

Міністерство науки і освіти України
Таврійський державний агротехнологічний університет

Бондаренко Л.Ю., Вершков О.О., Антонова Г.В.

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З МЕХАНІКИ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

*рекомендовано вченою радою
Таврійського державного агротехнологічного університету, як
навчальний посібник для підготовки здобувачів ступеня вищої освіти
«Бакалавр» зі спеціальностей: 208 «Агроінженерія»,
133 «Галузеве машинобудування», 122 «Комп'ютерні науки»*

Мелітополь
2017

Бондаренко Лариса Юрьевна

УДК 620.17(075.8)

Б81

*Рекомендовано вченою радою Таврійського державного
агротехнологічного університету як навчальний посібник
Протокол № 5 від «26» грудня 2017р*

Рецензенти:

С.В. Кюрчев – кандидат технічних наук, проф. (Таврійський державний агротехнологічний університет, завідувач кафедри технології конструкційних матеріалів);

В.М. Верещага – д-р техн. наук, проф. (Мелітопольський державний педагогічний університет ім. Б. Хмельницького, завідувач кафедри математики і фізики)

Бондаренко Л.Ю.

Б81 Лабораторний практикум з механіки матеріалів і конструкцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. / Л.Ю.Бондаренко, О.О.Вершков, Г.В.Антонова; Таврійський державний агротехнологічний університет. – Електрон. текст. дані. – Мелітополь: ТДАТУ, 2017. – 183с. – 1 електрон. опт. диск (CD-R). – Систем. вимоги: Pentium-II/300; 64 Мб RAM; Microsoft Windows XP; 60 Мб вільного дискового простору; NET Framework 2.0. – Лабораторний практикум з механіки матеріалів і конструкцій.

Зміст видання відповідає освітньо-професійній програмі підготовки бакалаврів зі спеціальностей: 208 «Агроінженерія», 133 «Галузеве машинобудування», 122 «Комп'ютерні науки» (галузевий стандарт вищої освіти України ГСВО ОПП-05) та програмі дисципліни «Механіка матеріалів і конструкцій».

У навчальному посібнику наведено опис лабораторних робіт з механіки матеріалів і конструкцій, які виконуються в Таврійському державному агротехнологічному університеті, опис випробувальних машин, установок та приладів. У кожній роботі наведені мета роботи, стислі теоретичні відомості, порядок виконання та обробка результатів випробувань, а також тестові запитання для самоконтролю. Призначений для самостійної підготовки студентів до лабораторних робіт з курсу механіки матеріалів і конструкцій.

УДК 620.17(075.8)

© Бондаренко Л.Ю., Вершков О.О.,
Антонова Г.В.

© Таврійський державний
агротехнологічний університет, 2017

ЗМІСТ

Вступ	5
Загальні вказівки до виконання лабораторних робіт	6
Прийняті позначення і термінологія	7
Техніка безпеки	8
Розділ 1. МАШИНИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ	11
1.1. ВИПРОБУВАЛЬНІ МАШИНИ.....	11
1.1.1. Машини для випробування на розтяг і стиск.....	11
1.1.2. Машини для випробувань на кручення.....	18
1.1.3. Машини для випробувань на удар.....	21
1.2. Прилади для вимірювання абсолютних лінійних деформації.....	25
1.3. Прилади для вимірювання відносних лінійних деформації.....	29
Розділ 2. МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ	36
2.1. Лабораторна робота: Випробування на розтяг маловуглецевої сталі.....	37
2.2. Лабораторна робота: Випробування на розтяг маловуглецевої сталі. Основні механічні характеристики.....	48
2.3. Лабораторна робота: Випробування на стиск сталі, чавуну та дерева.....	60
2.4. Лабораторна робота: Випробування на кручення сталі та чавуну.....	73
2.5. Лабораторна робота: Визначення модуля пружності I-го роду E, II-го роду G та коефіцієнта поперечної деформації для сталі при розтягу.....	85
2.6. Лабораторна робота: Визначення питомої ударної в'язкості при ударі.....	94

Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЕФОРМАЦІЙ ТА НАПРУЖЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ.....	105
3.1. Лабораторна робота: Експериментальна перевірка закону розподілу нормальних напружень по висоті перерізу балки при згині.....	105
3.2. Лабораторна робота: Визначення головних напружень в поперечних перерізах балки при поперечному згині.....	118
3.3. Лабораторна робота: Експериментальне визначення деформацій перерізів балки при згині.....	126
3.4. Лабораторна робота: Статично невизначені балки. Експериментальне визначення опорної реакції «зайвої» невідомої.....	135
3.5. Лабораторна робота: Визначення напружень і деформацій під час косоного згину.....	144
3.6. Лабораторна робота: Теоретичне та експериментальне визначення критичної сили для стиснутого стержня.....	157
3.7. Лабораторна робота: Дослідження впливу способів закріплення кінців стержня на його стійкість.....	167
БІБЛЮГРАФІЧНА ДОВІДКА.....	176
БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	178
ДОДАТКИ.....	179

ВСТУП

Механіка матеріалів і конструкцій – одна з найважливіших загально-технічних дисциплін, яка відіграє суттєву роль у науковій підготовці інженера будь-якої спеціальності, оскільки кожному з них у практичній діяльності доводиться вирішувати широке коло задач, серед яких велике місце займають розрахунки на міцність, жорсткість та стійкість.

Механіка матеріалів і конструкцій є дослідно-теоретичною дисципліною, оскільки вона широко використовує експериментальні дані під час теоретичних досліджень. Експеримент необхідний для визначення механічних властивостей матеріалів, а також для перевірки теоретичних висновків, що базуються на деяких гіпотезах, що спрощують розрахунки. Механічні характеристики матеріалів визначаються випробуванням стандартних зразків під навантаженням у лабораторії.

Незважаючи на високий розвиток теорії, у багатьох галузях інженерної практики переважну значимість мають експериментальні методи дослідження.

Лабораторні заняття є складовою частиною загального курсу механіки матеріалів і конструкцій і є ланкою, що пов'язує теорію з практикою. Вони дозволяють поглиблювати та закріплювати теоретичні знання, отримані студентами на лекціях, перевіряти науково-теоретичні положення експериментальним шляхом, знайомитись з устаткуванням, приладами, обладнанням та матеріалами, вивчати на практиці методи наукових досліджень.

Даний методичний посібник містить в собі відомості, що необхідні студентам для самостійної підготовки й виконання лабораторних робіт з механіки матеріалів і конструкцій.

Задачами проведення лабораторних занять є:

- визначення механічних властивостей матеріалів в умовах статичного та динамічного навантажень;
- перевірка теоретичних висновків шляхом експерименту.

Лабораторні роботи проводяться для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальностей 208 «Агроінженерія», 133 «Галузеве машинобудування» та 122 «Комп'ютерні науки».

Кількість лабораторних робіт відповідає наявності устаткування на кафедрі технічної механіки. Порядок виконання та вид лабораторної роботи можуть регламентуватись викладачем відповідно до програми курсу залежно від спеціальності.

До проведення лабораторних занять студент повинен самостійно вивчити ту роботу, що передбачена робочою програмою з курсу відповідної дисципліни, з'ясувати мету й теоретичні основи даної роботи, принцип дії машин і приладів, порядок виконання роботи й обробку результатів експерименту. Під час підготовки до лабораторних занять необхідно перевіряти свої знання, відповідаючи на всі тестові запитання для самоконтроля, які наведено в кінці кожної роботи.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторні роботи є складовою частиною загального курсу механіки матеріалів і конструкцій.

Виконання всіх лабораторних робіт, передбачених навчальним планом, для студентів є обов'язковим. Студент, який не виконав хоча б однієї лабораторної роботи, до заліку або іспиту не допускається. Керуючись графіком проведення робіт на семестр, студент зобов'язаний заздалегідь підготуватися до кожного лабораторного заняття та повинен:

- а) знати відповідний теоретичний матеріал, звернувши особливу увагу на вивчення механічних властивостей матеріалів;
- б) знати мету роботи та методику її виконання;
- в) ознайомитися зі схемами устаткування та роботи машин і приладів, що застосовуються;
- г) уміти проводити вимірювання та обробляти результати з необхідною точністю;
- д) підготувати журнал спостережень (таблиці) дослідів, виконати ескізи зразків, що використовуються для дослідів.

Під час виконання робіт та обробки отриманих даних студенту необхідно:

- а) точно дотримуватися правил поведінки в лабораторії;
- б) цілеспрямовано стежити за проведенням робіт відповідно до методики та інструкцій;
- в) уважно проводити необхідні спостереження, охайно виконувати всі виміри та розрахунки;
- г) ретельно робити усі необхідні креслення з дотриманням відповідних масштабів;
- д) отримані результати надавати із зазначенням можливої похибки;
- е) зробити аналіз отриманих результатів;
- ж) усі записи і розрахунки проводити в окремому зошиті, що має назву «Журнал лабораторних робіт».

Кожна робота приймається викладачем одразу ж після її виконання і оформлення. Лабораторні роботи оформлюються заліком, який студент отримує після здачі всіх робіт, передбачених навчальним планом на даний семестр. Зазначений порядок виконання лабораторних робіт поширюється на студентів як очного, так і заочного навчання.

ПРИЙНЯТІ ПОЗНАЧЕННЯ І ТЕРМІНОЛОГІЯ

F – зосереджена сила, Н

M_k – крутильний момент у перерізі, Н·м

M_x, M_y – згинальні моменти відносно центральних осей x та y , Н·м

A – площа поперечного перерізу, м²

E – модуль поздовжньої пружності матеріалу під час розтягу, МПа

G – модуль пружності матеріалу під час зсуву, МПа

μ – коефіцієнт Пуассона (безрозмірний)

ε – відносна лінійна деформація (безрозмірна)

γ – кутова деформація, рад

σ – нормальні напруження, МПа

τ – дотичні (тангенціальні) напруження, МПа

φ – кут закручування, градуси або рад

J_x, J_y – момент інерції поперечного перерізу стержня відносно осей x та y , м⁴

W_x, W_y – осьові моменти опору поперечного перерізу стержня, м³

J_p – полярний момент інерції поперечного перерізу стержня, м⁴

W_p – полярний момент опору поперечного перерізу стержня, м³

u, f – прогин балки під час згину, м

f_x, f_y – прогин балки в напрямку осей x та y , м

θ – кут повороту під час згину, рад

$F_{кр}$ – критична сила, Н

λ – гнучкість стержня (безрозмірна)

a_n – питома ударна в'язкість, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right)$

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Під час проведення робіт у лабораторії «Механіка матеріалів і конструкцій» кафедри технічної механіки ТДАТУ необхідно дотримуватися правил і вимог техніки безпеки.

У лабораторії встановлено електромеханічне обладнання для випробування матеріалів під навантаженням. Оскільки матеріали, що використовуються в сучасному машинобудуванні мають велику жорсткість і міцність, випробувальне обладнання розвиває значні робочі зусилля – до десятків тон сил. Під час проведення дослідів обладнання знаходиться під силовим напруженням 220 і 380 В.

