

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний педагогічний університет
імені Михайла Коцюбинського
Факультет мистецтв і художньо-освітніх технологій
Кафедра образотворчого, декоративного мистецтва,
технологій та безпеки життєдіяльності

С. В. Подолянчук

ОПР МАТЕРІАЛІВ.
ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Навчальний посібник

Вінниця-2024

УДК 620.17(075.8)

DOI: [https://doi.org/10.31652/620.17\(075.8\)-1-62](https://doi.org/10.31652/620.17(075.8)-1-62)

П44

Рецензенти:

Марущак О. В., кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри декоративного, образотворчого мистецтва, технологій та безпеки життєдіяльності Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського

Іванчук А. В., кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри декоративного, образотворчого мистецтва, технологій та безпеки життєдіяльності Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського

Рекомендовано вченою радою факультету мистецтв і художньо-освітніх технологій Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського (протокол №2 від 11 вересня 2024 року)

Подольнчук С.В.

П44 Опір матеріалів. Лабораторні роботи: навчальний посібник. Вінниця: ВДПУ, 2024. 62 с.

Навчальний посібник містить рекомендації щодо виконання лабораторних робіт з курсу «Опір матеріалів», результатом яких є визначення напружень і деформацій експериментальних зразків та фізико-механічних характеристик матеріалів. Призначений для підвищення ефективності обробки та рівня оформлення результатів експериментальних досліджень.

Рекомендується для здобувачів вищої освіти спеціальності 014.10. Середня освіта (Технології).

ПЕРЕДМОВА

Сучасні тенденції в реформуванні освіти в Україні, вимагають суттєвого підвищення вимог до фахової підготовки студентів. Заклади середньої освіти та професійно-технічні навчальні заклади бажано отримувати фахівців максимально високої професійної кваліфікації. Природно, що важливість професійно-орієнтованих дисциплін буде постійно зростати.

Курс «Опору матеріалів» як науки про інженерні методи розрахунку на міцність, жорсткість і стійкість деталей машин, механізмів, елементів конструкцій та споруд є органічною складовою дисциплін загальнотехнічного циклу. Він характеризується великою кількістю фактичного матеріалу, що базується як на даних експериментальних досліджень, так і на теоретичних положеннях. Це дає змогу проводити великий комплекс робіт розрахункового та експериментально-дослідницького характеру.

Питання міцності, жорсткості й стійкості, що розглядаються в курсі «Опір матеріалів», є дуже важливими для майбутнього учителя технологій. Ознайомлення з основами розрахунків деталей машин та елементів конструкцій, методами випробування матеріалів та їх механічними характеристиками, дає змогу розширити технічний світогляд учнів закладів середньої освіти в період професійної підготовки.

Учитель технологій може використати набуті знання, проєктуючи та виготовляючи з учнями складні моделі, різноманітні конструкції та пристрої під час роботи гуртків технічної творчості. Грунтовна технічна підготовка може знадобитися учителю й під час проведення профорієнтаційної роботи.

Велику роль у формуванні технічної підготовки майбутнього учителя технологій відіграють лабораторні роботи з курсу «Опір матеріалів». Вони сприяють кращому розумінню органічного взаємозв'язку фундаментальних та спеціальних дисциплін, теоретичних розрахунків й основ сучасного виробництва. Лабораторні роботи також дають змогу переконатись у відповідності теоретичних положень отриманим експериментальним результатам, закріпити набуті теоретичні знання та виробити навички самостійної науково-дослідної роботи, використання складного устаткування та різноманітних вимірювальних приладів.

Навчальний посібник включає лабораторні роботи, в яких експериментально вивчаються закономірності всіх основних видів опору, а саме – розтягання (стискання), зрізу, кручення та згинання.

Кожна лабораторна робота складається з таких розділів: мета роботи; задачі роботи; теоретичні відомості; обладнання, матеріали та інструменти; порядок проведення експерименту; обробка результатів досліджень; основні результати та висновки; контрольні запитання.

В теоретичних відомостях викладено матеріал, який доповнює і конкретизує відповідні розділи лекційного курсу. Лабораторне устаткування описано в обсязі, що достатній для вивчення його конструкції, призначення та принципу роботи. В розділі «Порядок проведення експерименту» детально описана методика отримання експериментальних даних. Суть процесу обробки результатів експериментальних досліджень полягає в проведенні відповідних математичних розрахунків, занесенні отриманих даних безпосередньо до поданих таблиць та графічній побудові (в разі необхідності) тих чи інших залежностей з використанням координатної сітки. Висновки за результатами виконання лабораторної роботи студенти роблять самостійно. В додатках приведені необхідні довідкові матеріали.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ З ВИПРОБУВАНЬ НА РОЗТЯГАННЯ

Мета роботи: вивчення закономірностей розтягання металевого зразка, виготовленого з маловуглецевої сталі.

Задачі роботи:

- дослідження процесу розтягання;
- побудова діаграми розтягання;
- визначення характеристик міцності металевого зразка, виготовленого з маловуглецевої сталі;
- визначення характеристик пластичності металевого зразка, виготовленого з маловуглецевої сталі.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Обов'язковою умовою проведення проєктних чи перевірних розрахунків деталей механізмів, машин або елементів конструкцій є знання фізико-механічних властивостей матеріалів, зокрема границі текучості, границі міцності, модуля Юнга тощо. Більшість з цих характеристик отримують дослідним шляхом. Причому найбільш розповсюдженим видом досліджень є випробування матеріалів на розтягання.

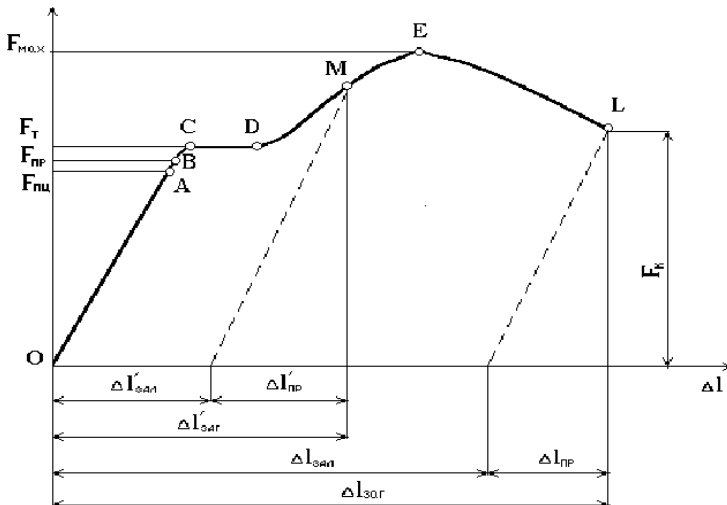


Рис. 1.1. Діаграма розтягання для маловуглецевої сталі.

Для вивчення поведінки матеріалу під час його дослідження на розтягання закріпленій зразок навантажують силою, що повільно зростає та направлена вздовж його осі. При цьому фіксують величину сили розтягання F і подовження зразка Δl . За результатами експерименту будують початкову діаграму розтягання (рис. 1.1), в якій по осі ординат відкладають зусилля F , а по осі абсцис – відповідні до них подовження Δl .

Розглянемо характерні ділянки й точки діаграми. На ділянці OA спостерігається лінійна залежність між навантаженням зразка і його подовженням. Це означає, що на цій ділянці виконується закон Гука. Максимальне напруження, за якого ще справджується закон Гука називається **границею пропорційності**

$$\sigma_{\text{пц}} = F_{\text{пц}}/A_0, \quad (1.1)$$

де $F_{\text{пц}}$ – сила, за якої закон пропорційності припиняє свою дію, A_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка.

При переході за точку A справедливості закону Гука порушується: подовження проходить інтенсивніше за ріст сили F . В результаті пряма OA поступово переходить в криву AB . Ділянка OB характеризує пружну стадію розтягання, а сила, що відповідає точці B діаграми, позначається $F_{\text{пр}}$. Найбільше напруження, за якого залишкова деформація при розвантаженні не спостерігається, називається **границею пружності**

$$\sigma_{\text{пр}} = F_{\text{пр}}/A_0 \quad (1.2)$$

Границя пружності є характеристикою, мало пов'язаною з законом Гука. Точка B може бути розміщена як вище, так і нижче точки A . Проте на практиці положення цих точок, а значить і значення напружень $\sigma_{\text{пц}}$ і $\sigma_{\text{пр}}$ близькі, тому різницею між ними, як правило, нехтують.

В точці C крива переходить в горизонтальну або майже горизонтальну ділянку CD . На цій стадії зразок подовжується при постійному значенні розтягальної сили, яка позначається F_T . В цьому випадку кажуть, що матеріал «тече», а горизонтальну ділянку CD називають площадкою текучості. Найменше напруження, за якого деформація зразка проходить при постійному зусиллі, називається **границею текучості**

$$\sigma_T = F_T/A_0 \quad (1.3)$$

При досягненні границі текучості попередньо полірована поверхня зразка стає матовою, оскільки на ній з'являється густа сітка ліній, нахилених до осі приблизно під кутом 45° . Ці лінії називаються лініями Чернова-Людерса. Вони виникають внаслідок зсуву в площинах, де діють максимальні дотичні напруження.

За подальшого розтягання зразок знову набуває здатності чинити опір зростаючому навантаженню. Цьому відповідає висхідна ділянка DE, що називається *ділянкою зміцнення* або *зоною наклепу*. Точка E характеризує найбільше зусилля F_{\max} , яке може сприймати зразок. Найбільше напруження, яке може витримати досліджуваний матеріал, називається **границею міцності** або **тимчасовим опором**

$$\sigma_M = \sigma_{To} = F_{\max}/A_0 \quad (1.4)$$

Після досягнення максимального навантаження при подальшому розтягуванні деформація зразка проходить головним чином на невеликій ділянці. Це приводить до утворення шийки й до зменшення сили F. Значення **критичного напруження**

$$\sigma_K = F_K/A_0, \quad (1.5)$$

де F_K – розтягальна сила в момент розриву, має умовний характер, оскільки в формулі (1.5) враховується початкова площа поперечного перерізу.

Дійсне напруження в момент розриву можна знайти за такою залежністю

$$\sigma_d = F_{\text{роз}}/A_{\text{ш}} \quad (1.6)$$

де $A_{\text{ш}}$ – площа поперечного перерізу шийки, $F_{\text{роз}}$ – зусилля розриву, яке чисельно дорівнює значенню сили F_K .

Точка L відповідає розриву зразка. Повне (загальне) подовження в такому випадку складається з двох частин: пружної й пластичної (залишкової)

$$\Delta l_{\text{заг}} = \Delta l_{\text{пр}} + \Delta l_{\text{зал}} \quad (1.7)$$

Аналогічно визначається подовження δ в довільній точці M.

Враховуючи, що на практиці дуже складно встановити початок відхилення від закону пропорційності чи моменту появи перших залишкових деформацій, вводять поняття умовної границі пропорційності та умовної границі пружності

Умовною границею пропорційності називають найменше напруження, за якого відхилення від лінійної залежності між напруженням та деформацією досягає деякого значення, що встановлюється технічними умовами (наприклад, 0,002% від вимірюваної довжини зразка)

Умовною границею пружності називають найменше напруження, за якого залишкова деформація досягає заданої величини (як правило, 0,001-0,05% від довжини зразка). Цю величину вказують у вигляді нижнього індексу відповідно до заданого значення залишкової деформації (наприклад, $\sigma_{0,001}$ або $\sigma_{0,05}$).

Крім того, існують метали, які при розтяганні не утворюють площадки текучості. Для них границя текучості визначається умовно. Умовною границею текучості називають напруження, за якого

залишкова деформація складає величину, що встановлена державним стандартом або технічними вимогами. Згідно з державними стандартами, величина залишкової деформації складає 0,2% від довжини зразка та при позначенні вказується у вигляді нижнього індексу ($\sigma_{0,2}$).

При статичних випробуваннях металів на розтягання крім параметрів, що характеризують міцність, визначають ще й параметри пластичності. Пластичність в такому випадку проявляється в тому, що під дією навантаження зразки з різних матеріалів подовжуються чи звужуються неоднаковою мірою. Ці характеристики також можна отримати за допомогою діаграми розтягання.

Відносним залишковим подовженням δ (%) називають відношення абсолютного подовження зразка після розриву до його початкової довжини

$$\delta = \frac{\Delta l_{\max}}{l_0} 100\% = \frac{l_{\text{роз}} - l_0}{l_0} 100\% \quad (1.8)$$

де $l_{\text{роз}}$ – довжина розрахункової частини зразка після розриву, l_0 – початкова розрахункова довжина зразка.

Відносним залишковим звуженням ψ (%) називають відношення величини зменшення площі поперечного перерізу зразка після розриву до початкової площі

$$\psi = \frac{A_0 - A_{\text{ш}}}{A_0} 100\%, \quad (1.9)$$

де A_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, $A_{\text{ш}}$ – площа поперечного перерізу шийки.

Використовуючи діаграму розтягання (рис 1.1), можна наближено визначити *повну роботу деформації*

$$W = F_{\max} \Delta l_{\text{заг}} \varphi, \quad (1.10)$$

де $\Delta l_{\text{заг}}$ – загальна абсолютна деформація, φ – коефіцієнт заповнення діаграми, який для м'якої сталі дорівнює приблизно 0,85.

Робота, що витрачається на деформацію й розрив розрахункової частини зразка, визначається за формулою

$$W_{\text{розр}} = F_{\max} \Delta l_{\text{зал}} \varphi, \quad (1.11)$$

де $\Delta l_{\text{зал}}$ – залишкова абсолютна деформація.

