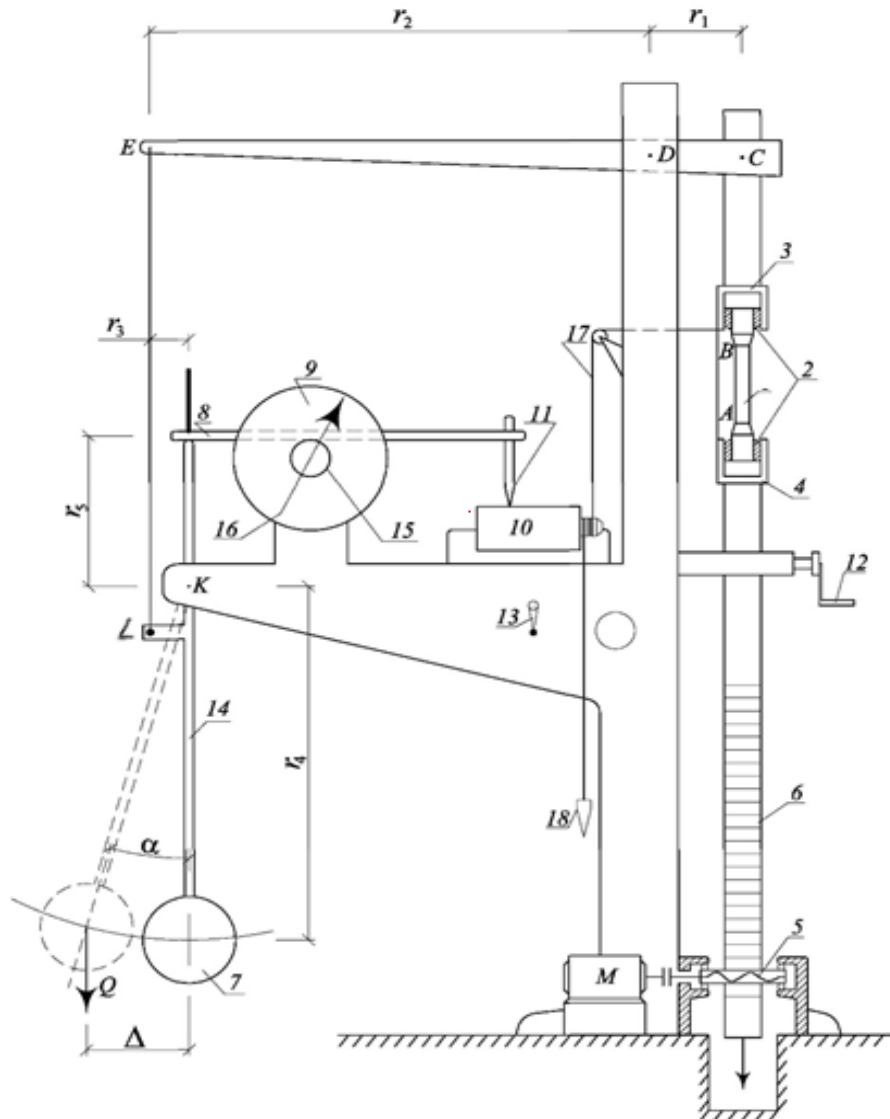


Рис. 3.2. Схема розривної машини Р-5

Повертаючись, маятник переміщує своїм верхнім кінцем рейку 8 по роликах, причому ролик 15 має зубчатку, якій відповідає нарізка рейки 8. Кут повороту стрілки 16, насадженої на спільну вісь з роликом 15, також прямо пропорційний силі F . Ця сила позначена поділками, нанесеними на шкалу 9. Рейка 8 перебуває в постійному контакті з кінцем маятника 14 і притиснута до нього зубчатим роликом 15, через який перекинута нитка з вантажем.

Для отримання діаграми залежності між силою, що подається на зразок, і

подовженням зразка використовується барабан 10, який обгортається папером (міліметровкою). Діаграма викреслюється олівцем 11, що закріплений на рейці 6. Поворот маятника передається на олівець 11 у вигляді горизонтального руху, а подовження зразка призводить до обертання барабана самописця ниткою 17.

Ця нитка перекинута через барабан 10 і натягується вагою гирі 18. Нитка пропускається через верхній захват 3 (у точці В) і закріплюється другим кінцем на нижньому захваті 4 машини (у точці А).

Таким чином, рух олівця навколо барабана пропорційний переміщенню зразка, а рух по твірній пропорційний навантаженню.

Машина Р-5 може слугувати і пресом, тому що маятник 14 може відхилятися у різні боки, залежно від напрямку руху гвинта 6.

Зміна ціни поділки на шкалі 9 досягається перестановкою вантажу Q по висоті і зміною дискових гирь, що складають цей вантаж.

Є чотири шкали показів механізму вимірювання сили: 50 кН, 25 кН, 10 кН, 5 кН.

Діаграма розтягу сталевго зразка

Зразок установлюється у захвати випробної машини і завантажується зусиллям розтягу. Самописець випробної машини викреслює діаграму розтягу – графік залежності між навантаженням і абсолютним подовженням зразка. Загальний вигляд такої діаграми, отриманої під час випробування зразка з пластичної сталі, зображено на рис. 3.3. Така діаграма називається абсолютною через залежність від геометричних параметрів зразка – довжини та площі поперечного перерізу.

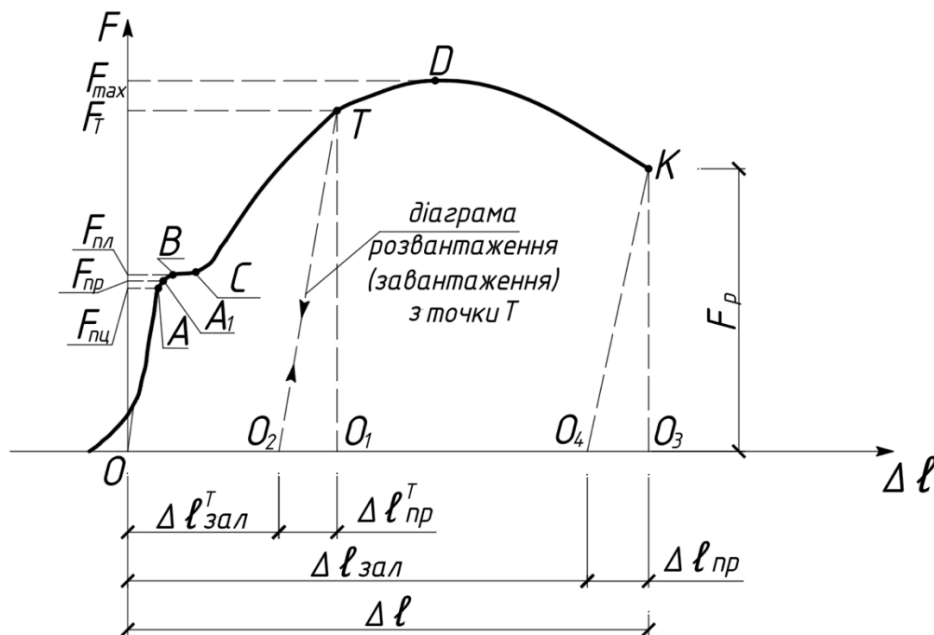


Рис. 3.3. Діаграма розтягу сталевго зразка

На початку випробування на діаграмі $F - \Delta l$ з'являється криволінійна ділянка, що відповідає обтисненню зразка в захватах випробної машини і ліквідації зазорів між ланками машини. Подальше збільшення навантаження відповідає прямолінійній ділянці діаграми OA до значення сили розтягу $F_{пц}$. На ділянці OA залежність між силою F і подовженням Δl має прямолінійний характер, тому цю ділянку називають

ділянкою пропорційності. На цій ділянці виконується закон Гука. Сила $F_{\text{пц}}$ – верхня межа ділянки пропорційності. Поряд з точкою A розміщена точка A_1 , що відповідає силі $F_{\text{пр}}$ і обмежує ділянку OA_1 пружної роботи матеріалу зразка. За точкою A_1 починається інтенсивний зріст залишкових деформацій. Практично можна вважати, що $F_{\text{пц}} = F_{\text{пр}}$.

Щоб виключити з розгляду криволінійну ділянку на початку діаграми, потрібно продовжити її прямолінійну ділянку до осі абсцис в перетині з якою буде отримана точка O – початок діаграми та системи координат.

Вище точки A діаграма викривлюється, переходить до горизонтальної ділянки BC – ділянки плинності матеріалу, коли переміщення зростають без помітного збільшення сили F . Поведінка металу тут подібна до поведінки в'язкої рідини. Ділянці BC відповідає сила плинності $F_{\text{пл}}$.

За ділянкою плинності крива знову піднімається – матеріал зміцнюється. Для подальшого деформування сталі сила зростає до значення $F_{\text{max}} = F_{\text{тм}}$, тимчасове, найбільше значення навантаження. Силі $F_{\text{тм}}$ відповідає найвища точка діаграми D .

До точки D залишкові деформації розподіляються рівномірно по всій довжині зразка – зразок залишається циліндричним. У точці D діаграми, коли сила розтягу досягає максимального значення, залишкові деформації локалізуються, тобто концентруються в якомусь одному, найбільш послабленому перерізі. Тут відбувається місцеве зменшення площі поперечного перерізу стрижня, з'являється, так звана, «шийка».

Оскільки в області «шийки» площа поперечного перерізу зразка інтенсивно зменшується, то сила, що потрібна для деформування зразка, теж зменшується; на діаграмі виникає ділянка спадання DK , яка закінчується розривом зразка в точці K при розривному значенні сили $F_{\text{р}}$.

Розглянемо закономірності розвантаження зразка з різних точок діаграми. Якщо навантажити зразок деякою силою в межах ділянки OA (рис. 3.3) діаграми, а потім повністю зняти навантаження, то лінія розвантаження співпаде з прямою завантаження OA , зразок поновить початкові розміри, тобто деформації зразка у цьому випадку будуть пружними.

Якщо розвантажувати зразок, наприклад, від точки T , то діаграма розвантаження буде мати вигляд прямої TO_2 , паралельної до прямої OA . Тут відрізок OO_1 відповідає повному подовженню зразка при навантаженні $F_{\text{т}}$; відрізок O_2O_1 – пружній частині подовження $\Delta l_{\text{пр}}^T$, що зникає після зняття навантаження; відрізок OO_2 – залишковій (пластичній) частині подовження $\Delta l_{\text{зал}}^T$, яка залишається після зняття навантаження. Повторне завантаження зразка буде відбуватися по прямій O_2T .

Із сказаного вище можна зробити висновок, що остаточне залишкове подовження зразка $\Delta l_{\text{зал}}^T$, виміряне після його розриву безпосередньо по двох складених половинках зразка, відповідає відрізку OO_4 діаграми і буде меншим від повного Δl подовження OO_3 в момент розриву.

Умовна діаграма розтягу сталевго зразка. Характеристики міцності пластичної сталі

Абсолютна діаграма розтягу сталевго зразка, викреслена самописцем випробної машини, характеризує не тільки властивості матеріалу, але й залежність від розмірів зразка. Щоб охарактеризувати тільки властивості матеріалу, необхідно від абсолютних координат

$$F - \Delta l$$

перейти до відносних

$$\sigma - \varepsilon,$$

де $\sigma = \frac{F}{A_0}$ – нормальне напруження, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ – відносне подовження – деформація, A_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, l_0 – початкова довжина робочої частини зразка.

Оскільки A_0 і l_0 для кожного випробуваного зразка є сталими величинами, то діаграмою умовних напружень $\sigma - \varepsilon$ називається машинна діаграма, ординати якої поділені на A_0 , а абсиси – на l_0 .

Така діаграма називається умовною, тому що в процесі деформування площа поперечного перерізу зразка зменшується, а довжина розрахункової частини збільшується.

Умовна діаграма розтягу (рис. 3.4) за зовнішнім виглядом не відрізняється від машинної діаграми і має всі точки й ділянки, що описані раніше.

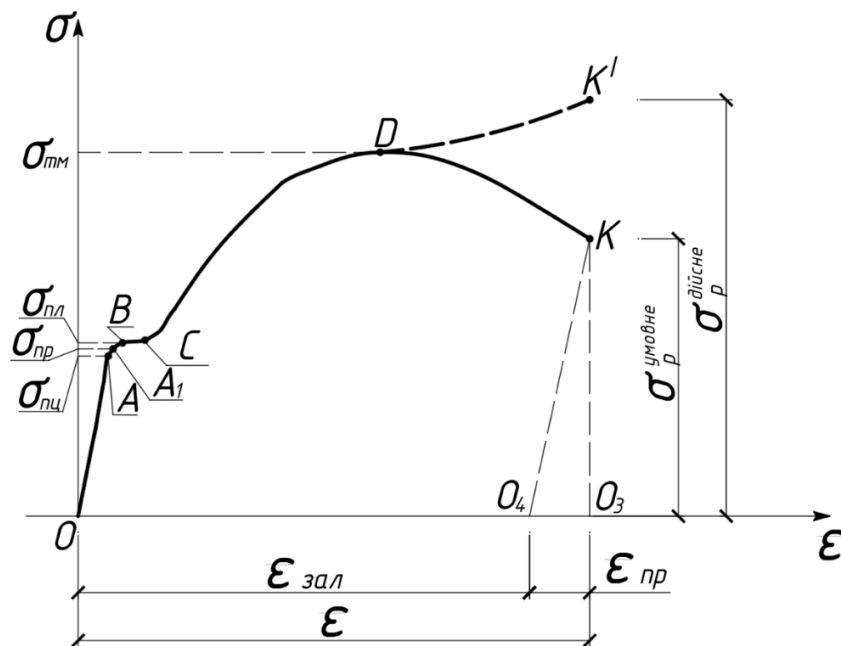


Рис. 3.4. Умовна діаграма розтягу сталевго зразка

Оскільки здатність матеріалів до опору зовнішнім навантаженням називається міцністю, то й ординати характерних точок умовної діаграми розтягу називаються характеристиками міцності матеріалу. Характеристики міцності для пластичної сталі наступні:

- **границя пропорційності** – найбільше напруження, до якого справедливий закон Гука:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}; \quad (3.1)$$

- **границя пружності** – найбільше напруження, до якого спостерігаються тільки пружні деформації:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{пр}}}{A_0}, \quad (3.2)$$

практично можна вважати, що $\sigma_{\text{пц}} = \sigma_{\text{пр}}$;

- **границя плинності** – найменше напруження, за якого матеріал деформується при майже сталому навантаженні:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{F_{\text{пл}}}{A_0}; \quad (3.3)$$

- **границя міцності** – умовне напруження, що відповідає максимальному, тимчасовому навантаженню:

$$\sigma_{\text{тм}} = \frac{F_{\text{max}}}{A_0}; \quad (3.4)$$

- **умовне напруження розриву:**

$$\sigma_{\text{р}}^{\text{умовне}} = \frac{F_{\text{р}}}{A_0}; \quad (3.5)$$

- **дійсне напруження розриву:**

$$\sigma_{\text{р}}^{\text{дійсне}} = \frac{F_{\text{р}}}{A_{\text{ш}}}, \quad (3.6)$$

де $A_{\text{ш}}$ – площа поперечного перерізу зразка у місці розриву – «шийки».

Зауважимо, що діаграми розтягу більшості металів і сплавів не мають помітної ділянки плинності. У цьому випадку встановлюють умовну границю плинності $\sigma_{0.2}$, яка відповідає залишковому переміщенню 0.002 або 0.2% від робочої довжини зразка. Подібним чином визначаються і інші характеристики міцності.

Характеристики пластичності сталі

Здатність матеріалів до пластичного деформування називається **пластичністю**.

За результатами випробувань на розтяг визначаються дві характеристики пластичності матеріалів:

- **відносне подовження** зразка:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%, \quad (3.7)$$

де l_k – довжина зразка після руйнування;

- **відносне звуження площі поперечного перерізу** зразка:

$$\psi = \frac{A_0 - A_{\text{ш}}}{A_0} 100\%. \quad (3.8)$$

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте штангенциркулем діаметр робочої частини зразка d_0 . Відкладіть на штангенциркулі розрахункову довжину $l_0 = 10d_0$ зразка та виділіть її поперечними рисками в середній частині зразка. Розбийте розрахункову довжину поперечними

рисками з інтервалом d_0 . Обчисліть площу поперечного перерізу зразка:

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}.$$

2. Використовуючи довідкові дані (додаток 6), визначте очікуване максимальне навантаження для розтягу сталевого зразка за формулою:

$$F = kA_0[\sigma],$$

де $k = 1.2 - 1.5$ коефіцієнт запасу; $[\sigma]$ – допустиме напруження розтягу (стиску) сталі 20 (додаток 6). Установіть на машині Р-5 відповідну шкалу завантажування, а на маятнику – необхідну вагу.

3. Закріпіть зразок у захватах випробної машини.

4. Підготуйте записуючий пристрій.

5. Увімкніть привід машини і спостерігайте за процесом розтягу зразка. За шкалою пристрою зафіксуйте навантаження $F_{пл}$ (у цю мить деформації зростають, а навантаження не змінюється), максимальне – тимчасове навантаження $F_{max} = F_{tm}$ (в цю мить стрілка силовимірника покаже найбільше значення сили розтягу, а на зразку утвориться стоншення – «шийка») і навантаження у момент розриву F_p .

6. Після розриву зразка вимкніть привід машини і дістаньте із захватів частини розірваного зразка.

7. Склавши частини розірваного зразка, виміряйте відстань між крайніми поперечними рисками – деформовану довжину l_k і діаметр «шийки» $d_{ш}$. Обчисліть площу поперечного перерізу зразка у зоні «шийки»:

$$A_{ш} = \frac{\pi d_{ш}^2}{4}.$$

8. Якщо зразок розірвався в крайніх третинах розрахункової довжини, а не в середній третині, то l_k підраховується так: вимірюється довжина ділянки l_1 , на якій відбулося руйнування, довжина чотирьох ділянок l_4 довгої частини зразка і довжина п'яти ділянок l_5 довгої частини зразка, суміжних з ділянкою розриву; результати вимірів підсумовуються (рис. 3.5):

$$l_k = l_1 + l_4 + l_5.$$

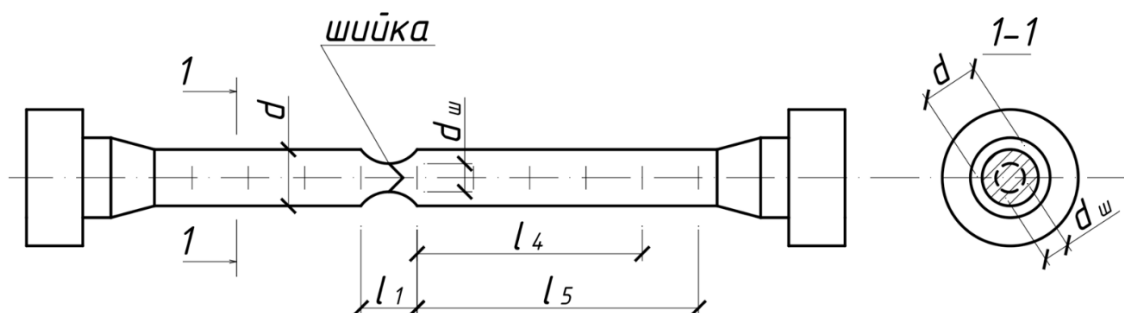


Рис. 3.5. Креслення розірваного сталевого зразка

Якщо розрив відбувся за межами розрахункової довжини, то експеримент вважається невдалим.

9. Зніміть з барабану діаграму і виконайте обробку результатів випробування.

10. На діаграмі розтягу вісь абсцис (вісь подовжень) сумістіть з нульовою лінією.

11. Продовжуючи вниз початкову нахилену ділянку діаграми до осі абсцис, знайдіть початкову точку O діаграми – початок системи координат.

12. Покажіть на діаграмі характерні точки: точку початку ділянки плинності – B , її кінця – C ; точку найбільшого зусилля – D , точку, що відповідає моменту розриву K .

13. Провівши через точку K пряму, паралельну відрізку OA , знайдіть на осі абсцис відрізок, який відповідає залишковому подовженню зразка $\Delta l_{\text{зал}}$.

14. Використовуючи обміри, виконані у п.7, установіть масштаб горизонтальної осі діаграми.

15. За величиною F_{max} діаграми, що знята з силівимірювального пристрою, установіть масштаб вертикальної осі. За двома іншими вимірами п.5 – $F_{\text{пл}}$ та $F_{\text{р}}$ – перевірте правильність роботи записуючого пристрою машини.

16. Обчисліть характеристики міцності матеріалу зразка:

- границю плинності сталі за формулою (3.3);
- границю міцності за формулою (3.4);
- умовне напруження розриву за формулою (3.5);
- дійсне напруження розриву за формулою (3.6).

17. Обчисліть характеристики пластичності матеріалу зразка:

- відносне подовження зразка за формулою (3.7);
- відносне звуження площі поперечного перерізу зразка за формулою (3.8).

18. Обчисліть відносне подовження і напруження в характерних точках та побудуйте діаграму розтягу в координатах $\sigma - \epsilon$ (умовну діаграму розтягу).

19. За таблицею фізико-механічних властивостей (додаток 3) установіть марку сталі, з якої виготовлений зразок.

У журнал звітів з лабораторних робіт перенесіть діаграму розтягу $F - \Delta l$ і умовну діаграму розтягу $\sigma - \epsilon$. Запишіть значення здобутих характеристик міцності й пластичності, зробіть ескіз зразка до навантаження і після розриву.

20. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення напруженому стану розтягу (стиску).
2. Опишіть основні технічні функції машини Р-5:
 - створення зусилля розтягу та стиску;
 - вимірювання діючого навантаження на зразок;
 - вимірювання подовження зразка.
3. Охарактеризуйте властивості діаграми розтягу пластичної сталі на ділянці:
 - пропорційності;
 - пружних деформацій;
 - пластичних деформацій – плинності;
 - зміцнення – наклепу;
 - місцевих пластичних деформацій;
 - одночасного виникнення пружних та пластичних деформацій.
4. Яка деформація зразка зникає відразу після розриву?

5. Перерахуйте характеристики міцності та пластичності сталі.
6. Дайте визначення та напишіть розрахункові формули для наступних характеристик міцності та пластичності:
- границя пропорційності;
 - границя пружності;
 - границя плинності;
 - границя міцності;
 - умовне та дійсне напруження розриву;
 - відносне подовження зразка;
 - відносне звуження площі поперечного перерізу зразка.
7. Розкажіть як задається система координат діаграми розтягу та як визначаються масштаби координатних осей?
8. Як будується умовна діаграма розтягу за абсолютною?
9. У чому полягає відмінність абсолютної діаграми розтягу від умовної щодо механічних характеристик матеріалу та зразка з цього матеріалу?
10. Розкрийте механізм пластичних деформацій сталі.
11. У чому полягає використання гіпотези Сен-Венана для досліджуваного зразка?
12. Чому фізико-механічні властивості пластичних сталей досліджуються на довгих зразках?

3.2. Лабораторна робота №2. Визначення модуля поздовжньої пружності сталі

Мета роботи: експериментально визначити модуль поздовжньої пружності сталі.

Обладнання: випробна машина Р-5 або УММ-5, прилади для вимірювання деформацій – тензометри важільні, сталевий зразок.

Загальні відомості

У межах малих подовжень для більшості матеріалів справедливий *закон Гука* [6], що встановлює пряму пропорційну залежність між напруженнями та деформаціями:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3.9)$$

де σ – нормальне напруження; ε – деформація; E – модуль поздовжньої пружності.

Коефіцієнт пропорційності E називається *модулем пружності першого роду*, модулем поздовжньої пружності, або модулем Юнга. Модуль пружності є фізичною константою матеріалу, він визначається експериментально.

У виразі (3.9) напруження обчислюється за формулою $\sigma = \frac{F}{A_0}$, а відносна деформація – за формулою $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$. У цих формулах F – зовнішня сила розтягу, A_0 – площа поперечного перерізу недеформованого стрижня, Δl – абсолютне подовження стрижня, l_0 – довжина недеформованого стрижня. Після підстановки виразів для σ і ε в формулу (3.9), закон Гука набуває вигляду:

$$\Delta l = \frac{F l_0}{E A_0}.$$

Звідки отримаємо формулу для обчислення модуля поздовжньої пружності E :

$$E = \frac{Fl_0}{A_0\Delta l}. \quad (3.10)$$

З (3.10) видно, що для визначення модуля пружності потрібно виміряти повне подовження Δl стрижня, вихідну довжину l_0 , обчислити площу поперечного перерізу A_0 , зафіксувати значення сили F . Зрозуміло, що навантаження F не повинно призводити до напружень, що перевищують границю пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$.

Для визначення лінійного переміщення Δl стрижня використовується важільний тензометр, схема якого зображена на рис. 2.2.

Подовження зразка вимірюється двома тензометрами, розміщеними на протилежних твірних робочої частини зразка. Це дозволяє підвищити точність вимірювань, так як півсума вимірів тензометрів вільна від похибок, викликаних перекосом зразка в захватах, позацентровим прикладенням сил розтягу і викривленням зразка.

Зразок використовуємо нормальний, тобто діаметром $d_0 = 20$ мм і довжиною $l_0 = 200$ мм.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте діаметр робочої частини зразка d_0 , обчисліть площу поперечного перерізу $A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$ і визначте гранично допустиме навантаження $F_{\text{пц}}$ зони пропорційності за формулою:

$$F_{\text{пц}} = k_{\text{зп}} A_0 [\sigma],$$

де $k_{\text{зп}} = 1.2 - 1.5$ коефіцієнт запасу; $[\sigma]$ – допустиме напруження розтягу (стиску) сталі (додаток 6).

2. Виберіть крок збільшення навантаження ΔF , за якого можна отримати в зоні пропорційності 5 – 6 відліків, починаючи з початкового зусилля $F_0 = 2\Delta F$.

3. Підготуйте машину Р-5 і тензометри до проведення випробування. На етапі обтиснення зразка у захватах і вибору люфтів у з'єднаннях ланцюгів машини (навантаження F_0) перевірте правильність установки і роботи тензометрів (чи рухається стрілка, чи відповідає вільна зона шкали напрямку руху стрілки).