З метою виключення травматизму під час проведення лабораторних робіт усі студенти повинні суворо виконувати правила техніки безпеки (ПТБ). Допуск до проведення лабораторних робіт дозволений після проведення інструктажу з ТБ викладачем або співробітником кафедри (завідувача лабораторією або навчальним майстром) з підписом у журналі інструктажу з ТБ.

Основні правила техніки безпеки, яких необхідно дотримуватись у лабораторії, викладені нижче.

1. Правила загальної техніки безпеки

Перед пуском випробувальної машини необхідно:

- ознайомитися з її будовою, пультом керування і порядком проведення лабораторної роботи;
- перевірити надійність кріплення силових стійок машини, надійність закріплення зразка в захоплювачах машини;
- переконатися у відсутності сторонніх предметів у робочій зоні машини;
- встановити (якщо є) захисні кожухи.

Перед проведенням основних вимірів потрібно навантажити машину малою силою, перевірити надійність усіх кріплень.

Навантаження зразків слід проводити поступово, плавно. Під час появи ознак несправності машини або руйнування зразка (якщо це не передбачено порядком виконання лабораторної роботи) необхідно зупинити навантаження, розвантажити зразок і відключити машину та повідомити викладача (завідувача лабораторією, навчального майстра).

Після закінчення проведення випробувань та вимірювань слід плавно розвантажити і відключити машину.

ЗАБОРОНЕНО:

- вмикати машину без викладача або завідувача лабораторією (навчального майстра);

- користуватися машиною з ознаками несправності;
- намагатися самостійно усунути несправності;
- порушувати послідовність проведення лабораторної роботи;
- встановлювати в машину випробовувані зразки або гирі не з штатного комплекту машини;
- встановлювати зразки і гирі ненадійно, недбало;
- збільшувати навантаження понад граничного значення;
- змінювати величину навантаження в момент проведення вимірювань;
- перебувати в зонах переміщення рухомих частин машини (траверси, маятника і т. п.) або розташовувати там сторонні предмети;
- залишати без нагляду працюючі машини.

2. Правила безпечної експлуатації електрообладнання, що працюють під напругою

Перед пуском необхідно переконатися в справності проводки шляхом огляду, перевірити наявність заземлення (якщо конструкція установки це допускає).

Під час роботи слід навантажувати електроустановку поступово, підключати нові споживачі електроенергії по черзі, під час цього контролювати величину допустимого струму в ланцюзі.

У разі спрацювання захисних пристроїв (запобіжників, автоматів) або припинення подачі струму в мережі з іншої причини, негайно вимкнути всі електроприлади та повідомити викладача (завідувача лабораторією, навчального майстра).

ЗАБОРОНЕНО:

- самостійно здійснювати монтаж, демонтаж, усунення несправностей електромереж і електричних частин випробувальних машин;
- користуватися несправною електропроводкою, арматурою і апаратурою;
- перевищувати паспортну потужність електроустановки;
- використовувати лампи, потужність яких перевищує номінальну для даного типу світильника;
- використовувати лампи, потужність яких перевищує 200 Вт.

3. Правила пожежної безпеки

Приміщення слід утримувати в чистоті. Необхідно регулярно очищати смітєві корзини.

Після закінчення занять слід відключити працююче обладнання та освітлення.

У разі займання електродротів або електроприладів необхідно негайно їх знеструмити, повідомити викладача (завідувача лабораторією, навчального майстра) і діяти за його вказівками.

ЗАБОРОНЕНО:

- вішати що-небудь на розетки, вимикачі та дроти;
- заклеювати дроти папером, завалювати предметами (особливо легкозаймистими), затискати дріт;
- використовувати абажури з горючих матеріалів;
- використовувати електронагрівальні прилади;
- користуватися відкритим вогнем, проводити роботи із застосуванням відкритого вогню;
- зберігати і використовувати легкозаймисту рідину;
- загроможувати приміщення та основні і запасні виходи з нього, шляхи евакуації та пожежні гідранти.

Про всі несправності і позаштатні ситуації необхідно негайно повідомити викладача або завідувача лабораторією (навчального майстра)!

Розділ 1. МАШИНИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ

У сучасному світі не існує такої галузі науки і техніки, такої сфери практичної діяльності людей, де одним з вирішальних чинників прогресу не були б вимірювання. Випробування матеріалів, а саме експериментальне визначення їх механічних і фізичних властивостей, необхідне для розрахунку елементів конструкцій і споруд, а також деталей машин. У більш вузькому сенсі слова, під випробуванням матеріалів мається на увазі механічне випробування з метою з'ясування механічної міцності матеріалу. На практиці застосовуються такі види механічних випробувань: на розрив (розтяг); на роздроблення (стиск); на згин; на кручення; на удар.

1.1. ВИПРОБУВАЛЬНІ МАШИНИ

1.1.1. Машини для випробування на розтяг і стиск

Розрізняють три види машин для випробувань на розтяг і стиск:

❖ розривні машини, що дозволяють прикладати до зразка тільки розтягуючі зусилля (для стиску зразків на таких машинах потрібне додаткове пристосування);

❖ преси для отримання тільки стискаючих зусиль (наприклад, твердомірів ТК і ТШ);

❖ універсальні машини, на яких можна здійснювати як випробування на розтяг, так і стиск, а також згинання.

За способом створення зусилля випробувальні машини можна розділити на два основних типи:

а) машини з механічним навантаженням, які, в свою чергу, діляться на гвинтові і важільні;

б) машини з гідравлічним навантаженням.

У гвинтових машинах зусилля, що діє на зразок, створюється за допомогою гвинта. У важільних машинах навантаження зразка здійснюється за допомогою системи важелів. До цього типу машин відносяться, наприклад, важільні твердоміри, в яких зусилля зазвичай створюється вантажем і визначається його масою.

У гідравлічних машинах зусилля в зразку виникає у наслідок збільшення тиску рідини на поршень у робочому циліндрі.

Випробувальні машини розрізняються між собою також силовимірювальними пристроями. Більшість мають маятникові силовимірювачі, що являють собою маятникову противагу, яка відхиляється пропорційно до діючого на зразок навантаження.

1.1.1.1. Машини з гідравлічним приводом

Найбільш поширеним обладнанням для випробування на розрив є машини з гідравлічним приводом. У лабораторії механіки матеріалів і конструкцій є в наявності вертикальна універсальна випробувальна машина УИМ-50, яка розрахована на граничне навантаження 50 тонн. Силвимірювач цієї машини являє собою комбінацію гідравлічного силвимірювального циліндра з важільно-маятниковою системою і має чотири шкали з максимальним навантаженням: 5т, 10т, 25т і 50т. Ця машина призначена головним чином для статичних випробувань металів на розтяг, стиск та згин. Загальний вид машини наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд універсальної розривної машини УИМ-50.

Універсальна випробувальна машина складається з трьох частин: робочої частини (гідравлічний прес) I, силовимірювального пристрою II та силового агрегата (насосної станції) III з регулятором і пусковою апаратурою.

На чавунній основі машини 1 встановлені чотири колони 2, що з'єднані зверху нерухою поперечиною 7, на якій міститься робочий циліндр 8 із поршнем 9, що при підкачуванні мастила піднімає траверсу 6 (рис. 1.2).

Робоча частина складається з двох траверс: нижня 10 – нерухома, а верхня 6 – рухома. Максимальна величина підняття рухомої траверси машини 265 мм. Нерухому траверсу 10 встановлюють по висоті (залежно від довжини зразка, за допомогою переміщення механічного приводу установчого захвату.

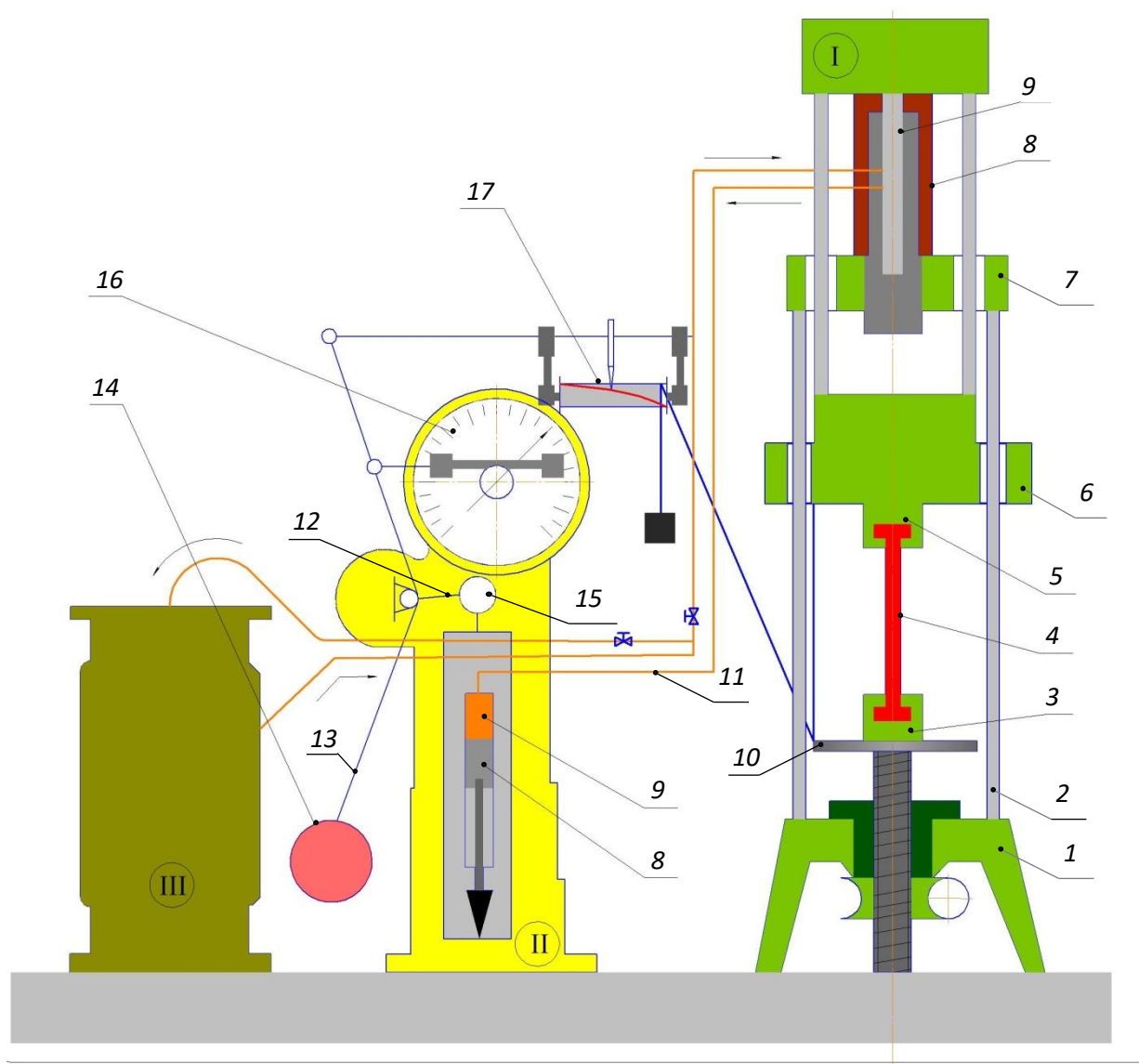


Рисунок 1.2 – Схема універсальної розривної машини УИМ-50.