Питома робота деформації w_0 характеризує в'язкість матеріалу, його здатність поглинати енергію при розриві та чинити опір дії динамічного навантаження. Вона визначається за формулою

$$w_0 = W_{\text{розр}} / V_{\text{розр}}, \quad (1.12)$$

де $V_{\text{розр}} = A_0 l_0$ – об'єм зразка.

Іноді для визначення механічних характеристик зручно використовувати умовну діаграму розтягання, побудовану в координатах σ – ε . Для цього всі значення сили ділять на початкову площу поперечного перерізу A_0 , а подовження зразка – на початкову довжину l_0 .

ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

1. Розривна машина.
2. Експериментальні зразки.
3. Штангенциркуль.

У навчальній і виробничій практиці для дослідження матеріалів на розтягання широко використовують розривні машини. Конструктивне виконання їх основних вузлів неоднакове і залежить від типу машини, величини навантаження, потужності тощо.

На рис. 1.2. зображена конструкція розривної машини, що використовується для дослідження матеріалів на розтягання. Розривна машина складається зі станини 1, на якій монтується електричний двигун 2 з конденсатором 3, редуктор 4, блок керування 5 та два кронштейни 6, 7, на яких закріплені відтарировані пружини 8. До пружин за допомогою болтового з'єднання монтується важіль 9.

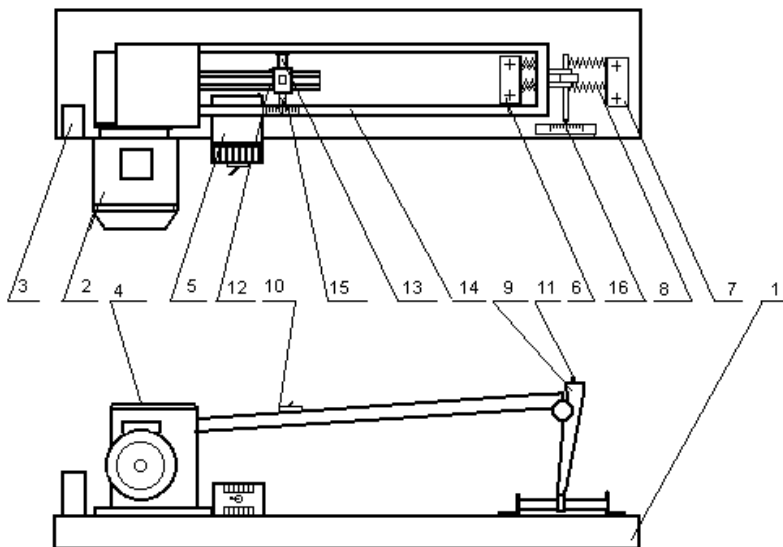


Рис. 1.2. Розривна машина.

Експериментальний зразок закріплюється в захватах 10, 11, один з яких є рухомим.

При вмиканні електродвигуна 2 рух вала передається на редуктор 4, який забезпечує зменшення частоти його обертання. За допомогою передачі гвинт-гайка обертальний рух гвинта 12 перетворюється в поступальний рух навантажувального пристрою 13, можливість переміщення якого забезпечують підшипники кочення, що рухаються по напрямним рами 14. Подовження зразка та величину розтягального навантаження визначають за допомогою відповідних вимірювальних пристроїв 15 та 16.

Слід відзначити, що конструктивні виконання окремих вузлів розривної машини можуть значно відрізнятись один від одного. Так, наприклад, для створення навантаження на зразок часто використовують електро- чи гідропривід. Величина зусилля може вимірюватись за допомогою важільних, важільно-маятникових, пружинних, електричних та інших пристроїв. Визначення деформації здійснюється, як правило, за допомогою спеціальних діаграмних апаратів. Проте навіть використання прикріпленої лінійки чи штангенциркуля забезпечує достатню для навчальних цілей точність вимірювання.

Для того, щоб результати досліджень можна було порівняти, використовують пропорційні циліндричні й плоскі зразки. На рис. 1.3. зображений циліндричний зразок, призначений для проведення

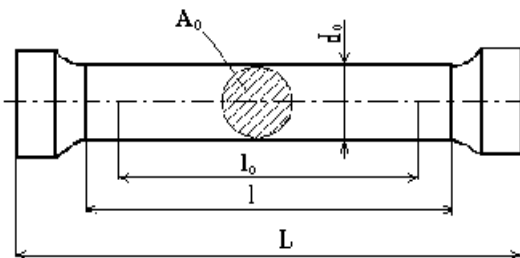


Рис. 1.3. Експериментальний зразок

досліджень на розтягання. Основними його розмірами є діаметр робочої частини d_0 , довжина робочої частини l , розрахункова довжина l_0 та загальна довжина зразка L .

Розрахунковою вважають довжину, на якій визначають деформацію.

Її беруть меншою від довжини робочої частини на діаметр або товщину зразка з кожної сторони.

$$l_0 \cong l - 2d_0 \quad (1.13)$$

Такий підхід є реалізацією принципу Сен-Венана, оскільки на відстані діаметра (товщини) від початку робочої частини зразка напружений стан однорідний і не залежить від способу прикладення розтягальної сили.

Крім того, в зразках циліндричної форми повинно витримуватись певне співвідношення між розрахунковою довжиною l_0 і діаметром робочої частини d_0 . Для довгих зразків це співвідношення повинно складати $l_0=10d_0$, для коротких – $l_0=5d_0$, причому діаметр рекомендується вибирати в межах 3...25 мм. Враховуючи, що для циліндричних зразків площа поперечного перерізу дорівнює $A=\pi d_0^2/4$, розрахункова довжина довгого зразка пов'язана з площею таким співвідношенням

$$l_0 \approx 11,3\sqrt{A} \quad (1.14)$$

Ширина плоского зразка, яка приймається в межах 3...25 мм, повинна бути втричі більша його товщини. При цьому співвідношення між розрахунковою довжиною і площею зберігається.

Слід також відзначити, що використання зразків із загальноприйнятими співвідношеннями основних розмірів підвищує достовірність отриманих даних. Проте для навчальних цілей, особливо у випадку наявності певних обмежень, що накладаються технічними можливостями розривної машини, допускається використання інших зразків. Отримані у цьому випадку значення фізико-механічних характеристик матеріалу можуть дещо відрізнятись від довідкових, але основні закономірності процесу розтягання при цьому зберігаються.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

1. Закріпити експериментальний зразок в захватах 10 і 11.
2. Увімкнувши двигун 2, встановити нижню межу навантаження, вибравши при цьому всі можливі зазори.
3. Використовуючи штангенциркуль, виміряти геометричні характеристики зразка (діаметр і довжину робочої частини).
4. Використовуючи формулу (1.13), визначити початкову розрахункову довжину зразка l_0 .
5. Визначити площу поперечного перерізу та об'єм робочої частини зразка та всі дані занести до таблиці 1.1.
6. Увімкнувши двигун 2, встановити перший ступінь навантаження (бажано в межах 30-50Н), дійсну величину якого визначити за допомогою вимірювального пристрою 16.
7. За допомогою вимірювального пристрою 15 визначити параметр довжини a_l (мм).
8. За допомогою вимірювального пристрою 16 визначити параметр довжини b_l (мм).

9. Враховуючи особливості конструкції установки, визначити абсолютне подовження зразка для першого ступеня навантаження Δl_1 (мм) за формулою

$$\Delta l_1 = a_1 - 0,2b_1 \quad (1.15)$$

10. Увімкнувши двигун 2, перейти на другий ступінь навантаження. Значення розтягальної сили визначити за допомогою вимірювального пристрою 16.

11. Повторивши пункти 7, 8, 9, визначити величину абсолютного подовження досліджуваного зразка для другого ступеня навантаження.

12. Пункти 10 і 11 повторювати до досягнення зразком границі текучості.

13. Після досягнення границі текучості величину абсолютного подовження зразка і значення навантаження визначати після короточасного (1-2 с) увімкнення двигуна.

14. Після переходу в зону наклепу пункти 10 і 11 повторювати до досягнення границі міцності.

15. Після досягнення границі міцності величину абсолютного подовження зразка і значення навантаження визначати після короточасного (1-2 с) увімкнення двигуна до моменту руйнування зразка.

16. Після руйнування зразка за допомогою штангенциркуля виміряти діаметр шийки.

17. Отримані дані експериментальних досліджень занести до таблиці 1.2.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Занести до таблиці 1.1 вихідні дані для проведення експерименту.

Таблиця 1.1. Вихідні дані для проведення експерименту.

№ п/п	Назва величини	Чисельне значення
1.	Діаметр робочої частини зразка (d_0), мм	
2.	Довжина робочої частини зразка (l), мм	
3.	Початкова розрахункова довжина (l_0), мм	
4.	Площа поперечного перерізу робочої частини зразка (A_0), мм ²	
5.	Об'єм робочої частини зразка (V), мм ³	

2. Занести до таблиці 1.2 дані експериментальних досліджень.

Таблиця 1.2. Дані експериментальних досліджень.

№	Навантаження, Н	Покази (а), мм	Покази (b), мм	Абс. подовж. Δl , мм	№	Навантаження, Н	Покази (а), мм	Покази (b), мм	Абс. подовж. Δl , мм
1					13				
2					14				
3					15				
4					16				
5					17				
6					18				
7					19				
8					20				
9					21				
10					22				
11					23				
12					24				

3. Використовуючи значення розтягальної сили та абсолютного подовження, побудувати діаграму розтягання в координатах F- Δl (рис. 1.4.)

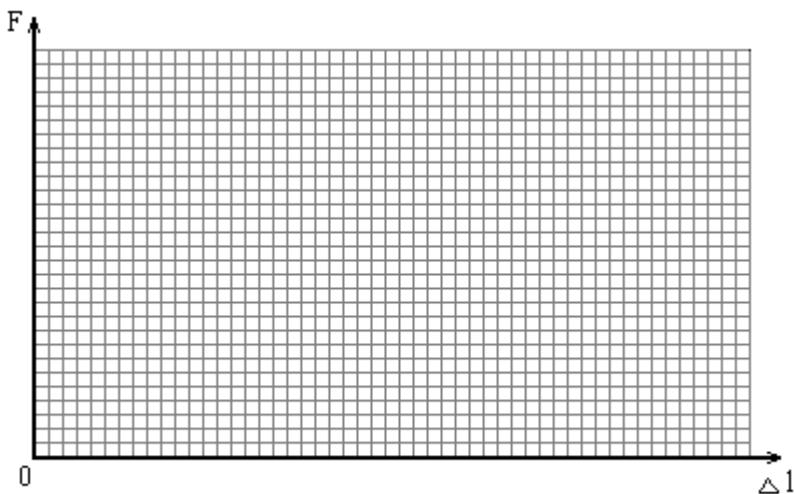


Рис. 1.4. Діаграма розтягання зразка, виготовленого з маловуглецевої сталі.

4. Використовуючи дані з таблиці 1.2 за формулою

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \quad (1.16)$$

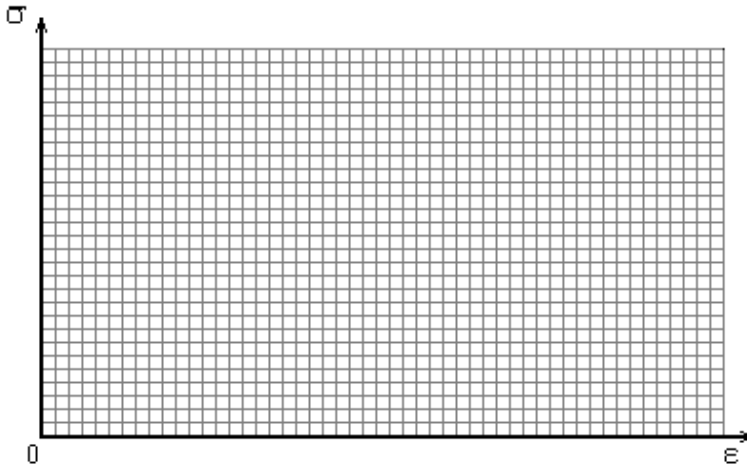


Рис. 1.5. Діаграма розтягання в координатах σ - ϵ .

визначити величину відносного подовження для кожного ступеня навантаження.

5. Використовуючи дані з таблиці 1.2 за формулою

$$\sigma = N/A_0, \quad (1.17)$$

де N – нормальна сила, що чисельно дорівнює силі розтягання F , визначити нормальне напруження для кожного ступеня навантаження.

6. Отримані результати занести в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3. Значення відносної деформації та нормального напруження.

№	ϵ	σ , МПа	№	ϵ	σ , МПа	№	ϵ	σ , МПа
1			9			17		
2			10			18		
3			11			19		
4			12			20		
5			13			21		
6			14			22		
7			15			23		
8			16			24		

7. За даними таблиці 1.3 побудувати умовну діаграму розтягання в координатах σ - ϵ (рис. 1.5).

8. Використовуючи діаграму розтягання (рис. 1.4.), визначити навантаження, що відповідає границі пропорційності, границі текучості, границі міцності та навантаження в момент розриву.

9. Використовуючи формули (1.1), (1.3), (1.4) та (1.6), знайти границю пропорційності, границю текучості, границю міцності та дійсне напруження в момент розриву.

10. Використовуючи формули (1.8), (1.9), (1.11) та (1.12), визначити відносне залишкове подовження, відносне залишкове звуження, повну роботу деформації та питому роботу деформації зразка.

11. Отримані дані занести до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Основні фізико-механічні характеристики маловуглецевої сталі, отримані із випробувань на розтягання.