4. Досягнувши величини навантаження F_0 , установіть стрілки тензометрів на нуль – початковий відлік та запишіть в табл. 3.1; запишіть ціну поділки шкали тензометра $k = 0.001$ мм, довжину бази тензометра $l_0 = 20$ мм.

5. Збільшуючи східчасто навантаження (кожного разу на величину ΔF) $n = 5$ разів, записуйте показання тензометрів.

6. Після п'ятиразового збільшення навантаження, у зворотній послідовності виконайте розвантаження зразка, записуючи покази тензометрів у таблицю спостережень 3.1.

Таблиця 3.1. Результати експериментального дослідження модуля поздовжньої пружності

Номер спостереження	Навантаження, кН	Збільшення навантаження				Зменшення навантаження			
		Лівий тензометр		Правий тензометр		Лівий тензометр		Правий тензометр	
		Відлік за шкалою d	Різниця D	Відлік за шкалою d	Різниця D	Відлік за шкалою d	Різниця $\bar{D}$	Відлік за шкалою d	Різниця $\bar{D}$
1									
2									
3									
4									
5									
6									
Середнє значення	$\Delta F =$	$D_{\text{л}}^{\text{ср}} = \frac{\sum D}{n} =$		$D_{\text{пр}}^{\text{ср}} = \frac{\sum D}{n} =$		$\bar{D}_{\text{л}}^{\text{ср}} = \frac{\sum \bar{D}}{n} =$		$\bar{D}_{\text{пр}}^{\text{ср}} = \frac{\sum \bar{D}}{n} =$	
n – кількість вимірювань									

7. Обчисліть середні значення показів лівого $D_{\text{л}}$ та правого $D_{\text{пр}}$ тензометрів:

$$D_{\text{л}} = \frac{D_{\text{л}}^{\text{ср}} + \bar{D}_{\text{л}}^{\text{ср}}}{2}, \quad D_{\text{пр}} = \frac{D_{\text{пр}}^{\text{ср}} + \bar{D}_{\text{пр}}^{\text{ср}}}{2}.$$

8. Обчисліть середні подовження, виміряні лівим і правим тензометрами:

$$\Delta l_{\text{л}} = k D_{\text{л}}, \quad \Delta l_{\text{пр}} = k D_{\text{пр}}.$$

9. Обчисліть середнє подовження осі стрижня на довжині бази тензометра, що відповідає величині приросту $F = \Delta F$ навантаження:

$$\Delta l_{\text{ср}} = \frac{\Delta l_{\text{л}} + \Delta l_{\text{пр}}}{2}. \quad (3.11)$$

10. Визначте модуль поздовжньої пружності матеріалу зразка за формулою (3.10) при $F = \Delta F$.

11. Побудуйте на міліметровці графіки навантаження і розвантаження зразка в координатах $F - d$.

12. Порівняйте експериментальне значення модуля поздовжньої пружності з табличним (додаток 4).

13. У журналі звітів з лабораторних робіт приведіть схему випробування, таблицю з результатами експерименту, розрахунок модуля поздовжньої пружності,

графіки навантаження та розвантаження зразка в координатах $F - d$.

14. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення модулю поздовжньої пружності.
2. Сформулюйте гіпотезу однорідності матеріалу.
3. Чи є змінним модуль Юнга у випадку змінних деформацій та відповідних їм напружень?
4. Які обмеження накладаються на навантаження F у досліді?
5. Поясніть принцип роботи шарнірно-важільного тензометра за його кінематичною схемою. Що називається базою тензометра?
6. Як визначити коефіцієнт збільшення вимірів тензометра?
7. Як впливає на точність вимірювання подовження зразка використання двох тензометрів? За рахунок чого?
8. Напишіть формулу, що дозволяє визначити модуль поздовжньої пружності за результатами досліді. Поясніть кожен компоненту формули.

3.3. Лабораторна робота №3. Випробування чавунного зразка на стиск

Мета роботи: експериментально визначити границю міцності чавуну при стиску.

Обладнання: прес гідравлічний 2ПГ–125, чавунний зразок.

Загальні відомості

Під час стискування зразків з крихких матеріалів визначається границя міцності σ_{TM} – напруження за найбільшого навантаження, залишкове скорочення δ й залишкове розширення ψ .

Зразки для випробування крихких матеріалів мають циліндричну форму (рис. 3.6, а), з відношенням висоти до діаметра від 1 до 2.5. В таких зразках при стискуванні виникає просторовий напружений стан. Просторовий характер напруженого стану обумовлений просторовим виглядом навантаження та співставними геометричними розмірами циліндричного зразка (суттєво просторовою геометричною формою). В процесі стискування між торцями зразка й плитами преса 2ПГ-125 виникають сили тертя τ_k . Вони осесиметрично розподілені по торцях зразка, мають радіальний напрямок і зростають від нульових значень в центрі до максимальних – на краю торців. Таким чином, на зразок діє рівномірно розподілене по торцях навантаження стиску уздовж осі й нерівномірно розподілене осесиметричне навантаження, від сил тертя, перпендикулярне до осі зразка. Сили тертя τ_k на осі z_0 дорівнюють нулю, збільшуючись до торців. Це призводить до просторового напруженого стану зразка.

Просторовий характер напруженого стану при стиску зразка виражається його бочкоподібною формою (рис. 3.6, б). Щоб зменшити бочкоподібність, потрібно зменшити сили тертя між плитами преса та торцями зразка. Для цього рекомендується там розмістити мастило, наприклад, промаслений папір.

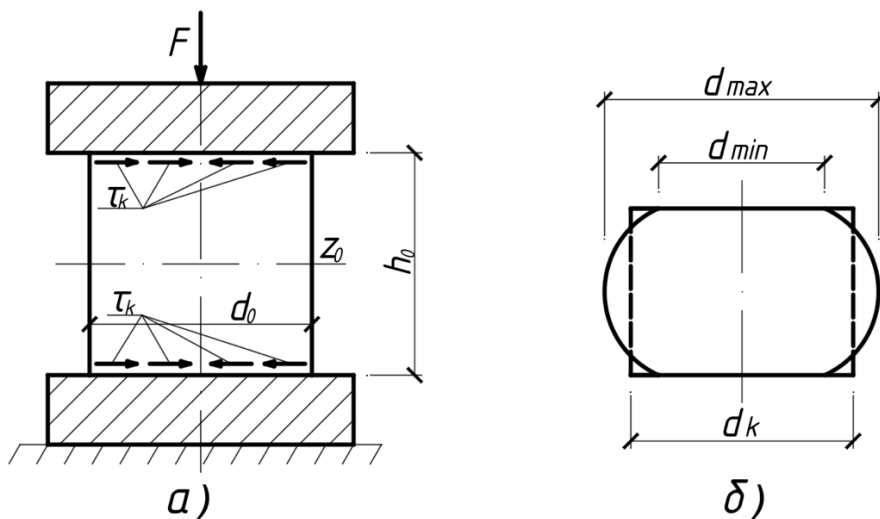


Рис. 3.6 а, б. Вигляд чавунного зразка до деформації (а) та після деформації (б)

При руйнуванні стиском зразків з крихких матеріалів, наприклад, із чавуну, у них можуть виникати тріщини під кутом близько 45° до осі зразка. Пояснити це можливо проковзуванням зерен матеріалу по напрямках дії найбільших дотичних напружень. Як відомо, *найбільші дотичні напруження діють під кутом приблизно $\pm 45^\circ$ до напрямку сили стиску*. У напрямку найбільших дотичних напружень і з'являються тріщини та відбувається руйнування матеріалу зразка.

Короткий опис пресу 2ПГ–125

Для випробування крихких матеріалів на стиск використовується гідравлічний прес типу 2ПГ-125, схема якого зображена на рис. 3.7. Цей прес складається з двох частин – робочої та блоку управління.

Робоча частина складається з основи 1, двох колон 4 і верхньої поперечини 6, які жорстко з'єднані між собою та утворюють станину рамної конструкції.

У центральній частині основи 1 розміщено робочий циліндр 2 з плунжером 3, на верхньому торці якого встановлено стіл 9.

Рухома поперечина 5 може рухатися по різьбі колон 4, забезпечуючи постановку верхньої опорної плити 8 у потрібне положення, залежно від висоти зразка. Рух поперечини 5 відбувається за допомогою електродвигуна 7, який управляється кнопковою станцією 10. Рух від електродвигуна 7 через черв'ячну передачу передається гайкам, що, обертаючись, переміщують поперечину 5 по колонах 4.

Робочий хід пресу відбувається за рахунок переміщення плунжера 3 зі столом 9 вгору під дією тиску мастила в циліндрі 2. Рухома частина машини опускається вниз від власної ваги.

У блоці управління 12 розміщені мастильний бак, гідронасос, пристрій управління гідравлікою та силовимірвальна голівка.

Управління електродвигуном насоса відбувається кнопковою станцією 11.

Пристрій управління гідравлікою використовується для розподілу і регулювання подачі мастила від гідронасоса до робочих органів преса. Ручки управління цим пристроєм розміщені зовні пульта й позначені табличками «Скид мастила» – 13, «Регулятор швидкості» – 14, і «Режим роботи» – 15.

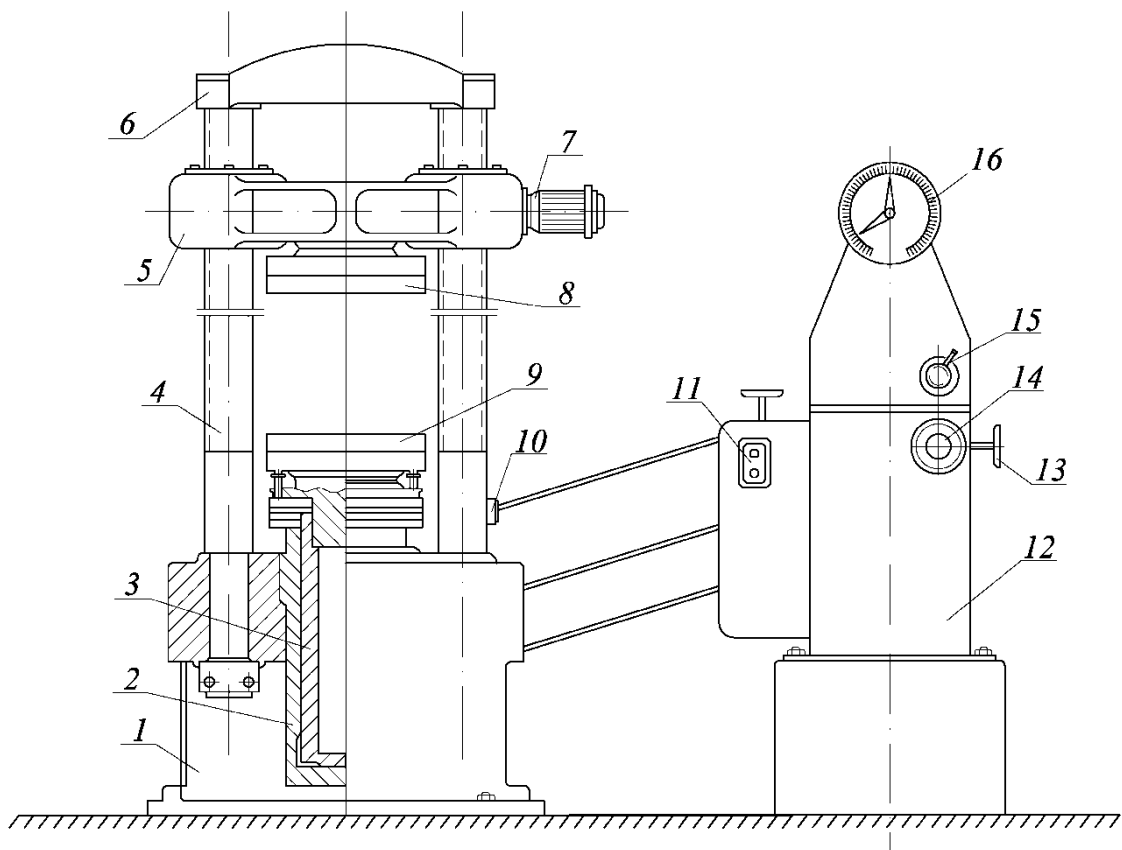


Рис. 3.7. Схема преса 2ПГ–125

Робочий хід преса відбувається при закритому вентилі 13 і відкритому вентилі 14. Щоб повернути плунжер 3 у вихідне положення, закривають вентиль 14 й відкривають вентиль 13. Ручкою 15 встановлюється режим роботи преса – до 400 кН чи до 1250 кН.

Для вимірювання зусилля, яке діє на зразок, у верхній частині пульта керування розміщена силівимірювальна головка типу СТ–2А, шкала 16 якої проградуєвана в безрозмірних одиницях. Тому для визначення зусилля, відповідного показу шкали 16, використовується тарувальна таблиця, складена під час перевірки преса за показами зразкового динамометра.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте діаметр d_0 і висоту h_0 зразка, намалюйте його ескіз.
2. Установіть зразок між плитами преса і прикрийте його захисним екраном.
3. Увімкніть прес і спостерігайте за силівимірювальним пристроєм. Як тільки навантаження почне зменшуватися (з'явилася перша тріщина – зразок зруйнувався) зупиніть роботу преса. Візьміть зруйнований зразок, виміряйте його висоту h_k , запишіть найбільший показ шкали силівимірювача.
4. Знову встановіть зразок між плитами преса і завантажуйте його до виникнення добре видимих тріщин.
5. Візьміть зразок з тріщинами та замалюйте його.
6. За допомогою тарувальної таблиці визначте найбільше зусилля стиску зразка F_{max} , установіть марку чавуну (додаток 5).
7. Обчисліть границю міцності на стиск за формулою:

$$\sigma_{\text{тм}} = \frac{F_{\text{max}}}{A_0}, \quad (3.12)$$

тут A_0 – площа поперечного перерізу зразка до стиску.

8. Визначте залишкове скорочення зразка:

$$\delta = \frac{h_0 - h_k}{h_0} 100\%. \quad (3.13)$$

9. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Обґрунтуйте просторовий характер напруженого стану зразка при стиску.
2. Як впливає просторовий характер напруженого стану зразка на його роботу при стиску?
3. За якою формулою визначається границя міцності чавуну $\sigma_{\text{тм}}$? Чи має чавун границю плинності $\sigma_{\text{пл}}$?
4. Як розподіляються дотичні напруження, обумовлені силами тертя між торцевими поверхнями зразка та робочими поверхнями преса, по висоті зразка та в торцевих поверхнях уздовж їхнього радіуса?
5. Як відбувається руйнування чавунних зразків під час стиску? За рахунок чого?
6. Яким чином визначається найбільше зусилля, що діє на чавунний зразок?
7. Як зменшити «бочкоподібність» зразка при стиску?
8. Які властивості матеріалу характеризує його залишкове скорочення? Чи буде відрізнятися цей параметр для чавуну та граніту?

3.4. Лабораторна робота №4. Випробування деревини на стиск

Мета роботи: експериментально визначити границю міцності деревини на стиск уздовж і упоперек волокон.

Обладнання: випробна машина Р–5, зразки деревини.

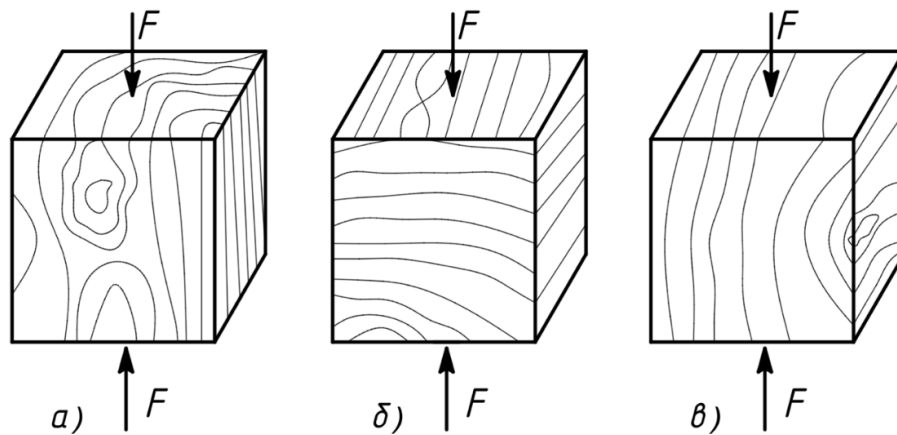
Загальні відомості

Структура деревини має складний характер. Деревина складається з міцних волокон та менш міцної речовини між волокнами. Тому деревина – анізотропний матеріал, властивості якого уздовж і упоперек волокон значно відрізняються [7]. Так як властивості деревини різні за трьома ортогональними напрямками – уздовж волокон, упоперек волокон в радіальному та тангенціальному напрямках, то вона називається також *ортотропним матеріалом*.

Використання деревини в будівництві значною мірою залежить від її фізико-механічних властивостей – границі міцності при стиску, при сколі тощо. Фізико-механічні властивості деревини визначаються за допомогою експериментальних досліджень.

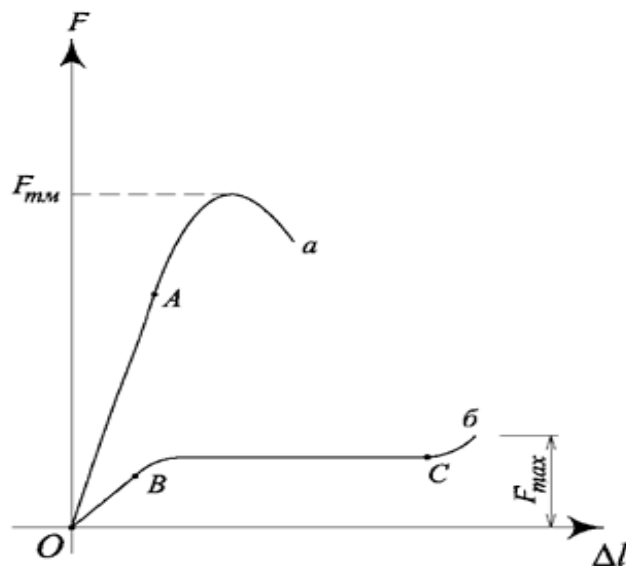
Для визначення границі міцності деревини при стиску в експериментальних дослідженнях використовуються зразки у вигляді кубиків розміром ребер 25 мм. Стискування зразків відбувається уздовж волокон (рис. 3.8, а) та упоперек волокон у

радіальному (рис. 3.8, б) та тангенціальному (рис. 3.8, в) напрямках відносно річних кілець.



**Рис. 3.8 а, б, в. Зразки деревини для випробування на стиск уздовж волокон (а),
уперек волокон у радіальному напрямі (б),
уперек волокон у тангенціальному напрямі (в)**

Діаграми стиску деревини уздовж і уперек волокон зображені на рис. 3.9 (а – стиск уздовж волокон, б – стиск уперек волокон). Приведені діаграми сильно відрізняються. Діаграма стиску деревини уздовж волокон має значну ділянку пропорційності OA , ділянка пластичних деформацій відсутня.



**Рис. 3.9 а, б. Діаграми стиску деревини уздовж волокон (а),
уперек волокон (б)**

З цієї діаграми видно, що зразок, стиснутий уздовж волокон (рис. 3.8, а), витримує значне навантаження з незначними залишковими деформаціями. Причому, пропорційність між навантаженням і деформацією спостерігається майже до моменту руйнування.

Така робота деревини пояснюється тим, що при стиску уздовж волокон основне навантаження сприймають міцні волокна. Руйнування деревини відбувається через злам волокон. Як правило, руйнування супроводжується виникненням поперечних складок і розплющуванням торців, а якщо зразок має сучки, то можлива поява поздовжніх тріщин.

На діаграмі стиску деревини упоперек волокон в радіальному напрямку ділянка пропорційності *ОВ* незначна, а пластичних деформацій *ВС* дуже розвинена. У цьому випадку пластично деформується міжволоконна речовина. Тут переміщення зростають без помітного збільшення навантаження. При відсутності в деревині дефектів, зразок спресовується, не руйнуючись. За навантаження руйнування умовно приймається таке навантаження, за якого зразок скорочується приблизно *на одну третину початкової висоти*.

Зразки, що стискаються упоперек волокон у тангенціальному напрямку, можуть руйнуватися за рахунок розшарування деревини. У цьому випадку навантаженням руйнування є максимальне зусилля, а діаграма стиску буде схожа на діаграму *а* рис. 3.9. Якщо ж зразок спресовується, то навантаження руйнування встановлюється так, як і при стиску в радіальному напрямі. Діаграмою стиску буде діаграма *б* рис. 3.9.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Відберіть по одному зразку для кожного варіанту стиску. Помітьте на зразках місця прикладання навантаження для забезпечення поздовжнього, радіального й тангенціального напрямків стиску.

2. Замалюйте зразки, покажіть їхні розміри, напрям волокон, річних кілець, напрям стиску (рис. 3.8). Обчисліть робочу площу стиску кожного зразка.

3. Підготуйте записуючий пристрій.

4. Закладіть почергово зразки між плитами преса, стискайте їх до руйнування, фіксуйте навантаження руйнування. Отримайте діаграми стиску на самописці машини Р-5.

5. Оглядом зруйнованих зразків установіть у кожному випадку характер їх руйнування.

6. Обчисліть границі міцності деревини для всіх трьох випадків стиску.

7. Результати роботи занесіть у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2. Результати експериментального дослідження деревини на стиск

Параметри	Стиск уздовж волокон	Стиск упоперек волокон	
		Радіально	Тангенціально
Площа стиску $A, \text{м}^2$			
Навантаження руйнування $F_{\text{TM}}, \text{Н}$			
Границя міцності $\sigma_{\text{TM}} = \frac{F_{\text{TM}}}{A}, \text{МПа}$			
Характер руйнування			

8. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Які матеріали називаються анізотропними, ортотропними?
2. Яку анізотропію фізико-механічних властивостей має деревина? Чому в досліді використовуються три однакові за розмірами зразки?
3. Як визначається в дерев'яному зразку напрям уздовж волокон, упоперек волокон радіальний та тангенціальний?
4. Розкажіть про характер руйнування зразків при стиску упоперек волокон у радіальному, тангенціальному напрямках та уздовж волокон.
5. Покажіть на рис. 3.9 діаграми стиску в радіальному, тангенціальному напрямках та уздовж волокон. Чим відрізняються ці діаграми?
6. Як розподіляються в порядку зростання знайдені в досліді границі міцності для різних напрямів стиску деревини?
7. В якому напрямку деревина має найкращі властивості міцності при стиску, а в якому – найгірші?

3.5. Лабораторна робота №5. Випробування деревини на скол

Мета роботи: експериментально визначити границю міцності деревини при сколі уздовж і упоперек волокон.

Обладнання: випробна машина Р-5, зразки деревини.

Загальні відомості

Елементи дерев'яних конструкцій часто з'єднуються між собою за допомогою різних врубок. Щоб розрахувати такі з'єднання, необхідно знати границю міцності τ_{tm} деревини при роботі на скол уздовж та упоперек волокон.

Границя міцності деревини визначається під час експериментальних досліджень зразків деревини. Для випробування деревини на скол уздовж та упоперек волокон використовуються зразки зображені на рис. 3.10.

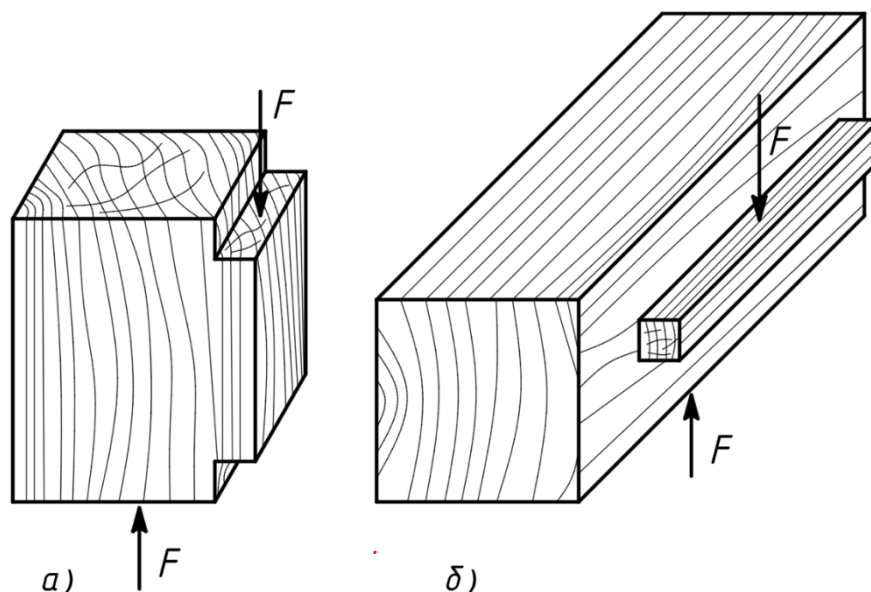


Рис. 3.10 а, б. Зразки деревини та схема прикладення зовнішніх сил при сколі уздовж волокон (а) та поперек волокон (б)

Схему установки для випробування деревини на скол зображено на рис. 3.11.

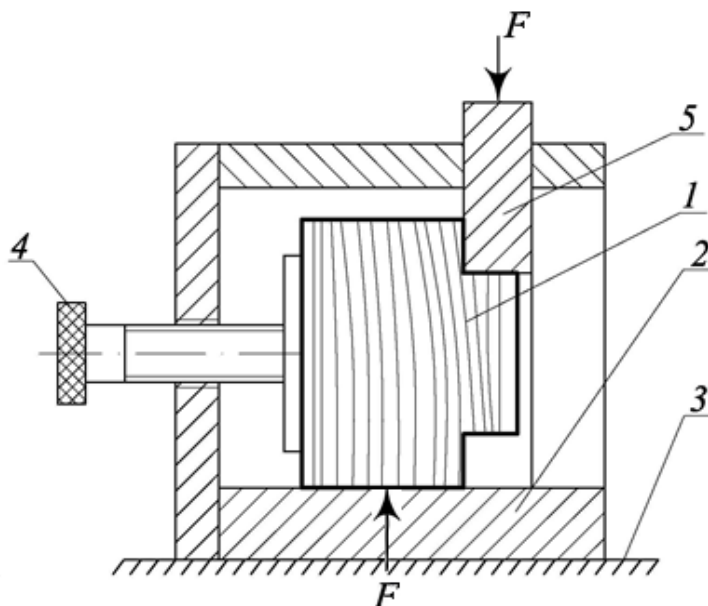


Рис. 3.11. Схема установки для випробування деревини на скол

Зразок 1 розміщується в коробці 2, яка встановлюється на нижню опорну плиту 3 випробної машини. За допомогою гвинта 4 зразок притискується до рухомої рамки 5. Верхня плита машини Р-5 тисне силою F на виступаючу частину рамки 5, що проходить через виріз у коробці 2. Своім нижнім кінцем рамка 5 упирається у виступ зразка 1, який під дією навантаження руйнується від сколу.