Рухома траверса 6 переміщується тільки вгору за рахунок гідравлічної системи навантаження. Для проведення досліджень на стиск у комплекті машини передбачено спеціальні опори, а на згин – переставні полозки, для встановлення на низ дослідних зразків.

На машинах з гідроприводом важче підтримувати задану швидкість деформування зразка, ніж під час використання механічного приводу (Швидкість деформації і швидкість деформування – різні поняття. Швидкість деформування характеризує зміну довжини зразка за одиницю часу, а швидкість деформації – зміну відносного подовження, у відсотках, за одиницю часу).

Зі збільшенням опору деформуванню матеріалу зразка зростає тиск мастила в робочому циліндрі. При цьому посилюється просочування рідини через зазор між циліндром і поршнем та швидкість деформування зменшується. Для її підтримки на постійному рівні необхідно збільшити подачу рідини в циліндр пропорційно до її витікання. Цей недолік машин з гідроприводом досить великий, коли механічні властивості випробувального матеріалу помітно залежать від швидкості деформації, наприклад, при підвищених температурах. Мастило, що накопичується між робочим поршнем і циліндром, виводиться по мастилопроводу.

Навантаження, що діє на зразок, вимірюється маятниковим сило-вимірювальним пристроєм. Зміна тиску мастила в робочому циліндрі передається по трубопроводу 11 поршню 8, який переміщується, викликає поворот важеля 12. Коли важіль 12 обертається, штанга 13 маятника 14 відхиляється доти, поки його момент врівноважить момент сили, прикладеної від поршня 8 до важеля 12. Штовхач 15 переміщує зубчасту рейку, що обертає шестерню, на вісь якої насаджені дві стрілки шкали 16 силовимірювального пристрою. Одна з них має фіксатор для другої, яка призначена для того, щоб зафіксувати значення навантаження, при якому відбувається руйнування.

Діаграмний апарат машини 17 призначений для автоматичного записування діаграми розтягу в процесі випробування. Він складається з барабану, який з'єднано з верхньою траверсою 6 шляхом блоку ниток, і самозаписувача, який з'єднано зі стрілкою силовимірювача. Лінійне переміщення траверси 6 перетворюється в обертальний рух барабана 17. На барабані закріплюється паперова стрічка для запису діаграми розтягу. Самозаписувач, жорстко насаджений на зубчасту рейку, повністю повторює її рух, будуючи силову лінію діаграми у певному масштабі. У той самий час по осі абсцис (теж у масштабі) відкладається подовження зразка.

Шляхом навішування змінних вантажів на штангу маятника можна встановити різні граничні межі вимірювання навантажень: 5, 10, 25 і 50 тон.

1.1.1.2. Машини з механічним приводом

Машини з механічним приводом зазвичай мають відносно невелику потужність і, як правило, розраховані на руйнівне зусилля не більше 5-10 тон. Особливості конструкції такого типу установок розглянемо на прикладі машини типу УММ-5, яка використовується в лабораторії «Механіка матеріалів і конструкцій» кафедри технічної механіки (рис. 1.3).

Випробувальна машина двоколонна, вертикальна, з механічним переміщенням рухомої траверси нижнього затискача і маятниковим силовимірювачем. Дозволяє проводити випробування з максимальним навантаженням 5 тонн. Для випробувань на даній машині використовують зразки відповідно до ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84) «Металлы. Методы испытаний на растяжение».



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд універсальної розривної машини УММ-5.

Машина призначена для випробування зразків на розтяг, стиск і згин при нормальній температурі навколишнього середовища. Має електромеханічний привод активного затискання і важільно-маятниковий силовимірювач та робочу частину. Блок приводу плавно регулює кутову швидкість двигуна з кратністю 1:100, що дозволяє змінювати швидкість руху активного захвату машини від 1 до 100 мм/хв. Принципова схема машини зображена на рисунку 1.4.

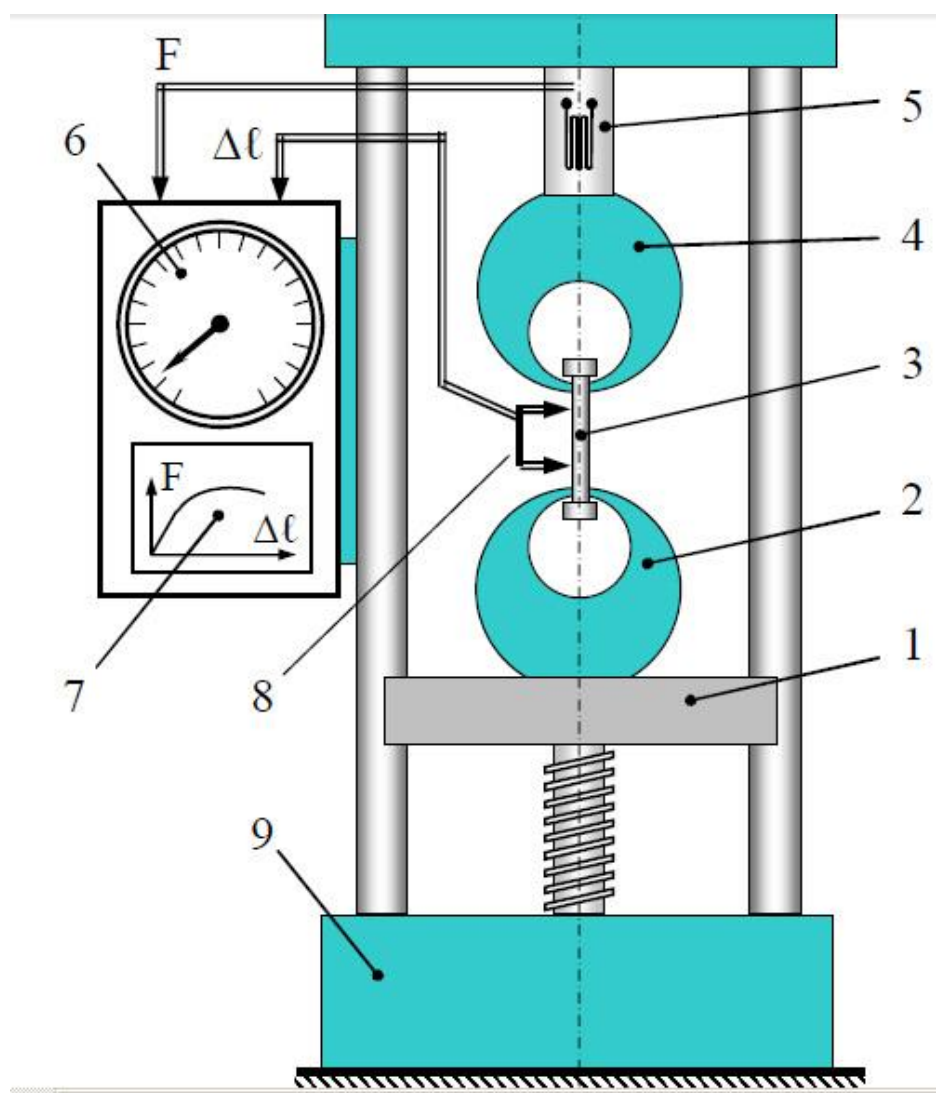


Рисунок 1.4 – Схема універсальної розривної машини УММ-5.

На чавунній литій станині 9 є направляючі, по яких може переміщатися у вертикальному напрямку нижня траверса машини 1, на якій встановлено нижній затискач 2. Верхній затискач 4 закріплений у верхній частині станини 5 є нерухомим. Він з'єднаний з динамометричним пристроєм, призначеним для визначення навантаження.

Характер деформації визначається напрямком переміщення нижнього затискача 2. Під час розтягування в затискачі 2 і 4 встановлюється

випробовувальний зразок 3. Поступальне переміщення (вгору або вниз) траверса 1 отримує за допомогою вантажного гвинта 10 за рахунок обертання черв'ячного редуктора, розташованого усередині фундаменту машини 9. Робоче обертання черв'ячного редуктора здійснюється асинхронним електродвигуном через коробку передач.

Опускання нижнього затискача при нерухомому верхньому викликає розтяг зразка 8. Рух нижнього затискача через зразок передається на верхній затискач машини. Переміщення викликає відхилення важеля 5 маятника 4, з яким вони з'єднані шарніром. При відхиленні важеля, маятник повертається і займає похиле положення, яке і визначає навантаження на зразок.

Машина має силовимірювач 6 та діаграмний апарат барабанного типу 7, що дозволяє записувати у великому масштабі діаграму навантаження зразків.

Силовимірювач має чотири шкали навантажень для статичних випробувань з різною ціною поділок. Ці шкали призначені для вимірювання граничних статичних навантажень у 0,5; 1; 2,5 і 5 тонн.

Деформації на діаграмному апараті можна отримувати в масштабі 1:2. Відстань між захватами під час розтягування – 0-800мм, відстань між захватами при стиску – 700мм, максимальна відстань між захватами під час випробування на згин – 600мм, максимальний допустимий прогин зразка під час випробування на поперечний згин – 68мм.

1.1.2. Машини для випробувань на кручення

Для випробування зразків на кручення використовують випробувальну машину з механічним навантаженням, на якій випробовують стандартні зразки з різних матеріалів (ГОСТ 3595-80 «Металлы. Метод испытаня на кручение»).

Крутильна машина КМ-50, яка є в наявності в лабораторії кафедри, з максимальним крутильним моментом 500 Н·м, призначена для проведення різних випробувань на кручення зразків круглого, прямокутного і кільцевого перерізів. Загальний вигляд машини показано на рисунку 1.5.

Машина має станину, на якій змонтовані механізми навантаження і силовимірювання. КМ-50 належить до машин з важільним маятниковим силовимірювачем.



Рисунок 1.5 – Загальний вигляд випробувальної машини КМ-50.

Принципово-кінематична схема машини наведена на рисунку 1.6. На станині машини, що складається з основи 15, двох колон 14 і траверси 13, змонтовані усі основні вузли: механізм навантаження, силівимірювальний механізм, пристрій для розрахунку кутів закручування і самописний діаграмний апарат. Кріплення зразка в затискачах 11 здійснюється за допомогою клиновидних вкладишів з рифленою робочою поверхнею, набір яких для зразків різних розмірів і перерізів входить до комплекту машини. Для установки зразків різної довжини нижній (активний) затискач можна швидко переміщувати, обертаючи маховик 2.