№ п/п	Назва величини	Чисельне значення
1	Діаметр зразка в місці розриву (d_m), мм	
2	Площа поперечного перерізу в місці розриву (A_m), мм	
3	Навантаження, що відповідає границі пропорційності (F_m), Н	
4	Навантаження, що відповідає границі текучості (F_T), Н	
5	Навантаження, що відповідає границі міцності (F_{max}), Н	
6	Навантаження в момент розриву (F_K), Н	
7	Границя пропорційності (σ_m), МПа	
8	Границя текучості (σ_T), МПа	
9	Границя міцності (σ_M), МПа	
10	Дійсне напруження в момент розриву (σ_d), МПа	
11	Відносне залишкове подовження (δ), %	
12	Відносне залишкове звуження (ψ), %	
13	Повна робота деформації за діаграмою (W), Н*м	
14	Питома робота деформації (w_0), Н*мм ³	

12. Зробити висновки щодо дослідження процесу розтягання металевого зразка, виготовленого з маловуглецевої сталі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ ПРУЖНОСТІ СТАЛІ

Мета роботи: дослідна перевірка закону пропорційності між подовженням і навантаженням у межах пружних деформацій та порівняльний аналіз методів визначення модуля повздовжньої пружності сталі.

Задачі роботи:

- ознайомлення з методикою експериментальної перевірки закону пропорційності між подовженням і навантаженням у межах пружних деформацій;
- визначення різними методами модуля повздовжньої пружності сталі;
- оцінка точності визначення модуля Юнга.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Проведені численні експериментальні дослідження дозволили зробити висновок, що між відносною повздовжньою деформацією ε і нормальним напруженням σ , яке виникає в поперечному перерізі стержня, в певних межах навантаження існує прямо пропорційна залежність, яка називається законом Гука

$$\varepsilon = \sigma / E \quad \text{або} \quad \sigma = \varepsilon E, \quad (2.1)$$

де E – модуль повздовжньої пружності або модуль пружності першого роду або модуль Юнга. Модуль Юнга має розмірність напруження (Па) і є однією з найважливіших констант матеріалу. Він визначається природою самого матеріалу і характеризує його пружні властивості, тобто здатність тіла чинити опір зміні форми і розмірів.

Наслідком закону Гука є умова, за якої на пружній стадії деформування для багатьох матеріалів абсолютне подовження зразка Δl прямо пропорційне силі F , довжині l_0 тієї частини стержня, подовження якої вимірюється приладами, і обернено пропорційне площі поперечного перерізу зразка A_0 :

$$\Delta l = Fl_0 / EA_0 \quad (2.2)$$

Добуток EA_0 у формулі (2.2) називають жорсткістю поперечного перерізу стержня.

Для підтвердження справедливості закону Гука для сталі діаграму розтягання будують тільки до площадки текучості в координатах «навантаження – абсолютне подовження». Це дозволяє визначити модуль Юнга з формули, що виражає закон Гука:

$$E = F l_0 / \Delta l A_0 \quad (2.3)$$

На практиці для встановлення в пружній зоні залежності між абсолютним подовженням Δl і повздовжньою силою F зразок навантажують східчасто, послідовно збільшуючи навантаження на однакову величину.

Відомо, що закон Гука справедливий лише до значень границі пропорційності $\sigma_{пц}$. Тому слід пам'ятати, що значення максимальної сили F_{max} в межах застосування закону Гука не повинно перевищувати значення

$$F_{max} \leq \sigma_{пц} A_0 \quad (2.4)$$

При цьому величину навантаження до границі пропорційності розділяють на 4-5 однакових частин. Для сталі границю пропорційності вважають досягнутою тоді, коли різко (приблизно на 50%) змінюється Δl , що відповідає збільшенню тангенса кута $\beta_{пц}$ між прямолінійною ділянкою діаграми та віссю ординат в 1,5 раза (рис. 2.1)

Після границі пропорційності знаходять границю текучості σ_t , яка може бути основою для визначення границі пропорційності за наближеною залежністю

$$\sigma_{пц} \cong \sigma_t / 1,2 \quad (2.5)$$

Проте слід визнати, що діаграма розтягання в координатах $F-\Delta l$ залежить не тільки від властивостей матеріалу, а й від розмірів самого зразка. Тому для отримання діаграми, яка характеризує лише механічні властивості матеріалу, початкову діаграму розтягання перебудовують в координатах $\sigma-\epsilon$ (рис. 2.2)

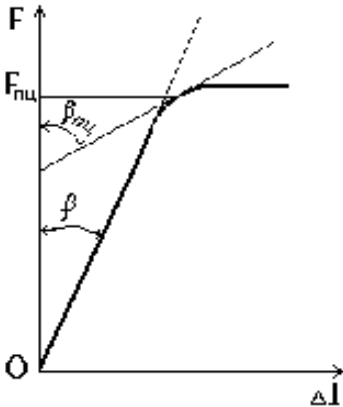


Рис. 2.1. Прямолінійна ділянка діаграми розтягання, що побудована в координатах $F-\Delta l$.

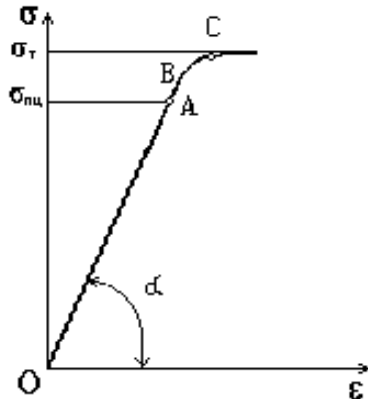


Рис. 2.2. Прямолінійна ділянка діаграми розтягання, що побудована в координатах $\sigma-\epsilon$.

Оскільки абсолютне подовження Δl прямо пропорційне відносному видовженню ε , а сила F прямо пропорційна нормальному напруженню σ , обидві діаграми відрізняються лише масштабами осей абсцис і ординат. Для стану, що визначається точкою А, залежність (2.1) набуде вигляду

$$E = \sigma_{\text{пц}} / \varepsilon_{\text{пц}} \quad (2.6)$$

або враховуючи залежність (2.5)

$$E = \sigma_r / 1,2 \varepsilon_{\text{пц}} \quad (2.7)$$

З діаграми розтягання (рис. 2.2) видно, що відношення $\sigma/\varepsilon = \text{const}$ на всій ділянці пропорційності

$$\sigma/\varepsilon = E \quad (2.8)$$

Тому для довільної точки, що лежить на прямій лінії

$$E = \sigma/\varepsilon = \text{tg} \alpha, \quad (2.9)$$

де α – кут між прямолінійною ділянкою діаграми σ – ε і віссю абсцис.

Таким чином, геометричний зміст модуля пружності першого роду (модуля Юнга) полягає в тому, що він являє собою тангенс кута нахилу до осі абсцис прямолінійної ділянки діаграми розтягання, побудованої в координатах σ – ε .

ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

1. Розривна машина.
2. Експериментальний зразок.
3. Штангенциркуль.

Конструкція і принцип дії розривної машини та типи експериментальних зразків детально описані в методичних вказівках до виконання лабораторної роботи № 1.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

1. Закріпити експериментальний зразок в захватах 10 і 11.
2. Використовуючи штангенциркуль, виміряти геометричні характеристики зразка (діаметр d_0 і довжину робочої частини l).
3. Використовуючи формулу (1.13), визначити початкову розрахункову довжину зразка l_0 .
4. Визначити площу поперечного перерізу зразка A_0 .
5. За допомогою діаграми розтягання, побудованої за даними лабораторної роботи №1, визначити в межах застосування закону Гука максимальне навантаження (навантаження, що відповідає границі пропорційності $F_{\text{пц}}$).

6. Розбити ділянку пропорційності на 5 частин і визначити крок навантаження

$$\Delta F = F_{\text{пн}}/5 \quad (2.10)$$

7. За допомогою діаграми розтягання, побудованої в координатах σ - ϵ , визначити границю текучості (σ_T) та відносну деформацію, що відповідає границі пропорційності ($\epsilon_{\text{пн}}$), і всі дані занести до таблиці 2.1.

8. Увімкнувши двигун 2, встановити нижню межу навантаження, вибравши при цьому всі можливі зазори.

9. Навантажити зразок силою, що відповідає першому ступеню навантаження, контролюючи його величину за допомогою вимірювального пристрою 16.

10. Використовуючи покази вимірювальних пристроїв 15, 16 та формулу (1.15) визначити абсолютне подовження зразка для першого ступеня навантаження Δl_1 (мм).

11. Повторити пункти 9,10 для кожного ступеня навантаження і всі дані занести до таблиці 2.2.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Занести до таблиці 2.1 початкові дані для проведення експерименту

Таблиця 2.1. Початкові дані для проведення експерименту.

№	Вихідна величина	Числове значення
1	Діаметр робочої частини зразка (d_0), мм	
2	Довжина робочої частини зразка (l), мм	
3	Початкова розрахункова довжина (l_0), мм	
4	Площа поперечного перерізу робочої частини (A_0), мм ²	
5	Максимальне навантаження в межах застосування закону Гука ($F_{\text{пн}}$), Н	
6	Крок навантаження (ΔF), Н	
7	Границя текучості (σ_T), МПа	
8	Відносна деформація, що відповідає границі пропорційності ($\epsilon_{\text{пн}}$)	

2. Занести до таблиці 2.2 дані експериментальних досліджень.

Таблиця 2.2. Дані експериментальних досліджень.

Ступінь навантаження	Величина навантаження F, Н	Абсолютне подовження Δl , мм
1		
2		
3		
4		
5		

3. Використовуючи експериментальні дані з таблиці 2.2., побудувати ділянку діаграми розтягання в координатах F- Δl (рис. 2.3.).

4. Аналізуючи вид побудованої ділянки діаграми розтягання, зробити висновок щодо справедливості закону пропорційності між подовженням зразка і розтягальною силою в межах пружних деформацій.

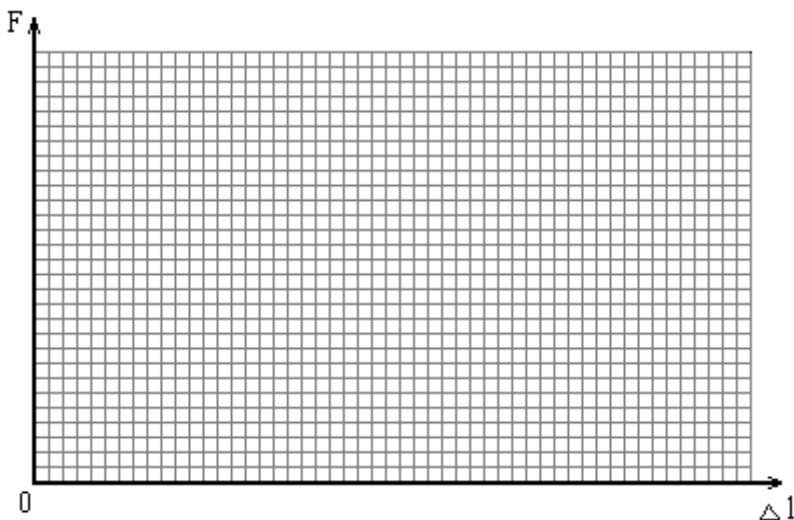


Рис. 2.3. Прямолінійна ділянка діаграми розтягання

5. Використовуючи формулу (2.3), визначити модуль Юнга для кожного ступеня навантаження.

6. Використовуючи формулу

$$E_1 = (E_1 + E_2 + \dots + E_n) / n, \quad (2.11)$$

де n – кількість ступенів навантаження (в нашому випадку $n=5$), знайти середнє значення модуля Юнга.

7. Отримані дані занести до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Результати обробки експериментальних даних.

Ступінь навантаження	Модуль Юнга E, МПа	Середнє значення модуля Юнга E _{ср} , МПа
1		
2		
3		
4		
5		

8. Використовуючи значення границі текучості σ_T та відносну деформацію, що відповідає границі пропорційності $\varepsilon_{пл}$, (таблиця 2.1) за формулою (2.7), визначити модуль Юнга E_{II} .

9. Графічним способом за допомогою діаграми розтягання, що побудована в координатах σ - ε (рис. 1.5), визначити кут нахилу прямолінійної ділянки до осі абсцис.

10. За допомогою формули (2.9) визначити модуль Юнга (E_{III})

11. Для матеріалу зразка знайти довідкове значення модуля Юнга E_d (Додаток 1).

12. За формулою

$$\delta = \frac{|E_i - E_d|}{E_d} 100\% \quad (2.12)$$

де E_i – модуль Юнга, визначений відповідно за пунктами 6, 8, 10, знайти відносну похибку у визначенні модуля пружності першого роду.

13. Отримані дані занести до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Значення модуля Юнга, визначеного різними методами.

№ п/п	Умовне позначення	Метод визначення модуля Юнга (E)	Формули	Значення модуля Юнга, МПа	Похибка визначення δ , %
1	E_I	Аналітичний (на основі закону пропорційності)	(2.3), (2.11)		
2	E_{II}	Аналітичний (з використання значення границі текучості)	(2.7)		
3	E_{III}	Графоаналітичний (з використанням прямолінійної ділянки діаграми розтягання, побудованої в координатах σ - ε)	(2.9)		
Довідкове значення модуля Юнга (E_d)					

14. Зробити висновок щодо найбільш точного методу визначення модуля Юнга.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВИПРОБУВАННЯ ЗРАЗКІВ З РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ НА СТИСКАННЯ

Мета роботи: встановлення закономірностей процесу стискання зразків, виготовлених з різних матеріалів.