Щоб здобути співставні результати випробувань, всі зразки мають бути виготовлені з однакової деревини (з однієї дошки або рейки).

Оскільки механічні характеристики деревини сильно відрізняються, навіть, для одного й того самого типу деформації, то рекомендується випробовувати не менше трьох зразків кожного типу й обчислювати потім середнє значення границі міцності для кожного досліджуваного випадку зсуву.

Перед випробуванням слід перевірити якість зразків. Сучки та інші дефекти в робочій площині не допускаються.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Відберіть зразки деревини для випробування на скол уздовж і уперек волокон. Замалюйте їх, покажіть усі розміри, напрям волокон, річних кілець і напрям сколу.

2. Обчисліть площу сколу кожного зразка.

3. Почергово закладіть зразки у пристрій, завантажте їх за допомогою ручного приводу випробної машини до руйнування, зафіксуйте максимальне навантаження $F_{\text{тм}}$.

4. Діленням навантаження руйнування $F_{\text{тм}}$ на площу сколу A зразка визначте границю міцності $\tau_{\text{тм}}$ деревини для двох видів сколу.

5. Результати досліджень занесіть у таблицю 3.3.

Таблиця 3.3. Результати експериментального дослідження деревини на скол

Вид сколу деревини	Площа сколу $A, \text{м}^2$	Максимальне навантаження $F_{\text{TM}}, \text{Н}$	Границя міцності $\tau_{\text{TM}} = \frac{F_{\text{TM}}}{A}, \text{МПа}$
Уздовж волокон			
Упоперек волокон			

6. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Яка властивість деревини зумовлює її випробування на скол уздовж та упоперек волокон?
2. Чому всі зразки мають бути виготовлені з однакової деревини?
3. Чому потрібно для кожного досліджуваного випадку зсуву обчислювати середнє декількох значень границі міцності?
4. За якою формулою визначається границя міцності деревини на скол?
5. В яких розрахунках можуть бути використані результати випробувань деревини на скол?

3.6. Лабораторна робота №6. Визначення ударної в'язкості сталі

Мета роботи: визначити відносну ударну в'язкість сталі.

Обладнання: маятниковий копер МК–30А, зразок.

Загальні відомості

За умови ударного навантаження, навіть для пластичних матеріалів, зростає небезпека крихкого руйнування, збільшується небезпечність концентраторів напружень у матеріалі – раковин, надрізів, тріщин.

Механічні характеристики, що отримані при статичних випробуваннях матеріалів (навантаження зростає повільно), не дозволяють оцінити їхню здатність протистояти ударному навантаженню.

Щоб оцінити здатність матеріалів сприймати ударні навантаження та виявити їхню схильність до крихкого руйнування, проводиться *випробування матеріалів на ударну в'язкість*. Найпоширенішими й стандартизованими випробуваннями на ударну в'язкість є ударні випробування на згинання зразків з надрізом, у результаті яких визначається в'язкість руйнування – опір поширенню тріщин (рис. 3.12).

Розмір H зразка може бути 6, 7 або 8 мм. Допускається використання зразків з кутовим надрізом.

Надріз робиться для створення концентрації напружень – об'ємного напруженого стану, що ускладнює розвиток пластичних деформацій, поліпшує крихке руйнування.

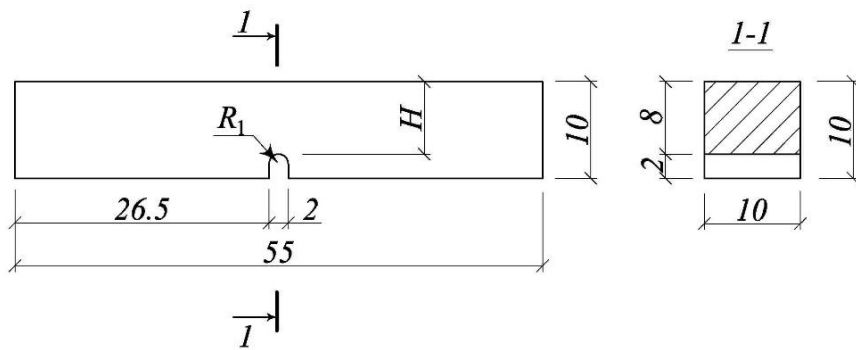


Рис. 3.12. Ескіз сталевго зразка для випробування на ударну в'язкість

Відносною ударною в'язкістю b_H називається відношення роботи, витраченої на руйнування зразка ударом, до площі поперечного перерізу зразка в місці удару:

$$b_H = \frac{B}{A}, \quad (3.14)$$

де B – робота руйнування зразка; A – робоча площа зразка.

Випробовуються зразки на маятникових копрах з граничною енергією 300 Н·м. Зразок кладуть горизонтально, строго посередині прольоту між опорами. Удар наноситься з боку, протилежного до надрізу, перпендикулярно до осі зразка (рис. 3.13).

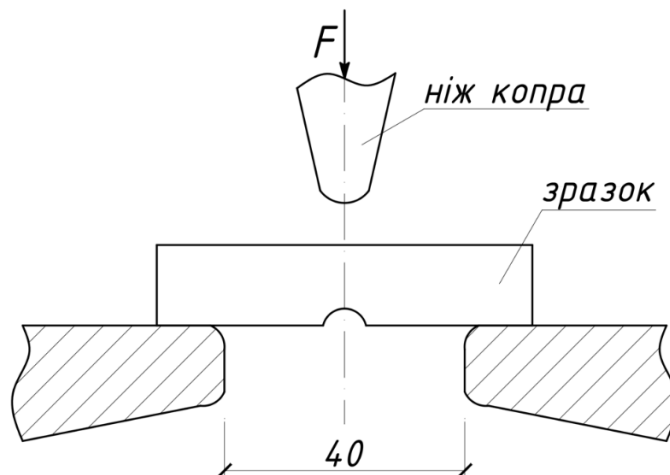


Рис. 3.13. Схема випробування зразка на ударну в'язкість

Принцип дії та короткий опис конструкції маятникового копра типу МК–30А

Конструктивна схема маятникового копра приведена на рис. 3.14. Основними частинами його є станина, молот, механізм зведення та відлікова шкала. Станина копра складається з основи 13 та двох вертикальних стояків 2. У верхню частину стояків установлена вісь маятника. Маятником є – масивний молот 10, підвішений до осі за допомогою жорсткої системи розтяжок. У вирізі молота встановлений сталевий загартований ніж 11, що при ударі контактує зі зразком 12.

На копрі передбачена підйомна рама 8, її можна встановити під різними кутами до горизонту. Ця рама встановлюється у бажане положення опусканням собачки 7 на храповику 6, що змонтовані на стояках. На вільному кінці рами 8 розміщений гачок, на якому маятник утримується у зведеному стані собачкою 9. Щоб виконати випробування, маятник зводиться на кут α і потім відпускається, руйнуючи на шляху зразок. Витративши на руйнування зразка частину запасу енергії, маятник відхиляється на кут

β . На осі маятника жорстко закріплений повід 3, який, рухаючись, веде по чергово праву стрілку 5, або ліву стрілку 4 і залишає їх у положенні, що фіксує кут зводу α і кут злету β маятника після зламу зразка.

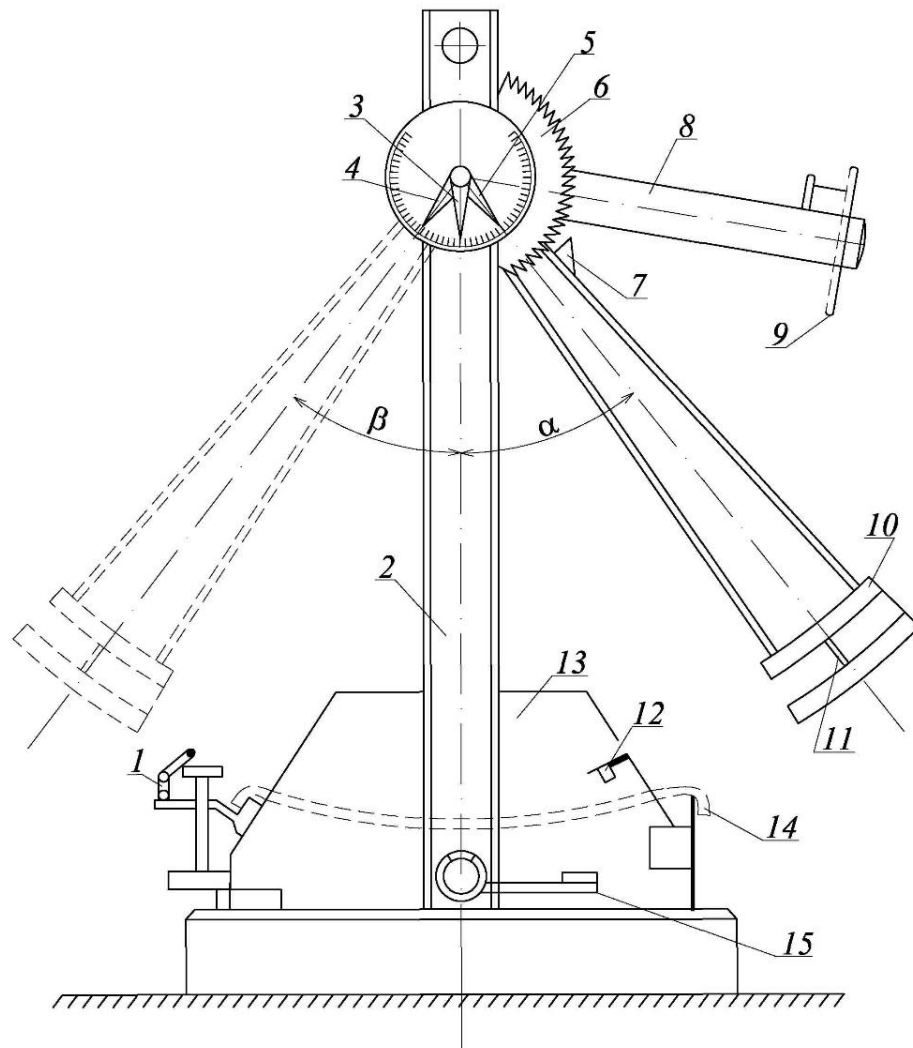


Рис. 3.14. Схема маятникового копра типу МК-30А

Шкала відлікового механізму має подвійний ряд поділок, розміщених симетрично відносно нульової мітки, і градуйована в Н·м. Таким чином, за нею можна визначити запас енергії зведеного маятника і надлишковий запас енергії після зламу зразка. Безпосереднім відніманням цих значень енергій визначається робота, що витрачена на злам зразка.

Для погашення коливань маятника після руйнування зразка, копер обладнаний гальмівним пристроєм 1, 14, 15.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Намалюйте ескіз зразка і виміряйте всі його розміри, обчисліть площу поперечного перерізу зразка в зоні руйнування.
2. Установіть зразок на опори копра так, щоб надріз був розміщений симетрично відносно опор і звернений в бік, протилежний удару.
3. Зведіть маятник, а потім звільніть його.

4. Після руйнування зразка запишіть покази лівої і правої стрілок відлікового механізму.
5. Обчисліть роботу руйнування і відносну ударну в'язкість за формулою (3.14).
6. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Для чого проводяться дослідження на ударний згин?
2. Яку роль має надріз у зразках, що випробовуються?
3. Яким чином визначається кількість роботи, що витрачена на руйнування зразка?
4. Як враховується значення ударної в'язкості в проектуванні конструктивних елементів?
5. Приведіть приклади виникнення ударного згину у будівництві. Які умови виникнення ударного згину?
6. Як розвиваються тріщини при ударному згині?
7. Опишіть конструкцію маятникового копра МК–30А та принцип його роботи.
8. Розкажіть про порядок експериментального визначення ударної в'язкості сталі.

Розділ 4. Курс лабораторних робіт по перевірці гіпотез та теорій опору матеріалів

Експериментальні дослідження в опорі матеріалів умовно можливо поділити на досліді по визначенню фізико-механічних властивостей матеріалів і досліді по перевірці гіпотез та теорій.

Другий тип дослідів потрібний для перевірки достовірності наближених формул та теорій опору матеріалів, які отримуються шляхом застосування методу гіпотез і припущень. Щоб досягти простоти кінцевих формул, під час їхнього виведення не враховуються величини, що вважаються порівняно малими. Тому отримані формули фактично є наближеними [8, 9]. Але ці формули можуть використовуватися для практичних розрахунків, якщо відхилення здобутих за ними результатів від дослідних незначні. Тільки дослідним шляхом можливо встановити величину цих відхилень.

Пропонований курс лабораторних робіт присвячений перевірці гіпотез та теорій опору матеріалів.

На лабораторних заняттях студенти знайомляться з методами організації механічних випробувань одного з основних об'єктів опору матеріалів – стрижня. На лабораторних роботах відбувається перевірка теоретично отриманих розрахункових моделей міцності при роботі стрижня на розтяг (стиск), згин, кручення, позацентровий розтяг (стиск), косий згин тощо.

4.1. Лабораторна робота №1. Дослідження осадки циліндричної гвинтової пружини

Мета роботи: експериментально перевірити теоретичну формулу для визначення осадки циліндричної гвинтової пружини.

Обладнання: випробна машина Р–5, циліндрична гвинтова пружина.

Загальні відомості

Циліндричні гвинтові пружини мають широке застосування у техніці, а також використовуються у будівництві. Основною характеристикою роботи циліндричної гвинтової пружини є її поздовжнє переміщення – подовження чи осадка пружини під дією осевої сили F .

Формула для визначення теоретичного $\lambda^{\text{теор}}$ поздовжнього переміщення, тобто осадки, гвинтової пружини має вигляд:

$$\lambda^{\text{теор}} = \frac{8 \cdot \Delta F \cdot D^3 \cdot n}{G \cdot d^4}, \quad (4.1)$$

де $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$ – модуль зсуву матеріалу пружини, $E = 2.2 \cdot 10^5$ МПа – модуль пружності, $\mu = 0.23$ – коефіцієнт Пуассона.

Ця формула враховує тільки крутний момент. Вплив поперечної й поздовжньої сил, згинаючого моменту до уваги не береться. Не враховується також кривина скручуваного стрижня (витка) і нахил витків пружини до осі.

Результати лабораторної роботи дозволяють оцінити вплив використаних

гіпотез і спрощень на точність визначення переміщень пружини, а також придатність теоретичних формул для практичних розрахунків.

Схему випробування пружини зображено на рис. 4.1. Пружина стискується між плитами випробної машини Р-5. Осадка її вимірюється звичайною мірною лінійкою, установленою уздовж осі пружини.

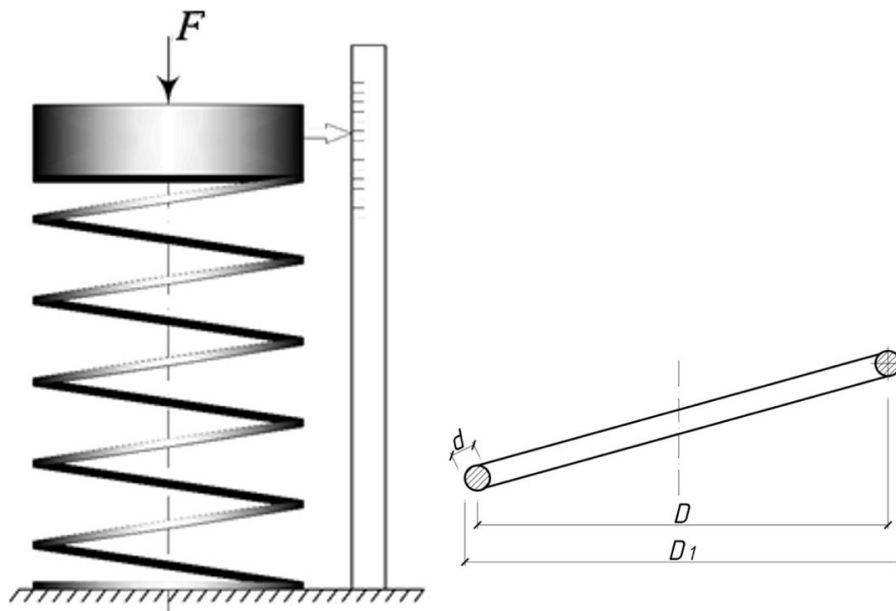


Рис. 4.1. Схема установки для визначення осадки гвинтової циліндричної пружини

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте розміри випробуваної пружини – зовнішній діаметр D_1 , діаметр поперечного перерізу круглого дроту d . Обчисліть середній діаметр витка пружини

$$D = D_1 - d,$$

підрахуйте число робочих витків n пружини.

2. Установіть пружину між плитами випробної машини. Приведіть машину до робочого стану. Для цього завантажте циліндричну гвинтову пружину стискуючою силою $F_0 = 1$ кН.

3. Виміряйте висоту пружини, вважаючи, що навантаження $F = 0$. Збільшуючи навантаження рівними ступенями на величину ΔF , кожного разу вимірюйте висоту пружини $h_{\text{пр}}$. Значення ΔF виберіть таким, щоб можливо було здійснити $k = 5$ завантажень (пропонується $\Delta F = 1$ кН).

4. Результати спостережень занесіть у таблицю 4.1.

5. Обчисліть приріст навантаження та відліків за лінійкою $h_{\text{пр}}$, які за рівних прирістів навантаження ΔF мають бути приблизно однаковими.

6. Обчисліть середній приріст відліку за лінійкою. Він дорівнює усередненій величині осадки $\lambda^{\text{експ}}$ циліндричної гвинтової пружини, яка відповідає приросту навантаження ΔF .

7. Обчисліть теоретичне значення осадки пружини за формулою (4.1).

8. Результати експериментального дослідження гвинтової циліндричної пружини занесіть до таблиці 4.1.

**Таблиця 4.1. Результати експериментального дослідження
гвинтової циліндричної пружини**

№ п/п	Навантаження F , Н	Відлік за лінійкою $h_{\text{пр}}$, мм	Приріст навантаження ΔF , Н	Приріст відліків за лінійкою Δl , мм	Середній приріст відліку $\lambda^{\text{експ}}$, мм
1					$\lambda^{\text{експ}} = \frac{\sum \Delta l}{k} =$
2					
3					
4					
5					
6				$\sum \Delta l =$	

9. Знайдіть розбіжність між експериментальним $\lambda^{\text{експ}}$ та теоретичним $\lambda^{\text{теор}}$ значенням осадки пружини:

$$\delta = \frac{|\lambda^{\text{теор}} - \lambda^{\text{експ}}|}{\lambda^{\text{теор}}} \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

10. За даними таблиці 4.1 побудуйте діаграму стиску в координатах $F - h_{\text{пр}}$.

11. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення напруженому стану кручення.
2. Які внутрішні зусилля, що виникають у перерізах пружини, враховуються при обчисленні її осадки?
3. Для яких практичних розрахунків можуть бути використані результати лабораторної роботи?
4. Чому формула (4.1) для визначення осадки пружини є наближеною? Як оцінити точність цієї формули?
5. Чи можна застосувати результати лабораторних досліджень для наближеного визначення модуля зсуву матеріалу пружини G ?

4.2. Лабораторна робота №2. Визначення переміщень двохопорної балки при згині

Мета роботи: експериментально визначити прогин та кути повороту опорних перерізів двохопорної балки й порівняти їх з теоретичними значеннями, отриманими за методом початкових параметрів.

Обладнання: двохопорна балка, індикатори годинникового типу.

Загальні відомості

Переміщення поперечних перерізів балки під час згину характеризується двома величинами: прогином v і кутом повороту θ . Теоретичні величини прогинів визначаються із диференціального рівняння пружної осі балки:

$$EI_z v'' = M_z,$$

де E – модуль пружності матеріалу балки, I_z – момент інерції перерізу балки відносно осі Z , v – переміщення уздовж осі Y , M_z – згинаючий момент у перерізі відносно Z .

Диференціальне рівняння зігнутої осі балки розв'язується безпосереднім інтегруванням чи за методом початкових параметрів [10].

Використаємо метод початкових параметрів для теоретичного визначення прогину перерізу D і кутів повороту опорних перерізів A та B двохопорної балки, схема якої зображена на рис. 4.2. Для цього будемо розрахункову схему балки: початок координат розміщуємо в крайній лівій точці балки A , вісь Y направляємо догори, а вісь X – уздовж осі балки та обчислюємо опорні реакції.

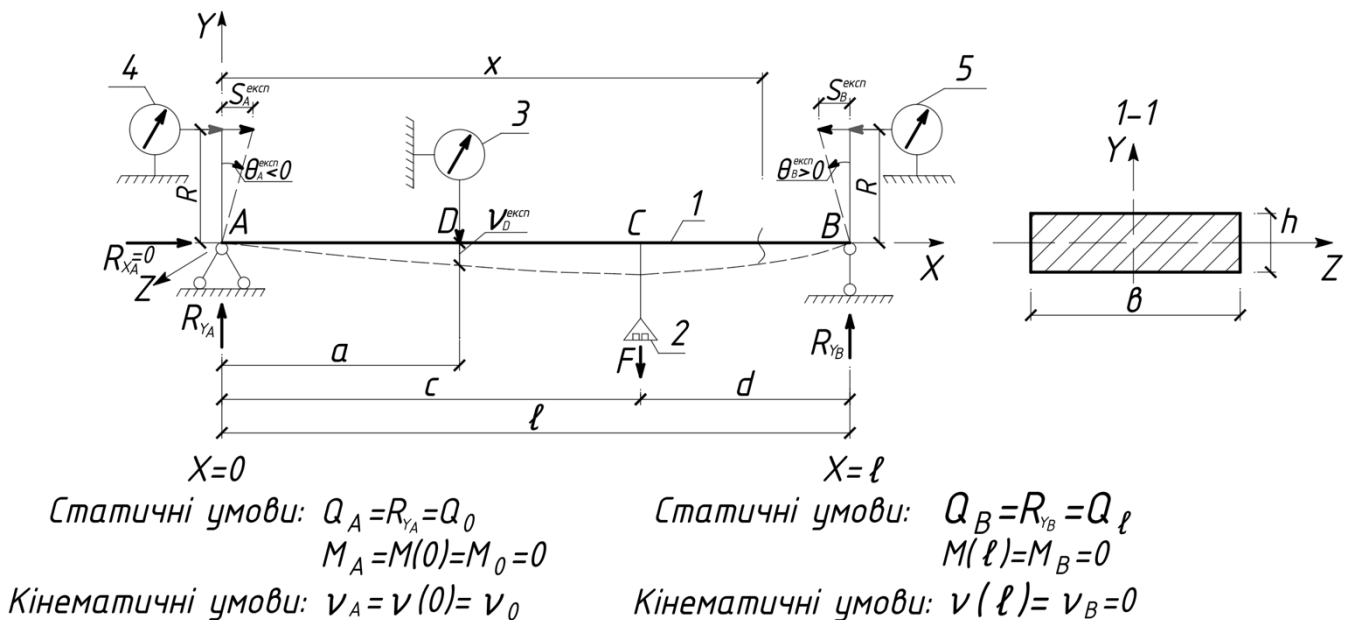


Рис. 4.2. Схема установки для дослідження згину балки на двох опорах

Будуємо рівняння рівноваги:

$$\Sigma F_x = 0; R_{XA} = 0;$$

$$\Sigma M_A(F) = 0; Fc - R_{YB}l = 0; R_{YB} = F \frac{c}{l};$$

$$\Sigma M_B(F) = 0; Fd - R_{YA}l = 0; R_{YA} = F \frac{d}{l}.$$

Перевіряємо правильність обчислення реакцій:

$$\Sigma F_Y = R_{YA} + R_{YB} - F = F \frac{c+d}{l} - F = F - F = 0.$$

Висновок: реакції обчислені вірно.

Обчислюємо момент інерції перерізу балки відносно осі Z :

$$I_z = \frac{bh^3}{12}.$$

За методом початкових параметрів записуємо рівняння кутів повороту та прогинів

для ділянки CB :

$$EI_z \theta(x) = EI_z \theta_0 + R_{YA} \frac{x^2}{2} - F \frac{(x-c)^2}{2},$$

$$EI_z v(x) = EI_z v_0 + EI_z \theta_0 x + \frac{R_{YA} x^3}{6} - F \frac{(x-c)^3}{6}.$$

Визначаємо початкові параметри v_0, θ_0 із умов закріплення балки:

- шарнірно-нерухома опора в точці A : $x=0, v_0 = v_A = 0$;
- шарнірно-рухома опора в точці B : $x=l, v_B = 0$.

Ураховуємо те, що $v_0 = 0$, та підставляємо другу умову в отримане рівняння прогинів методу початкових параметрів:

$$EI_z v(l) = EI_z v_B = EI_z \theta_0 l + R_{YA} \frac{l^3}{6} - F \frac{(l-c)^3}{6}.$$

Після підстановки значення R_{YA} та спрощень отримаємо:

$$EI_z \theta_0 l + F \frac{dl^2}{6} - F \frac{d^3}{6} = 0.$$

Звідки визначаємо $\theta_0 = \theta_A^{\text{теор}}$:

$$\theta_0 = -F \frac{d(l^2 - d^2)}{6lEI_z} = -F \frac{d(l-d)(l+d)}{6lEI_z} = -F \frac{cd(l+d)}{6lEI_z} = \theta_A^{\text{теор}}. \quad (4.3)$$

Кут θ_A вийшов від'ємним. Це означає, що переріз A повертається за годинниковою стрілкою.