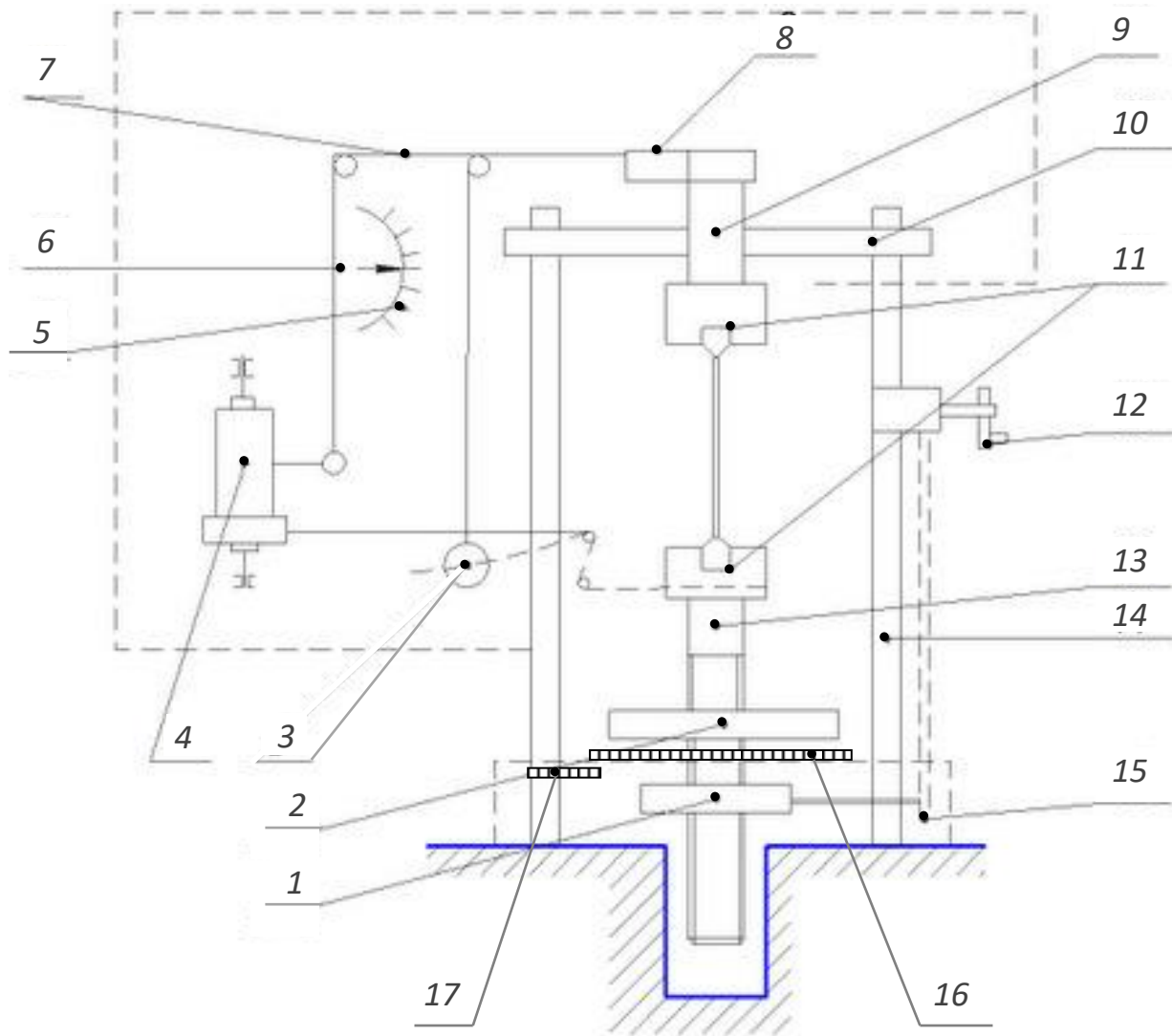


Рисунок 1.6 – Принципово-кінематична схема випробувальної машини КМ-50.

Механізм навантаження. Електродвигун через коробку швидкостей і черв'ячну пару 1 призводить в обертання ходовий гвинт 13 разом з нижнім затискачем 11. Механічний привод передає валу дві швидкості обертання – 0,3 і 0,1 об/хв.

Силувимірвальний механізм забезпечує реєстрацію величини крутильного моменту, що передається через зразок, який випробовують до верхнього (пасивного) затискача. При навантаженні зразка верхній затискач разом з валом 10 повертається на невеликий кут, пропорційний величині крутильного моменту, і викликає за допомогою гнучкої тяги 8 відповідне відхилення маятника 3 від вертикального положення.

Кут закручування (кут повороту нижнього затискача відносно верхнього) в межах 360^0 визначають за шкалою кутів закручування 16 зі стрілочним покажчиком. Для відліку цілого числа обертів машина забезпечена лічильником 17 з межею вимірювання 10 обертів. Показання кута закручування за шкалою 16 відповідають відносному куту закручування нижнього 11 і верхнього 11 затискачів машини.

Механізм силувимірювання. При закручуванні зразка верхній затискач 11 намотує на свій вал 9 тонку гнучку тягу, яка відхиляє маятник 3 до тих пір, поки не буде урівноважений крутильний момент, що виникає в зразку.

При відхиленні маятника 3 через важіль 7 приводиться в рух зубчаста рейка 6, на одному кінці якої закріплюється самозаписувач діаграмного апарату 4, а на іншому зубчаста пара, що переміщає стрілку шкали навантажень 5. Одночасно перо, що закріплене на рейці, записує на діаграмному апараті 4 залежність $M_{кр} - \varphi$. Масштаб запису кута закручування φ : 1град зкручування = 2мм на барабані. Барабан 4 приводиться в обертання від ходового гвинта гнучким зв'язком.

У комплекті для маятника є три різних вантажі, що дозволяють створювати такі границі вимірювання крутильного моменту: 100, 200 і 500 Н·м (10, 20 і 50 кгс·м).

1.1.3. Машини для випробувань на удар

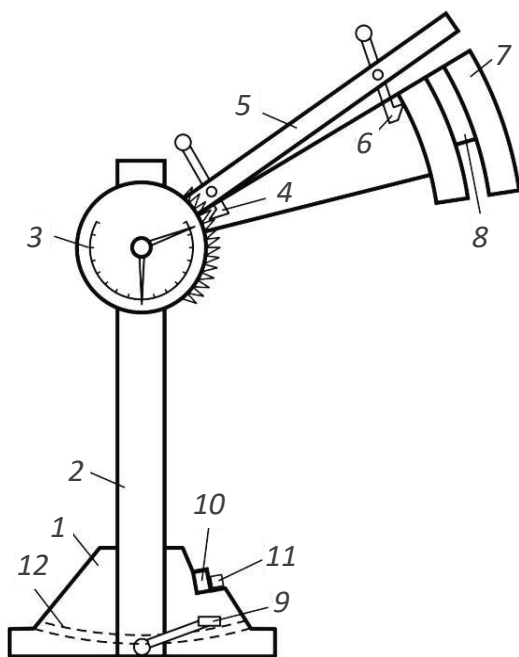
При виборі матеріалу для деталей, або елементів конструкцій, які піддаються динамічним впливам, керуються так званою ударною пробою. Вона полягає в тому, що зразки матеріалу піддають руйнуванню, вимірюючи кількість енергії, витраченої на руйнування зразка.

Ударна в'язкість сильно залежить також від наявності різного роду дефектів у структурі металу (тріщини, порожнечі, неметалеві включення та ін.). Тому випробовування на ударну в'язкість відноситься також до числа поширених технологічних проб, які виявлятимуть якість матеріалу. Такі випробування проводять на ударний розрив або згин.

Руйнування зразків здійснюється зазвичай на маятникових копрах із запасом енергії 300Дж, так як великий надлишок енергії, що залишається після удару, негативно впливає на точність вимірювань.

Випробування на ударний згин.

Випробування на ударний згин (злам) надрізаних зразків має великі переваги: воно вимагає більш дешевих і простих машин і дозволяє виявити небезпечну крихкість там, де випробування на розрив дає хороші результати. Для випробування на ударний згин використовують маятникові копри МК-30 (із максимальною енергією удару 30 кгс·м). На рисунку 1.7 наведено схему та загальний вид копра.



а)



б)

Рисунок 1.7 – Маятниковий копер МК-30: а) схема копра, б) зовнішній вигляд копра.

На масивній основі 1 (рис. 1.7, а) встановлено стійки 2 зі швелерів, пов'язаних вгорі поперечиною. До верхньої частини стійок 2 на горизонтальній осі кріпиться маятник 7, що являє собою плоский сталевий диск, який має в середині ніж 8. Підйомна рама 5 може повертатися навколо своєї осі, і її положення фіксується храповиком 4.

Маятник 7 відхиляється вручну і за допомогою заціпки 6, яка забезпечена запобіжним стопором, закріплюється на підйомній рамі 5. При підйомі маятника одна зі стрілок шкали 3 відхиляється на кут, відповідний (в поділках шкали) потенційній енергії маятника в зведеному положенні, і вказує запас енергії маятника.

Дослідний зразок 11 встановлюється на опори 10, положення яких можна в певних межах регулювати. Відстань між опорами має бути такою, щоб зруйнований зразок не заклинював ніж 8.

Спуск маятника відбувається за допомогою рукоятки заціпки 6. При падінні маятника, пройшовши нижнє положення і зруйнувавши зразок, відхиляє іншу стрілку шкали 3 на кут, що відповідає енергії, збереженої в маятнику після руйнування зразка (в деяких конструкціях маятникових копрів відлік потенційної енергії здійснюється не по круговій шкалі, а по прямолінійній) (рис. 1.8).

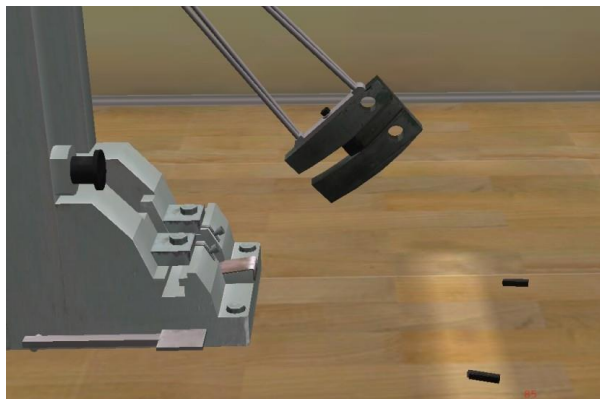


Рисунок 1.8 – Руйнування зразка при ударному згині.

Робота, витрачена на руйнування зразка, дорівнює різниці енергії маятника до і після удару. Для зупинки маятника при зворотному ході копер обладнаний стрічковим гальмом 12. Перед кожним випробуванням гальмівний пристрій зводиться натисканням педалі 9.