Задачі роботи:

- ознайомлення з методикою випробування різних матеріалів на стискання;
- експериментальне визначення основних характеристик міцності пластичних та крихких матеріалів;
- експериментальне визначення коефіцієнта анізотропії для анізотропних матеріалів;
- побудова та обробка діаграм стискання.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Дослідження на стискання, не дивлячись на його простоту, проводять рідше, ніж на розтягання. Пояснюється це тим, що для більшості пластичних матеріалів границя пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$, модуль Юнга E , границя пружності $\sigma_{\text{пр}}$, границя текучості $\sigma_{\text{т}}$ при стисканні такі ж, що й при розтяганні.

Однією з особливостей поведінки пластичних матеріалів при стисканні є відсутність в багатьох випадках руйнування зразка чи подрібнення його на частини. Тому напруження, що відповідає руйнівній силі, при стисканні пластичних матеріалів отримати не можна. При цьому зразок не руйнується, а перетворюється в диск і стискальна сила постійно збільшується. Характеристики, аналогічні отриманим при розтяганні відносному подовженню і відносному звуженню в процесі дослідження пластичних матеріалів на стискання також не можна отримати. Лише в окремих випадках пластичні матеріали обов'язково випробовують на стискання, наприклад, сталі при виготовленні кулькових та роликкових підшипників.

Дослідженню на стискання піддають головним чином крихкі матеріали: чавун, фарфор, природні та штучні будівельні матеріали тощо. Слід зазначити, що крихкими називають матеріали, відносно залишкове подовження яких не перевищує 5%. Ці матеріали, як правило, краще чинять опір стисканню, ніж розтяганню, та використовуються для виготовлення елементів, що працюють на стискання. Для їхнього розрахунку на міцність необхідно знати характеристики, що були отримані при такому виді досліджень.

Крім того, на стискання часто досліджують анізотропні матеріали, зокрема, деревину. Ці матеріали відзначаються різними характеристиками міцності залежно від напрямку стискальної сили стосовно напрямку волокон. При цьому слід розрізняти стискання поперек волокон по радіусу ствола і вздовж річного шару (по дотичній до кола).

Зразки для випробування на стискання виготовляють з круглим або квадратним поперечним перерізом. Слід відзначити, що деформаційні та міцнісні характеристики циліндричного зразка суттєво залежать від відношення висоти зразка до його діаметра. Так, наприклад, при необґрунтованому збільшенні висоти зразка під час його дослідження на стискання може виникнути значне бокове розширення.

Крім того, на результати випробувань і характер руйнування зразка суттєво впливають умови тертя на його торцях. У звичайних умовах деформування крихкі матеріали при розтяганні руйнуються в результаті розриву. При стисканні внаслідок тертя, що виникає на опорних поверхнях, відрив ускладнюється, а зразок руйнується по похилих площадках. Якщо силу тертя зменшити, наносячи на поверхні, що контактують, наприклад, шар парафіну, руйнування відбудеться по-іншому: спочатку на зразку утворюються тріщини, паралельні напрямку стискальної сили, а потім відбудеться розшарування зразка.

Під дією стискального навантаження характер поведінки зразків з різних матеріалів помітно відрізняється один від одного.

Пластичні матеріали (сталі). Початкова ділянка діаграми стискання зразків з маловуглецевої сталі являє собою пряму (рис. 3.1),

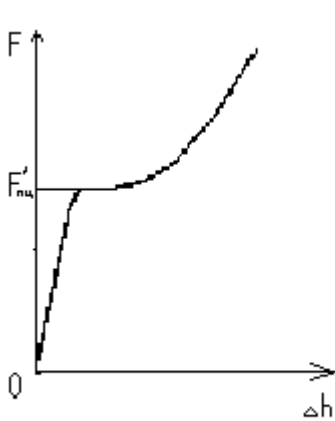


Рис. 3.1. Діаграма стискання маловуглецевої сталі.

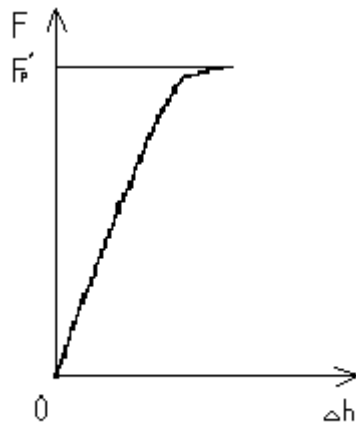


Рис. 3.2. Діаграма стискання чавуну.

яка відображає пропорційну залежність між деформацією зразка і навантаженням (закон Гука).

Відношення сили $F'_{\text{пц}}$ до початкової площі поперечного перерізу зразка A_0 називається *границею пропорційності* сталі при стисканні:

$$\sigma'_{\text{пц}} = F'_{\text{пц}}/A_0 \quad (3.1)$$

В процесі подальшого навантаження спостерігається значний приріст деформації, тобто матеріал «тече», але без явно вираженої площадки текучості. Щоб деформація зросла, стискальне навантаження різко збільшують. При цьому деформації зростають повільніше внаслідок збільшення перерізу зразка. В результаті зразок не руйнується, а розплющуються, деколи з утворенням тріщин. Тому пластичні матеріали при стисканні не мають границі міцності – чітко виражена лише границя пропорційності.

Крихкі матеріали (чавун). При стисканні чавунного зразка практично з початку навантаження і до моменту руйнування спостерігається нелінійна залежність між силою і деформацією. Але в умовах тих невеликих деформацій, при яких матеріал використовують в різних деталях машин та елементах конструкцій, діаграма $F-\Delta h$ являє собою лінію малої кривизни (рис. 3.2). Тому в практичних розрахунках вважають, що поведінка матеріалу підлягає закону Гука. Чітко виражене лише руйнівне навантаження F'_p , яке до того ж є максимальним. Відношення сили F'_p до початкової площі поперечного перерізу зразка A_0 називають *границею міцності* σ'_m або *тимчасовим опором* $\sigma'_{\text{то}}$ чавуна при стисканні

$$\sigma'_m = \sigma'_{\text{то}} = F'_p/A_0 \quad (3.2)$$

Зразок, вкочуючись, набуває діжкоподібної форми. Це свідчить про наявність невеликих пластичних деформацій. Руйнування здійснюється по площинах, нахилених до осі зразка під кутом $\alpha \approx 40^\circ \dots 50^\circ$, тобто під дією максимальних дотичних напружень. При руйнуванні навантажувальна здатність чавуну падає практично миттєво, що є характерним для крихких матеріалів.

Анізотропні матеріали (дерево). Дослідження дерев'яного зразка як представника анізотропних матеріалів проводять вздовж і поперек волокон. Діаграма стискання зразка вздовж волокон, побудована в координатах $F-\Delta h$ (рис. 3.3, крива 1), зовні схожа на діаграму стискання чавуну. При цьому пропорційність між навантаженням і деформацією спостерігається майже до моменту руйнування. Хоча в багатьох випадках трапляється незначна нелінійність, яка трохи зростає при збільшенні навантаження.

Після досягнення максимального навантаження зразок руйнується не відразу, а навантаження при цьому дещо зменшується.

Відношення сили $F'_к$ до початкової площі поперечного перерізу зразка A_0 , називають *границею міцності* $\sigma'_м$ або *тимчасовим опором* $\sigma'_{то}$ дерева вздовж волокон:

$$\sigma'_м = \sigma'_{то} = F'_к / A_0 \quad (3.3)$$

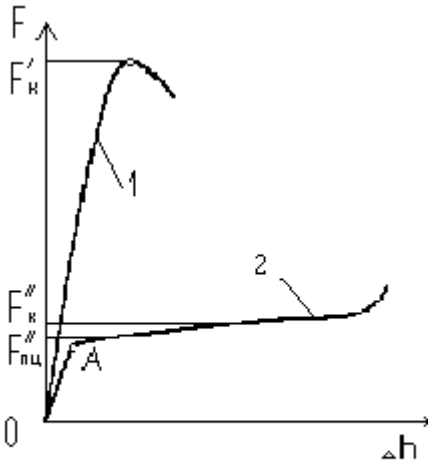


Рис. 3.3. Діаграма стиснення чавуну вздовж (крива 1) та поперек (крива 2) волокон.

Руйнування зразка в цьому випадку проходить, як правило, з утворенням поперечних складок і змінанням торців.

При стиснанні зразка поперек волокон діаграма $F-\Delta h$ має інший вигляд (рис. 3.3, крива 2). До деякої точки А спостерігається пропорційна залежність між силою і деформацією. Це дозволяє визначити *границю пропорційності* $\sigma''_{пц}$, яка являє собою відношення сили $F''_{пц}$ до початкової площі

поперечного перерізу A_0

$$\sigma''_{пц} = F''_{пц} / A_0 \quad (3.4)$$

З подальшим збільшенням навантаження деревина здатна сильно ущільнюватись без видимих ознак руйнування зразка. Момент втрати несучої здатності зафіксувати дуже складно. Тому вважають, що руйнівне навантаження настає тоді, коли зразок стискається на одну третину своєї початкової висоти. Відношення сили $F''_к$ до A_0 називають *границею міцності* $\sigma''_м$ або *тимчасовим опором* $\sigma''_{то}$ деревини при стиснанні поперек волокон:

$$\sigma''_м = \sigma''_{то} = F''_к / A_0 \quad (3.5)$$

Руйнування твердих порід супроводжується також зсувом по похилих площадках. Це означає, що деревина руйнується й під дією дотичних напружень.

Порівнюючи характер поведінки дерев'яних зразків залежно від напрямку дії стискального навантаження, можна дійти до висновку, що при стиснанні вздовж волокон зразок значно менше деформується, ніж при стиснанні поперек волокон. Міцність зразка в першому випадку в 7...10 разів вища, ніж в другому, а характер руйнування в обох випадках

помітно відрізняється один від одного. Основні механічні характеристики деяких конструкційних матеріалів наведені в додатку 2.

Однією з головних характеристик при дослідженні дерев'яних зразків на стискання є коефіцієнт анізотропії, який характеризує різні механічні властивості дерева вздовж і поперек волокон. Він являє собою відношення границі міцності при стисканні вздовж волокон σ'_m до границі міцності при стисканні поперек волокон σ''_m

$$K = \sigma'_m / \sigma''_m \quad (3.6)$$

ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

1. Розривна машина.
2. Пристрій для дослідження матеріалів на стискання.
3. Експериментальні зразки.
4. Штангенциркуль.

В більшості випадків дослідження матеріалів на стискання здійснюють на універсальних установках та розривних машинах, конструкція та принцип дії однієї з яких детально описані в методичних вказівках до виконання лабораторної роботи № 1.

В такому випадку використовують спеціальний пристрій, який складається із втулки (рис. 3.4, а) та штока (рис. 3.4, б). Втулка розміщується на ходовому гвинті розривної машини (рис. 1.2), а шток

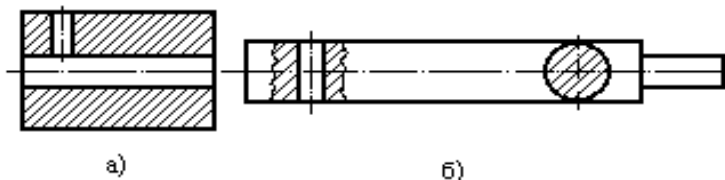


Рис. 3.4. Пристрій для дослідження матеріалів на стискання:
а - втулка, б - шток.

монтується в спеціальному отворі станини.

Зразки для випробування на стискання виготовляють з круглим чи квадратним поперечним перерізом. При цьому слід враховувати сили тертя між плитами машини та торцями зразка, а також можливість їх викривлення. Тому для проведення випробувань встановлені оптимальні розміри зразків, які дають змогу зменшити похибку результатів експерименту.

Для металів використовують циліндричні зразки з відношенням висоти зразка h до його діаметра $h/d = 1 \dots 2$. При цьому діаметр зразків, як правило вибирають в межах 10-25 мм. Обов'язковою умовою є паралельність торців між собою та їх перпендикулярність до осі зразка.

При випробуванні деревини на стискання використовують зразки кубічної форми з довжиною ребра 20 мм або 30 мм.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

1. Використовуючи штангенциркуль, виміряти геометричні характеристики зразків (діаметр чи довжину ребра та висоту).

2. Визначити площу поперечного перерізу зразків і всі дані занести до таблиці 3.1.

3. Між втулкою та штоком пристрою для дослідження матеріалів на стискання встановити експериментальний зразок, виготовлений із маловуглецевої сталі.

4. Увімкнувши двигун 2, встановити нижню межу навантаження, вибравши при цьому всі можливі зазори.

5. Увімкнувши двигун 2, встановити перший ступінь навантаження (бажано в межах 50-100Н), дійсну величину якого визначити за допомогою вимірювального пристрою 16.

6. За допомогою вимірювального пристрою 15 визначити параметр довжини a_1 (мм).

7. За допомогою вимірювального пристрою 16 визначити параметр довжини b_1 (мм).

8. Враховуючи особливості конструкції установки, визначити абсолютне укорочення зразка для першого ступеня навантаження Δh_1 (мм) за формулою

$$\Delta h_1 = a_1 - 0,2b_1 \quad (3.7)$$

9. Увімкнувши двигун 2, перейти на другий ступінь навантаження. Значення стискальної сили визначити за допомогою вимірювального пристрою 16.

10. Повторивши пункти 6, 7, 8, визначити величину абсолютного укорочення зразка для другого ступеня навантаження.

11. Повторити пункти 9, 10, збільшуючи стискальне навантаження до величини, за якої зразок набуде форми диска та яка не перевищує технічних можливостей розривної машини.

12. Встановити чавунний експериментальний зразок.