З урахуванням θ_0 (4.3) рівняння прогинів для ділянки CB набуде вигляду:

$$EI_z v(x) = -F \frac{cd(l+d)}{6l} x + F \frac{dx^3}{6l} - F \frac{(x-c)^3}{6}. \quad (4.4)$$

Рівняння кутів повороту θ для ділянки CB отримаємо диференціюванням рівняння прогинів (4.4):

$$\frac{d}{dx}(EI_z v) = EI_z \theta(x) = -F \frac{cd(l+d)}{6l} + F \frac{dx^2}{2l} - F \frac{(x-c)^2}{2}. \quad (4.5)$$

Визначаємо кут повороту перерізу $B - \theta_B^{\text{теор}}$. Для цього в (4.5) підставляємо координату точки $B - x = l$. Отримаємо:

$$EI_z \theta_B^{\text{теор}} = EI_z \theta(l) = -F \frac{cd(l+d)}{6l} + F \frac{dl^2}{2l} - F \frac{d^2}{2} = F \frac{cd(l+c)}{6l}.$$

Звідки визначимо $\theta_B^{\text{теор}}$:

$$\theta_B^{\text{теор}} = F \frac{cd(l+c)}{6lEI_z}. \quad (4.6)$$

Знак «+» відповідає повороту перерізу проти руху годинникової стрілки.

Обчислимо теоретичний прогин перерізу $D - v_D^{\text{теор}}$. Підставимо координату точки $D - x = a$ в (4.4) (доданок не враховується, якщо вираз $(a-c) < 0$), отримаємо:

$$EI_z v_D^{\text{теор}} = -F \frac{cd(l+d)}{6l} a + F \frac{da^3}{6l} = F \frac{ad}{6l[a^2 - c(l+d)]} =$$

$$= F \frac{ad}{6l[a^2 - (l-d)(l+d)]} = F \frac{ad}{6l(a^2 - l^2 + d^2)}.$$

Звідки визначимо $v_D^{\text{теор}}$:

$$v_D^{\text{теор}} = -F \frac{ad(l^2 - a^2 - d^2)}{6lEI_z}. \quad (4.7)$$

Якщо $(a - c) > 0$, то

$$\begin{aligned} EI_z v_D^{\text{теор}} &= -F \frac{cd(l+d)}{6l} a + F \frac{da^3}{6l} - F \frac{(a-c)^3}{6} = \\ &= \frac{F}{6l} [ad(-l^2 + d^2 + a^2) - l(a-c)^3]. \end{aligned}$$

Звідки визначимо $v_D^{\text{теор}}$:

$$v_D^{\text{теор}} = -F \frac{[ad(l^2 - a^2 - d^2) + (a-c)^3 l]}{6lEI_z}. \quad (4.8)$$

Від'ємне значення прогину відповідає переміщенню перерізу донизу.

Для проведення експерименту використовується установка, схема якої зображена на рис. 4.2. Вона складається із сталеві балки l , що лежить на опорах A та B . Балка довжиною l з прямокутним поперечним перерізом $b \times h$ встановлюється широкою стороною для отримання значних деформацій за невеликих навантажень. Балка завантажується у перерізі C зосередженою силою через підвіску 2.

Прогин перерізу $D - v_D^{\text{експ}}$ визначається індикатором годинникового типу 3. Для визначення кутів повороту перерізів A та B , використовуються індикатори 4 і 5. Ці індикатори встановлені горизонтально і вимірюють переміщення S_A та S_B вільних кінців кронштейнів, що протилежними кінцями жорстко приєднані до балки і тому повертаються разом з торцевими перерізами балки. Величина кутів повороту визначається за формулами:

$$\theta_A^{\text{експ}} \cong \text{tg} \theta_A^{\text{експ}} = \frac{S_A^{\text{експ}}}{R}; \quad \theta_B^{\text{експ}} \cong \text{tg} \theta_B^{\text{експ}} = \frac{S_B^{\text{експ}}}{R}, \quad (4.9)$$

де $R = 150$ мм – відстань від осі балки до осі індикатора.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Ознайомтесь з установкою, виміряйте всі необхідні розміри балки: b, h, l, a, c, d, R , де b – ширина перерізу балки; h – висота перерізу балки; l – довжина балки; c – координата точки прикладання навантаження; a – координата точки вимірювання лінійного переміщення – точки установки індикатора годинникового типу.

2. Завантажте балку підвіскою 2 без вантажу, установіть в нульове положення стрілки всіх індикаторів.

3. Завантажуйте балку від $F=0$ до $F_{\text{max}}=15$ Н з приростом $\Delta F=2.5$ Н. Визначайте кожного разу величини v_D, S_A, S_B за показами індикаторів. Обчисліть різниці показів індикаторів $\Delta v_D, \Delta S_A, \Delta S_B$ та середні значення різниць показів кожного індикатора годинникового типу:

$$\Delta v_D^{\text{cp}} = \frac{\Sigma v_D}{n}, \quad \Delta S_A^{\text{cp}} = \frac{\Sigma S_A}{n}, \quad \Delta S_B^{\text{cp}} = \frac{\Sigma S_B}{n},$$

де n – кількість обчислених різниць.

4. Результати випробувань двохопорної запишіть у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2. Результати експериментального дослідження переміщень балки

№ п/п	Навантаження F , Н	Індикатор D		Індикатор A		Індикатор B	
		Відлік за шкалою v_D	Різниця Δv_D	Відлік за шкалою S_A	Різниця ΔS_A	Відлік за шкалою S_B	Різниця ΔS_B
1	0.0	0.0		0.0		0.0	
2							
3							
4							
5							
6							
Середнє значення	$\Delta F =$	$\Delta v_D^{\text{cp}} =$		$\Delta S_A^{\text{cp}} =$		$\Delta S_B^{\text{cp}} =$	

5. Обчисліть експериментальні значення переміщень. Для цього помножте середні значення показів індикаторів годинникового типу на ціну поділок індикаторів $k = 0.01$ мм. Отримайте дійсні переміщення перерізів балки за формулами:

$$v_D^{\text{експ}} = k \Delta v_D^{\text{cp}}, \quad S_A^{\text{експ}} = k \Delta S_A^{\text{cp}}, \quad S_B^{\text{експ}} = k \Delta S_B^{\text{cp}}.$$

6. Експериментальні значення кутів повороту опорних перерізів A та B обчисліть за співвідношенням (4.9).

7. Теоретичні значення прогину $v_D^{\text{теор}}$ та кутів повороту $\theta_A^{\text{теор}}$ і $\theta_B^{\text{теор}}$ обчисліть за залежностями (4.3), (4.6), (4.7), (4.8).

8. Порівняйте теоретичні та експериментальні значення переміщень балки в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Таблиця порівняння теоретичних та експериментальних значень переміщень двохопорної балки

Параметри	Дані		Розбіжність, %
	теоретичні	експериментальні	
Прогин v_D , мм			
Кут повороту θ_A , рад			
Кут повороту θ_B , рад			

9. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення напруженому стану згину.
2. Які типи напружень діють у поперечних перерізах балки при згині? Який характер розподілу цих напружень? Запишіть розрахункові формули для напружень при згині.

3. Запишіть загальну формулу для визначення лінійних переміщень перерізів балки за методом початкових параметрів.
4. Як отримати кути повороту перерізів балки за допомогою індикаторів годинникового типу?
5. Які параметри називаються початковими у методі початкових параметрів? Скільки початкових параметрів?
6. Дайте визначення головної системи координат для прямокутного перерізу. Напишіть за якою формулою визначаються головні моменти інерції прямокутника.
7. Для яких розрахунків двохопорних балок потрібно визначати переміщення та кути повороту перерізів балок?
8. Поясніть механічний зміст умов, з яких визначаються початкові параметри v_0 та θ_0 .

4.3. Лабораторна робота 3. Дослідження згину статично невизначуваної двохопорної балки

Мета роботи: експериментально визначити прогин та кут повороту перерізів двохопорної балки і порівняти їхні величини з теоретичними значеннями, отриманими за методом початкових параметрів.

Обладнання: двохопорна статично невизначувана балка, індикатори годинникового типу.

Загальні відомості

Двохопорна балка називається *статично невизначуваною*, якщо обчислити її внутрішні сили неможливо лише за допомогою рівнянь статки (рівноваги) [9]. Необхідна кількість додаткових рівнянь називається ступенем статичної невизначуваності балки.

Розглянемо схему установки для дослідження статично невизначуваної балки на двох опорах (рис. 4.3). Вона складається із сталеві балки I , що лежить на опорах A та B . Опора A – шарнірно-рухома, а B – жорстко затиснена.

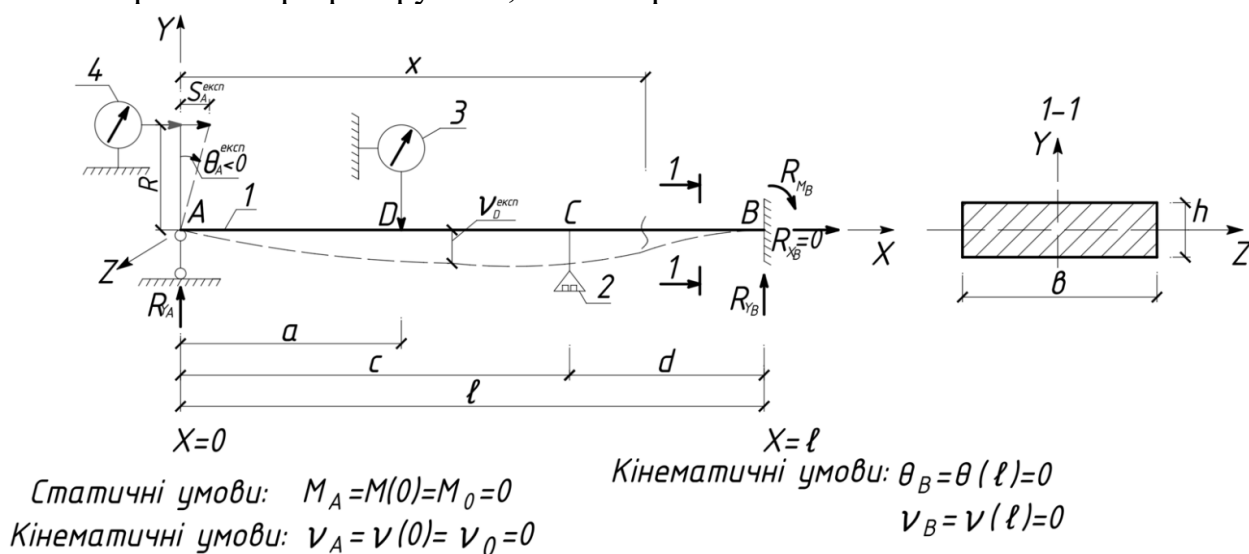


Рис. 4.3. Схема установки для дослідження статично невизначуваної балки на двох опорах

Балка прямокутного поперечного перерізу $b \times h$, має довжину l і встановлена широкою стороною для отримання значних деформацій за невеликих навантажень. Балка завантажується у перерізі C зосередженою силою F через підвіску 2.

Для цієї балки можемо скласти три незалежних рівняння рівноваги. Невідомих реакцій, як видно з рис. 4.3, в опорах балки виникає чотири – $R_{YA}, R_{XB}, R_{YB}, R_{MB}$. Отже, не вистачає одного рівняння для обчислення опорних реакцій, тому така балка називається один раз статично невизначуваною.

Для розрахунку один раз статично невизначуваної двохопорної балки застосуємо метод початкових параметрів. Рівняння методу складемо для крайньої правої ділянки балки CB :

$$\begin{aligned} M(x) &= M_0 + Q_0x - F(x - c); \\ EI_z\theta(x) &= EI_z\theta_0 + M_0x + Q_0\frac{x^2}{2} - F\frac{(x - c)^2}{2}; \\ EI_zv(x) &= EI_zv_0 + EI_z\theta_0x + M_0\frac{x^2}{2} + Q_0\frac{x^3}{6} - F\frac{(x - c)^3}{6}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

У виразах (4.10) $E = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль пружності сталі 20, а I_z момент інерції перерізу балки відносно осі Z :

$$I_z = \frac{bh^3}{12}.$$

Обчислимо початкові параметри – Q_0, M_0, θ_0, v_0 . Для цього використаємо статичні та кінематичні умови на кінцях балки [11]:

- лівий кінець $A - x = 0$: статичні умови – $M_0 = 0$,
кінематичні умови – $v_0 = 0$;
- правий кінець $B - x = l$: кінематичні умови – $\theta_l = 0, v_l = 0$.

Кількість невідомих початкових параметрів і кількість статичних та кінематичних умов співпадає, тож обчислити початкові параметри можливо. Для цього підставимо статичні та кінематичні умови в отримані рівняння методу початкових параметрів.

Крайові умови на лівому кінці балки при $x = 0$ наступні:

$$M(0) = M_0 = 0, v(0) = v_0 = 0.$$

Вони є початковими умовами для рівнянь (4.10), тому підставимо значення M_0 та v_0 у рівняння методу початкових параметрів, отримаємо:

$$\begin{aligned} M(x) &= Q_0x - F(x - c); \\ EI_z\theta(x) &= EI_z\theta_0 + Q_0\frac{x^2}{2} - F\frac{(x - c)^2}{2}; \\ EI_zv(x) &= EI_z\theta_0x + Q_0\frac{x^3}{6} - F\frac{(x - c)^3}{6}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Останні два рівняння (4.11) використаємо для обчислення наступних початкових параметрів – $Q_0, EI_z\theta_0$. Для цього умови на правому кінці балки при $x = l$ – $\theta_l = 0, v_l = 0$ підставимо у рівняння (4.11), будемо мати:

$$EI_z\theta(l) = EI_z\theta_l = EI_z\theta_0 + Q_0\frac{l^2}{2} - F\frac{(l - c)^2}{2} = 0;$$

$$EI_z v(l) = EI_z v_l = EI_z \theta_0 l + Q_0 \frac{l^3}{6} - F \frac{(l-c)^3}{6} = 0.$$

Отримані рівняння розв'яжемо відносно $Q_0, EI_z \theta_0$, будемо мати:

$$Q_0 = F \frac{(2l+c)d^2}{2l^3}; \quad EI_z \theta_0 = -F \frac{cd^2}{4l}.$$

Підставимо початкові параметри $Q_0, EI_z \theta_0$ у рівняння переміщень (4.11), отримаємо:

$$\begin{aligned} EI_z \theta(x) &= -F \frac{cd^2}{4l} + F \frac{(2l+c)d^2}{4l^3} x^2 - F \frac{(x-c)^2}{2}; \\ EI_z v(x) &= -F \frac{cd^2}{4l} x + F \frac{(2l+c)d^2}{12l^3} x^3 - F \frac{(x-c)^3}{6}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

За рівняннями (4.12) обчислимо переміщення в перерізах A та D балки. У точці A ($x = 0$) обчислимо теоретичний кут повороту перерізу $\theta_A^{\text{теор}}$. Усі доданки з множниками $(x-c) < 0$ у рівнянні методу початкових параметрів для кутів повороту (4.12) відкидаються, отримаємо:

$$EI_z \theta(0) = EI_z \theta_A^{\text{теор}} = -F \frac{cd^2}{4l},$$

звідки будемо мати:

$$\theta_A^{\text{теор}} = -F \frac{cd^2}{4lEI_z}. \quad (4.13)$$

Кут $\theta_A^{\text{теор}}$ від'ємний, що означає поворот перерізу A за годинниковою стрілкою.

У точці D визначаємо теоретичне значення прогину балки $v_D^{\text{теор}}$. Розглянемо два випадки розміщення індикатора годинникового типу в точці D ($x = a$). Перший випадок відповідає умові $a > c$, тоді $(a-c) > 0$, а отже у рівнянні прогинів (4.12) зберігаються усі доданки. Будемо мати:

$$EI_z v(a) = -F \frac{cd^2}{4l} a + F \frac{(2l+c)d^2}{12l^3} a^3 - F \frac{(a-c)^3}{6}.$$

Звідки отримаємо:

$$v(a) = v_D^{\text{теор}} = \frac{F}{EI_z} \left[-\frac{cd^2}{4l} a + \frac{(2l+c)d^2}{12l^3} a^3 - \frac{(a-c)^3}{6} \right]. \quad (4.14)$$

Другий випадок відповідає умові $a < c$. У цьому випадку $(a-c) < 0$, тому останній доданок у рівнянні прогину (4.12) не враховується:

$$EI_z v(a) = -F \frac{cd^2}{4l} a + F \frac{(2l+c)d^2}{12l^3} a^3,$$

звідки отримаємо:

$$v(a) = v_D^{\text{теор}} = \frac{F}{EI_z} \left[-\frac{cd^2}{4l} a + \frac{(2l+c)d^2}{12l^3} a^3 \right]. \quad (4.15)$$

Від'ємне значення прогину відповідає переміщенню перерізу донизу.

Експериментальна частина лабораторної роботи виконується на установці, схема якої зображена на рис. 4.3.

Прогин перерізу $D - v_D^{\text{експ}}$ визначається індикатором годинникового типу 3. Для визначення кута повороту перерізу A використовується індикатор 4. Цей індикатор встановлений горизонтально і вимірює переміщення S_A вільного кінця кронштейну, що протилежним кінцем жорстко приєднаний до балки і тому повертається разом з торцевим

перерізом балки. Величина кута повороту визначається за формулою:

$$\theta_A^{\text{експ}} \cong \text{tg} \theta_A^{\text{експ}} = \frac{S_A^{\text{експ}}}{R}, \quad (4.16)$$

де R – відстань від осі балки до осі індикатора.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Ознайомтесь з установкою (рис. 4.3), виміряйте всі необхідні розміри балки: b, h, l, a, c, d, R , де b – ширина перерізу балки; h – висота перерізу балки; l – довжина балки; c – координата точки прикладання навантаження; a – координата точки вимірювання лінійного переміщення, точки установки індикатора годинникового типу.

2. Завантажте балку підвіскою без вантажу, установіть стрілки індикаторів в нульове положення.

3. Завантажуйте балку покроково поперечною силою з приростом $\Delta F = 2.5$ Н до навантаження $F_{\text{max}} = 12.5$ Н, вимірюйте на кожному кроці величини v_D та S_A за показами індикаторів.

4. Результати випробувань занесіть до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Результати експериментального дослідження переміщень статично невизначуваної балки

№ п/п	Навантаження F , Н	Індикатор в точці D		Індикатор в точці A	
		Відлік за шкалою v_D	Різниця Δv_D	Відлік за шкалою S_A	Різниця ΔS_A
1	0.0	0.0		0.0	
2					
3					
4					
5					
6					
Середнє значення	$\Delta F =$	$\Delta v_D^{\text{cp}} =$		$\Delta S_A^{\text{cp}} =$	

5. Для вибраного кроку навантаження ΔF експериментальне значення прогину перерізу D дорівнює $v_D^{\text{експ}} = k \Delta v_D^{\text{cp}}$, де $k = 0.01$ мм – ціна поділки індикатора годинникового типу. Експериментальне значення кута повороту перерізу A обчисліть за формулою (4.16):

$$\theta_A^{\text{експ}} \cong \text{tg} \theta_A^{\text{експ}} = \frac{S_A^{\text{експ}}}{R},$$

де $S_A^{\text{експ}} = k \Delta S_A^{\text{cp}}$.

6. За результатами теоретичного дослідження статично невизначуваної балки за методом початкових параметрів (4.13) і (4.15) визначте розрахункові значення $\theta_A^{\text{теор}}$ і $v_D^{\text{теор}}$.

7. Порівняйте теоретичні та експериментальні значення переміщень в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів дослідження переміщень статично невизначуваної балки

Параметри	Значення		Розбіжність, %
	Теоретичні	Експериментальні	
Прогин ν_D , мм			
Кут повороту θ_A , рад			

8. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. В чому зміст методу початкових параметрів?
2. Які стрижневі системи називаються статично невизначуваними? Як обчислюється ступінь статичної невизначуваності?
3. Як розкривається статична невизначуваність у методі початкових параметрів?
4. Як оцінити жорсткість балки?
5. Якими залежностями пов'язані навантаження, внутрішні сили та переміщення у балці?
6. Для яких розрахунків потрібно обчислювати прогин балки?
7. Як обчислити найбільший прогин балки?

4.4. Лабораторна робота №4. Дослідження косого згину консольної балки

Мета роботи: дослідити косий згин консольної балки, порівняти експериментальні значення прогину та напружень з теоретичними для перевірки достовірності теоретичних результатів.

Обладнання: консольна балка, індикатори годинникового типу, тензометр важільний.

Загальні відомості

Згин консольної балки буде косим у випадку, коли площина дії зовнішніх сил – вантажна площина – не співпадає з головними площинами, але проходить через вісь балки.

Косий згин зручно представляти у вигляді суми двох прямих згинів. Для цього згинаючий момент M розкладається на складові моменти відносно головних осей поперечного перерізу u і v .

Згідно з принципом незалежності дії сил, прогини і напруження при косому згині визначаються геометричним додаванням відповідних складових від дії двох прямих згинів.

У лабораторній роботі використовується експериментальна установка, схема якої зображена на рис. 4.4. Основним елементом установки є консольна балка l . Кінець балки A вільний, а кінець B жорстко затиснений. Поперечний переріз балки – рівнобічний кутик. Вільний кінець завантажується зосередженою силою F , яка

відносно головних площин балки направлена під кутом 45° . Проекції F_u і F_v сили F на головні осі u і v перерізу однакові й дорівнюють $0.707 F$ (рис. 4.4).

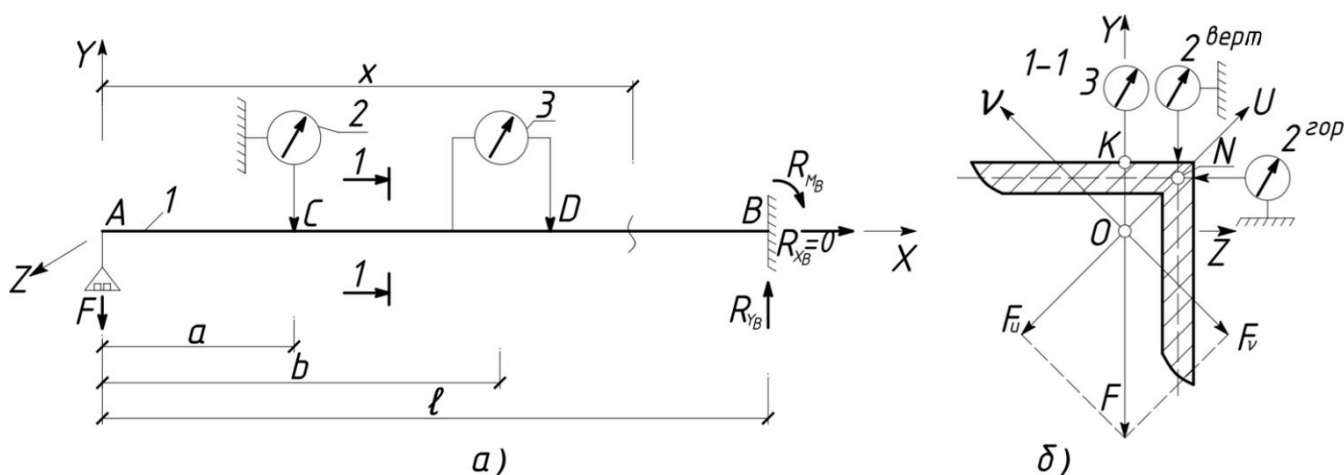


Рис. 4.4 а, б. Схема установки для дослідження косого згину консольної балки:
(а) – схема балки, (б) схема перерізу балки

Розрахункові значення прогинів перерізу C балки в напрямі головних осей u і v визначимо за методом початкових параметрів. Рівняння прогинів методу початкових параметрів для консольної балки по осі u матиме вигляд:

$$\begin{aligned} EI_v \theta(x) &= EI_v \theta_0 + M_0^v x - Q_0^u \frac{x^2}{2}, \\ EI_v u(x) &= EI_v u_0 + EI_v \theta_0 x + M_0^v \frac{x^2}{2} - Q_0^u \frac{x^3}{6}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

тут I_v – момент інерції кутика відносно осі v , M_0^v – згинаючий момент відносно v на початку балки у точці A , Q_0^u – поперечна сила по осі u у точці A .

Обчислимо початкові параметри $u_0, \theta_0, M_0^v, Q_0^u$ за умовами кріплення балки. Статичні початкові параметри M_0^v, Q_0^u визначимо із умови кріплення балки на початку, у точці A . Тут балка має вільний кінець до якого прикладена зосереджена сила F_u , тому поперечна сила Q_0^u дорівнює навантаженню F_u , тобто $Q_0^u = F_u$, а згинаючий момент M_0^v дорівнює нулю – $M_0^v = 0$. Кінематичні початкові параметри u_0, θ_0 визначимо із умови кріплення балки у точці B . Тут балка має жорстке затиснення, тобто при $x = l$ переміщення дорівнюють нулю – $u_l = 0, \theta_l = 0$. Підставимо ці умови у рівняння (4.17), отримаємо:

$$\begin{aligned} EI_v \theta(l) &= EI_v \theta_0 - F_u \frac{l^2}{2} = 0, \\ EI_v u(l) &= EI_v u_0 + EI_v \theta_0 l - F_u \frac{l^3}{6} = 0. \end{aligned}$$

Звідки будемо мати початкові параметри:

$$\theta_0 = F_u \frac{l^2}{2EI_v}, \quad u_0 = -F_u \frac{l^3}{3EI_v}. \quad (4.18)$$

Підставимо початкові параметри (4.18) у рівняння (4.17), отримаємо розрахункові формули для обчислення переміщень:

$$EI_v \theta(x) = F_u \frac{l^2}{2} - F_u \frac{x^2}{2}; \quad \theta(x) = \frac{F_u}{2EI_v} [l^2 - x^2],$$

$$EI_v u(x) = -F_u \frac{l^3}{3} + F_u \frac{l^2}{2} x - F_u \frac{x^3}{6}; \quad u(x) = \frac{F_u}{6EI_v} [-2l^3 + 3l^2 x - x^3]. \quad (4.19)$$

Обчислимо переміщення точки C по осі u . Для цього підставимо абсцису точки $C - x = a$ у (4.19), отримаємо:

$$u(a) = f_{u,C}^{\text{теор}} = \frac{F_u}{6EI_v} [-2l^3 + 3l^2 a - a^3]. \quad (4.20)$$

Рівняння прогинів методу початкових параметрів для консольної балки по осі v матиме вигляд:

$$EI_u \theta(x) = EI_u \theta_0 + M_0^u x + Q_0^v \frac{x^2}{2},$$

$$EI_u v(x) = EI_u v_0 + EI_u \theta_0 x + M_0^u \frac{x^2}{2} + Q_0^v \frac{x^3}{6},$$

тут I_u – момент інерції кутика відносно осі u , M_0^u – згинаючий момент відносно u на початку балки у точці A , Q_0^v – поперечна сила по осі v у точці A .