У масових динамічних випробуваннях на згин зразків з надрізом ударна в'язкість – єдина вихідна характеристика випробування. Діаграма деформації зазвичай не записується, так як це пов'язано зі значними експериментальними труднощами. Загальний час випробування вимірюється частками секунди, тому для фіксації залежності навантаження від деформації потрібні малоінерційні чутливі датчики і швидкодіючий прилад для запису діаграм. Зазвичай використовують п'езокварцеві динамометри і шлейфові осцилографи.

Випробування на ударний розтяг.

Один з найважливіших плюсів ударних випробувань, як методу оцінки стану металу, – підвищена чутливість. Так, наприклад, коливання механічних властивостей біля середнього значення для сталі (0,35% С) складають: для ударної в'язкості a_n – 99%, для границі міцності σ_b – 15%, для відносного залишкового подовження ε – 8,8% і для відносного залишкового звуження ψ – 5,7%.

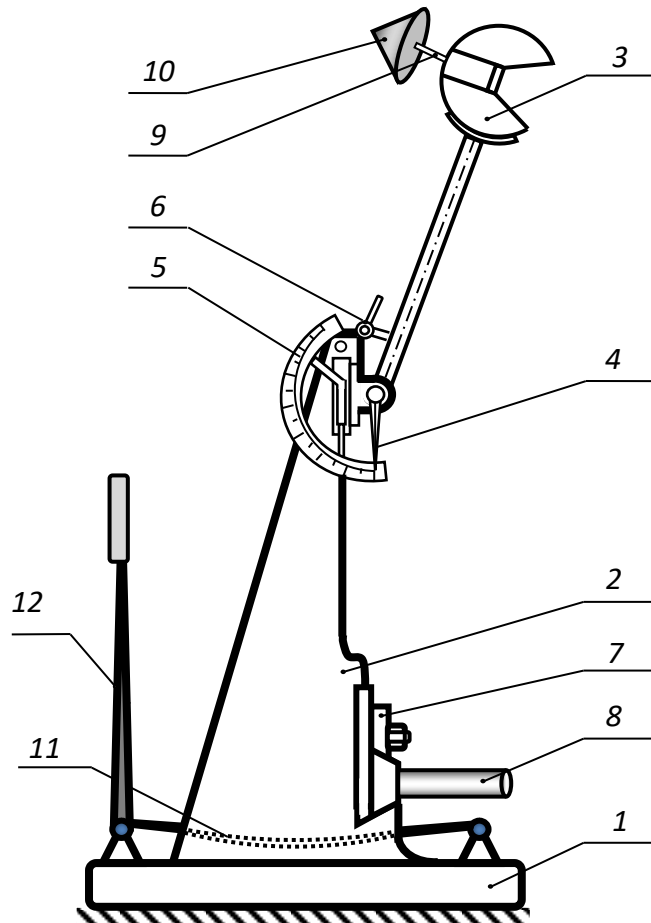
На величину ударної в'язкості часто впливає і спосіб виплавки сталі: електросталь має найбільшу, безсімерівська – найменшу, мартенівська – проміжну величину ударної в'язкості.

Ударна в'язкість в значній мірі відображає стан поверхні зразка, так як деформації в зразку розподіляються нерівномірно і часто бувають зосереджені, в основному, в поверхневих шарах. Наявність твердих поверхневих шарів знижує ударну в'язкість, а м'які поверхневі шари підвищують її.

Випробування на ударний згин проводять на маятникових копрах Шарпі (рис. 1.9, а) із запасом енергії піднятого маятника 300Дж. Копер призначений для проведення випробувань як на ударний розтяг, так і на ударний згин.



а)



б)

Рисунок 1.9 – Маятниковий копер Шарпі: а) загальний вигляд, б) схема маятникового копра.

Опис установки для випробувань. Схема маятнікового копра Шарпі показана на рис. 1,9, б. Копер складається з основи 1, на якій кріпиться стояк 2. До верхньої частини стояка на горизонтальній осі підвішений маятник 3, що являє собою плоский сталевий диск з вирізом. З іншого боку маятника є отвір з різьбою для вкручування зразка 9 (при проведенні випробувань на ударний розтяг), на який зверху накручується «тарілка» 10. Крім того, на осі маятника встановлена стрілка 4, навпроти якої до стояка 2 прикріплена шкала 5 для відліку витрат енергії на руйнування зразка. Шкала проградуєрована в градусах від 0° до 160° . Для фіксації маятника в вихідному верхньому положенні передбачена заціпка 6. На стояках 2 передбачені опори 7 для установки зразків при випробувань на ударний згин, а опори 8 – для випробувань на ударний розтяг.

При проведенні випробувань маятник 3 піднімають вгору і фіксують заціпкою 6. Стрілку 4 встановлюють на нуль, а в маятник 3 вкручують зразок 9. Потім, повернувши засувку 6, відпускають маятник 3, який при своєму падінні руйнує зразок, вдаряючись «тарілкою» 10 об опори 8. Рухаючись далі, маятник 3 перемістить стрілку 4 по шкалі 5, яка зафіксує кут підйому маятника після удару. Цей кут по спеціальних таблицях переводять в значення роботи руйнування зразка. Маятник після удару зупиняють спеціальним гумовим гальмом 11, натискаючи на рукоятку 12.

Зразки для випробувань на ударний розтяг виготовляють механічною обробкою зі стержнів циліндричної форми (рис. 1.10). При динамічних випробуваннях закон подібності не діє. Тому тут необхідна жорстка уніфікація розмірів зразків і умов проведення випробування.

Поверхня зразків повинна бути гладкою, рівною, без тріщин, сколів, здуття і раковин.

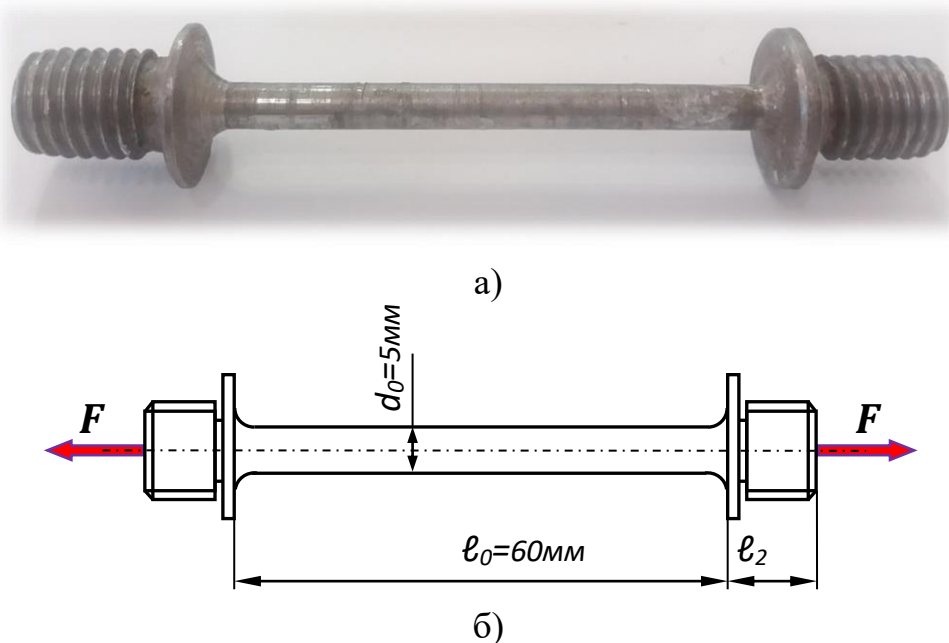


Рисунок 1.10 – Зразок для випробувань на ударний розтяг:
а) загальний вигляд, б) ескіз зразка.

1.2. ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ АБСОЛЮТНИХ ЛІНІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

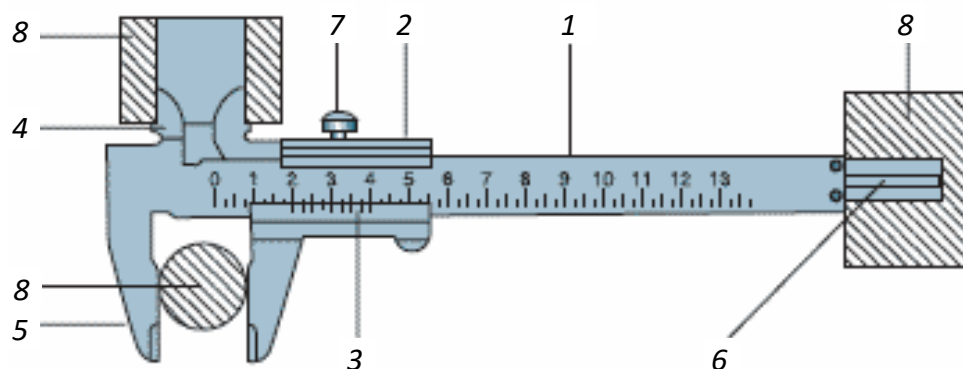
Для вимірювання абсолютних лінійних деформацій можуть використовуватися лінійки й мірні стрічки з ціною поділки 1 мм, які пройшли атестацію органів стандартизації.

Штангенциркуль ШЦ-1

Штангенциркуль застосовується для вимірювання зовнішніх і внутрішніх розмірів деталей, як глибиномір, а також для розмітки з точністю до 0,1 мм (рис. 1.11).



а)



б)

Рисунок 1.11 – Штангенциркуль: а) загальний вигляд, б) схема приладу.

Штангенциркуль складається зі штанги 1 з міліметровими поділками лінійки, штанга закінчується двосторонньою губою 4 і 5. Верхні частини губок закінчуються вістрями для розмітки по металу. По штанзі переміщується рамка 2, на якій є спеціальна шкала – ноніус 3, нульовий штрих якої при зімкнутих губах збігається з нульовим штрихом лінійки на штанзі.

Для вимірювання зовнішніх розмірів деталей 8 розміщують між двох губок 4 і зводять їх без зазору і люфту. Для фіксації рухомої рамки 3 призначений гвинт 7. Цілі значення в міліметрах визначаються за положенням нульового

штриха ноніусу. Дробові частки міліметра з точністю до 0,1 мм визначаються по штриху шкали – ноніусу 3, який збігається зі штрихом шкали лінійки на штанзі.

Для вимірювання внутрішніх розмірів губки 4 розміщують всередині деталі 8 і вони розводяться без зазору і люфту. Також за допомогою штангенциркуля можна вимірювати глибину, для цього в деталь 8 опускається глибиномір 6.

Стрілочний індикатор годинникового типу ИЧ-10

Цей нескладний в обігу і установці прилад, пристрій якого показано на рисунку 1.12, призначений для вимірювання лінійних абсолютних переміщень (як правило, прогинів балок, осадки опор і т.п.) з точністю до 0,01 мм. При вимірюваннях індикатор годинникового типу закріплюється у нерухомому стояку і наконечником 1 вимірювального стержня-рейки 2 спирається на поверхню, переміщення якої потрібно виміряти. До цієї поверхні штифт 2 постійно притискається пружиною 9. Переміщення стержня-рейки 2 за допомогою рейкової шестерні 8, а також шестерень 4, 6 і 10 викликає поворот великої 5 і малої 7 стрілок. Ціна поділки циферблата великої стрілки зазвичай 0,01 мм (існують також індикатори годинникового типу, які мають ціну поділки великої стрілки 0,002 та 0,001 мм), а її повний оборот відповідає 1 мм. Число повних обертів великої стрілки фіксується малою стрілкою 7. Гільза 3 служить направляючою для вимірювального стержня-рейки 2, спіральна пружина 11 усуває зазори в зубчастих передачах.