13. Повторити пункти 4-10, довівши зразок до руйнування (за умови, що руйнівне навантаження не буде перевищувати технічних можливостей розривної машини).

14. Встановити дерев'яний експериментальний зразок таким чином, щоб стискальне навантаження діяло вздовж волокон.

15. Повторити пункти 4-10, довівши зразок до руйнування (за умови, що руйнівне навантаження не буде перевищувати технічних можливостей розривної машини).

16. Встановити дерев'яний експериментальний зразок таким чином, щоб стискальне навантаження діяло поперек волокон.

17. Повторити пункти 4-10 до того моменту, коли висота зразка зменшиться на одну третину (за умови, що максимальне навантаження не буде перевищувати технічних можливостей розривної машини).

18. Дані експериментальних досліджень занести до таблиці 3.2.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Занести до таблиці 3.1 вихідні дані для проведення експерименту.

Таблиця 3.1. Вихідні дані для проведення експерименту.

№ п/п	Розміри зразка	Матеріал			
		Маловуглецева сталь	Чавун	Дерево (вздовж волокон)	Дерево (поперек волокон)
1	Діаметр зразка d , мм			-----	-----
2	Довжина ребра a , мм	-----	-----		
3	Висота зразка h , мм				
4	Площа поперечного перерізу A_0 , мм ²				

2. Занести до таблиці 3.2. дані експериментальних досліджень.

Таблиця 3.2. Дані експериментальних досліджень.

№	Матеріал зразка							
	Сталевий зразок		Чавунний зразок		Дерево (вздовж волокон)		Дерево (поперек волокон)	
	F, Н	Δh , мм	F, Н	Δh , мм	F, Н	Δh , мм	F, Н	Δh , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
3								
4								

Продовження таблиці 3.2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								

3. Використовуючи дані з таблиці 3.2, побудувати діаграми стискання в координатах $F-\Delta h$ для не менше, ніж двох експериментальних зразків.

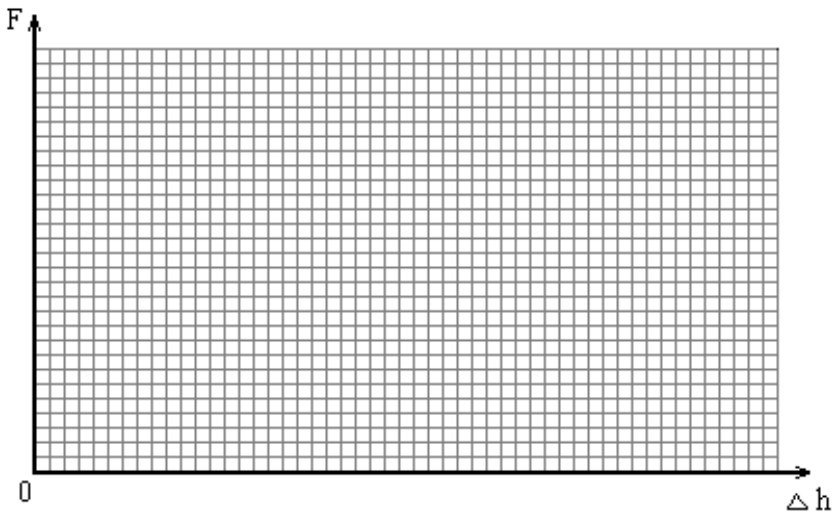


Рис. 3.5. Діаграми стискання:

4. Використовуючи діаграму стискання сталевого зразка та експериментальні дані з таблиці 3.2, знайти навантаження, що відповідає границі пропорційності $F'_{\text{ст}}$.

5. Користуючись формулою (3.1), визначити границю пропорційності сталі при стисканні $\sigma'_{\text{ст}}$.

6. Використовуючи діаграму стискання чавунного зразка та експериментальні дані з таблиці 3.2, знайти руйнівне навантаження F'_p .

7. Користуючись формулою (3.2), визначити границю міцності чавуну при стисканні σ'_m .

8. Використовуючи діаграму стискання дерев'яного зразка вздовж волокон та експериментальні дані з таблиці 3.2, знайти критичне навантаження F'_k .

9. Користуючись формулою (3.3), визначити границю міцності дерева вздовж волокон σ'_m .

10. Використовуючи діаграму стискання дерев'яного зразка поперек волокон та експериментальні дані з таблиці 3.2, знайти навантаження, що відповідає границі пропорційності $F''_{\text{ст}}$ і границі міцності F''_k .

11. Користуючись формулою (3.4), визначити границю пропорційності дерева поперек волокон $\sigma''_{\text{ст}}$.

12. Користуючись формулою (3.5), визначити границю міцності дерева поперек волокон σ''_m .

13. Користуючись формулою (3.6), визначити коефіцієнт анізотропії K .

14. Отримані дані занести до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Основні механічні характеристики маловуглецевої сталі, чавуну та дерева при стисканні.

№	Основні механічні характеристики при стисканні	Чисельне значення
1.	Границя пропорційності сталі $\sigma'_{\text{ст}}$, МПа	
2.	Границя міцності чавуну σ'_m , МПа	
3.	Границя міцності дерева вздовж волокон σ'_m , МПа	
4.	Границя пропорційності дерева поперек волокон $\sigma''_{\text{ст}}$, МПа	
5.	Границя міцності дерева поперек волокон σ''_m , МПа	
6.	Коефіцієнт анізотропії K	

15. Зробити висновки щодо дослідження процесу стискання зразків, виготовлених з різних матеріалів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЗРІЗ

Мета роботи: експериментальна перевірка закономірностей зрізу зразків, виготовлених з різних матеріалів.

Задачі роботи:

- ознайомлення з методами дослідження матеріалів на зріз;
- визначення границі міцності на зріз для різних матеріалів;
- визначення допустимих дотичних напружень на зріз.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Деформація **зсуву** виникає тоді, коли зовнішні сили зміщують два паралельні перерізи стержня один відносно одного при незмінній відстані між ними (рис. 4.1)

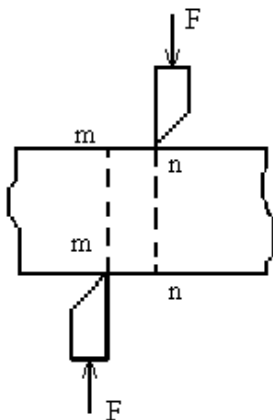


Рис. 4.1. Зсув.

Для визначення напруження, що виникає під дією сили F , використовують метод перерізів. Уявно розсікаючи стержень на дві частини та відкидаючи одну із них, розглядають умови рівноваги другої частини. Зовнішня сила F урівноважується внутрішніми силами пружності, статичним еквівалентом яких у перерізі є поперечна сила Q .

Оскільки закон розподілу дотичних напружень невідомий, то вважають, що вони розподілені по площі поперечного перерізу рівномірно. Це означає, що на кожну одиницю площі діє внутрішня сила однакової величини.

В цьому випадку дотичне напруження можна визначити за формулою

$$\tau = Q/A = F/A, \quad (4.1)$$

де A – площа поперечного перерізу стержня.

Хоча формула (4.1) дає змогу визначити лише середнє значення дотичних напружень, проте її точність є цілком достатньою для проведення практичних розрахунків.

Зрізом називають деформацію зсуву, доведену до руйнування матеріалу. На зріз працюють болтові, заклепкові, шпоночні, штифтові, зварні з'єднання. Умову міцності на зріз з урахуванням конструкції з'єднання та схеми навантаження можна записати в такому вигляді

$$\tau = \frac{F}{knA_0} \leq [\tau_{зр}] \quad (4.2)$$

де k – число площин зрізу, n – кількість елементів, що працюють на зріз, A_0 – площа поперечного перерізу елемента, що працює на зріз, $[\tau_{зр}]$ – допустиме дотичне напруження при розрахунках на зріз.

Слід відзначити, що напружений стан при зрізі складніший, ніж при чистому зсуві, оскільки в цьому випадку виникають додаткові напруження від згинання і зминання. При цьому велике значення приділяють вибору допустимих дотичних напружень. Для їх визначення необхідно знати величини головних напружень для плоского напруженого стану. У випадку чистого зсуву маємо

$$\sigma_1 = \tau, \quad \sigma_2 = 0, \quad \sigma_3 = -\tau \quad (4.3)$$

Використовуючи залежність (4.3) і відомі теорії міцності, можна знайти частку, яку складає допустиме дотичне напруження на зріз від допустимого нормального напруження на розтягання.

Так, за другою теорією міцності отримаємо

$$[\tau_{зр}] = [\sigma_p] / (1 + \mu), \quad (4.4)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона, який для металів знаходиться в межах $\mu \approx 0,25 \div 0,42$. Підставляючи числові значення у формулу (4.4), отримаємо

$$[\tau_{зр}] = (0,7 \div 0,8) [\sigma_p] \quad (4.5)$$

За третьою теорією міцності:

$$[\tau_{зр}] = 0,5 [\sigma_p] \quad (4.6)$$

За четвертою теорією міцності:

$$[\tau_{зр}] = [\sigma_p] / \sqrt{3} \approx 0,6 [\sigma_p] \quad (4.7)$$

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що між границею міцності на зріз $\tau_{м}^{зр}$ і границею міцності на розтягання σ_m для більшості матеріалів зберігаються співвідношення, описані формулами 4.5-4.7. Слід лише пам'ятати, що визначене в результаті практичних досліджень значення $\tau_{м}^{зр}$ буде мати практичну цінність лише в тому випадку, якщо умови навантаження зразка будуть близькі до умов роботи деталей машин чи елементів конструкцій.

На практиці часто зустрічаються деталі, які працюють на зріз по двох площинах. В цьому випадку зразки випробовують за допомогою спеціального пристрою, який робить подвійний зріз. Тоді границю міцності визначають за формулою

$$\tau_m = F_p / 2A, \quad (4.8)$$

де F_p – руйнівне навантаження, A – площа поперечного перерізу зразка.

Визначивши τ_m , можна знайти допустиме дотичне напруження на зріз

$$[\tau_{зр}] = \tau_m / K, \quad (4.9)$$

де K – коефіцієнт запасу міцності.

ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

1. Розривна машина.
2. Пристрій для дослідження матеріалів на зріз.
3. Експериментальні зразки.
4. Штангенциркуль.

В більшості випадків дослідження матеріалів на зріз здійснюють на універсальних установках та розривних машинах, конструкція та принцип дії однієї з яких детально описані в методичних вказівках до виконання лабораторної роботи № 1.

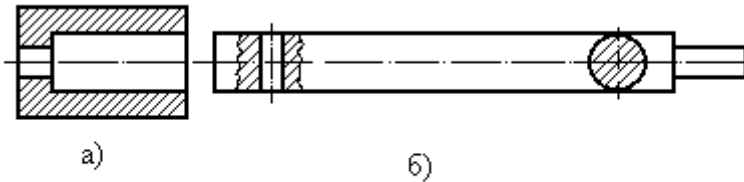


Рис. 4.2. Пристрій для дослідження матеріалів на зріз: а - втулка, б - шток

При цьому використовують спеціальний пристрій, який складається із втулки (рис. 4.2, а) та штока (рис. 4.2, б). Втулка розміщується на ходовому гвинті розривної машини (рис. 1.2), а шток монтується в спеціальному отворі станини.

Для дослідження матеріалів на зріз використовують, як правило, зразки круглого поперечного перерізу з діаметром до 8 мм, які при випробуваннях розміщують в отворі штока (рис. 4.2, б).

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

1. Використовуючи штангенциркуль, виміряти діаметр зразків, виготовлених з різних матеріалів.
2. Визначити площу поперечного перерізу зразків і всі дані занести до таблиці 4.1.
3. Встановити пристрій для дослідження матеріалів на зріз.
4. В отвір штока пристрою для дослідження матеріалів на зріз (рис. 4.2) встановити експериментальний зразок, виготовлений з маловуглецевої сталі.
5. Увімкнувши двигун 2, навантажувати експериментальний зразок, довівши його до руйнування.

6. За допомогою вимірювального пристрою 16 розривної машини (рис. 1.2) визначити величину руйнівного навантаження F_p .

7. Повторити (не менше 2-х разів) пункти 4-6 для зразків такого ж діаметра, виготовлених з маловуглецевої сталі.

8. Повторити (не менше 3-х разів) пункти 4-6 для зразків однакового діаметра, виготовлених з міді, алюмінію або інших наявних матеріалів.

9. Дані експериментальних досліджень занести до таблиці 4.2.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Занести до таблиці 4.1 вихідні дані для проведення експерименту.

Таблиця 4.1. Вихідні дані для проведення експерименту.

№ п/п	Матеріал зразка	Діаметр зразка d , мм	Площа поперечного перерізу A , мм ²
1	Маловуглецева сталь		
2	Мідь		
3	Алюміній		
4			

2. Занести до таблиці 4.2. дані експериментальних досліджень.

3. Використовуючи формулу (4.8) і дані експериментальних досліджень, знайти для кожного ступеня навантаження границю міцності при зрізі зразків, виготовлених з різних матеріалів.

Таблиця 4.2. Дані експериментальних досліджень та результати їх попередньої обробки.

№ п/п	Матеріал зразка	Номер експерименту	Руйнівне навантаження F_p , Н	Границя міцності τ_m , МПа
1	2	3	4	5
1	Маловуглецева сталь	1.1		
		1.2		
		1.3		
2	Мідь	2.1		
		2.2		
		2.3		

Продовження таблиці 4.2.