Подальші перетворення отриманих рівнянь подібні до перетворень, виконаних вище, для рівнянь по осі u . Це дозволяє зразу записати розрахункові формули для обчислення переміщень:

$$\theta(x) = \frac{F_v}{2EI_u} [l^2 - x^2], \quad v(x) = \frac{F_v}{6EI_u} [-2l^3 + 3l^2 x - x^3]. \quad (4.21)$$

Обчислимо переміщення точки C по осі v . Для цього підставимо абсцису точки $C - x = a$ у (4.21), отримаємо:

$$v(a) = f_{v,C}^{\text{теор}} = \frac{F_v}{6EI_u} [-2l^3 + 3l^2 a - a^3]. \quad (4.22)$$

Визначимо розрахунковий повний прогин перерізу $C - f_C^{\text{теор}}$. Складемо геометрично ортогональні проекції повного прогину, отримаємо:

$$f_C^{\text{теор}} = \sqrt{(f_{u,C}^{\text{теор}})^2 + (f_{v,C}^{\text{теор}})^2}. \quad (4.23)$$

Визначимо напрямок повного прогину, для цього обчислимо кут між вектором прогину та віссю u :

$$\text{tg } \varphi = \frac{f_{v,C}^{\text{теор}}}{f_{u,C}^{\text{теор}}}, \quad \text{звідки } \varphi = \text{tg}^{-1} \frac{f_{v,C}^{\text{теор}}}{f_{u,C}^{\text{теор}}}. \quad (4.24)$$

Гострий кут відкладається проти годинникової стрілки від осі u , а від'ємний – за годинниковою стрілкою.

Напруження у довільній точці K перерізу D балки визначається за формулою:

$$\sigma_K^{\text{теор}} = \frac{M_u}{I_u} v_K + \frac{M_v}{I_v} u_K, \quad (4.25)$$

тут $M_u = M_v = F_u \cdot b$ – згинаючі моменти; I_u, I_v – моменти інерції перерізу відносно головних осей; u_K, v_K – координати точки K в головній системі координат u і v .

Експериментальне значення повного прогину перерізу C виражається через вертикальну та горизонтальну його проекції. Ці переміщення вимірюємо

індикаторами годинникового типу $2^{\text{верт}}$ та $2^{\text{гор}}$ (рис. 4.4, б).

При випробуванні на косий згин балки з перерізом у вигляді рівнобокого кутика слід мати на увазі, що центр його згинання не збігається з центром перерізу.

Центр згинання розміщується у точці N перетину осей полиць кутика. Тому для виключення впливу закручування, переміщення $f_{z,C}^{\text{експ}}$ і $f_{y,C}^{\text{експ}}$ потрібно вимірювати для центру згинання кутика. У цій точці встановлюємо два індикатори годинникового типу: перший $2^{\text{гор}}$ уздовж осі Z , а другий $2^{\text{верт}}$ уздовж осі Y (рис. 4.4, б).

Визначимо експериментальний повний прогини $f_C^{\text{експ}}$ перерізу C :

$$f_C^{\text{експ}} = \sqrt{(f_{z,C}^{\text{експ}})^2 + (f_{y,C}^{\text{експ}})^2}. \quad (4.26)$$

Для експериментального визначення напруження $\sigma_{K,\text{ср}}^{\text{експ}}$ у точці K перерізу D використовуємо тензометр 3.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Ознайомтесь з експериментальною установкою для дослідження косоного згину (рис. 4.4), виміряйте параметри балки a, b, l , випишіть із сортаменту необхідні для кутика геометричні характеристики.

2. Установіть індикатори годинникового типу в точці C так, щоб вони вимірювали вертикальне та горизонтальне переміщення в точці N . Точка N є центром згинання, який знаходиться на перетині серединних ліній полиць кутика. Ціна поділок шкали індикаторів – $k = 0.01$ мм. Зафіксуйте стрілки індикаторів у нульовому положенні.

3. Установіть тензометр у точці K перерізу D . Зафіксуйте положення стрілки тензометра. Ціна поділки шкали тензометра – $t = 0.001$ мм, а довжина бази – $l_0 = 20$ мм.

4. Завантажуйте балку покроково з кроком $\Delta F = 20$ Н, $n = 5$ разів від нульового навантаження до $F_{\text{max}} = 100$ Н, вимірюйте на кожному кроці вертикальне і горизонтальне переміщення перерізу C у точці N та фіксуйте покази тензометра D . Результати випробування занесіть до таблиці 4.6.

5. В таблиці обчисліть експериментальні значення прогинів $f_{z,C}^{\text{експ}}, f_{y,C}^{\text{експ}}$ у точці N перерізу C та напруження $\sigma_{K,\text{ср}}^{\text{експ}}$ у точці K перерізу D за формулами:

$$f_{z,C}^{\text{експ}} = k \Delta f_z^{\text{ср}}, \quad f_{y,C}^{\text{експ}} = k \Delta f_y^{\text{ср}}, \quad \sigma_K^{\text{експ}} = t \Delta l^{\text{ср}}.$$

6. Підрахуйте повний, експериментально визначений, прогин $f_C^{\text{експ}}$ перерізу C за формулою (4.26).

7. За формулами (4.20) та (4.22) визначте теоретичні прогини перерізу C у напрямку головних осей.

8. За формулою (4.23) визначте теоретичне значення повного прогину перерізу C .

9. За формулою (4.25) обчисліть теоретичне значення напруження у точці K перерізу D .

10. Порівняйте теоретичні та експериментальні значення прогинів і напружень

в таблиці 4.7.

Таблиця 4.6. Результати експериментального дослідження косого згину консольної балки

№ п/п	Навантаження F, H	Індикатори в точці N перерізу C				Тензометр в точці K перерізу D	
		Відлік за шкалою горизонтального індикатора	Різниця Δf_z	Відлік за шкалою вертикального індикатора	Різниця Δf_y	Відлік за шкалою тензометра	Різниця Δl
1	0	0.0		0.0		0.0	
2	20						
3	40						
4	60						
5	80						
6	100						
Середнє значення	$\Delta F = 20 \text{ H}$	$\Delta f_z^{\text{cp}} = \frac{\Delta f_z}{n} =$		$\Delta f_y^{\text{cp}} = \frac{\Delta f_y}{n} =$		$\Delta l^{\text{cp}} = \frac{\Delta l}{n} =$	

Таблиця 4.7. Порівняння експериментальних та теоретичних результатів досліджень косого згину консольної балки

Навантаження $F, \text{Н}$	Переміщення точки N перерізу C , мм						Розбіжність, %	Напруження, МПа		Розбіжність, %
	Експериментальні			Теоретичні				$\sigma_{K,\text{ср}}^{\text{експ}}$	$\sigma_K^{\text{теор}}$	
	$f_{z,C}^{\text{експ}}$	$f_{y,C}^{\text{експ}}$	$f_C^{\text{експ}}$	$f_{u,C}^{\text{теор}}$	$f_{v,C}^{\text{теор}}$	$f_C^{\text{теор}}$				

11. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення складному напруженому стану косого згину.
2. Які площини балки називаються головними?
3. Які кути складають головні осі u і v рівнобічного кутика з його сторонами?
4. Поясніть чому сили F_u та F_v у сумі дають значення F ?
5. Як обчислюються моменти M_v , M_u у точці D ?
6. Які зміни у формулі для $\sigma_K^{\text{роз}}$ треба зробити, щоб точка K змінила своє

розташування симетрично відносно осі u ?

7. Яка орієнтація балки даного типу перерізу є найбільш раціональною?

4.5. Лабораторна робота № 5. Дослідження позацентрового розтягу прямого стрижня

Мета роботи: експериментально перевірити розрахункові формули опору матеріалів для позацентрового розтягу стрижня. Для цього пропонується теоретично обчислити та експериментально отримати значення нормальних напружень в позацентрово розтягнутому прямому стрижні.

Обладнання: випробна машина Р-5, тензометри важільні, зразок стрижня.

Загальні відомості

За позацентрового розтягу точка прикладення рівнодійної зовнішніх сил не співпадає з віссю стрижня, як при звичайному розтягу. Рівнодійна зміщена відносно осі X і паралельна до неї. Відстань від рівнодійної до осі стрижня називається ексцентриситетом – e . Нормальні напруження у цьому випадку розподілені по поперечному перерізу стрижня нерівномірно – вони змінюються за законом площини, нахиленої до поперечного перерізу:

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{F \cdot y_F}{I_z} \cdot y + \frac{F \cdot z_F}{I_y} \cdot z, \quad (4.27)$$

де y_F, z_F – координати прикладення рівнодійної зовнішніх сил F у головній системі координат, y, z – координати довільної точки перерізу в головних осях, A – площа поперечного перерізу стрижня, I_z, I_y – моменти інерції перерізу стрижня.

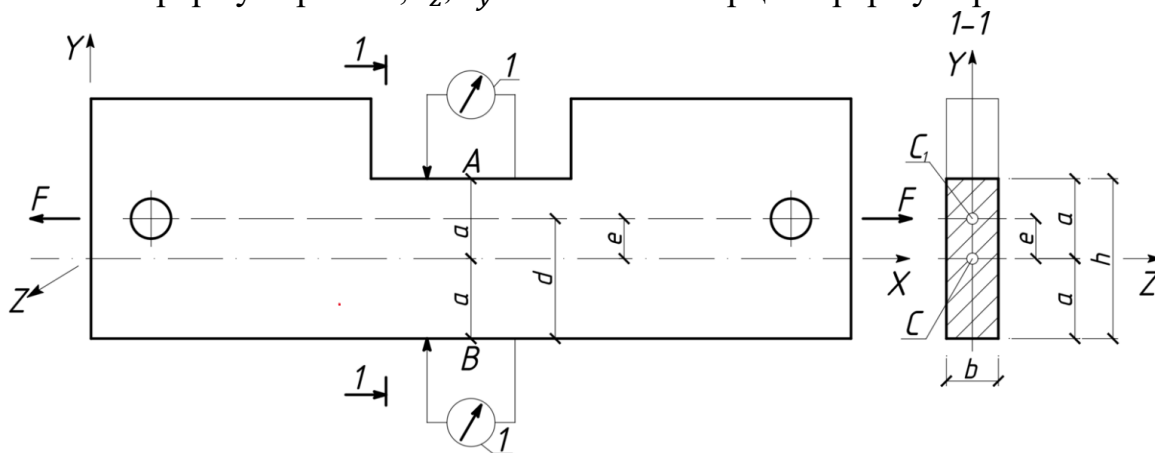


Рис. 4.5. Схема установки для випробування стрижня на позацентровий розтяг

Схема установки для випробування стрижня на позацентровий розтяг приведена на рис. 4.5. Виріз у стрижні спричинює його позацентровий розтяг у середній частині довжини. Сила F паралельна осі X стрижня і має з нею ексцентриситет e . Для такого випадку навантаження формула (4.27) спрощується до вигляду:

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{F \cdot e}{I_z} \cdot y. \quad (4.28)$$

У цій формулі площа перерізу – $A = b \cdot h$, ордината установки тензومتра – $y = \pm \frac{h}{2}$, момент інерції перерізу відносно осі z – $I_z = \frac{bh^3}{12}$.

У лабораторній роботі за формулою (4.28) визначаються напруження в крайніх шарах A та B поперечного перерізу стрижня. При цьому потрібно враховувати знаки ординати у точок A та B ($y_A > 0$, $y_B < 0$).

Експериментально напруження в шарах A та B визначається за допомогою важільних тензометрів I . Тензометри встановлюються навпроти один одного.

Послідовність виконання роботи

1. Накресліть ескіз зразка стрижня для позацентрового розтягу, виміряйте його розміри – a, d, b, h , обчисліть ексцентриситет прикладання навантаження – $e = d - a$. Визначте площу A і момент інерції I_z поперечного перерізу стрижня. Знайдіть граничне навантаження зони пропорційності за формулою:

$$F_{\text{пц}} = \sigma_{\text{пц}} \cdot A, \quad (4.29)$$

де $\sigma_{\text{пц}}$ – нормальне напруження пропорційності матеріалу зразка (Ст 20) (додаток 6).

2. Виберіть крок збільшення навантаження $\Delta F = \frac{F_{\text{пц}}}{10}$, за якого у зоні пропорційності можна зробити 5–6 відліків, починаючи з зусилля $F_0 = \Delta F$.

3. Підготуйте машину Р–5, зразок стрижня і тензометри до проведення випробування. На етапі вибору люфтів у з'єднаннях ланок машини (навантаження до F_0) перевірте правильність установки і роботи тензометрів – рух стрілок, відповідність вільної зони шкали напрямку руху стрілок, визначте ціну поділки шкали кожного приладу.

4. Досягши початкового навантаження F_0 , запишіть покази тензометрів (початковий відлік) в таблицю 4.8.

Таблиця 4.8. Результати експериментального дослідження позацентрового розтягу стрижня

№ п/п	Навантаження F , Н	Тензометр А		Тензометр В	
		Відлік за шкалою	Різниця відліків, ΔD_A	Відлік за шкалою	Різниця відліків, ΔD_B
1	0.0	0.0		0.0	
2					
3					
4					
5					
6					
Середнє значення	$\Delta F =$	$\Delta D_A^{\text{cp}} =$		$\Delta D_B^{\text{cp}} =$	

5. Збільшуючи покроково навантаження (кожного разу на величину ΔF), записуйте покази тензометрів в таблицю 4.8.

6. Зменшуючи покроково навантаження (кожного разу на величину ΔF) перевірте правильність показів тензометрів. Якщо покази тензометрів відрізняються, або при повному розвантаженні стрілки тензометрів не повертаються в нульове положення, експеримент повторіть.

7. Обчисліть середнє подовження поверхонь в точках A та B , що відповідає кроку навантаження ΔF :

$$\Delta l_A^{\text{cp}} = k \cdot \Delta D_A^{\text{cp}}, \quad \Delta l_B^{\text{cp}} = k \cdot \Delta D_B^{\text{cp}}, \quad (4.30)$$

де k – ціна поділки шкали тензометра.

8. Визначте середню відносну деформацію поверхонь прямого стрижня в точках A та B :

$$\varepsilon_A^{\text{cp}} = \frac{\Delta l_A^{\text{cp}}}{l_0}, \quad \varepsilon_B^{\text{cp}} = \frac{\Delta l_B^{\text{cp}}}{l_0}, \quad (4.31)$$

де $l_0 = 20$ мм – база тензометра.

9. Використовуючи співвідношення закону Гука для стрижня, визначте напруження в точках A та B перерізу:

$$\sigma_A^{\text{експ}} = E \cdot \varepsilon_A^{\text{cp}}, \quad \sigma_B^{\text{експ}} = E \cdot \varepsilon_B^{\text{cp}}, \quad (4.32)$$

де E – модуль пружності першого роду для Ст20 (додаток 4).

10. За формулою (4.28) обчисліть теоретичні значення нормальних напружень у точках A та B перерізу стрижня – $\sigma_A^{\text{теор}}, \sigma_B^{\text{теор}}$.

11. Порівняйте теоретичні й експериментальні значення нормальних напружень в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9. Порівняння результатів експериментальних та теоретичних досліджень

Нормальні напруження	Значення нормальних напружень, МПа		Розбіжність, %
	Теоретичні	Експериментальні	
σ_A			
σ_B			

12. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення складному напруженому стану позacentрового розтягу (стиску).
2. Що називають ядром перерізу і які його властивості?
3. Що називається ексцентриситетом e прикладання сили? Як його визначити?
4. Як визначити граничне навантаження зони пропорційності? Навіщо це потрібно?
5. Як змінюється несуча здатність стрижня при виникненні позacentрового стиску?
6. Чому в експерименті використовуються два тензометри одночасно?
7. Наведіть приклади позacentрового розтягу (стиску) стрижнів у будівництві.

4.6 Лабораторна робота № 6. Коливання пружної системи

Мета роботи: експериментально визначити період власних коливань гвинтової пружини з вантажем та порівняти його з розрахунковим значенням.

Обладнання: гнучка гвинтова пружина незначної жорсткості, вантаж, хронометр, штангенциркуль, лінійка.

Загальні відомості

Коливання пружної системи можуть бути власними чи вимушеними. Власні коливання виникають у пружній системі у випадку одноразової короткочасної дії зовнішньої сили.

Для експериментального визначення періоду власних коливань пружної системи з одним степенем свободи використовується гнучка гвинтова пружина незначної жорсткості. Частота коливань вантажу, підвішеного до такої пружини, настільки мала, що дозволяє підраховувати кількість коливань системи без допомоги спеціальних приладів.

Схема установки для дослідження вільних коливань пружини зображена на рис. 4.6.

Теоретичне значення $T^{\text{теор}}$ періоду коливань вантажу 2, підвішеного до пружини 1, визначається за формулою:

$$T^{\text{теор}} = 2\pi \sqrt{\frac{\delta^{\text{теор}}}{g}}, \quad (4.33)$$

де $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; $\delta^{\text{теор}}$ – осадка пружної системи, що тримає статично прикладений вантаж.

Осадка гвинтової пружини $\delta^{\text{теор}}$ визначається за формулою:

$$\delta^{\text{теор}} = \frac{8QD^3n}{Gd^4}, \quad (4.34)$$

де n – число витків пружини, G – модуль зсуву матеріалу пружини, D – розрахунковий діаметр гвинтової пружини, d – діаметр дроту пружини, Q – навантаження.

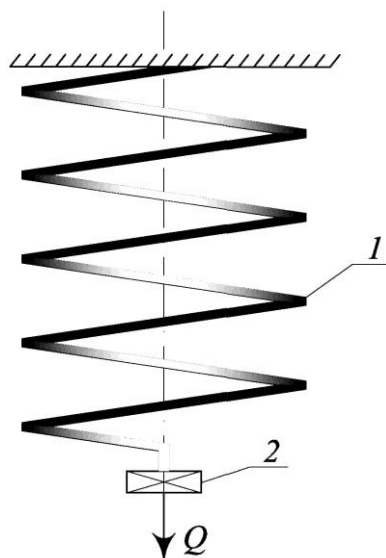


Рис. 4.6. Схема установки для дослідження вільних коливань пружини

Розрахунковий діаметр пружини (рис. 4.7) визначається за формулою:

$$D = D_1 - d, \quad (4.35)$$

де D_1 – зовнішній діаметр гвинтової пружини.

Вплив маси пружини на період коливань не враховується.

Експериментальне значення $T^{\text{експ}}$ періоду коливань пружини визначається наступним чином:

$$T^{\text{експ}} = \frac{t}{k^{\text{експ}}}, \quad (4.36)$$

де t – час, за який система зробила $k^{\text{експ}}$ коливань.

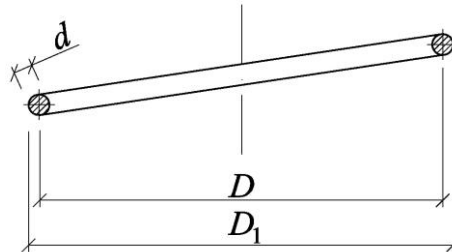


Рис. 4.7. Геометричні параметри пружини

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте діаметри пружини D_1 та d (рис. 4.7), обчисліть діаметр D за формулою (4.35), підрахуйте число витків пружини n . Запишіть модуль зсуву матеріалу пружини $G = 9 \cdot 10^4$ МПа.

2. Підвісьте пружину одним кінцем та виміряйте лінійкою її довжину l . До другого її кінця причепіть вантаж Q і виміряйте довжину деформованої пружини l_1 . Визначте осадку пружини $\delta_{\text{експ}} = l_1 - l$.

3. Вантаж відтягніть уздовж осі пружини від положення рівноваги і раптово відпустіть – він починає коливально рухатись по вертикалі. Порахуйте кількість коливань за одну хвилину, фіксуючи час за хронометром. Дослід повторіть кілька разів і виведіть середній результат.

4. Обчисліть експериментальне значення періоду коливань за формулою (4.36).

5. За формулою (4.34) визначте розрахункову статичну осадку пружини від дії вантажу Q .

6. Обчисліть теоретичне значення періоду коливань за формулою (4.33).

7. Визначте розбіжність між значеннями теоретичного й експериментального періоду коливань.

8. Визначте розбіжність між експериментальним та теоретичним значеннями осадки пружини.

9. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Які коливання називаються власними, а які вимушеними?
2. Що називається періодом коливань T ? Від чого він залежить?
3. За якою формулою розраховується осадка гвинтової пружини?
4. Чому період власних коливань пружини визначається з вантажем?

4.7. Лабораторна робота №7. Випробування сталевго зразка на кручення та визначення модуля зсуву

Мета роботи: дослідити та перевірити пропорційну залежність між навантаженням та кутом закручування при крученні сталевго зразка у межах дії закону Гука, експериментально визначити модуль пружності другого роду $G^{\text{експ}}$ (модуль зсуву) та порівняти його значення із розрахунковим $G^{\text{теор}}$.

Обладнання: машина КМ–50, сталевий зразок.

Загальні відомості

В будівельній та інженерній практиці деформація кручення часто зустрічається в елементах просторових конструкцій, витках пружин, валах тощо. Розрахунок на міцність та жорсткість при крученні потребує визначення фізико-механічних властивостей матеріалів, що використовуються. Для цього проводяться випробування на кручення зразків у вигляді довгих стрижнів.

Кручення стрижнів відбувається в умовах пропорційної залежності між навантаженням – крутним моментом M_k , та переміщенням – кутом закручування φ . При цьому крутний момент змінюється від нуля до деякого значення, що відповідає значенню дотичного напруження пропорційності $\tau_{\text{пл}}$. У цьому випадку кут закручування зразка визначається за законом Гука:

$$\varphi = \frac{M_k \cdot l}{G \cdot J_p}, \quad (4.37)$$

де l – довжина стрижня, J_p – полярний момент інерції перерізу стрижня, G – модуль зсуву матеріалу стрижня.

При подальшому збільшенні навантаження пропорційна залежність (4.37) між навантаженням та переміщенням порушується, спостерігається швидке збільшення кута закручування при відносно повільному збільшенні крутного моменту (рис. 4.8, а).

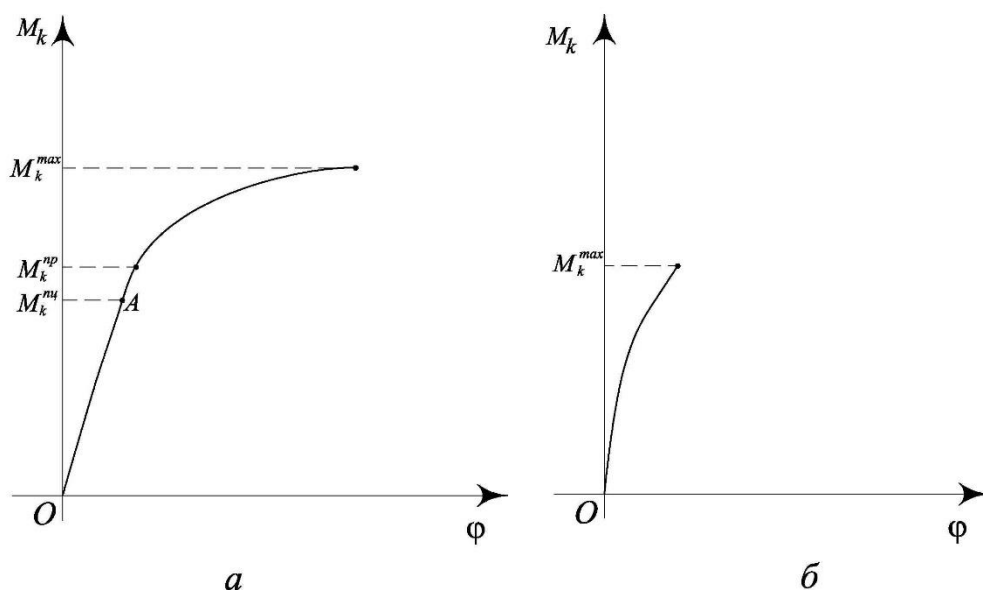


Рис 4.8 а, б. Діаграми кручення стрижнів зі сталі (а) та чавуну (б)

Руйнування сталевих зразків відбувається по перерізах, перпендикулярних до осі, без утворення шийки від максимальних дотичних напружень. Чавунні зразки руйнуються від нормальних напружень розтягу по площинах під кутом 45° до осі. Отже руйнування при крученні відбувається внаслідок зсуву або розтягу (відриву). При крученні чавунного зразка пропорційна залежність між крутним моментом та кутом закручування не спостерігається (рис. 4.8, б). Зразок руйнується від дії максимальних нормальних напружень.

Дослідження діаграм $M_k - \varphi$ дозволяє визначити такі механічні характеристики: для сталі:

- границю пропорційності $\tau_{\text{пц}}$:

$$\tau_{\text{пц}} = \frac{M_k^{\text{пц}}}{W_\rho}; \quad (4.38)$$

- максимальне напруження τ_{max} :

$$\tau_{\text{max}} = \frac{M_k^{\text{max}}}{W_\rho}; \quad (4.39)$$

для чавуну:

- максимальне напруження τ_{max} :

$$\tau_{\text{max}} = \frac{M_k^{\text{max}}}{W_\rho}, \quad (4.40)$$

де W_ρ – полярний момент інерції перерізу стрижня.

Для перевірки справедливості закону Гука крутний момент збільшується рівними кроками, кут закручування при цьому має однакові прирости.

Експериментальне значення модуля пружності при зсуві $G^{\text{експ}}$ визначається із (4.37) за формулою:

$$G^{\text{експ}} = \frac{\Delta M_k^{\text{cp}} \cdot l_0}{\Delta \varphi_{\text{cp}} \cdot J_\rho}, \quad (4.41)$$

де ΔM_k^{cp} – середнє значення приросту крутного моменту; $\Delta \varphi_{\text{cp}}$ – середнє значення приросту кута закручування; l_0 – довжина робочої частини зразка.