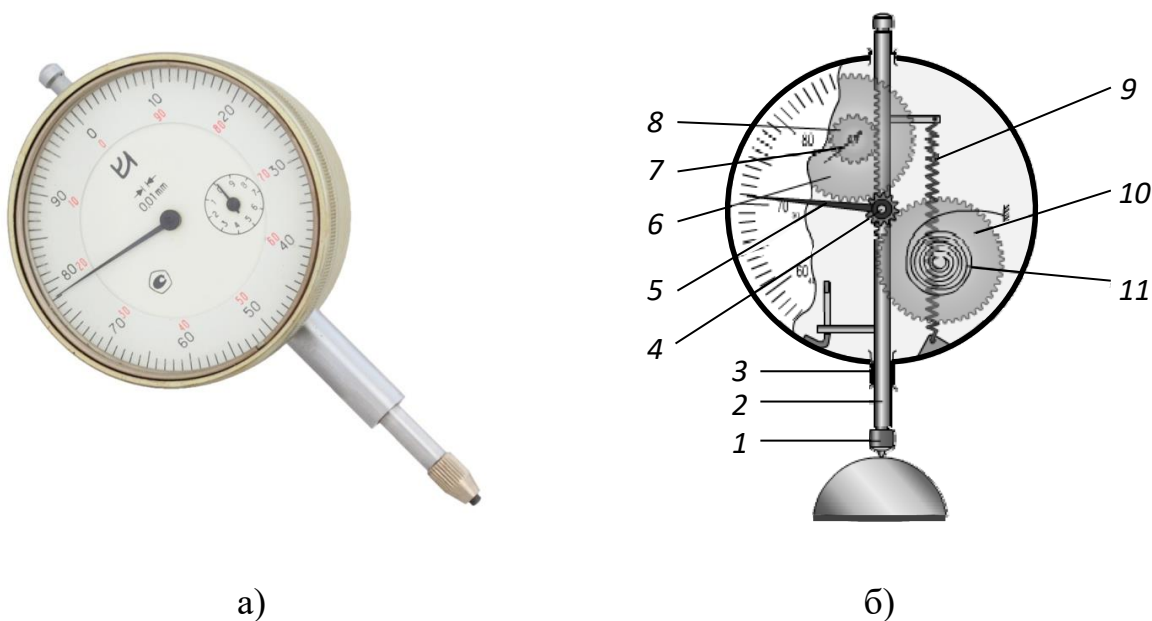


Рисунок 1.12 – Стрілочний індикатор:
а) зовнішній вигляд, б) схема пристрою.

Індикатор багатооборотний типу 1 МИГ

Індикатори багатооборотні призначені для лінійних вимірювань методом безпосередньої оцінки або методом порівняння з еталонною мірою. Ціна поділки шкали 0,001 мм, а діапазон вимірювань від 0 до 1мм. Вимірювальні головки бувають 0 і 1 класів точності.

Застосовуються багатооборотні вимірювальні головки спільно зі стояками і штативами та іншими пристосуваннями для вимірювальних головок та індикаторів у різних галузях машинобудування і приладобудування. Їх вважають найточнішими важільно-механічними вимірювальними пристроями.

При експлуатації необхідно дотримуватися таких умов:

- ❖ температура навколишнього середовища $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$;
- ❖ зміна температури не повинна перевищувати 10°C за одну годину роботи;
- ❖ відносна вологість повітря $(60 \pm 20) \%$.

Загальний вигляд індикатора наведено на рисунку 1.13.



Рисунок 1.13 – Загальний вигляд індикатора багатооборотного типу 1 МИГ.

Принцип роботи. У цього індикатора механізм перетворення лінійного переміщення вимірювального стержня у кутове переміщення стрілки складається з важільних і зубчато-пружинних механізмів (рис. 1.14).

Вісь механізму встановлена в корундових підшипниках. Вимірювальний стержень 2 виконаний з нержавіючої сталі і має аретируючий пристрій, переміщення якого перевищує межі вимірювання за шкалою. Вимірювання відбувається контактним методом за допомогою вимірювальної головки 1, яка кріпиться до стержня 2.

При переміщенні стержня 2 у направляючих втулках 3 важіль 10, повертаючись навколо своєї осі, впливає на важільно-зубчастий сектор 11, який входить у зачеплення із зубчастим колесом 13. Також із зубчастим колесом пов'язана стрілка 12, що з'єднана зі спіральною пружиною 14, яка обирає зазор. А пружина 15 створює вимірювальне зусилля. Голівка 7 кріпиться до стояка за рахунок втулки. Стрілка 12 показує на шкалі 8 переміщення вимірювального наконечника 1. Крайнє нижнє положення вимірювального стержня 2 обмежується гвинтом 4, розташованим поруч з направляючою втулкою 3 вимірювального стержня (гвинт повинен бути залитий нітрофарбою). При такому обертанні гвинта 4 установки механізму в нульове положення повинно викликати рух стрілки 12. Завдяки відсутності тертя в цій конструкції, досягається висока точність показань.

Механізм індикатора повинен бути розвантажений від вимірювального зусилля, що підвищує довговічність приладу. Розвантажена конструкція механізму дозволяє переміщати вимірювальний стержень 2 на величину не менше 2,5 мм, усуваючи небезпеку пошкодження механізму при випадкових ударах по наконечнику 1.

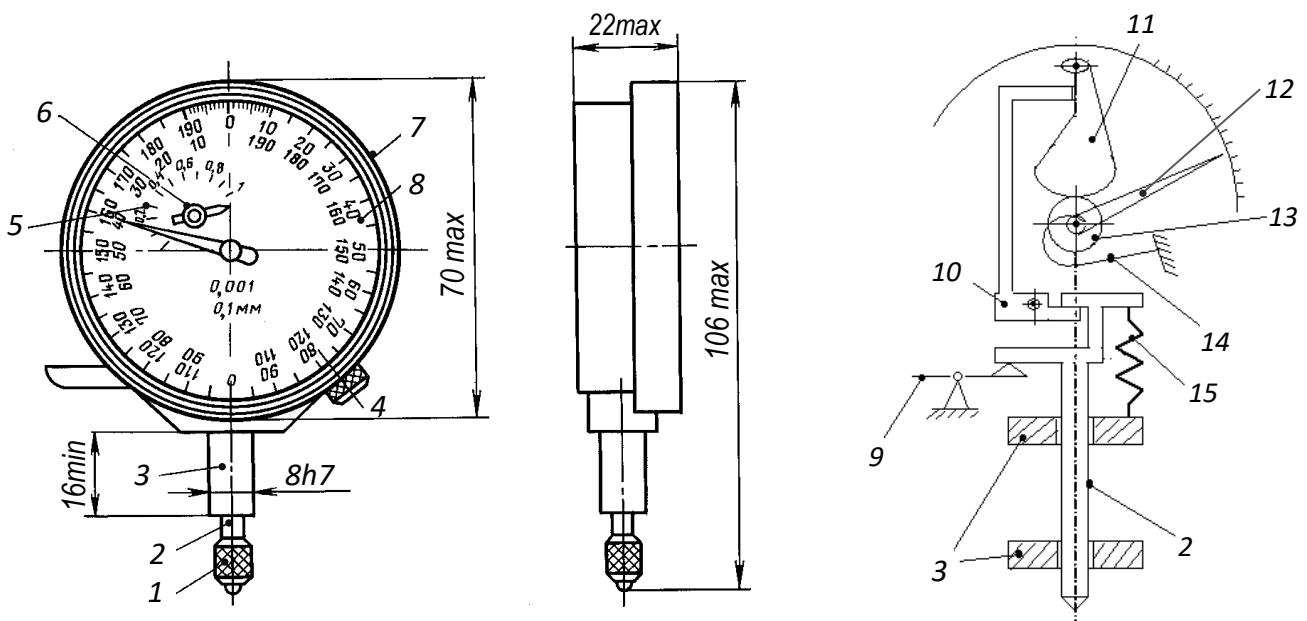


Рисунок 1.14 – Принципова схема індикатора МИГ-1.

1.3. ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВІДНОСНИХ ЛІНІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

Прилади, призначені для вимірювання відносних лінійних деформацій, називаються тензомерами. У лабораторних дослідженнях можуть використовуватися тензометри: механічні, оптичні, електричні або іншої конструкції.

Важільно-стрілочний механічний тензомер Гугенбергера

Важільно-стрілочний механічний тензомер призначений для вимірювання малих лінійних деформацій, як правило, на відкритих поверхнях деталей з вільним доступом при статичному навантаженні. Загальний вид тензометра наведений на рисунку 1.15.



Рисунок 1.15 – Загальний вигляд важільного тензометра.

Кінематична схема тензометра наведена на рисунку 1.14. Тензомер притискається до випробуваного зразка 1 за допомогою струбцини двома опорними призмами, одна з них нерухома 8, а друга – рухома 2 і має ромбічну форму. Відстань між двома призмами l є базою тензометра (зазвичай 20 мм, але за допомогою спеціальних подовжувачів база може бути збільшена до 30 або 100 мм). Під час деформації зразка відстань між призмами змінюється на величину Δl .

Принцип роботи (рис. 1.16). Рухома призма 2, яка шарнірно кріпиться до основи і з'єднана з важелем 3, повертаючись відхиляє його. Важіль приладу 3 забезпечений фіксатором нейтрального положення і пов'язаний через коромисло 4 зі стрілкою вимірювача деформацій 5. На жорсткій підставці тензометра нанесена шкала 7.