1	2	3	4	5
3	Алюміній	3.1		
		3.2		
		3.3		
4		4.1		
		4.2		
		4.3		

4. Використовуючи формулу

$$\tau_{\text{м}}^{\text{сеп}} = (\tau_{\text{м1}} + \tau_{\text{м2}} + \tau_{\text{м3}}) / 3 \quad (4.10)$$

знайти середнє значення границі міцності при зрізі для різних матеріалів.

5. Використовуючи формулу (4.9), визначити експериментальнє значення допустимого дотичного напруження на зріз для різних матеріалів, прийнявши значення коефіцієнта запасу міцності для пластичних матеріалів $K = 1,4 \div 1,6$, для крихких – $K = 2,5 \div 3,0$.

6. Знайти довідкові значення допустимого нормального напруження на розтягання для різних матеріалів (додаток 3).

7. Знайти відношення $[\tau_{\text{зр}}] / [\sigma_{\text{р}}]$ для різних матеріалів.

8. Отримані дані занести до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Допустимі напруження на зріз для різних матеріалів.

№ п/п	Матеріал зразка	Середнє значення границі міцності, $\tau_{\text{м}}^{\text{сеп}}$, МПа	Допустиме дотичне напруження на зріз $[\tau_{\text{зр}}]$, МПа (експ. знач.)	Допустиме нормальне напруження на розтягання $[\sigma_{\text{р}}]$, МПа (довід. знач.)	Відношення $[\tau_{\text{зр}}] / [\sigma_{\text{р}}]$
1	Маловуглецева сталь				
2	Мідь				
3	Алюміній				
4					

9. Порівняти значення відношень $[\tau_{\text{зр}}] / [\sigma_{\text{р}}]$ з числовими коефіцієнтами формул 4.5-4.7 і зробити висновок щодо справедливості та доцільності застосування тієї чи іншої теорії міцності для конкретного матеріалу.

10. Зробити узагальнювальні висновки щодо закономірностей зрізу зразків, виготовлених з різних матеріалів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

ВИПРОБУВАННЯ ЗРАЗКІВ З РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ НА КРУЧЕННЯ

Мета роботи: експериментальна перевірка закономірностей процесу кручення зразків, виготовлених з різних матеріалів.

Задачі роботи:

- ознайомлення з методикою випробувань на кручення зразків з різних матеріалів;
- визначення границі міцності матеріалів при крученні;
- визначення допустимих дотичних напружень при розрахунках на кручення.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Крученням називають такий вид деформації, за якого в довільному поперечному перерізі бруса, перпендикулярному до його осі, із шести внутрішніх силових факторів діє лише один – крутний момент M_k . В цьому випадку прямий брус, що працює на кручення, називається *валом*. Як показує досвід, вісь бруса залишається прямою, якщо прикладений момент не перевищує деякої границі.

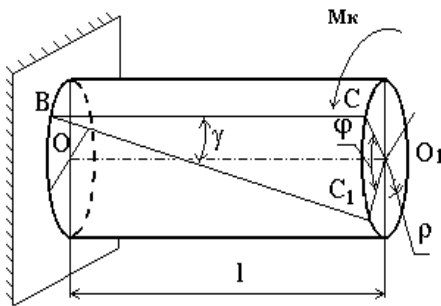


Рис. 5.1. Кручення.

Розглянемо кручення вала, один кінець якого закріплений, а до іншого прикладений крутний момент M_k (рис. 5.1). Кут, утворений твірною до і після деформації ($\angle CVC_1$), називається **кутом відносного зсуву** або **відносним зсувом** γ . Кут, утворений радіусами до і після деформації ($\angle CO_1C_1$),

характеризує кут повороту одного перерізу відносно іншого, умовно закріпленого, і називається **кутом закручування** φ . Для довільної точки поперечного перерізу, яка знаходиться на відстані ρ від центра, застосовують поняття **відносного кута закручування** θ , величина якого визначається за формулою

$$\theta = \gamma / \rho \quad (5.1)$$

При крученні стержня круглого поперечного перерізу окремі його елементи зазнають деформації зсуву. У цьому випадку виникають

лише дотичні напруження τ . Між цими напруженнями та відносним зсувом γ існує прямо пропорційна залежність

$$\tau = \gamma G, \quad (5.2)$$

яка трактується як математичний вираз закону Гука при зсуві. Коефіцієнт G називають **модулем зсуву** або **модулем пружності другого роду**. Він характеризує жорсткість матеріалу при зсуві та є однією з найважливіших фізичних констант матеріалу. Модуль зсуву G і модуль повздовжньої пружності E пов'язані між собою таким співвідношенням

$$G = E/2(1+\mu), \quad (5.3)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона. Беручи, наприклад, для сталі $\mu=0,25$, отримаємо $G=0,4 E$.

Наслідком закону Гука у випадку кручення є взаємозв'язок між кутом закручування φ , крутним моментом $M_{кр}$, довжиною зразка l і жорсткістю вала при крученні (GI_p), який виражається такою залежністю

$$\varphi = M_{кр} l / GI_p \quad (5.4)$$

Жорсткість вала при крученні відображає вплив як пружних властивостей матеріалу (G), так і розмірів перерізу (I_p) на деформування стержня при крученні. Величина I_p називається полярним моментом інерції. Для суцільного вала круглого поперечного перерізу

$$I_p = \pi d^4 / 32 \approx 0,1d^4 \quad (5.5)$$

При визначенні за допомогою формули (5.4) кута закручування слід пам'ятати, що отримане значення φ буде вимірюватись в радіанах. Для його переводу в градуси результат необхідно помножити на $180/\pi$.

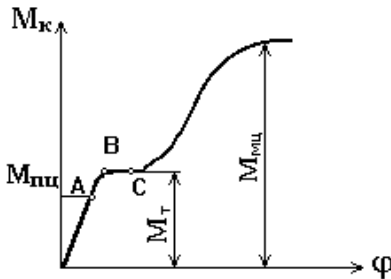


Рис. 5.2. Діаграма кручення пластичних матеріалів.

Для визначення необхідних міцносних і деформаційних характеристик матеріали досліджують на кручення. Результатом таких випробувань є побудова діаграми кручення (рис. 5.2), яка для пластичних матеріалів дещо нагадує діаграму розтягання. З діаграми можна визначити момент, до якого зберігається лінійна залежність між

деформацією і навантаженням ($M_{плц}$); момент, що відповідає початку текучості матеріалу (M_t) та момент, що викликає втрату міцності ($M_{рц}$).

Проте в багатьох випадках діаграма кручення пластичних матеріалів площадки текучості не має. Спочатку деформація зростає пропорційно навантаженню, тобто за законом Гука. При збільшенні навантаження пропорційність порушується, а на діаграмі утворюється

криволінійна ділянка, зумовлена зміцненням матеріалу. Зразок руйнується без утворення шийки при найбільшому крутному моменті.

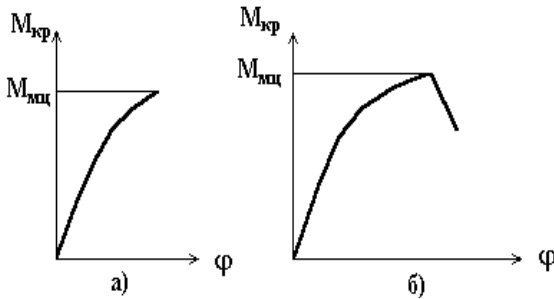


Рис. 5.3. Діаграми кручення: а – чавуну, б – дерева.

Характер кривої навантаження чавунного зразка (рис. 5.3, а) свідчить про відсутність чіткої пропорційної залежності між φ і $M_{кр}$. Руйнування зразка відбувається без великих залишкових деформацій шляхом відриву від похилого

перерізу.

При крученні дерев'яних зразків (рис. 5.3, б) кут закручування зростає практично пропорційно навантаженню майже до максимальних значень крутного моменту. Після досягнення деякого значення моменту, що викликає втрату міцності ($M_{міц}$), навантаження різко зменшується внаслідок утворення повздожних тріщин.

Таким чином, пластичні матеріали при крученні, як правило, руйнуються шляхом зсуву, а крихкі – шляхом відриву від похилого перерізу.

Дотичні напруження при крученні змінюються за прямолінійним законом

$$\tau = \frac{M_{кр}}{I_p} \rho, \quad (5.6)$$

де ρ – відстань від центра перерізу до точки, в якій визначається напруження. З аналізу формули (5.6) очевидно, що максимальні дотичні напруження будуть виникати в точках, що найбільш віддалені від центра перерізу (у випадку круглого поперечного перерізу – при $\rho=r$). Тоді максимальне дотичне напруження

$$\tau_{\max} = \frac{M_{кр}}{I_p} r = \frac{M_{кр}}{W_p} \quad (5.7)$$

де $W_p = I_p/r = 2I_p/d$ – полярний момент опору при крученні. Для суцільного вала круглого поперечного перерізу

$$W_p = \pi d^3 / 16 \approx 0,2 d^3 \quad (5.8)$$

Умова міцності при крученні має такий вигляд

$$\tau_{\max} = M_{кр} / W_p \leq [\tau_{кр}] \quad (5.9)$$

Враховуючи особливості діаграми кручення крихких матеріалів, допустиме дотичне напруження визначають через границю міцності $\tau_{\text{мц}}$ ($\tau_{\text{мц}}=M_{\text{мц}}/W_p$) за такою формулою

$$[\tau_{\text{кр}}] = \tau_{\text{мц}} / K, \quad (5.10)$$

де K – коефіцієнт запасу міцності.

Для пластичних матеріалів допустиме дотичне напруження визначають через границю текучості τ_T ($\tau_T=M_T/W_p$)

$$[\tau_{\text{кр}}] = \tau_T / K \quad (5.11)$$

де K – коефіцієнт запасу міцності. У випадку відсутності явно вираженої площадки текучості, границю текучості при крученні τ_T беруть рівною $(0,5 \div 0,6) \sigma_T$. Значення коефіцієнта запасу міцності приймають: для пластичних матеріалів – $1,4 \div 1,6$, для крихких – $2,5 \div 3,0$.

Проте слід відзначити, що в практичних розрахунках для пластичних матеріалів при визначенні допустимого дотичного напруження при крученні дозволяється користуватись формулою (5.10). В цьому випадку умовну границю міцності визначають за наближеною залежністю

$$\tau_{\text{мц}}=3M_{\text{мц}}/4W_p \quad (5.12)$$

Ступінь пластичності матеріалу при крученні оцінюють за величиною відносного кута закручування θ , який визначається за формулою

$$\theta=\varphi/l \quad (5.13)$$

ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

1. Установа для дослідження матеріалів на кручення.
2. Кутомір.
3. Експериментальні зразки.
4. Штангенциркуль.

Установа для дослідження матеріалів на кручення (рис. 5.4) складається з основи 1, на якій монтуються дві стійки 2 і 3. Для встановлення зразка в центрових гніздах клинових захватів 4 і 5, нижній захват 5 переміщують за допомогою маховика 6. Навантаження зразка здійснюється за допомогою електродвигуна 7, який через систему механічних передач 8 приводить в рух нижній захват 5.

Швидкість обертання захвату залежно від конструкції установи можна встановити в межах $0,3-3$ об/хв. Обертати нижній захват можна і вручну – за допомогою ручки 9. При цьому крутний момент визначається за коловою шкалою 10 маятникового силувимірника, що

сполучений з верхнім захватом. Кут закручування відлічують по вмонтованій на установці шкалі 11.

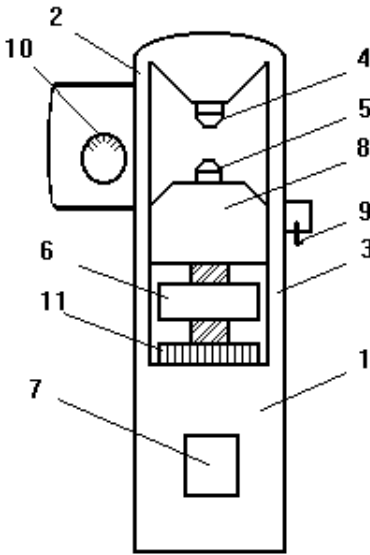


Рис. 5.4. Установка для дослідження матеріалів на кручення.

В багатьох випадках для підвищення точності вимірювання кута закручування, особливо в зоні пружних деформацій, застосовують дзеркальні, стрілкові, індикаторні та іншого типу кутоміри. Одним з найбільш розповсюджених на практиці внаслідок простоти конструкції та водночас достатньої точності вимірювання є індикаторний кутомір. Він складається з двох кілець, нерухомо закріплених на зразку, які під дією крутного моменту обертаються одне відносно одного. Важіль кільця переміщує стержень індикатора, покази якого використовуються для визначення кута закручування.

На кручення випробовують стандартні циліндричні зразки діаметром 10 мм і розрахунковою довжиною 100 мм

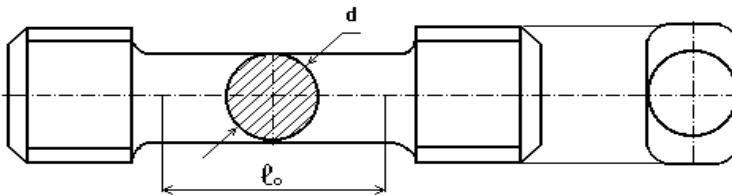


Рис. 5.5. Експериментальний зразок.