Для випробування металів на кручення використовуються зразки у вигляді круглих стрижнів. Діаметр перерізу d_0 робочої частини стрижня дорівнює 20 мм, а довжина l_0 робочої частини – 400 мм.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Величину крутного моменту, що відповідає границі пружності $M_k^{\text{пр}}$ можна визначити експериментально чи теоретично. Для експериментального визначення $M_k^{\text{пр}}$ закріпіть зразок у захватах машини КМ–50. Плавню та рівномірно завантажуйте зразок крутним моментом до значень, для яких лінія діаграми на самописці почне викривлюватися. На рис. 4.8, а цьому моменту відповідає точка А. У цій точці величина крутного моменту приблизно відповідає границі пружності $M_k^{\text{пр}}$.

Теоретично границю пружності $M_k^{\text{пр}}$ обчисліть за формулою:

$$M_k^{\text{пр}} = [\tau] W_\rho,$$

де $[\tau]$ – допустиме дотичне напруження для Ст. 20 (додаток 7); $w_p = \frac{\pi d_0^3}{16}$ – полярний момент опору при крученні.

2. Розвантажте зразок до значення $M_k = 0$, пристрій для вимірювання кутів закручування поставте в нульове положення.

Максимальне значення навантаження $\max M_k$ вибирається таким, для якого залишкові переміщення не виникають. Для виконання цієї умови, потрібно покласти:

$$\max M_k = 0.8 \cdot M_k^{\text{пр}}. \quad (4.42)$$

3. Визначте величину приросту навантаження:

$$\Delta M_k = \frac{\max M_k}{5}. \quad (4.43)$$

4. Плавнo завантажуйте зразок кроками ΔM_k , при цьому вимірюйте прирости кута закручування.

5. Значення крутних моментів та кутів закручування запишіть у таблицю 4.10.

Таблиця 4.10. Результати вимірювання кута закручування

Навантаження M_k , Н·м	Приріст навантаження ΔM_k , Н·м	Кут закручування φ , град.	Різниця кутів закручування $\Delta\varphi$, град.
0			
Середнє значення	$\Delta M_k^{\text{ср}} =$		$\Delta\varphi^{\text{ср}} =$

6. За даними вимірювань (табл. 4.10) побудуйте графік $M_k - \varphi$ та визначте модуль зсуву за формулою (4.41).

$$G_{\text{експ}} = \frac{\Delta M_k^{\text{ср}} \cdot l_0}{\Delta\varphi_{\text{рад}}^{\text{ср}} \cdot J_p}, \quad (4.44)$$

де $\Delta\varphi_{\text{рад}}^{\text{ср}}$ – в радіанах, визначається як добуток $\Delta\varphi^{\text{ср}}$ в градусах на множник $\frac{\pi}{180^\circ}$,

$J_p = \frac{\pi d_0^4}{32}$ – полярний момент інерції круглого перерізу.

7. Експериментальне значення модуля зсуву для Ст20 порівняйте з розрахунковим, отриманим за формулою:

$$G^{\text{теор}} = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad (4.45)$$

де E – модуль поздовжньої пружності Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона (додаток 4).

8. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення напруженому стану кручення.
2. Яка залежність між навантаженням та крутним моментом визначається законом Гука? Запишіть формулу цієї залежності.
3. Як руйнуються сталеві та чавунні зразки при крученні? Поясніть різний характер їхнього руйнування.
4. Накресліть та поясніть діаграми кручення сталевих та чавунних зразків. Покажіть характерні точки.
5. Як визначається модуль зсуву, які властивості матеріалу він характеризує?
6. Як визначається найбільше навантаження $\max M_k$, граничне для виконання закону Гука?

Література

1. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів: підручник / за ред. Г.С. Писаренка. Київ: Вища школа, 2004. 655 с.
2. ДСТУ ГОСТ 2.104:2006. Єдина система конструкторської документації. Основні написи. [Чинний від 2007-01-07]. Вид. офіц. Київ: Держспоживчстандарт України, 2007. 24 с.
3. Андрушков В. І., Гуртовий О. Г., Тинчук С. О. Опір матеріалів. Лабораторні роботи : навч. посіб. [Електронне видання]. Рівне : НУВГП, 2022. 130 с.
4. Мильніков О. В. Опір матеріалів: конспект лекцій. Тернопіль: Видавництво ТНТУ, 2010. 257 с.
5. Шваб'юк В. І. Опір матеріалів: підручник для студ. інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів. Київ: Знання, 2016. 407 с.
6. Шкельов Л. Т., Станкевич А. М., Пошивач Д. В. Опір матеріалів: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Київ: ЗАТ «Віпол», 2011. 456 с.
7. Григор'єва Л. О., Левківський Д.В., Кошевий О.П. Опір матеріалів з основами теорії пружності: курс лекцій. Київ: Видавництво Ліра-К, 2021. 270 с.
8. Філатов Г. В. Опір матеріалів в задачах і прикладах. Розрахунок статично визначуваних систем. Кн. 1: навч. посіб. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2019. 360 с.
9. Іваненко П. О., Григор'єва Л. О., Кошевий О.П. та ін. Збірник задач з опору матеріалів: навч. посіб. для студентів ВНЗ III-IV рівнів акредитації, які навчаються за галуззю знань «Будівництво» та «Прикладна механіка» / за ред. П. О. Іваненка. Київ: Ліра-К, 2021. 394 с.
10. Hibbeler R.C. Mechanics of materials. NJ: Pearson, 2015. 900 p.
11. Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Юрченко С.В. Побудова епюр внутрішніх сил в балках та рамах: навчально-методичні вказівки. Черкаси: ЧДТУ, 2013. 68 с.
12. Людмила Григор'єва. Розв'язуємо задачі з опору матеріалів по програмі КНУБА. URL: https://www.youtube.com/channel/UC4ptzya-AQGAFDj18iOB_rA

Додатки

Додаток 1. Журнал звітів №1

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет технологій, будівництва та раціонального природокористування
Кафедра промислового та цивільного будівництва

ЖУРНАЛ ЗВІТІВ №1

з лабораторних робіт

дисципліни «Опір матеріалів»

здобувача вищої освіти освітнього ступеня бакалавра
спеціальності G19 «Будівництво та цивільна інженерія», денної форми навчання
студента групи _____

Лабораторна робота № 1

Випробування сталевго зразка на розтяг

Мета роботи: експериментально визначити характеристики міцності й пластичності сталі при випробуванні сталевго зразка на розтяг.

Обладнання: розривна машина Р–5, сталевий зразок.

Загальні відомості

1. Опишіть сталевий зразок. Накресліть схему зразка.

2. Опишіть конструкцію та принцип роботи випробної машини Р–5. Накресліть схему машини.

3. Накресліть та опишіть діаграму розтягу сталевого зразка в координатах $F - \Delta l$ (абсолютна діаграма).

4. Накресліть та опишіть діаграму розтягу сталевго зразка в координатах $\sigma - \epsilon$ (умовна діаграма). Як отримується умовна діаграма?

5. Дайте визначення характеристикам міцності та пластичності сталі, чому вони дорівнюють?

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте штангенциркулем діаметр робочої частини зразка d_0 , відкладіть на штангенциркулі розрахункову довжину $l_0 = 10d_0$ зразка та виділіть її поперечними рисками в середній частині зразка. Розбийте розрахункову довжину поперечними рисками з інтервалом d_0 . Обчисліть площу поперечного перерізу зразка:

$$d_0 = \quad ; l_0 = 10d_0 = \quad ; A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} = \quad .$$

2. Накресліть ескіз зразка до завантаження:

3. Визначте очікуване максимальне навантаження для розтягу сталевого зразка за формулою:

$$F = kA_0[\sigma] =$$

де $k = 1.2-1.5$ – коефіцієнт запасу; $[\sigma]$ – допустиме напруження розтягу (стиску) Ст20 (додаток 6).

4. Установіть на машині Р-5 відповідну шкалу завантажування, а на маятнику – необхідну вагу.

5. Закріпіть зразок у захватах випробної машини.

6. Підготуйте записуючий пристрій.

7. Увімкніть привід машини і спостерігайте за процесом розтягу зразка. За шкалою пристрою зафіксуйте навантаження $F_{пл}$ (у цю мить деформації зростають, а навантаження не змінюється), максимальне – тимчасове навантаження $F_{max} = F_{TM}$, в цю мить стрілка силовимірювача покаже найбільше значення сили розтягу, а на зразку утвориться стоншення – «шийка») і навантаження у момент розриву F_p :

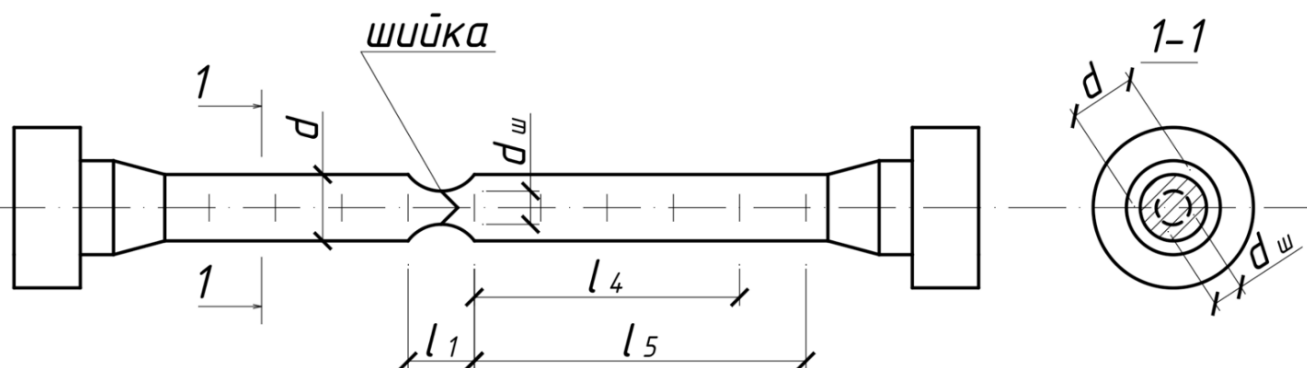
$$F_{пл} = \quad F_{max} = \quad F_{TM} = \quad F_p = \quad$$

8. Після розриву зразка вимкніть привід машини і звільніть із захватів частини розірваного зразка.

9. Склавши частини розірваного зразка, виміряйте відстань між крайніми поперечними рисками – деформовану довжину l_k і діаметр «шийки» $d_{ш}$ та обчисліть площу поперечного перерізу зразка у зоні «шийки»:

$$l_k = \quad d_{ш} = \quad A_{ш} = \frac{\pi d_{ш}^2}{4} = \quad$$

10. Якщо зразок розірвався в крайніх третинах розрахункової довжини, а не в середній третині, то l_k підраховується так: вимірюється довжина ділянки l_1 , на якій відбулося руйнування, довжина чотирьох ділянок l_4 довгої частини зразка і довжина п'яти ділянок l_5 довгої частини зразка, суміжних з ділянкою розриву; результати вимірів підсумовуються: $l_k = l_1 + l_4 + l_5$.



Креслення розірваного сталевго зразка

11. Якщо розрив відбувся за межами розрахункової довжини, то експеримент вважається невдалим.

12. Зробіть ескіз зразка після розриву.

13. Зніміть з барабану діаграму і виконайте обробку результатів випробування:

- на діаграмі розтягу вісь абсцис (вісь подовжень) сумістіть з нульовою лінією;
- продовжуючи вниз початкову нахилenu ділянку діаграми до осі абсцис, знайдіть початкову точку O діаграми – початок системи координат;
- покажіть на діаграмі характерні точки: точку початку ділянки плинності – B , її кінця – C ; точку найбільшого зусилля – D , точку, що відповідає моменту розриву K ;
- провівши через точку K пряму, паралельну відрізку OA , знайдіть на осі відрізок, який відповідає залишковому подовженню зразка $\Delta l_{\text{зал}}$;
- використовуючи обміри, виконані у п.7, установіть масштаб горизонтальної осі діаграми;
- за ординатою F_{max} діаграми та її величиною, що знята силовимірювального пристрою, установіть масштаб вертикальної осі. За двома іншими вимірами п.5 – $F_{\text{пл}}$ та F_p – перевірте правильність роботи записуючого пристрою машини.

14. Обчисліть характеристики міцності матеріалу зразка:

- границю пропорційності:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0} =$$

- границю пружності:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{пр}}}{A_0} =$$

- границю плинності:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{F_{\text{пл}}}{A_0} =$$

- границю міцності:

$$\sigma_{\text{тм}} = \frac{F_{\text{max}}}{A_0} =$$

– умовне напруження розриву:

$$\sigma_p^{\text{умовне}} = \frac{F_p}{A_0} =$$

– дійсне напруження розриву:

$$\sigma_p^{\text{дійсне}} = \frac{F_p}{A_{\text{ш}}} =$$

15. Обчисліть характеристики пластичності матеріалу зразка:

– відносне подовження:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\% =$$

– відносне звуження площі поперечного перерізу:

$$\psi = \frac{A_0 - A_{\text{ш}}}{A_0} 100\% =$$

16. За обчисленими характеристиками – відносним подовженням та напруженнями в характерних точках – побудуйте умовну діаграму розтягу в координатах $\sigma - \epsilon$ (отриману та побудовану діаграми вкласти до звіту).

17. За таблицею механічних властивостей (додаток 3) установіть марку сталі, з якої виготовлений зразок:

18. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи:

Дайте відповіді на контрольні запитання:

1. Дайте визначення напруженому стану розтягу (стиску):

2. Опишіть основні технічні функції машини Р-5:

– як створюється зусилля розтягу (стиску):

– як вимірюється навантаження на зразок:

– як вимірюється подовження зразка:

3. Охарактеризуйте властивості діаграми розтягу сталі в координатах $F - \Delta l$ на ділянці:

- пропорційності
- пружних деформацій
- пластичних деформацій – плинності
- зміцнення – наклепу
- місцевих (локальних) пластичних деформацій
- одночасного виникнення пружних та пластичних деформацій

4. Яка деформація зразка зникає відразу після розриву?

5. Перерахуйте характеристики міцності та пластичності сталі.

6. Як будувється діаграма розтягу в координатах $\sigma - \epsilon$ за діаграмою в координатах $F - \Delta l$?

7. Розкрийте механізм виникнення пластичних деформацій сталі.

8. У чому полягає використання гіпотези Сен-Венана для експериментального зразка?

Лабораторна робота № 2

Визначення модуля поздовжньої пружності сталі

Мета роботи: експериментально визначити модуль поздовжньої пружності сталі.

Обладнання: випробна машина Р-5 або УММ-5, прилади для вимірювання деформацій – тензометри важільні, сталевий зразок.

Загальні відомості

1. Дайте формулювання закону Гука для випадку розтягу (стиску) стрижня:

2. Отримайте формулу для обчислення модуля пружності першого роду за відомою деформацією.

3. Опишіть та накресліть схему нормального зразка стрижня.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте діаметр робочої частини зразка d_0 , обчисліть площу поперечного перерізу A_0 і визначте гранично допустиме навантаження $F_{\text{пц}}$ зони пропорційності:

$$d_0 = \quad A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} = \quad F_{\text{пц}} = k_{\text{зп}} A_0 [\sigma] =$$

$k_{\text{зп}} = 1.2-1.5$ коефіцієнт запасу; $[\sigma] = 160$ МПа – допустиме напруження розтягу (стиску) сталі (додаток 6).

2. Виберіть крок збільшення навантаження ΔF , за якого можна отримати в зоні пропорційності 5–6 відліків, починаючи з початкового зусилля $F_0 = 2\Delta F$:

$$\Delta F = \frac{F_{\text{пц}}}{8} = \quad F_0 = 2\Delta F =$$

3. Підготуйте машину Р-5 і тензометри до проведення випробування. На етапі

обтиснення зразка у захватах і вибору люфтів у з'єднаннях ланцюгів машини (навантаження F_0) перевірте правильність установки і роботи тензометрів (чи рухається стрілка, чи відповідає вільна зона шкали напрямку руху стрілки).

4. Досягнувши величини навантаження F_0 , установіть стрілки тензометрів на нуль – початковий відлік та запишіть в таблицю, а також запишіть ціну поділки шкали тензометрів $k = 0.001$ мм та довжину бази тензометра $l_0 = 20$ мм.

5. Збільшуючи східчасто навантаження (кожного разу на величину ΔF) $n = 5$ разів, записуйте показання тензометрів.

6. Після п'ятиразового збільшення навантаження, у зворотній послідовності виконайте розвантаження зразка, записуючи показання тензометрів у таблицю спостережень (стрілки тензометрів повинні повернутися у нульове положення, при неперенні – завантаження повторити).

Таблиця результатів експериментального дослідження модуля поздовжньої пружності

Номер спостереження	Навантаження, кН	Збільшення навантаження				Зменшення навантаження			
		Лівий тензометр		Правий тензометр		Лівий тензометр		Правий тензометр	
		Відлік за шкалою d	Різниця D	Відлік за шкалою d	Різниця D	Відлік за шкалою d	Різниця $\bar{D}$	Відлік за шкалою d	Різниця $\bar{D}$
1									
2									
3									
4									
5									
6									
Середнє значення	$\Delta F =$	$D_{\text{л}}^{\text{ср}} = \frac{\sum D}{n} =$		$D_{\text{пр}}^{\text{ср}} = \frac{\sum D}{n} =$		$\bar{D}_{\text{л}}^{\text{ср}} = \frac{\sum \bar{D}}{n} =$		$\bar{D}_{\text{пр}}^{\text{ср}} = \frac{\sum \bar{D}}{n} =$	
n – кількість вимірювань									

7. Обчисліть середні значення показів лівого $D_{\text{л}}$ та правого тензометрів $D_{\text{пр}}$:

$$D_{\text{л}} = \frac{D_{\text{л}}^{\text{ср}} + \bar{D}_{\text{л}}^{\text{ср}}}{2} =$$

$$D_{\text{пр}} = \frac{D_{\text{пр}}^{\text{ср}} + \bar{D}_{\text{пр}}^{\text{ср}}}{2} =$$

8. Обчисліть середні подовження, виміряні лівим і правим тензометрами:

$$\Delta l_{\text{л}} = k D_{\text{л}} =$$

$$\Delta l_{\text{пр}} = k D_{\text{пр}} =$$

8. Обчисліть середнє подовження осі стрижня на довжині бази тензометра, що відповідає величині приросту $F = \Delta F$ навантаження:

$$\Delta l_{\text{ср}} = \frac{\Delta l_{\text{л}} + \Delta l_{\text{пр}}}{2} =$$

9. Визначте модуль поздовжньої пружності матеріалу зразка за формулою:

$$E = \frac{F l_0}{A_0 \Delta l} =$$

10. Побудуйте на міліметрівці чотири графіки навантаження і розвантаження зразка в координатах $F - d$.

11. Порівняйте експериментальне значення модуля поздовжньої пружності з табличним (додаток 4).

12. Накресліть схему випробування.

13. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення модулю поздовжньої пружності:

2. Сформулюйте гіпотезу однорідності матеріалу:

3. Чи є змінним модуль Юнга у випадку змінних деформацій та відповідних їм напружень?

4. Які обмеження накладаються на навантаження F у досліді?

5. Поясніть принцип роботи шарнірно-важільного тензометра за його кінематичною схемою. Що називається базою тензометра?

6. Як впливає на точність вимірювання подовження зразка використання двох тензометрів? За рахунок чого?

7. Напишіть формулу, що дозволяє визначити модуль поздовжньої пружності за результатами дослідів. Поясніть кожен компонент формули.

Лабораторна робота № 3

Випробування чавунного зразка на стиск

Мета роботи: експериментально визначити границю міцності чавуну на стиск.

Обладнання: прес гідравлічний 2ПГ–125, чавунний зразок.

Загальні відомості

1. Надайте опис чавунного зразка для випробування на стиск. Накресліть чавунний зразок до деформації.

2. Надайте короткий опис преса 2ПГ–125. Накресліть схему преса.

3. Чому деформований чавунний зразок має бочкоподібну форму? Накресліть чавунний зразок після деформування.

4. Чому напружено-деформований стан чавунного зразка при стиску має просторовий характер?

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте діаметр d_0 і висоту h_0 зразка, обчисліть площу поперечного перерізу A_0 та намалуйте ескіз зразка:

$$d_0 = \quad h_0 = \quad A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} =$$

2. Установіть зразок між плитами преса і прикрийте його захисним екраном.

3. Увімкніть прес і спостерігайте за силовимірювальним пристроєм. Як тільки навантаження почне зменшуватися (з'явилася перша тріщина – зразок зруйнувався) зупиніть роботу преса. Візьміть зруйнований зразок, виміряйте його висоту h_k , запишіть найбільший показ шкали силовимірювача F_c :

$$h_k = \quad F_c =$$

4. Знову встановіть зразок між плитами преса і завантажуйте його до виникнення добре видимих тріщин.

5. Візьміть зразок з тріщинами та замалуйте його.

6. За допомогою тарувальної таблиці визначте найбільше зусилля стиску зразка
 $F_{max} =$ установіть марку чавуну (додаток 5) –

7. Обчисліть границю міцності на стиск за формулою:

$$\sigma_{\text{тм}} = \frac{F_{\text{max}}}{A_0} =$$

8. Визначте залишкове скорочення зразка:

$$\delta = \frac{h_0 - h_k}{h_0} 100\% =$$

9. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Обґрунтуйте просторовий характер напруженого стану зразка при стиску.

2. Як впливає просторовий характер напруженого стану зразка на його роботу при стиску?

3. За якою формулою визначається границя міцності чавуну $\sigma_{\text{тм}}$? Чи має чавун границю плинності $\sigma_{\text{пл}}$?

4. Як розподіляються дотичні напруження, обумовлені силами тертя між торцевими поверхнями зразка та робочими поверхнями преса, по висоті зразка та в торцевих поверхнях уздовж їхнього радіуса?

5. Як відбувається руйнування чавунних зразків під час стиску? За рахунок чого?

6. Яким чином визначається найбільше зусилля, що діє на чавунний зразок?

7. Як зменшити «бочкоподібність» зразка при стискуванні?

8. Які властивості матеріалу характеризує його залишкове скорочення? Чи буде відрізнятися цей параметр для чавуну та граніту?

Лабораторна робота № 4

Випробування деревини на стиск

Мета роботи: експериментально визначити границю міцності деревини при стиску уздовж і уперек волокон.

Обладнання: випробна машина Р–5, зразки деревини.

Загальні відомості

1. Опишіть структуру деревини, поясніть її ортотропність.

2. Опишіть зразки деревини для стиску. Накресліть їхні схеми.

3. Опишіть діаграми деформування зразків деревини при стиску, замалюйте ці діаграми. Розкрийте механіку деформування.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Відберіть по одному зразку для кожного варіанту стиску. Помітьте на зразках місця прикладання навантаження для забезпечення поздовжнього (літерою У), радіального (літерою Р) й тангенціального (літерою Т) стиску.

2. Замалюйте зразки, покажіть їхні розміри, напрям волокон, річних кілець, напрям стиску. Обчисліть площу стиску кожного зразка.

$A_y =$

$A_p =$

$A_t =$

3. Закладіть зразки між плитами преса, стискуйте їх до руйнування, фіксуйте навантаження руйнування. Отримайте діаграми стиску на самописці машини Р–5. Приведіть ці діаграми у звіті.

$F_{y,tm} =$

$F_{p,tm} =$

$F_{t,tm} =$

4. Оглядом зруйнованих зразків установіть у кожному випадку характер їхнього руйнування.

5. Обчисліть границі міцності деревини для всіх трьох випадків стискування.

$$\sigma_{у,тм} = \frac{F_{у,тм}}{A_y} =$$

$$\sigma_{р,тм} = \frac{F_{р,тм}}{A_p} =$$

$$\sigma_{т,тм} = \frac{F_{т,тм}}{A_t} =$$

Результати обчислень занесіть у таблицю.

Таблиця результатів експериментального дослідження деревини на стиск

Параметри	Стиск уздовж волокон	Стиск уперек волокон	
		Радіально	Тангенціально
Площа стиску $A, \text{м}^2$			
Навантаження руйнування $F_{тм}, \text{Н}$			
Границя міцності $\sigma_{тм} = \frac{F_{тм}}{A}, \text{МПа}$			
Характер руйнування			

6. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Які матеріали називаються анізотропними, ортотропними?

2. Яку анізотропію фізико-механічних властивостей має деревина? Чому в досліді використовуються три однакові за розмірами зразки?

3. Як визначається в дерев'яному зразку напрям уздовж волокон, упоперек волокон радіальний та тангенціальний?

4. Розкажіть про характер руйнування зразків при стискуванні упоперек волокон у радіальному, тангенціальному напрямках та уздовж волокон.

5. В якому напрямку деревина має найкращі властивості міцності при стискуванні, а в якому – найгірші?

Лабораторна робота №5

Випробування деревини на скол

Мета роботи: експериментально визначити границю міцності деревини при сколі уздовж і упоперек волокон.

Обладнання: випробна машина Р–5, зразки деревини.

Загальні відомості

1. Опишіть та накресліть зразки деревини при сколі уздовж та упоперек волокон. Покажіть напрямки прикладання зовнішніх сил.

2. Сформулюйте вимоги до зразків.

3. Опишіть та накресліть схему установки для випробування деревини на скол.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Відберіть зразки деревини для випробування на скол уздовж і упоперек волокон. Замалюйте їх, покажіть усі розміри, напрям волокон, річних кілець і напрям сколу.

2. Обчисліть площу сколу кожного зразка:

$$A_{\text{уздовж}} =$$

$$A_{\text{упоперек}} =$$

3. Почергово закладіть зразки у пристрій, завантажте їх за допомогою ручного приводу випробної машини до руйнування, зафіксуйте максимальне навантаження:

$$F_{\text{уздовж,тм}} =$$

$$F_{\text{упоперек,тм}} =$$

4. Діленням навантаження руйнування $F_{\text{тм}}$ на площу сколу A зразка визначте границю міцності $\tau_{\text{тм}}$ деревини для двох видів сколу:

$$\tau_{\text{уздовж,тм}} = \frac{F_{\text{уздовж,тм}}}{A_{\text{уздовж}}} =$$

$$\tau_{\text{упоперек,тм}} = \frac{F_{\text{упоперек,тм}}}{A_{\text{упоперек}}} =$$

5. Результати досліджень занесіть у таблицю.