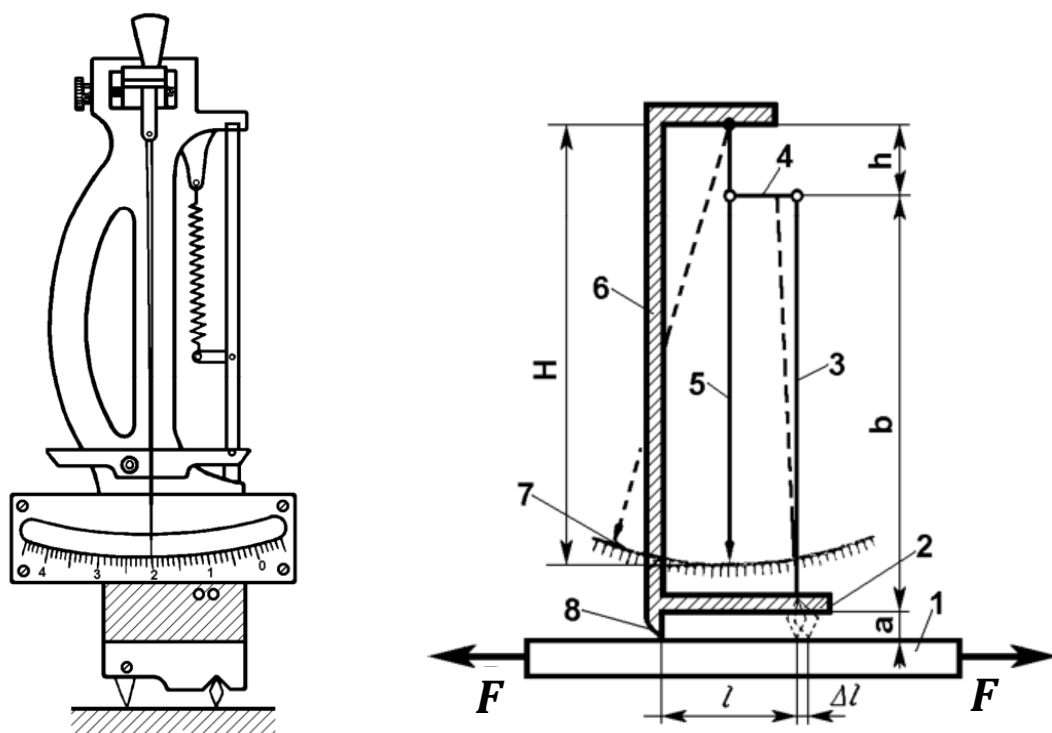


Рисунок 1.16 – Кінематична схема тензометра.

Перед вимірюванням деформацій волокон матеріалу важіль 3 тензометра фіксується в нейтральному положенні, сам прилад за допомогою струбцини кріпиться на поверхні, що досліджується так, щоб призми 2 і 8 щільно були притиснуті до поверхні. Після установки тензометра важіль звільняється від фіксатора. При навантаженні зразка і деформації волокон матеріалу рухома призма 2 повертається, що викликає поворот важеля 3, відхилення якого через тягу 4 передається на стрілку 5, яка повертається навколо осі, закріпленої на рамці 6. Переміщення стрілки по шкалі 7 пропорційно зміні відстані між призмами, але значно більше, залежно від плечей важелів 3 і 4.

Шкала тензометра проградуєвана в міліметрах. Точність вимірювання лінійних деформацій 0,001 мм.

Зміна довжини бази тензометра дорівнюватиме подовженню волокна матеріалу:

$$\Delta l = (C_1 - C_0) \cdot K_A,$$

де C_0 – нульовий відлік за шкалою тензометра;

C_1 – відлік за шкалою після деформації зразка;

K_A – коефіцієнт збільшення приладу, залежить від співвідношення довжин важелів.

Коефіцієнт збільшення важільних тензометрів зазвичай становить 1000-1200. Значення коефіцієнта збільшення для кожного тензометра вказується в його паспорті.

Основи електротензометрії

Поряд з удосконаленням механічних і оптичних засобів вимірювань деформацій у даний час широко використовуються електричні тензометри. В електричних тензометрах розрізняють дві основні частини: датчик (перетворювач), за допомогою якого деформація деталі перетворюється в зміну будь-якої електричної величини (омічного опору, ємності, індуктивності), і вимірювальний (реєструючий) пристрій. Датчик встановлюється на досліджуваному об'єкті, а вимірювальний пристрій (прилад) розташовують зазвичай на деякому віддаленні і пов'язують з датчиком дротами.

Найбільш поширеним перетворювачем для вимірювання деформацій є дротяний датчик опору (тензорезистор). Принцип роботи тензорезистора заснований на зміні омичного опору дроту при його розтягуванні або стисканні.

Тензорезистор має решітку 1 (рис. 1.17), яка являє собою тонкий (діаметром 0,02-0,03 мм) дріт, покладений паралельними петлями. Кінці решітки припаюються до більш товстих дротів 4 і 5, які сполучаються з вимірювальним пристроєм. Довжина решітки 1 називається базою. Найбільшого поширення набули тензорезистори з базою від 3 до 40 мм. Решітка тензорезистора наклеюється на тонкий папір 3 спеціальним клеєм і покривається зверху таким же папером 2.

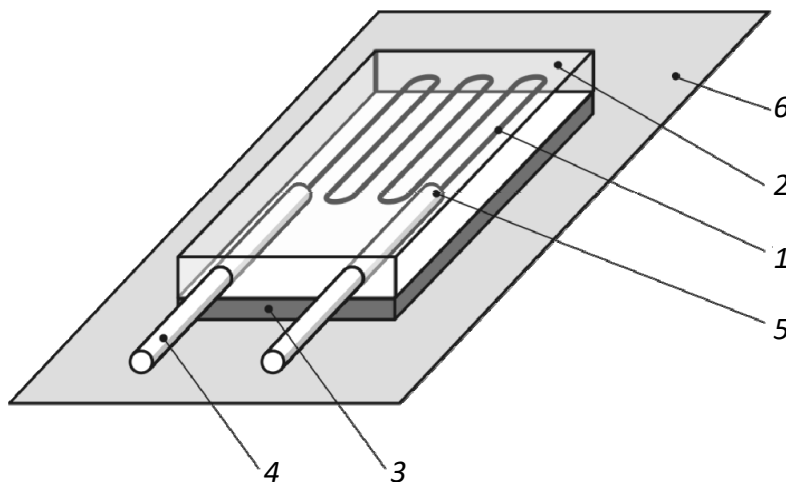


Рисунок 1.17 – Тензорезистор.

Тензорезистор кріпиться на досліджувану поверхню 6 (рис. 1.17) так, щоб база тензорезистора збігалася з напрямком, в якому потрібно виміряти деформацію об'єкта. Відомо, що відносна зміна опору тензорезистора $\Delta R / R$ пропорційна до його деформації і виражається залежністю:

$$\Delta R / R = S_{\text{позд}} \epsilon_x + S_{\text{поп}} \epsilon_y,$$

де ϵ_x і ϵ_y – деформації тензорезистора в напрямку його поздовжньої і поперечної осей відповідно;

$S_{\text{позд}}$ і $S_{\text{поп}}$ – коефіцієнти поздовжньої і поперечної чутливості тензорезистора.

Для дріт'яних тензорезисторів з базою $l \geq 5$ мм величина коефіцієнта $S_{\text{поп}} \ll S_{\text{позд}}$, і для таких тензорезисторів можна прийняти:

$$\Delta R/R = S_{\text{позд}} \varepsilon_x,$$

де ε_x – деформація тензорезистора в напрямку його поздовжньої осі.

Коефіцієнт тензочутливості $S_{\text{позд}}$ визначається із досліду шляхом тарировки. Таким чином, визначення деформацій деталі за допомогою тензорезисторів зводиться до вимірювання зміни їх опору.

У практиці тензометрування найбільшого поширення набула мостова схема включення тензорезистора, яка дозволяє реєструвати досить малі зміни опору по відношенню до зміни величини струму у вимірювальній діагоналі моста.

Опір тензорезистора може змінюватися не тільки у зв'язку з деформацією зразка, викликаній механічними навантаженнями, але і через зміну температури. Для виключення впливу температури на показники вимірювального приладу застосовують температурну компенсацію (рис. 1.18). Вона здійснюється шляхом включення в якості опору R_2 компенсаційного тензорезистора, який являє собою такий же тензорезистор, як і активний. Цей тензорезистор наклеюється на зразок з того ж матеріалу, що і дослідний об'єкт, і розташовується поруч з активним тензорезистором. Таким чином, температурні зміни опору компенсаційного і активного тензорезисторів будуть завжди однаковими, а так як ці тензорезистори включені в суміжні плечі вимірювального моста, то при однаковій зміні їхнього опору баланс моста не порушується.

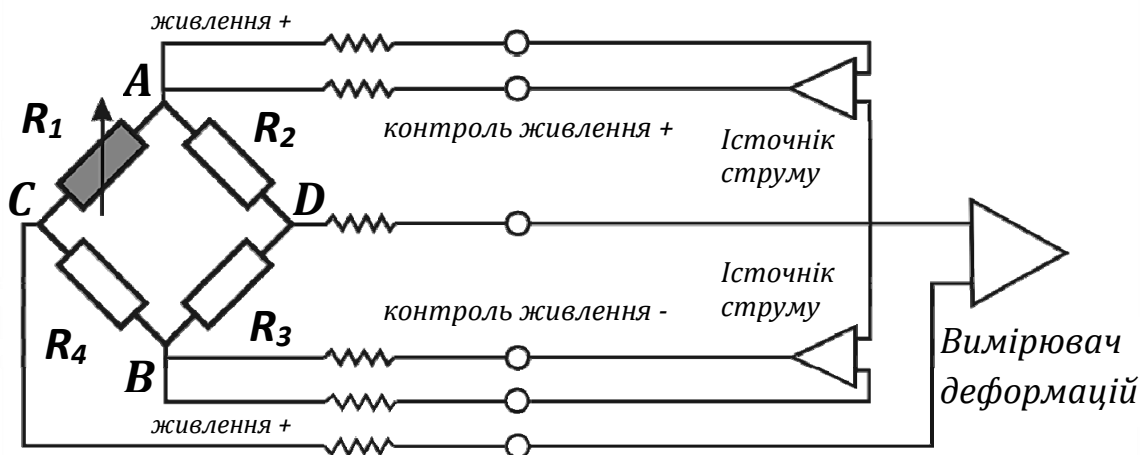


Рисунок 1.18 – Мостова схема підключення тензорезисторів.

Зміну опору активного тензорезистора можна визначити двома методами: методом безпосереднього вимірювання і нульовим методом. У методі безпосереднього вимірювання про зміну опору активного тензорезистора судять по зміні показань вимірювального пристрою (рис. 1.18). Цей метод може бути використаний як при статичних, так і при динамічних вимірюваннях деформацій.

Нульовий метод дозволяє вимірювати зміну опору активного тензорезистора з високою точністю, але так як він вимагає виконання операції балансування, його можна використовувати лише при проведенні статичних вимірювань.

Для вимірювання деформацій методом тензометрії випускаються спеціальні прилади, які називаються тензопідсилювачами, тензостанціями або вимірювачами деформації. В лабораторії кафедри технічної механіки при проведенні робіт з курсу «Механіка матеріалів і конструкцій» застосовується вимірювач деформацій ИДЦ-1, який призначений для проведення багатоканальних вимірювань з використанням різноманітних типів датчиків і перетворення їх сигналів у цифрову форму.

Типовий комплект навчального обладнання «Стенд універсальний для проведення лабораторних робіт з опору матеріалів СМУ»

Універсальний стенд призначений для проведення лабораторних робіт з курсу «Механіка матеріалів і конструкцій» у вищих навчальних закладах. Стенд забезпечує цілий цикл лабораторних робіт, що проводяться на спеціалізованих лабораторних столах.