(рис 5.5). Стандарт дозволяє випробувати на кручення пропорційні зразки інших розмірів (діаметром 15-20 мм), які залежать від найбільшого крутного моменту випробувальної машини. Форма і розміри головок зразка залежать від способу його кріплення в захватах установки для дослідження матеріалів на кручення.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

1. Виміряти діаметр і розрахункову довжину кожного з трьох циліндричних зразків, виготовлених з маловуглецевої сталі, чавуну і деревини.
2. За формулою (5.8) визначити полярний момент опору для кожного зразка та всі дані занести до таблиці 5.1.
3. Зробити на поверхні кожного зразка риску вздовж його осі.
4. Закріпити зразок в захватах 4, 5.
5. Включивши електродвигун 7 або обертаючи ручку 9, навантажувати зразок, довівши його до руйнування.
6. За коловою шкалою 10 маятникового силовимірника визначити для кожного зразка максимальні крутні моменти.
7. За допомогою вимірювального пристрою 11 визначити для кожного зразка максимальний кут закручування.
8. Визначити положення повздовжньої риски на зразках і з'ясувати, які напруження є найбільш небезпечними.
9. Дані експериментальних досліджень занести до таблиці 5.2.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Занести до таблиці 5.1 вихідні дані для проведення експерименту.

Таблиця 5.1. Вихідні дані для проведення експерименту.

№ п/п	Матеріал зразка	Діаметр зразка d , мм	Розрахункова довжина l_0 , мм	Полярний момент опору W_p , мм ³
1.	Маловуглецева сталь			
2.	Чавун			
3.	Деревина			

2. Занести до таблиці 5.2 дані експериментальних досліджень.

Таблиця 5.2. Дані експериментальних досліджень.

№ п/п	Матеріал зразка	Максимальний крутний момент $M_{кр}$, Н*м	Максимальний кут закручування φ , град
1.	Маловуглецева сталь		
2.	Чавун		
3.	Деревина		

3. Використовуючи результати експериментальних досліджень, визначити за формулою (5.12) границю міцності сталі при крученні.

4. Використовуючи результати експериментальних досліджень, визначити за формулою (5.7) границю міцності при крученні крихких (чавун) та анізотропних (дерево) матеріалів.

5. За формулою (5.10) визначити експериментальне значення допустимого дотичного напруження при крученні $[\tau_{кр}^{екс}]$ зразків, виготовлених з крихких (чавун) та анізотропних (дерево) матеріалів, приймаючи при цьому значення коефіцієнта запасу міцності для пластичних матеріалів – $1,4 \div 1,6$, для крихких – $2,5 \div 3,0$.

6. Знайти довідкові значення допустимого дотичного напруження при крученні $[\tau_{кр}^{дов}]$ для сталі та чавуну (додаток 4).

7. Знайти для сталі та чавуну похибку визначення допустимого дотичного напруження при крученні, використовуючи формулу

$$\delta = \frac{|[\tau_{кр}^{екс}] - [\tau_{кр}^{дов}]|}{[\tau_{кр}^{дов}]} 100\%, \quad (5.14)$$

де $[\tau_{кр}^{дов}]$ – довідкові значення допустимого дотичного напруження при крученні для сталі та чавуну; $[\tau_{кр}^{екс}]$ – значення допустимого дотичного напруження при крученні для сталі та чавуну, що було визначено шляхом використання даних експериментальних досліджень.

8. Визначити пластичність матеріалу за величиною відносного кута закручування θ , використовуючи формулу (5.13).

9. Отримані дані занести до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Результати обробки даних експериментальних досліджень.

№ п/п	Матеріал зразка	Границя міцності $\tau_{мц}$, МПа	Допустиме дотичне напруження при крученні (МПа)		Похибка δ , %	Відносний кут закручування θ , град/м
			Експер. значення $[\tau_{кр}^{екс}]$	Довідкове значення $[\tau_{кр}^{дов}]$		
1.	Маловуглецева сталь					
2.	Чавун					
3.	Дерево			-----	-----	

10. Оцінити точність визначення допустимих дотичних напружень при крученні сталі і чавуну та зробити висновок щодо

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ВИПРОБУВАННЯ ЗРАЗКІВ З РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЗГИНАННЯ

Мета роботи: експериментальне вивчення закономірностей поведінки різних конструкційних матеріалів при поперечному згинанні.

Задачі роботи:

- ознайомлення з методикою випробувань зразків з різних матеріалів на згинання;
- визначення прогину двоопорної балки;
- визначення модуля пружності I роду (модуля Юнга) та його порівняння з довідковими даними.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Брус зазнає деформації **згинання**, якщо в площинах, що проходять через вісь бруса, діють сили або пари сил, перпендикулярні до його осі. В цьому випадку вісь бруса змінює свою кривизну. Брус, який працює на згинання, називається **балкою**.

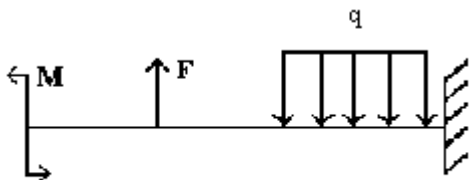


Рис. 6.1. Поперечне пряме згинання.

Плоским називають згинання, за якого всі зовнішні сили й пари сил розміщені в одній площині, причому ця площина збігається з однією з головних площин перерізу (проходить через вісь бруса та одну з головних центральних осей). Навантаження, які діють на балку, можуть бути зосередженими в певних точках уздовж балки, або розподіленими по деякій її частині. На практиці найчастіше зустрічається поперечне пряме згинання, приклад якого зображений на рис. 6.1. В цьому випадку повздовжня сила N відсутня.

Крім того, для встановлення основних залежностей при згинанні, часто розглядають його найпростіший випадок – чисте згинання, за якого в поперечних перерізах бруса відмінними від нуля будуть тільки згинальні моменти.

Випадок чистого згинання реалізується, якщо до двоопорної балки прикласти однакові пари сил M_z (рис. 6.2). В будь-якому перерізі

такої балки поперечна сила буде дорівнювати нулю, а згинальний момент визначається за такою формулою

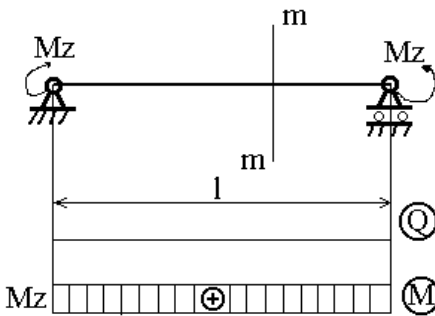


Рис. 6.2. Чисте згинання.

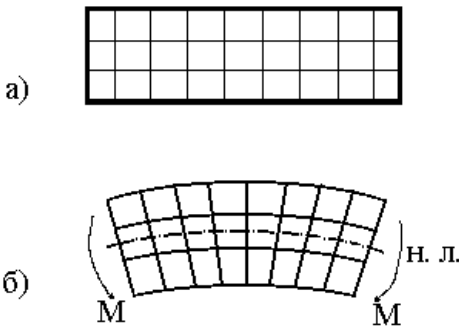


Рис. 6.3. Деформація балки при згинанні.

$$M_z = \int_A \sigma y dA \quad (6.1)$$

Закономірності деформації балки при згинанні можна встановити, якщо взяти за основу модель у вигляді прямолінійного бруса з нанесеною сіткою (рис. 6.3, а). При чистому згинанні (рис. 6.3, б) брус деформується таким чином:

- поперечні лінії, що були прямими до деформації, залишаються прямими й після деформації;
- твірні лінії викривляються й перетворюються в дуги;
- лінії контурів перетинаються з викривленими кривими під прямим кутом.

Отже, при чистому згинанні справедлива гіпотеза плоских перерізів. З аналізу запропонованої моделі видно, що верхні волокна розтягуються, а нижні стискаються. Тобто, можна

знайти такі волокна, довжина яких залишається незмінною.

Сукупність волокон, що не змінює своєї довжини при згинанні балки називається **нейтральним шаром**. Лінія перетину нейтрального шару і поперечного перерізу балки називається **нейтральною лінією**.

Кількісною характеристикою деформації балки при чистому згинанні є відносне видовження, яке визначається за формулою

$$\varepsilon = u/\rho, \quad (6.2)$$

де u – відстань від нейтральної лінії до точки, в якій визначається відносна деформація; ρ – радіус кривизни кола, в яке перетвориться нейтральна лінія після деформації.

Будемо вважати, що волокна матеріалу, розташовані вздовж балки, не тиснуть одне на одне, а тому напруження між ними дорівнюють нулю. Це означає, що волокно, деформацію якого ми

хочемо визначити, перебуває в лінійному напруженому стані й знає простого розтягання або стискання. Тому для нього закон Гука запишеться у вигляді

$$\sigma = \varepsilon E \quad (6.3)$$

підставляючи формулу (6.2) в (6.3) отримаємо вираз для визначення нормального напруження при згинанні

$$\sigma = \frac{y}{\rho} E \quad (6.4)$$

Своєю чергою підставляючи (6.4) в (6.1), отримаємо вираз для визначення згинального моменту в даній точці поперечного перерізу

$$M = \frac{I_z E}{\rho} \quad (6.5)$$

де $I_z = \int_A y^2 dA$ – осьовий момент інерції відносно осі z.

Переписавши (6.5) в іншому вигляді

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_z} \quad (6.6)$$

отримаємо математичний вираз закону Гука при згинанні: кривизна балки постійної жорсткості прямо пропорційно залежить від згинального моменту. Добуток EI_z в цьому випадку називають жорсткістю поперечного перерізу балки при згинанні.

Розв'язуючи спільно (6.4) і (6.6) отримаємо вираз для визначення нормального напруження при згинанні в довільній точці поперечного перерізу

$$\sigma = \frac{M}{I_z} y \quad (6.7)$$

З аналізу формули видно, що нормальне напруження зростає при віддаленні від нейтральної лінії. Причому, на самій нейтральній лінії (при $y=0$) нормальне напруження дорівнює нулю.

Закон розподілу нормальних напружень дозволяє зробити висновок щодо раціональної форми поперечного перерізу при згинанні. Очевидно, що матеріал балки, розміщений біля нейтральної лінії, навантажений мало. Це означає, що з метою економії матеріалу необхідно вибрати таку форму поперечного перерізу, за якої більша частина площі була б якомога далі від нейтральної лінії.

До таких раціональних профілів відносяться двотаври, швелери, труби тощо, на відміну від балок з суцільними перерізом, які використовуються рідко.

Максимальної величини напруження досягають у волокнах, найбільш віддалених від нейтральної лінії. У випадку симетричного,

наприклад прямокутного, перерізу максимальні нормальні напруження (при $y_{\max}=h/2$) визначаються таким чином

$$\sigma_{\max} = \frac{Mh}{2I_z} \quad (6.8)$$

Величина

$$W_z = 2I_z/h \quad (6.9)$$

називається осьовим моментом опору. Тоді значення максимального нормального напруження при згинанні визначається таким чином

$$\sigma_{\max} = M/W_z \quad (6.10)$$

Якщо переріз не має горизонтальної осі симетрії (тавр), то напруження в крайніх волокнах не будуть однакові та визначаються окремо

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} \quad \text{та} \quad \sigma'_{\max} = \frac{M}{W'}, \quad (6.11)$$

де W і W' – осьові моменти опору відповідних частин перерізу.

Аналізуючи залежності (6.10) і (6.11) можна дійти висновку, що згинальний момент пропорційний осьовому моменту опору W . Своєю чергою витрата матеріалу пропорційна площі поперечного перерізу A . Це означає, що чим більше відношення W/A , тим більшу величину згинального моменту може витримати переріз з даною площею. Тому відношення W/A може бути прийнято як критерій, що оцінює якість профілю.

Розрахунок балок на міцність виконують за найбільшими нормальними напруженнями, які виникають у поперечному перерізі при згинанні. Умова міцності в цьому випадку має вигляд

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \leq [\sigma] \quad (6.12)$$

Момент опору для прямокутного поперечного перерізу – $W_z = bh^2/6$, для круглого поперечного перерізу – $W_z = W_y = \pi d^3/32 \approx 0,1d^3$.

Слід відзначити, що в реальних умовах опір матеріалів згинанню носить складніший характер. Тому при проведенні розрахунків часто необхідно знати величину і напрямок деформацій, що зумовлені дією зовнішніх силових факторів. Так, для випадку балки, що вільно лежить на двох опорах (рис. 6.4), її прогин посередині

$$f = Fl^3/48EI_z \quad (6.13)$$

Враховуючи припущення про справедливість закону Гука при згинанні, із залежності (6.13) можна визначити модуль Юнга, який є однією з найважливіших констант матеріалів.

$$E = \frac{Fl^3}{48fl_z} \quad (6.14)$$

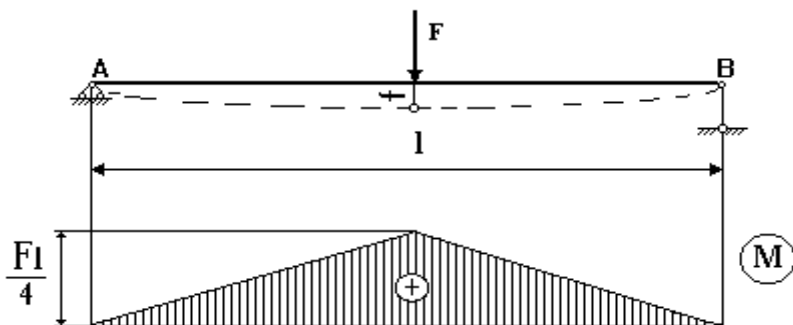


Рис. 6.4. Визначення прогину двоопорної балки.

ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

1. Установа для дослідження матеріалів на згинання.
2. Експериментальні зразки.
3. Набір ваг.
4. Індикатори годинникового типу.