Таблиця результатів експериментального дослідження деревини на скол

Вид сколювання деревини	Площа сколювання A , м ²	Максимальне навантаження $F_{\text{тм}}$, Н	Границя міцності $\tau_{\text{тм}} = \frac{F_{\text{тм}}}{A}$, МПа
Уздовж волокон			
Упоперек волокон			

6. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Яка властивість деревини зумовлює її випробування на сколювання уздовж та уперек волокон?

2. Чому всі зразки мають бути виготовлені з однакової деревини?

3. Чому потрібно для кожного досліджуваного випадку зсуву обчислювати середнє декількох значень границі міцності?

4. За якою формулою визначається границя міцності деревини на скол?

5. В яких розрахунках можуть бути використані отримані експериментальні результати?

Лабораторна робота № 6

Визначення ударної в'язкості сталі

Мета роботи: визначити відносну ударну в'язкість сталі.

Обладнання: маятниковий копер МК–30А, зразок.

Загальні відомості

1. Опишіть як оцінити здатність матеріалів сприймати ударні навантаження.
2. Опишіть характер сталевого зразка для випробування на ударну в'язкість та накресліть його.
3. Опишіть та накресліть схему випробування сталевого зразка на ударну в'язкість.
4. Дайте короткий опис конструкції маятникового копра типу МК–30А та поясніть принцип дії. Накресліть схему копра.

5. Поясніть як обчислюється кількість енергії, що витрачена на руйнування зразка маятниковим копром.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Намалуйте ескіз зразка, виміряйте розміри перерізу в ударній області a, b та площу перерізу A :

$$a = \quad b = \quad A = a \cdot b =$$

2. Установіть зразок на опори копра так, щоб надріз був розміщений симетрично відносно опор і звернений в бік, протилежний удару.

3. Зведіть маятник, а потім звільніть його із гачка.

4. Після руйнування зразка запишіть покази лівої $B_{\text{л}}$ й правої $B_{\text{пр}}$ стрілок відлікового механізму:

$$B_{\text{л}} =$$

$$B_{\text{пр}} =$$

5. Обчисліть роботу руйнування B та відносну ударну в'язкість $b_{\text{н}}$ за формулою:

$$B = B_{\text{пр}} - B_{\text{л}} =$$

$$b_{\text{н}} = \frac{B}{A} =$$

6. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Для чого проводяться дослідження на ударний згин?

2. Яку роль має надріз у зразках, що випробовуються?

3. Яким чином визначається кількість роботи, що витрачена на руйнування зразка?

4. Як враховується значення ударної в'язкості в проектуванні конструктивних елементів?

5. Приведіть приклади виникнення ударного згинання у будівництві. Які умови виникнення ударного згинання?

6. Опишіть конструкцію маятникового копра МК–30А та принцип його роботи.

7. Розкажіть про порядок експериментального визначення ударної в'язкості сталі.

Додаток 2. Журнал звітів №2

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет технологій, будівництва та раціонального природокористування
Кафедра промислового та цивільного будівництва

ЖУРНАЛ ЗВІТІВ №2

з лабораторних робіт

дисципліни «Опір матеріалів»

здобувача вищої освіти освітнього ступеня бакалавра
спеціальності G19 «Будівництво та цивільна інженерія», денної форми навчання
студента групи _____

Черкаси
202__

Лабораторна робота №1

Дослідження осадки циліндричної гвинтової пружини

Мета роботи: експериментально перевірити теоретичну формулу для визначення осадки циліндричної гвинтової пружини.

Обладнання: випробна машина Р–5, циліндрична гвинтова пружина.

Загальні відомості

1. Запишіть розрахункову формулу для обчислення осадки циліндричної гвинтової пружини.

2. Зробіть аналіз впливу внутрішніх сил на напружено-деформований стан пружини.

3. Накресліть схему установки для визначення осадки циліндричної гвинтової пружини.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте розміри випробуваної пружини – зовнішній діаметр D_1 , діаметр поперечного перерізу круглого дроту d . Обчисліть середній діаметр витка пружини D , підрахуйте число робочих витків n пружини.

$$D_1 = \quad d = \quad D = D_1 - d = \quad n =$$

2. Установіть пружину між плитами випробної машини. Приведіть машину до робочого стану. Для цього завантажте циліндричну гвинтову пружину стискуючою силою $F_0 = 1$ кН.

3. Виміряйте висоту пружини, вважаючи, що навантаження $F = 0$. Збільшуючи навантаження рівними ступенями на величину ΔF , кожного разу вимірюйте висоту пружини $h_{\text{пр}}$. Значення ΔF виберіть таким, щоб можливо було здійснити $k = 5$ завантажень (пропонується $\Delta F = 1$ кН).

4. Результати спостережень занесіть у таблицю.

Таблиця результатів експериментального дослідження гвинтової циліндричної пружини

№ п/п	Навантаження F , Н	Відлік за лінійкою $h_{\text{пр}}$, мм	Приріст навантаження ΔF , Н	Приріст відліків за лінійкою Δl , мм	Середній приріст відліку $\lambda^{\text{експ}}$, мм
1	0				
2					
3					
4					
5					
6				$\Sigma \Delta l =$	

5. Обчисліть приріст навантаження та відліків за лінійкою $h_{\text{пр}}$, які за рівних прирістів навантаження ΔF мають бути приблизно однаковими.

6. Обчисліть середній приріст відліку за лінійкою. Він дорівнює усередненій величині осадки $\lambda^{\text{експ}}$ циліндричної гвинтової пружини, яка відповідає приросту навантаження ΔF .

$$\lambda^{\text{експ}} = \frac{\Sigma \Delta l}{k} =$$

7. Обчисліть теоретичне значення осадки пружини за формулою:

$$\lambda_{\text{теор}} = \frac{8 \cdot \Delta F \cdot D^3 \cdot n}{G \cdot d^4} =$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} =$$

де G – модуль зсуву матеріалу пружини, $E = 2.2 \cdot 10^5$ МПа – модуль пружності, $\mu = 0.23$ – коефіцієнт Пуассона.

8. Знайдіть розбіжність між експериментальним $\lambda_{\text{експ}}$ та теоретичним $\lambda_{\text{теор}}$ значенням осадки пружини:

$$\delta = \frac{|\lambda_{\text{теор}} - \lambda_{\text{експ}}|}{\lambda_{\text{теор}}} 100\% =$$

9. За даними таблиці результатів експериментального дослідження гвинтової циліндричної пружини побудуйте діаграму стискування в координатах $F - h_{\text{пр}}$.

10. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення напруженому стану кручення.

2. Які внутрішні зусилля, що виникають у перерізах пружини, враховуються при обчисленні її осадки?

3. Для яких практичних розрахунків можуть бути використані результати лабораторної роботи?

4. Чому формула для визначення осадки пружини є наближеною? Як оцінити точність цієї формули?

5. Чи можна застосувати результати лабораторних досліджень для наближеного визначення модуля зсуву матеріалу пружини G ?

Лабораторна робота №2

Визначення переміщень двохопорної балки при згині

Мета роботи: експериментально визначити прогин та кути повороту опорних перерізів балки й порівняти їх з теоретичними значеннями, отриманими за методом початкових параметрів.

Обладнання: двохопорна балка, індикатори годинникового типу.

Загальні відомості

1. Запишіть диференціальне рівняння пружної осі балки при згині та розшифруйте його компоненти.

2. Накресліть розрахункову схему балки на двох опорах, переміщення якої досліджується. Опишіть експериментальну установку.

3. Отримайте за методом початкових параметрів розрахункові формули для обчислення переміщень перерізів балки v_D , θ_A , θ_B . Порівняйте отримані результати з приведеними нижче у п. 6.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Ознайомтесь з установкою, виміряйте всі необхідні розміри балки: b, h, l, a, c, d, R , де b – ширина перерізу балки; h – висота перерізу балки; l – довжина балки; c – координата точки прикладання навантаження; a – координата точки вимірювання лінійного переміщення – точки установки індикатора годинникового типу.

$b =$ $h =$ $l =$ $a =$ $c =$

$d = l - c =$ $R =$

2. Завантажте балку підвіскою 2 без вантажу, установіть в нульове положення стрілки всіх індикаторів.

3. Завантажуйте балку від $F = 0$ до $F_{max} = 12.5$ Н з приростом $\Delta F = 2.5$ Н. Визначайте кожного разу величини v_D , S_A , S_B за показами індикаторів. Обчисліть різниці показів індикаторів Δv_D , ΔS_A , ΔS_B та середні значення різниць показів кожного індикатора годинникового типу:

$$\Delta v_D^{cp} = \frac{\Sigma v_D}{n} =$$

$$\Delta S_A^{cp} = \frac{\Sigma S_A}{n} =$$

$$\Delta S_B^{cp} = \frac{\Sigma S_B}{n} =$$

де n – кількість обчислених різниць.

4. Результати випробувань запишіть у таблицю.

Таблиця результатів експериментальних досліджень переміщень балки

№ п/п	Навантаження F, H	Індикатор D		Індикатор A		Індикатор B	
		Відлік за шкалою v_D	Різниця Δv_D	Відлік за шкалою S_A	Різниця ΔS_A	Відлік за шкалою S_B	Різниця ΔS_B
1	0.0	0.0		0.0		0.0	
2	2.5						
3	5.0						
4	7.5						
5	10.0						
6	12.5						
Середнє значення	$\Delta F = 2.5 \text{H}$	$\Delta v_D^{cp} =$		$\Delta S_A^{cp} =$		$\Delta S_B^{cp} =$	

5. Обчисліть експериментальні значення переміщень. Для цього помножте середні значення показів індикаторів годинникового типу на ціну поділок індикаторів $k = 0.01 \text{ мм}$. Отримайте дійсні переміщення перерізів балки:

$$v_D^{експ} = k \Delta v_D^{cp} =$$

$$S_A^{експ} = k \Delta S_A^{cp} =$$

$$S_B^{експ} = k \Delta S_B^{cp} =$$

6. Експериментальні значення кутів повороту опорних перерізів A та B обчисліть за співвідношеннями:

$$\theta_A^{експ} \cong tg \theta_A^{експ} = \frac{S_A^{експ}}{R} =$$

$$\theta_B^{експ} \cong tg \theta_B^{експ} = \frac{S_B^{експ}}{R} =$$

7. Теоретичні значення кутів повороту θ_A і θ_B обчисліть за залежностями:

$$\theta_A^{\text{теор}} = -F \frac{cd(l+d)}{6lEI_z} =$$

$$\theta_B^{\text{теор}} = F \frac{cd(l+c)}{6lEI_z} =$$

де $F = 2.5 \text{ Н}$, $E = 2.5 \text{ МПа}$,

$$I_z = \frac{bh^3}{12} =$$

8. Теоретичне значення прогину $v_D^{\text{теор}}$ обчисліть, враховуючі розміщення індикатора годинникового типу відносно підвіски для вантажу. Якщо індикатор ліворуч від підвіски, то вираз $(a - c) < 0$, а це означає, що доданок з таким множником не враховується. Тоді прогин $v_D^{\text{теор}}$ обчислюється за формулою:

$$v_D^{\text{теор}} = -F \frac{a \cdot d(l^2 - a^2 - d^2)}{6lEI_z} =$$

Якщо індикатор праворуч від підвіски, то вираз $(a - c) > 0$ і доданок з таким множником враховується. Тоді прогин $v_D^{\text{теор}}$ обчислюється за формулою:

$$v_D^{\text{теор}} = -F \frac{a \cdot d(l^2 - a^2 - d^2) + (a - c)^3 l}{6lEI_z} =$$

9. Порівняйте теоретичні й експериментальні значення переміщень в таблиці.

Таблиця порівняння теоретичних та експериментальних значень переміщень двохопорної балки

Параметри	Дані		Розбіжність, %
	теоретичні	експериментальні	
Прогин v_D , мм			
Кут повороту θ_A , рад			
Кут повороту θ_B , рад			

10. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення напруженому стану згину.

2. Які типи напружень діють у поперечних перерізах балки при згині? Який характер розподілу цих напружень? Запишіть розрахункові формули для напружень при згині.

3. Запишіть загальну формулу для визначення лінійних переміщень перерізів балки за методом початкових параметрів.

4. Як отримати кути повороту перерізів балки за допомогою індикаторів годинникового типу?

5. Які параметри називаються початковими у методі початкових параметрів? Скільки початкових параметрів?

6. Дайте визначення головної системи координат для прямокутного перерізу. Напишіть за якою формулою визначаються головні моменти інерції прямокутника.

7. Для яких розрахунків двохопорних балок потрібно визначати переміщення та кути повороту перерізів балок?

8. Поясніть механічний зміст умов, з яких визначаються початкові параметри v_0 та θ_0 .

Лабораторна робота 3

Дослідження згину статично невизначуваної двохопорної балки

Мета роботи: експериментально визначити прогин та кут повороту перерізів двохопорної балки і порівняти їхні величини з теоретичними значеннями, отриманими за методом початкових параметрів.

Обладнання: двохопорна статично невизначувана балка, індикатори годинникового типу.

Загальні відомості

1. Яка балка називається статично невизначуваною? Запишіть алгоритм розрахунку статично невизначуваної балки за методом початкових параметрів.

2. Накресліть схему статично невизначуваної балки на двох опорах. Опишіть експериментальну установку.

3. Отримайте за методом початкових параметрів розрахункові формули для обчислення переміщень перерізів балки v_D , θ_A , θ_B . Порівняйте отримані результати з приведеними нижче у п. 6.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Ознайомтесь з установкою, виміряйте всі необхідні розміри балки:

$$b = \quad h = \quad l = \quad a = \quad c =$$

$$d = l - c = \quad R =$$

де b – ширина перерізу балки; h – висота перерізу балки; l – довжина балки; c – координата точки прикладання навантаження; a – координата точки вимірювання лінійного переміщення – точки установки індикатора годинникового типу.

2. Завантажте балку підвіскою без вантажу, установіть стрілки індикаторів в нульове положення.

3. Завантажуйте балку від $F = 0$ до $F_{max} = 12.5$ Н покроково поперечною силою з приростом $\Delta F = 2.5$ Н, вимірюйте на кожному кроці величини v_D, S_A за показами індикаторів. Результати випробувань занесіть до таблиці.

4. Для вибраного кроку навантаження ΔF експериментальне значення прогину перерізу D обчисліть за виразом:

$$v_D^{експ} = k \Delta v_D^{cp} =$$

де $k = 0.01$ мм – ціна поділки індикатора годинникового типу.

5. Експериментальне значення кута повороту перерізу A обчисліть за формулою:

$$\theta_A^{експ} \cong tg \theta_A^{експ} = \frac{S_A^{експ}}{R} =$$

$$\text{де } S_A^{експ} = k \Delta S_A^{cp} =$$

6. За результатами теоретичного дослідження статично невизначуваної балки за методом початкових параметрів визначте розрахункові значення $\theta_A^{теор}$ і $v_D^{теор}$:

$$\theta_A^{теор} = -F \frac{cd^2}{4lEI_z} =$$

при $a > c$ –

$$v(a) = v_D^{теор} = \frac{F}{EI_z} \left[-\frac{cd^2}{4l} a + \frac{(2l+c)d^2}{12l^3} a^3 - \frac{(a-c)^3}{6} \right] =$$

при $a < c$ –

$$v_D^{\text{теор}} = \frac{F}{EI_z} \left[-\frac{cd^2}{4l}a + \frac{(2l+c)d^2}{12l^3}a^3 \right] =$$

**Таблиця результатів експериментального дослідження
переміщень статично невизначуваної балки**

№ п/п	Навантаження F , Н	Індикатор в точці D		Індикатор в точці A	
		Відлік за шкалою v_D	Різниця Δv_D , мм	Відлік за шкалою S_A	Різниця ΔS_A , мм
1	0.0	0.0		0.0	
2	2.5				
3	5.0				
4	7.5				
5	10.0				
6	12.5				
Середнє значення	$\Delta F =$	$\Delta v_D^{\text{ср}} =$		$\Delta S_A^{\text{ср}} =$	

7. Порівняйте теоретичні та експериментальні значення переміщень в таблиці.

Таблиця порівняння теоретичних та експериментальних значень переміщень

Параметри	Значення		Розбіжність, %
	Теоретичні	Експериментальні	
Прогин v_D , мм			
Кут повороту θ_A , рад			

8. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. В чому зміст методу початкових параметрів?

2. Які стрижневі системи називаються статично невизначуваними? Як обчислюється ступінь статичної невизначуваності?

3. Як розкривається статична невизначуваність у методі початкових параметрів?

4. Як оцінити жорсткість балки?

5. Якими диференціальними залежностями пов'язані навантаження, внутрішні сили та переміщення у балці?

6. Для яких розрахунків потрібно обчислювати прогин балки?

7. Як обчислити найбільший прогин балки?

Лабораторна робота №4

Дослідження косого згину консольної балки

Мета роботи: дослідити косий згин консольної балки, порівняти експериментальні значення прогину та напружень з теоретичними для перевірки достовірності теоретичних результатів.

Обладнання: консольна балка, індикатори годинникового типу, тензометр важільний.

Загальні відомості

1. Які напружені стани називаються складними? Дайте визначення косого згину. Отримайте розрахункову формулу для нормального напруження.

2. Накресліть схему експериментальної консольної балки, що досліджується на косий згин. Зобразіть переріз кутика.

3. Яка система координат називається головною? Як направлені осі головної системи координат у рівнобічного кутика?

4. Запишіть рівняння методу початкових параметрів для консольної балки у головній системі координат.

5. Отримайте розрахункові вирази для обчислення прогинів у точці C .

6. Запишіть формулу для обчислення нормального напруження у точці D .

7. Як обчислити повне переміщення перерізу балки?

8. Що таке центр перерізу та центр згинання кутика.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Ознайомтесь з експериментальною установкою, виміряйте параметри балки
 $a =$ $b =$ $l =$
де a – абсциса точки C вимірювання лінійного переміщення, точки установки індикаторів годинникового типу, b – абсциса точки D вимірювання нормального напруження, точки установки важільного тензометра, l – довжина консольної балки також.

Випишіть із сортаменту геометричні параметри кутика:

- головні моменти інерції – $I_u =$ $I_v =$
- товщину полиць кутика $\delta =$

2. Установіть індикатори годинникового типу в точці C так, щоб вони вимірювали вертикальне та горизонтальне переміщення в точці N . Точка N є центром згинання, який знаходиться на перетині серединних ліній полиць кутика. Ціна поділок шкали індикаторів – $k = 0.01$ мм. Зафіксуйте стрілки індикаторів у нульовому положенні.

3. Установіть тензометр у точці K перерізу D . Зафіксуйте положення стрілки тензометра. Ціна поділки шкали тензометра – $t = 0.001$ мм, а довжина бази – $l_0 = 20$ мм.

4. Завантажуйте балку покроково з кроком $\Delta F = 20$ Н, $n = 5$ разів від нульового навантаження до $F_{max} = 100$ Н, вимірюйте на кожному кроці вертикальне і горизонтальне переміщення перерізу C у точці N та фіксуйте покази тензометра D . Результати випробування занесіть до таблиці.

Таблиця результатів експериментального дослідження косого згину балки

№ п/п	Навантаження F , Н	Індикатори в точці N перерізу C				Тензометр в точці K перерізу D	
		Відлік за шкалою горизонтального індикатора	Різниця Δf_z	Відлік за шкалою вертикального індикатора	Різниця Δf_y	Відлік за шкалою тензометра	Різниця Δl
1	0						
2	20						
3	40						
4	60						
5	80						
6	100						
Середнє значення	$\Delta F = 20$ Н	$\Delta f_z^{cp} = \frac{\Delta f_z}{n} =$		$\Delta f_y^{cp} = \frac{\Delta f_y}{n} =$		$\Delta l^{cp} = \frac{\Delta l}{n} =$	

5. В таблиці обчисліть експериментальні значення прогинів $f_{z,C}^{експ}$, $f_{y,C}^{експ}$ у точці N перерізу C та напруження $\sigma_{K,CP}^{експ}$ у точці K перерізу D за формулами:

$$f_{z,C}^{експ} = k \Delta f_z^{cp} =$$

$$f_{y,C}^{експ} = k \Delta f_y^{cp} =$$

$$\sigma_K^{експ} = t \Delta l^{cp} =$$

6. Підрахуйте повний, експериментально визначений, прогин перерізу C :

$$f_C^{\text{експ}} = \sqrt{(f_{z,C}^{\text{експ}})^2 + (f_{y,C}^{\text{експ}})^2} =$$

7. Обчисліть проекції сили F на головні осі:

$$F_u = F_v = 0.707 \cdot F =$$

8. Визначте теоретичні прогини перерізу C у напрямку головних осей за формулами:

$$u(a) = f_{u,C}^{\text{теор}} = \frac{F_u}{6EI_v} [-2l^3 + 3l^2a - a^3] =$$

$$v(a) = f_{v,C}^{\text{теор}} = \frac{F_v}{6EI_u} [-2l^3 + 3l^2a - a^3] =$$

9. Визначте теоретичне значення повного прогину перерізу C :

$$f_C^{\text{теор}} = \sqrt{(f_{u,C}^{\text{теор}})^2 + (f_{v,C}^{\text{теор}})^2} =$$

10. Обчисліть теоретичне значення напруження у точці K :

$$\sigma_K^{\text{теор}} = \frac{M_u}{I_u} v_K + \frac{M_v}{I_v} u_K =$$

$$\text{тут } M_u = M_v = F_u \cdot b =$$

– згинаючі моменти;

I_u, I_v , – моменти інерції перерізу відносно головних осей; u_K, v_K – координати точки K в головній системі координат u і v .

11. Порівняйте теоретичні та експериментальні значення прогинів і напружень.

Таблиця порівняння експериментальних та теоретичних результатів досліджень косого згину консольного стрижня

Навантаження $F, \text{ Н}$	Переміщення точки N перерізу C , мм						Розбіжність, %	Напруження, МПа		Розбіжність, %
	Експериментальні			Розрахункові				$\sigma_{K,\text{ср}}^{\text{експ}}$	$\sigma_K^{\text{теор}}$	
	$f_{z,C}^{\text{експ}}$	$f_{y,C}^{\text{експ}}$	$f_C^{\text{експ}}$	$f_{u,C}^{\text{теор}}$	$f_{v,C}^{\text{теор}}$	$f_C^{\text{теор}}$				

12. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення складному напруженому стану косого згину.
2. Які площини стрижня називаються головними?
3. Які кути складають головні осі u і v рівнобічного кутика з його сторонами?
4. Поясніть чому сили F_u та F_v у сумі дають значення F ?
5. Як обчислюються моменти M_v , M_u у точці D ?
6. Які зміни у формулі для $\sigma_K^{\text{роз}}$ треба зробити, щоб точка K змінила своє розташування симетрично відносно осі u ?
7. Яка орієнтація балки даного типу перерізу є найбільш раціональною?

Лабораторна робота № 5

Дослідження позацентрового розтягу прямого стрижня

Мета роботи: експериментально перевірити розрахункові формули опору матеріалів для позацентрового розтягу стрижня. Для цього пропонується теоретично обчислити та експериментально отримати значення нормальних напружень в позацентрово розтягнутому прямому стрижні.

Обладнання: випробна машина Р-5, тензometri важільні, зразок стрижня.

Загальні відомості

1. Дайте визначення складному напруженому стану позацентрового розтягу прямого стрижня. Що таке ексцентриситет e ?

2. Отримайте розрахункову формулу для нормального напруження при позацентровому розтягу прямого стрижня.

3. Накресліть схему експериментальної установки для випробування стрижня на позацентровий розтяг.

Послідовність виконання роботи

1. Накресліть ескіз зразка стрижня для позацентрового розтягу.

Виміряйте всі його розміри:

$$a = \quad d = \quad b = \quad h =$$

Обчисліть ексцентриситет прикладання навантаження:

$$e = d - a =$$

Визначте площу робочого перерізу стрижня:

$$A = b \cdot h =$$

та момент інерції перерізу відносно поперечної осі z :

$$I_z = \frac{bh^3}{12} =$$

Знайдіть граничне навантаження зони пропорційності за формулою:

$$F_{\text{пц}} = \sigma_{\text{пц}} \cdot A =$$

де $\sigma_{\text{пц}}$ – нормальне напруження пропорційності матеріалу зразка (Ст20) (додаток 6).

2. Виберіть крок збільшення навантаження $\Delta F = \frac{F_{\text{пц}}}{10}$, за якого у зоні пропорційності можна зробити 5 відліків, починаючи з зусилля

$$F_0 = \Delta F =$$

3. Підготуйте машину Р-5, зразок стрижня і тензометри до проведення випробування. На етапі вибору люфтів у з'єднаннях ланок машини (навантаження до F_0) перевірте правильність установки і роботи тензометрів – рух стрілок, відповідність вільної зони шкали напрямку руху стрілок, визначте ціну поділки шкали кожного приладу.

4. Досягши початкового навантаження F_0 , запишіть покази тензометрів (початковий відлік) в таблицю.

5. Збільшуючи покроково навантаження (кожного разу на величину ΔF), записуйте покази тензометрів в таблицю.

6. Зменшуючи покроково навантаження (кожного разу на величину ΔF) перевірте правильність показів тензометрів. Якщо покази тензометрів відрізняються, або при повному розвантаженні стрілки тензометрів не повертаються в нульове положення, експеримент повторіть.

7. Обчисліть середнє подовження поверхонь в точках A та B , що відповідає кроку навантаження ΔF :

$$\Delta l_A^{\text{cp}} = k \cdot \Delta D_A^{\text{cp}} =$$

$$\Delta l_B^{\text{cp}} = k \cdot \Delta D_B^{\text{cp}} =$$

де k – ціна поділки шкали тензометра.