Установа для дослідження матеріалів на згинання (рис. 6.5) складається зі станини 1, на якій знаходиться нерухомий кронштейн 2 і рухомий кронштейн 15. На кронштейнах за допомогою спеціальних затискувачів 11 і 12 закріплюється досліджуваний зразок 3. За допомогою прикріплених до штанги пластин 6 і рухомих опор 7 досягається точна горизонтальна орієнтація установки.

Навантаження досліджуваного зразка здійснюється за допомогою підвіски 4 та відповідного набору ваг. Слід відзначити, що конструкція підвіски може змінюватись залежно від реальних умов експерименту. Наявність бігунка 5 дає можливість змінювати місце прикладення сили, що своєю чергою дозволяє досліджувати властивості матеріалів при згинанні в широкому діапазоні.

Визначення прогину здійснюється за показами індикатора годинникового типу 9, що за допомогою затискувача 13 кріпиться на стійці 8. Кут повороту визначається за показами індикатора годинникового типу 10, що за допомогою затискувача 14 монтується на кронштейні 2.

Однією з найважливіших особливостей конструкції установки є можливість реалізації практично всіх типових схем навантаження:

- визначення переміщення і кута повороту двоопорної балки постійного перерізу, навантаженої посередині зосередженою силою;

- визначення переміщення і кута повороту консольної балки постійного поперечного перерізу, що навантажена зосереджено силою на вільному кінці;
- визначення переміщення і кута повороту двоопорної балки постійного перерізу, навантаженої зосередженою силою в довільній точці.

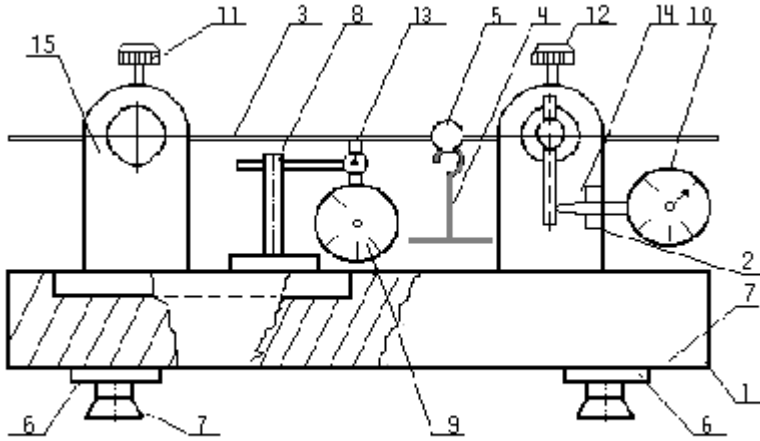


Рис. 6.5. Установка для дослідження матеріалів на згинання.

Така можливість досягається внаслідок наявності паза на станині 1, по якому може рухатись кронштейн 15 і стійка 8. Зміна їх взаємного розташування і дозволяє реалізувати типові схеми навантаження.

Зразки для дослідження матеріалів на згинання мають, як правило, прямокутний поперечний переріз (рис. 6.6.) з розмірами сторін $h \times b = 5 \times 25$ мм і довжиною l від 250 мм до 500 мм. Слід відзначити, що конструкція затискувачів 11 і 12 та бігунка 5 дозволяє досліджувати зразки різних типорозмірів, виготовлених до того ж з різних матеріалів, як металевих (сталь, латунь, алюміній), так і неметалевих (бук, дуб).

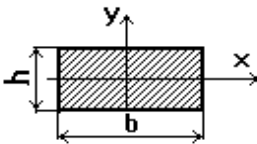


Рис. 6.6. Зразок.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

1. Виміряти розміри поперечного перерізу зразків, що виготовлені з різних матеріалів.
2. Встановити на кронштейнах 2, 15 за допомогою затискувачів 11 і 12 експериментальний зразок, виготовлений з маловуглецевої сталі.

3. Виміряти довжину балки між двома опорами l і всі дані занести до таблиці 6.1.

4. Встановити бігунок 5 посередині балки.

5. Навантажити балку за допомогою підвіски 4 і відповідного набору ваг зосередженою силою F , що прикладена посередині зразка. Рекомендоване значення зосередженої сили – $1Н$.

6. За допомогою індикатора годинникового типу 9, що встановлений на стійці 8, визначити прогин посередині зразка.

7. Перейти на наступний ступінь навантаження, збільшивши величину зосередженої сили F (рекомендується на $0,5 Н$).

8. Для цього ступеня навантаження за допомогою індикатора годинникового типу 9, що встановлений на стійці 8, визначити деформацію посередині зразка.

9. Повторити пункти 7 і 8 декілька разів (але не менше 3).

10. Повторити пункти 2-9 для зразка, виготовленого з кольорового металу (латунь, бронза, алюміній).

11. Повторити пункти 2-9 для зразка, виготовленого з дерева (бук, дуб).

12. Дані експериментальних досліджень занести до таблиці 6.2.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Занести до таблиці 6.1 вихідні дані для проведення експерименту, визначивши значення осьового моменту інерції кожного зразка за формулою

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad (6.15)$$

Таблиця 6.1. Вихідні дані для проведення експерименту.

№ п/п	Розміри зразка	Маловуглецева сталь	Латунь	Дерево (дуб, бук)
	Висота h , мм			
	Ширина b , мм			
	Довжина l , мм			
	Осьовий момент інерції I_z , мм ⁴			

2. Занести до таблиці 6.2 дані експериментальних досліджень.

Таблиця 6.2. Дані експериментальних досліджень.

Ступінь навантаження	Сталевий зразок		Латунний (бронзовий, алюмінієвий) зразок		Дерев'яний зразок	
	F	f	F	f	F	f
1						
2						
3						
4						
5						

3. За формулою (6.13) визначити теоретичне значення прогину посередині балки.

4. За формулою

$$\delta = \frac{|f_{теор} - f_{екс}|}{f_{теор}} 100\% \quad (6.16)$$

знайти відносну похибку визначення прогину посередині балки для кожного ступеня навантаження.

5. Результати обробки експериментальних даних занести до таблиці 6.3.

Таблиця 6.3. Результати обробки експериментальних даних.

Ступінь навантаження	Сталевий зразок			Латунний зразок			Дерев'яний зразок		
	f _{екс} , мм	f _т , мм	δ, %	f _{екс} , мм	f _т , мм	δ, %	f _{екс} , мм	f _т , мм	δ, %

6. Для кожного зразка вибрати ступінь навантаження, при якому похибка у визначенні прогину посередині балки мінімальна.

7. За формулою (6.14) для кожного матеріалу знайти величину модуля Юнга, взявши за основу експериментальні дані ступеня навантаження з мінімальною похибкою у визначенні F і f.

8. Знайти довідкові значення модулів Юнга для цих же матеріалів (додаток 1).

9. Знайти відносну похибку у визначенні модуля Юнга за формулою

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. В якому випадку брус зазнає деформації згинання? Що таке балка? 2. Яке згинання називається плоским? 3. Що таке чисте згинання? Якою схемою реалізується випадок чистого згинання? 4. Які закономірності деформації балки при чистому згинанні? 5. Як в загальному випадку визначається величина згинального моменту? 6. Що таке нейтральний шар, нейтральна лінія? 7. Як визначається відносне видовження при згинанні? 8. Обґрунтуйте можливість застосування при згинанні закону Гука. 9. Як в загальному випадку можна визначити нормальне напруження при згинанні? 10. Як визначити згинальний момент в довільній точці поперечного перерізу? 11. Сформулюйте та напишіть математичний вираз закону Гука при згинанні. 12. Як визначити нормальне напруження при згинанні в довільній точці поперечного перерізу. 13. Обґрунтуйте необхідність вибору раціональної форми поперечного перерізу. 14. В якому місці значення нормального напруження досягає своєї максимальної величини? 15. Як визначити значення максимального нормального напруження при згинанні? 16. Що таке осьовий момент опору? 17. Як і в яких точках визначають максимальне нормальне напруження для перерізів, у яких відсутня горизонтальна вісь симетрії? 18. Якою є умова міцності при згинанні. 19. Чому дорівнюють значення моментів опору для прямокутного та круглого поперечного перерізів. 20. Як визначити прогин посередині двоопорної балки у випадку дії на неї зосередженої сили? 21. Як, використовуючи значення прогину балки, визначити модуль Юнга? 22. Як визначити осьовий момент інерції балки прямокутного поперечного перерізу? 23. Які зразки використовуються при дослідженні матеріалів на згинання? 24. Опишіть конструкцію та принцип дії установки для дослідження матеріалів на згинання. 25. Опишіть методику проведення експерименту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрушков В. І., Гуртовий О. Г., Тинчук С. О. Опір матеріалів. Лабораторні роботи : навч. посіб. [Електронне видання]. Рівне : НУВГП, 2022. 130 с.
2. Гурняк Л. І., Гуцуляк Ю. В., Юзьків Т. Б. Опір матеріалів: посібник для вивчення курсу при кредитно-модульній системі навчання. Львів: «Новий світ – 2000», 2019. 363 с.
3. Опір матеріалів : навчальний посібник : у 2 ч. / Жигілій Д. О., Верещака С. М., Некрасов С. С., Довгополов Ю. А. Суми : Сумський державний університет, 2022. Ч. І. 159 с.
4. Опір матеріалів : навчально-методичний посібник для здобувачів освіти першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної, заочної та дистанційної форм навчання / Сліпченко М. В, Алфьоров О. І., Савченко В. Б., Свіргун О. А. Харків, 2023. 153 с.
5. Опір матеріалів : підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський; За ред. Г. С. Писаренка. 2-ге вид., допов. і переробл. – Київ: Вища школа, 2004. – 655 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1. Модулі Юнга деяких матеріалів.

№ п/п	Матеріал	Модуль пружності E, $\times 10^5$ МПа
1	Чавун білий, сірий	1,15 ... 1,60
2	Чавун ковкий	1,55
3	Сталь вуглецева	2,0 ... 2,1
4	Сталь легована	2,1 ... 2,2
5	Мідь прокатана	1,1
6	Бронза алюмінієва лита	1,15
7	Латунь холоднотягнута	0,0091 ... 0,0099
8	Алюміній катаний	0,69
9	Дуралюмін катаний	0,71
10	Граніт	0,49
11	Деревина вздовж волокон	0,1 ... 0,12
12	Деревина поперек волокон	0,005 ... 0,01
13	Текстоліт	0,06 ... 0,1

Додаток 2. Основні механічні характеристики деяких конструкційних матеріалів.

№ п/п	Матеріал	Границя міцності, МПа	
		Розтягання	Стискання
1	Сталь 10	340	---
2	Сталь 30	500	---
3	Сталь 45	610	---
4	Сталь 40X	1000	---
5	Чавун сірий звичайний	140... 180	600 ... 1000
6	Чавун сірий дрібнозернистий	210 ... 250	до 1400
7	Текстоліт	85 ...100	130 ...250
8	Гетинакс	150 ...170	150 ...180
9	Сосна вздовж волокон	80	40
10	Сосна поперек волокон	—	5
11	Дуб вздовж волокон	95	50
12	Дуб поперек волокон	—	15
13	Граніт	3	120 ... 260
14	Цегла	—	7,4 ...30
15	Бетон	—	5 ... 35

Додаток 3. Орієнтовні значення основних допустимих напружень на розтягання і стискання

№ п/п	Матеріал	Допустиме напруження, МПа	
		Розтягання	Стискання
1	Чавун сірий у відливках	28...80	120...150
2	Сталь Ст2	140	
3	Сталь Ст3	160	
4	Сталь вуглецева	60...250	
5	Сталь легована	100...400 і вище	
6	Мідь	30...120	
7	Латунь	70...140	
8	Бронза	60...120	
9	Алюміній	30...80	
10	Дуралюмін	80...150	
11	Текстоліт	30...40	
12	Гетинакс	50...70	
13	Сосна вздовж волокон	7...10	10...12
14	Сосна поперек волокон	---	1,5...2
15	Дуб вздовж волокон	9...13	13...15
16	Дуб поперек волокон	---	2...3,5
17	Бетон	0,1...0,7	1.0...9

Додаток 4. Допустимі дотичні напруження при крученні для сталі і чавуну.

№ п/п	Матеріал	Допустиме дотичне напруження при крученні, $[\tau_{кр}]$, МПа	№ п/п	Матеріал	Допустиме дотичне напруження при крученні, $[\tau_{кр}]$, МПа
1	Сталь 10	90	8	Чавун Сч 15	80
2	Сталь 20	100	9	Чавун Сч 21	95
3	Сталь 35	120	10	Чавун Сч 24	100
4	Сталь 45	140	11	Чавун Сч 32	130
5	Сталь 40ХН	245	12	Чавун Сч 38	155
6	Сталь Ст3	100	13	Чавун Вч 40-10	160
7	Сталь Ст6	140	14	Чавун Вч 50-1,5	250

ЗМІСТ

Передмова.....	3
Лабораторна робота №1. Визначення фізико-механічних характеристик маловуглецевої сталі з випробувань на розтягання	5
Лабораторна робота №2. Визначення модуля повздовжньої пружності сталі.....	17
Лабораторна робота № 3. Випробування зразків з різних матеріалів на стискання	24
Лабораторна робота № 4. Дослідження різних матеріалів на зріз	34
Лабораторна робота №5. Випробування зразків з різних матеріалів на кручення	40
Лабораторна робота № 6. Випробування зразків з різних матеріалів на згинання	48
Список літератури.....	58
Додатки	59

Навчальне видання

Подолянчук Станіслав Вікторович

Опір матеріалів.

Лабораторні роботи

Навчальний посібник

Вінницький державний педагогічний університет
імені Михайла Коцюбинського