**Таблиця результатів експериментального дослідження
позацентрального розтягу прямого стрижня**

№ п/п	Навантаження F , Н	Тензометр A		Тензометр B	
		Відлік за шкалою	Різниця відліків, ΔD_A	Відлік за шкалою	Різниця відліків, ΔD_B
1	0.0	0.0		0.0	
2					
3					
4					
5					
6					
Середнє значення	$\Delta F =$	$\Delta D_A^{\text{ср}} =$		$\Delta D_B^{\text{ср}} =$	

8. Визначте середню відносну деформацію поверхонь прямого стрижня в точках A та B :

$$\varepsilon_A^{\text{ср}} = \frac{\Delta l_A^{\text{ср}}}{l_0} =$$

$$\varepsilon_B^{\text{ср}} = \frac{\Delta l_B^{\text{ср}}}{l_0} =$$

де $l_0 = 20$ мм – база тензометра.

9. Використовуючи співвідношення закону Гука для стрижня, визначте напруження в точках A та B перерізу:

$$\sigma_A^{\text{експ}} = E \cdot \varepsilon_A^{\text{ср}} =$$

$$\sigma_B^{\text{експ}} = E \cdot \varepsilon_B^{\text{ср}} =$$

де E – модуль пружності першого роду для Ст20 (додаток 4).

10. За формулою

$$\sigma^{\text{теор}} = \frac{F}{A} + \frac{F \cdot e}{I_z} y$$

(y – ординати точок A та B) обчисліть теоретичні значення нормальних напружень у точках A та B перерізу стрижня:

$$\sigma_A^{\text{теор}} =$$

$$\sigma_B^{\text{теор}} =$$

11. Порівняйте теоретичні й експериментальні значення нормальних напружень в таблиці.

Таблиця порівняння результатів експериментальних та теоретичних досліджень

Нормальні напруження	Значення нормальних напружень, МПа		Розбіжність, %
	Теоретичні	Експериментальні	
σ_A			
σ_B			

12. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення складному напруженому стану позацентрального розтягу (стиску).

2. Що називають ядром перерізу і які його властивості?

3. Що називається ексцентриситетом прикладання сили e ? Як його визначити?

4. Як визначити граничне навантаження зони пропорційності? Навіщо це потрібно?

5. Як змінюється напружено-деформований стан стрижня при виникненні позацентрального стиску?

6. Чому в експерименті використовуються два тензometri одночасно?

7. Наведіть приклади позацентрального розтягу (стиску) стрижнів у будівництві.

Лабораторна робота № 6

Коливання пружної системи

Мета роботи: експериментально визначити період власних коливань гвинтової пружини з вантажем та порівняти його з розрахунковим значенням.

Обладнання: гнучка гвинтова пружина незначної жорсткості, вантаж, хронометр, штангенциркуль, лінійка.

Загальні відомості

1. Що вам відомо про власні і вимушені коливання?

2. Чим характеризуються коливальні процеси?

3. Накресліть схему установки для дослідження коливань пружини.

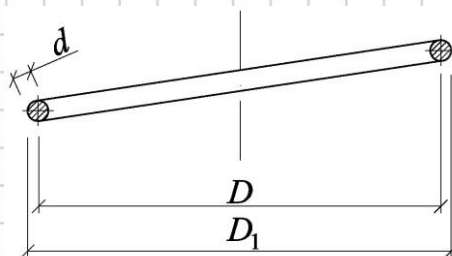
4. Запишіть формулу для обчислення осадки гвинтової пружини. Розшифруйте її компоненти.

5. Запишіть формулу для обчислення періоду коливань пружини з підвішеним вантажем.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте зовнішній діаметр пружини $D_1 =$
та діаметр дроту, з якого виготовлена пружина, $d =$
обчисліть серединний діаметр пружини
 $D = D_1 - d =$
підрахуйте число витків пружини $n =$

Модуль зсуву матеріалу пружини прийміть – $G = 9 \cdot 10^4$ МПа. Геометричні параметри пружини зображені нижче на рисунку.



2. Підвісьте пружину одним кінцем та виміряйте лінійкою її довжину
 $l =$

До другого її кінця причепіть вантаж

$Q =$
і виміряйте довжину деформованої пружини
 $l_1 =$

Визначте осадку пружини

$$\delta_{\text{експ}} = l_1 - l =$$

3. Вантаж відтягніть від положення рівноваги і раптово відпустіть – він почине коливально рухатись по вертикалі. Обчисліть число коливань за одну хвилину, фіксуючи час за хронометром:

$$k =$$

Дослід повторіть кілька разів і виведіть середній результат

$$k_{\text{експ}} =$$

4. Обчисліть експериментальне значення періоду коливань за формулою:

$$T_{\text{експ}} = \frac{t}{k_{\text{експ}}} =$$

5. Визначте статичну осадку пружини від дії вантажу Q за формулою:

$$\delta_{\text{теор}} = \frac{8QD^3n}{Gd^4} =$$

де число витків пружини – $n =$

модуль зсуву матеріалу пружини – $G =$
розрахунковий діаметр гвинтової пружини – $D =$
діаметр дроту пружини – $d =$
навантаження – $Q =$

5. Обчисліть теоретичне значення періоду коливань за формулою:

$$T_{\text{теор}} = 2\pi \sqrt{\frac{\delta_{\text{теор}}}{g}} =$$

де $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

6. Визначте розбіжність між значеннями теоретичного й експериментального періоду коливань.

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{експ}} - T_{\text{теор}}}{T_{\text{експ}}} \cdot 100\% =$$

7. Визначте розбіжність експериментального та теоретичного значень осадки пружини:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{\text{експ}} - \delta_{\text{теор}}}{\delta_{\text{експ}}} \cdot 100\% =$$

8. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Які коливання називаються власними, а які вимушеними?
2. Що називається періодом коливань T ? Від чого він залежить?
3. За якою формулою розраховується осадка гвинтової пружини?
4. Чому період власних коливань пружини визначається з вантажем?

Лабораторна робота №7

Випробування сталевго зразка на кручення та визначення модуля зсуву

Мета роботи: дослідити та перевірити пропорційну залежність між навантаженням та деформацією при крученні сталевго зразка у межах дії закону Гука, експериментально визначити модуль пружності другого роду $G^{\text{експ}}$ (модуль зсуву) та порівняти його значення із розрахунковим $G^{\text{теор}}$.

Обладнання: машина КМ–50, сталевий зразок.

Загальні відомості

1. Запишіть формулу для обчислення кута закручування, зробіть аналіз складових цієї формули.

2. Накресліть та опишіть діаграми кручення стрижнів зі сталі та чавуну.

3. Запишіть формулу для експериментального обчислення модуля пружності при зсуві $G^{\text{експ}}$ та зробіть аналіз її компонент.

Послідовність виконання лабораторної роботи

1. Виміряйте діаметр та довжину перерізу робочої частини зразка

$$d_0 =$$

$$l_0 =$$

2. Визначте величину крутного моменту, що відповідає границі пружності $M_k^{\text{пр}}$ експериментально чи теоретично. Для експериментального визначення $M_k^{\text{пр}}$ закріпіть зразок у захватах машини КМ–50. Плавню та рівномірно завантажуйте зразок крутним моментом до значень, для яких лінія діаграми на самописці почне викривлюватися, що приблизно відповідає границі пружності $M_k^{\text{пр}}$.

Теоретично границю пружності $M_k^{\text{пр}}$ можливо обчислити за формулою:

$$M_k^{\text{пр}} = [\tau] w_p =$$

де $[\tau]$ – допустиме дотичне напруження для Ст20 (додаток 7),

полярний момент опору при крученні

$$w_p = \frac{\pi d_0^3}{16} =$$

3. Розвантажте зразок до значення $M_k = 0$, пристрій для вимірювання кутів закручування поставте в нульове положення.

Максимальне значення навантаження $\max M_k$ виберіть таким, для якого залишкові переміщення не виникають. Для виконання цієї умови, потрібно покласти:

$$\max M_k = 0.8 \cdot M_k^{\text{пр}} =$$

4. Визначте величину приросту навантаження:

$$\Delta M_k = \frac{\max M_k}{5} =$$

5. Плавню завантажуйте зразок кроками ΔM_k , при цьому вимірюйте прирости кута закручування.

6. Значення крутних моментів та кутів закручування запишіть у таблицю.

7. За табличними даними вимірювань побудуйте графік $M_k - \varphi$.

Таблиця результатів вимірювання кута закручування

Навантаження $M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	Приріст навантаження $\Delta M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	Кут закручування $\varphi, \text{град.}$	Різниця кутів Закручування $\Delta \varphi, \text{град.}$
0			
Середнє значення	$\Delta M_k^{\text{ср}} =$		$\Delta \varphi^{\text{ср}} =$

8. Визначте експериментальний модуль зсуву за формулою:

$$G_{\text{експ}} = \frac{\Delta M_k^{\text{ср}} \cdot l_0}{\Delta \varphi_{\text{рад}}^{\text{ср}} \cdot J_p} =$$

де $\Delta \varphi_{\text{рад}}^{\text{ср}}$ визначається в радіанах

$$\Delta \varphi_{\text{рад}}^{\text{ср}} = \Delta \varphi^{\text{ср}} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} =$$

полярний момент інерції круглого перерізу

$$J_p = \frac{\pi d_0^4}{32} =$$

Теоретичне значення модуля зсуву для Ст20 обчисліть за формулою:

$$G_{\text{теор}} = \frac{E}{2(1 + \mu)} =$$

де E – модуль поздовжньої пружності Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона (додаток 4).

9. Експериментальне значення модуля зсуву порівняйте з теоретичним:

$$\varepsilon = \frac{G_{\text{теор}} - G_{\text{експ}}}{G_{\text{теор}}} \cdot 100\% =$$

10. Запишіть висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Контрольні запитання до лабораторної роботи

1. Дайте визначення напруженому стану кручення.

2. Яка залежність між навантаженнями та крутним моментом визначається законом Гука? Запишіть формулу цієї залежності.

3. Як руйнуються сталеві та чавунні зразки при крученні? Поясніть різний характер їх руйнування.

4. Намалюйте та поясніть діаграми кручення сталевих та чавунних зразків. Покажіть характерні точки.

5. Як визначається модуль зсуву, які властивості матеріалу він характеризує?

6. Як визначається найбільше навантаження $\max M_k$, граничне для виконання закону Гука?

Додаток 3. Таблиця механічних характеристик для основних марок вуглецевих конструкційних сталей*

Марка сталі (ДСТУ 2651:2005)	Міжнародний аналог (ISO, EN, ASTM)	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²	Твердість НВ
СтЗсп/СтЗпс	S235JR (EN 10025)	215–245	370–470	22–26	34–47	131–187
08КП, 08ПС	DC01 (EN 10130)	140–180	270–370	30–40	–	≤ 90
Ст10	C10 (EN 10083)	180–250	320–470	25–30	30–50	100–140
Ст20	C20 (EN 10083)	250–290	410–490	23–28	35–50	120–160
Ст35	C35 (EN 10083)	305–355	580–700	15–22	30–45	150–180
Ст45	C45 (EN 10083)	355–400	700–850	14–17	25–40	170–230
Ст50	C50 (EN 10083)	390–440	750–900	12–16	20–35	180–240

* згідно з ДСТУ 2651:2005 – «Прокат сталевий для будівельних конструкцій. Загальні технічні умови» та міжнародними аналогами.

Пояснення:

- **Межа плинності** – напруження, при досягненні якого з'являються залишкові деформації.
- **Межа міцності** – максимальне навантаження, яке витримує сталь перед руйнуванням.
- **Відносне подовження** – характеристика, яка дає змогу оцінити, наскільки матеріал може змінити свою довжину під дією механічного навантаження до руйнування.
- **Ударна в'язкість** – здатність матеріалу поглинати механічну енергію в процесі деформації і руйнування під дією ударного навантаження.
- **Твердість НВ** – значення твердості матеріалу за шкалою Брінелля. Це значення визначається як відношення прикладеного зусилля до площі відбитка після вдавлювання сталевий кульки у зразок.

Додаток 4. Таблиця модулів пружності та коефіцієнтів Пуассона

Матеріал	Модуль пружності E , ГПа	Модуль зсуву G , ГПа	Коефіцієнт Пуассона, μ
Сталь вуглецева (конструкційна)	200–210	78–82	0.27–0.30
Низьколегована сталь	190–210	75–80	0.28–0.30
Нержавіюча сталь	180–200	70–80	0.27–0.31
Чавун сірий	100–140	40–50	0.25–0.28
Чавун високоміцний (ВЧ)	160–180	60–75	0.26–0.29
Чавун ковкий (КЧ)	140–170	50–70	0.26–0.28
Алюміній і його сплави	65–80	25–30	0.33–0.35
Мідь	110–130	44–50	0.34–0.36
Латунь (Cu – Zn)	90–110	36–44	0.33–0.36
Бронза (Cu – Sn, Cu – Al)	100–130	38–50	0.32–0.35
Титан і його сплави	100–120	40–50	0.32–0.34
Магній і його сплави	40–45	15–18	0.26–0.30
Поліетилен високої щільності	0.8–1.5	0.3–0.5	0.42–0.48
Поліпропілен	1.2–2.0	0.5–0.8	0.40–0.46
Полікарбонат	2.0–2.6	0.7–1.1	0.37–0.40
Скло	50–90	20–35	0.18–0.30
Бетон (С20/25)	25–35	10–15	0.15–0.20
Граніт	45–60	20–30	0.20–0.30
Деревина (уздовж волокон)	8–16	1–2	0.30–0.40
Деревина (поперек волокон)	0.5–1.5	0.05–0.2	0.40–0.50

Пояснення:

- **Модуль пружності** – характеризує жорсткість матеріалу, тобто його здатність чинити опір розтягуванню або стисканню.
- **Модуль зсуву** – також відомий як модуль пружності другого роду, описує опір матеріалу зсувним деформаціям. Обчислюється за формулою:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

- **Коефіцієнт Пуассона** – показує, як змінюються поперечні розміри матеріалу при осьовій деформації.

Додаток 5. Таблиця механічних характеристик чавуну*

Марка чавуну (ДСТУ)	Тип чавуну	Межа міцності, МПа	Межа плинності, МПа	Відносне подовження, %	Твердість НВ	Ударна в'язкість, Дж/см ²
СЧ15	Сірий чавун	150–250	–	0.5–1.0	120–180	1–3
СЧ20	Сірий чавун	200–300	–	0.5–1.5	150–220	2–4
СЧ25	Сірий чавун	250–350	–	1–2	170–240	3–5
СЧ30	Сірий чавун	300–400	–	1.5–2.5	190–260	4–6
СЧ35	Сірий чавун	350–450	–	2–3	210–280	5–7
СЧ40	Сірий чавун	400–500	–	2–4	230–300	6–8
ВЧ40	Високоміцний чавун	400–500	250–300	5–10	140–200	10–20
ВЧ50	Високоміцний чавун	500–600	300–400	7–12	160–220	12–22
ВЧ60	Високоміцний чавун	600–700	350–450	8–15	180–240	15–30
ВЧ70	Високоміцний чавун	700–800	400–500	10–16	200–260	18–35
КЧ30-6	Ковкий чавун	300–400	180–250	6–10	120–180	8–14
КЧ35-10	Ковкий чавун	350–450	220–280	10–15	130–180	12–18
КЧ40-12	Ковкий чавун	400–500	250–320	12–18	140–190	14–20
КЧ50-15	Ковкий чавун	500–600	300–380	15–22	160–210	16–25
КЧ60-20	Ковкий чавун	600–700	350–450	18–25	180–230	18–28
Білий чавун	Білий чавун	300–600	–	<1	400–600	<2
EN-GJS-400-15	Високоміцний чавун	400	250	15	130–170	10–15
EN-GJS-600-3	Високоміцний чавун	600	400	3	190–250	6–12

* за ДСТУ 8833:2019, ДСТУ 3925–99, ДСТУ 3926–99

Пояснення:

- **Сірий чавун (СЧ)** – це метал, у складі якого є залізо, вуглець і в невеликих кількостях графіт у пластинах. Має гарні ливарні та оброблювальні властивості, підвищені міцність та ударну в'язкість, набагато дешевший за інші сплави.
- **Високоміцний чавун (ВЧ, EN-GJS)** – це вид чавуну, у якому графіт має кулясту форму (кулястий графіт). Такий чавун має високу міцність на розрив та ударну в'язкість. ВЧ значно перевершує сірий чавун за цими показниками.
- **Ковкий чавун (КЧ)** – умовна назва чавуну, що відзначається підвищеною пластичністю. Міцний, стійкий до впливу зовнішнього (корозійного) середовища і проти зношування, має добрі ливарні властивості. Назва чавуну – умовна, оскільки він не піддається куванню, хоча він більш пластичний за сірий та білий чавун.
- **Білий чавун** – чавун, в якому весь вуглець хімічно зв'язаний з залізом і міститься у вигляді карбиду Fe₃C (цементиту). Білий чавун є твердим і крихким, не легко піддається механічній обробці, рідко застосовується безпосередньо в деталях лиття.

Додаток 6. Орієнтовні допустимі напруження на розтяг та стиск*

Матеріал	Допустиме напруження на розтяг $[\sigma_+]$, МПа	Допустиме напруження на стиск $[\sigma_-]$, МПа
Сталь вуглецева (конструкційна, Ст20, С235)	140–170	150–180
Сталь низьколегована (С345, 09Г2С)	170–200	180–220
Сталь високоміцна (С390, 30ХГСА)	200–260	220–280
Чавун сірий (СЧ20, СЧ25)	40–60	120–180
Чавун високоміцний (ВЧ40, ВЧ50)	100–140	250–350
Чавун ковкий (КЧ35-10, КЧ50-15)	120–160	200–300
Алюміній і його сплави	40–80	50–90
Мідь	70–110	90–130
Латунь (Cu-Zn, Л63, БрО5Ц5С5)	80–120	100–140
Бронза (Cu-Sn, Cu-Al)	90–130	110–160
Титан і його сплави (BT1-0, BT6)	250–400	280–450
Магній і його сплави	30–50	40–60
Поліетилен високої щільності (HDPE)	4–8	6–12
Полікарбонат	20–30	30–50
Скло (будівельне)	20–50	100–150
Бетон (С20/25)	2–3	15–18
Граніт	7–10	80–120
Деревина (уздовж волокон)	30–50	40–60
Деревина (поперек волокон)	1–3	5–10

* враховуючи коефіцієнти запасу міцності

Пояснення:

- **Допустиме напруження на розтяг** – це максимальне значення напруження, яке матеріал може витримати під час розтягу, не переходячи в стан незворотних деформацій або руйнування.
- **Допустиме напруження на стиск** – максимальне напруження, якому матеріал може протистояти під час стиску без деформації або руйнування. У чавунів та крихких матеріалів напруження на стиск значно більше, ніж на розтяг.

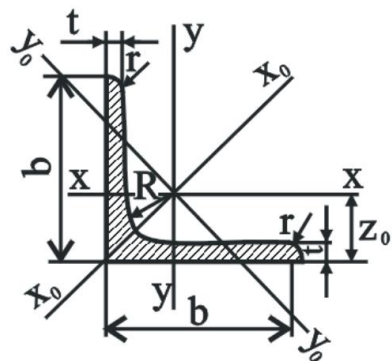
Додаток 7. Орієнтовні допустимі напруження на зріз для заклепкових і зварних з'єднань

Матеріал / Тип з'єднання	Допустиме напруження на зріз $[\tau]$, МПа
Заклепки зі сталі (Ст20, С235)	80–100
Заклепки зі сталі (С345, 09Г2С)	100–120
Заклепки з алюмінію	25–40
Заклепки з мідних сплавів	35–60
Зварні з'єднання зі сталі (звичайна якість)	100–140
Зварні з'єднання зі сталі (високоміцні сплави)	140–180
Зварні з'єднання з алюмінієвих сплавів	30–70
Зварні з'єднання з мідних сплавів	50–80
Зварні з'єднання з титанових сплавів	90–120

Пояснення:

- **Заклепкові з'єднання** зазвичай працюють на зріз, тому їхні допустимі напруження залежать від матеріалу заклепок.
- **Зварні з'єднання** оцінюють за межею плинності та типом зварного шва (наприклад, кутовий або стиковий шов може мати різні допустимі значення).
- **Допустиме напруження на зріз для заклепкових і зварних з'єднань** – це максимальне значення напруження, яке допускається у місці з'єднання при діючих зсувних навантаженнях, без перевищення межі міцності матеріалу та з урахуванням коефіцієнтів запасу.

Додаток 8. Кутики сталеві рівнобокі*



b – ширина полиці;
 t – товщина полиці;
 R – радіус внутрішнього закруглення;
 r – радіус закруглення полиць;
 J – момент інерції;
 i – радіус інерції;
 z_0 – відстань від центра ваги до зовнішньої грані полиці;
 J_{xy} – відцентровий момент інерції

Довідкові величини для осей																Маса 1 м, кг
Номер профілю	мм				Площа перерізу, см ²	$x - x$			$x_0 - x_0$		$y_0 - y_0$			$J_{xy},$ см ⁴	$z_0,$ см	
	b	t	R	r		$J_x,$ см ⁴	$W_x,$ см ³	$i_x,$ см	$J_{x_0max},$ см ⁴	$i_{x_0max},$ см	$J_{x_0min},$ см ⁴	$W_{y_0},$ см ³	$i_{y_0min},$ см			
2	20	3	3.5	1.2	1.13	0.40	0.28	0.59	0.63	0.75	0.17	0.20	0.39	0.23	0.60	0.89
		4			1.46	0.50	0.37	0.58	0.78	0.73	0.22	0.24	0.38	0.28	0.64	1.15
2.5	25	3			1.43	0.81	0.46	0.75	1.29	0.95	0.34	0.33	0.49	0.47	0.73	1.12
		4			1.86	1.03	0.59	0.74	1.62	0.93	0.44	0.41	0.48	0.59	0.76	1.46
		5			2.27	1.22	0.72	0.73	1.91	0.92	0.53	0.47	0.48	0.69	0.80	1.78
2.8	28	3	4.0	1.3	1.62	1.16	0.58	0.85	1.84	1.07	0.48	0.42	0.55	0.68	0.80	1.27
3	30	3	4.0	1.3	1.74	1.45	0.67	0.91	2.30	1.15	0.60	0.53	0.59	0.85	0.85	1.36
		4			2.27	1.84	0.87	0.90	2.92	1.13	0.77	0.61	0.58	1.08	0.89	1.78
		5			2.78	2.20	1.06	0.89	3.47	1.12	0.94	0.71	0.58	1.27	0.93	2.18
3.2	32	3	4.5	1.5	1.86	1.77	0.77	0.97	2.80	1.23	0.74	0.59	0.63	1.03	0.89	1.46
		4			2.43	2.26	1.00	0.96	3.58	1.21	0.94	0.71	0.62	1.32	0.94	1.91

* Сортамент (ГОСТ 8509-86)

Довідкові величини для осей																Маса 1 м, кг
Номер профілю	мм				Площа перерізу, см ²	$x - x$			$x_0 - x_0$		$y_0 - y_0$			$J_{xy},$ см ⁴	$z_0,$ см	
	b	t	R	r		$J_x,$ см ⁴	$W_x,$ см ³	$i_x,$ см	$J_{x_0max},$ см ⁴	$i_{x_0max},$ см	$J_{x_0min},$ см ⁴	$W_{y_0},$ см ³	$i_{y_0min},$ см			
3.5	35	3			2.04	2.35	0.93	1.07	3.72	1.35	0.97	0.71	0.69	1.37	0.97	1.60
		4			2.67	3.01	1.21	1.06	4.76	1.33	1.25	0.88	0.68	1.75	1.01	2.10
		5			3.28	3.61	1.47	1.05	5.71	1.32	1.52	1.02	0.68	2.10	1.05	2.58
4	40	3	5.0	1.7	2.35	3.55	1.22	1.23	5.63	1.55	1.47	0.95	0.79	2.08	1.09	1.85
		4			3.08	4.58	1.60	1.22	7.26	1.53	1.90	1.19	0.78	2.68	1.13	2.42
		5			3.79	5.53	1.95	1.21	8.75	1.52	2.30	1.39	0.78	3.22	1.17	2.98
		6			4.48	6.41	2.30	1.20	10.13	1.50	2.70	1.58	0.78	3.72	1.21	3.52
4.5	45	3	5.0	1.7	2.65	5.13	1.56	1.39	8.13	1.75	2.12	1.24	0.89	3.00	1.21	2.08
		4			3.48	6.63	2.04	1.38	10.52	1.74	2.74	1.54	0.89	3.89	1.26	2.73
		5			4.29	8.03	2.51	1.37	12.74	1.72	3.33	1.81	0.88	4.71	1.30	3.37
		6			5.08	9.35	2.95	1.36	14.80	1.71	3.90	2.06	0.88	5.45	1.34	3.99
5	50	3	5.5	1.8	2.96	7.11	1.94	1.55	11.27	1.95	2.95	1.57	1.00	4.16	1.33	2.32
		4			3.89	9.21	2.54	1.54	14.63	1.94	3.80	1.95	0.99	5.42	1.38	3.05
		5			4.80	11.20	3.13	1.53	17.77	1.92	4.63	2.30	0.98	6.57	1.42	3.77
		6			5.69	13.07	3.69	1.52	20.72	1.91	5.43	2.63	0.98	7.65	1.46	4.47
		7			6.56	14.84	4.23	1.50	23.47	1.89	6.21	2.93	0.97	8.63	1.50	5.15
		8			7.41	16.51	4.76	1.49	26.03	1.87	6.98	3.22	0.97	9.52	1.53	5.82
5.6	56	4	6.0	2.0	4.38	13.10	3.21	1.73	20.79	2.18	5.41	2.52	1.11	7.69	1.52	3.44
		5			5.41	15.97	3.96	1.72	25.36	2.16	6.59	2.97	1.10	9.41	1.57	4.25
6	60	4	7.0	2.3	4.72	16.21	3.70	1.85	26.69	2.33	6.72	2.93	1.19	9.48	1.62	3.71
		5			5.83	19.79	4.56	1.84	31.40	2.32	8.18	3.49	1.18	11.61	1.66	4.68
		6			6.92	23.21	5.40	1.83	36.81	2.31	9.60	3.99	1.18	13.60	1.70	5.43
		8			9.04	29.55	7.00	1.81	46.77	2.27	12.34	4.90	1.17	17.22	1.78	7.10
		10			11.08	35.32	8.52	1.79	55.64	2.24	15.00	5.70	1.16	20.32	1.85	8.70