Універсальний стенд (рис. 1.19) являє собою лабораторний стіл з набором функціональних елементів (зразків, допоміжних пристроїв, деталей та кріпильних елементів), що зберігаються у 4-х пеналах 12 і встановлюються на стіл при проведенні відповідної лабораторної роботи.

Стіл складається із звареного каркасу 1, для організації додаткових робочих місць для студентів він має на петлях дві відкидні столешниці 2 і 3. Кронштейни 6 столешниці в піднятому стані фіксуються відносно стола стенда фіксаторами 5. Стіл зовні обшитий плитами 4 із декоративним покриттям. Праві дверцята стола 9 мають замок 8, ліві дверцята 7 – фіксуються фіксатором. Для зручності використання каркас стола 1 та дверцята 7 і 9 мають спрямовувачі 12 по яким викочуються на роликах пенали 13 до упорів. Для закріплення наладок на столі є спеціальна плита 10 із Т-образним пазом 11, на яку встановлюються опорні стояки і закріплюються болтовими з'єднаннями. При установці в лабораторії стенд виставляється за рівнем домкратом 14.

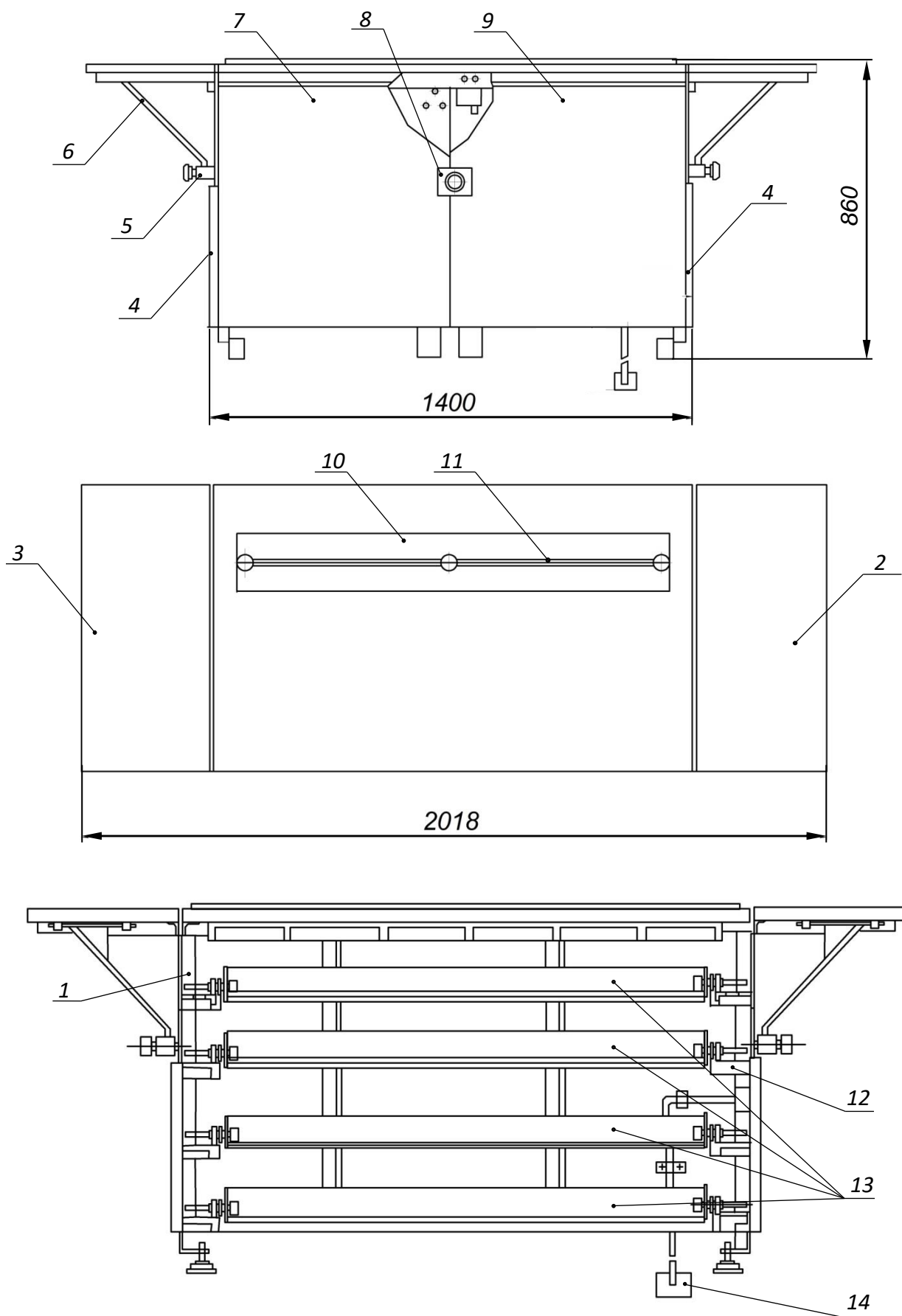


Рисунок 1.19 – Універсальний стэнд для проведення лабораторних робіт.

С бічної сторони стенд обладнаний панеллю 1 з розетками на 12В постійного струму і 220В змінного струму, частотою 50Гц (рис. 1.20). Розташування проводки повинно бути передбачено під полом лабораторії.

Для виконання лабораторних робіт до розетки на 12В підключають вилку жгута 2, другий кінець якої з'єднують з вимірювачем деформацій типу ИДЦ-1 поз. 3 (рис. 1.20). Вимірювач деформацій 3 встановлюють на вільній поверхні стола. До нього підключають вилку жгута 4, другий кінець якої з'єднують зі зразком 5.

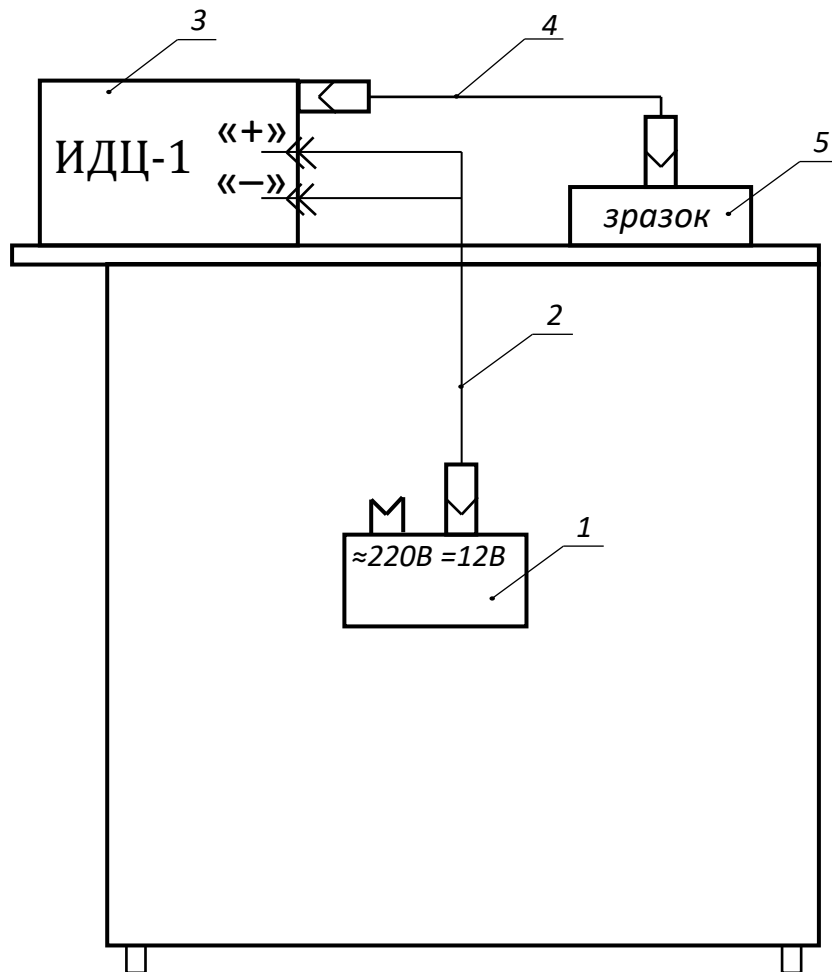


Рисунок 1.20 – Схема підключення вимірювача деформацій типу ИДЦ-1.

Розділ 2. МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

Другий розділ посібника присвячений дослідженню механічних властивостей і вивченню основних механічних характеристик матеріалів.

Механічні властивості матеріалів характеризують їх здатність опиратися деформуванню і руйнуванню під дією зовнішніх сил та інших чинників. До основних механічних властивостей матеріалів відносяться: міцність, пружність і пластичність.

Міцністю називають здатність матеріалу чинити опір руйнуванню і утворенню залишкових деформацій, **пружність** – здатність матеріалу відновлювати свою форму і розміри після припинення дії зовнішніх сил, **пластичність** – здатність матеріалу зазнавати залишкові деформації.

Механічні властивості матеріалів характеризуються низкою величин, що називаються **механічними характеристиками**. У наведених лабораторних роботах визначаються характеристики статичної міцності (границя пропорційності, границя текучості, границя міцності (тимчасовий опір), та істинний опір розриву), характеристики пластичності (відносне залишкове подовження і відносне залишкове звуження після розриву), а також розглядається поведінка пластичних і крихких матеріалів при розтягу, стиску, крученні і ударі.

Для виконання робіт другого розділу посібника необхідно ознайомитись з принципами дії та будовою випробувальних машин, приборів, пристроїв. Огляд випробувальних машин і устаткування наведено у першому розділі. У тих випадках, коли методика випробувань важко викласти окремо від опису машин або приладів, цей опис наводиться у відповідній роботі.

Різноманіття умов експлуатації та обробки матеріалів надає необхідність проведення великої кількості механічних випробувань, які можна класифікувати за різними принципами. За характером зміни діючих на зразок навантажень розрізняють статичні та динамічні випробування.

Статичні випробування характеризуються плавним, відносно повільним (тривалістю від декількох секунд до хвилини) зростанням навантаження на зразок від нуля до деякої максимальної величини і, відповідно, з невеликою швидкістю деформації зразка.

Залежно від схеми прикладання навантаження на зразок розрізняють наступні статичні випробування: одновісний розтяг і стиск, одновісний згин, кручення, розтяг і згин зразка з надрізом.

Динамічні випробування характеризуються прикладенням до зразків миттєвого навантаження з різкою зміною його величини і великою швидкістю деформації зразка. Тривалість всього випробування не перевищує сотих або тисячних часток секунди. В результаті динамічних випробувань зазвичай визначається величина повної і питомої роботи динамічної деформації, а також величина залишкової деформації зразка.

2.1. Лабораторна робота

ВИПРОБУВАННЯ НА РОЗТЯГ МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

МЕТА РОБОТИ: дослідження властивостей та поведінки матеріалу при центральному розтягу, побудування та аналіз діаграми розтягу, спостереження за деформацією зразка до розриву.

Короткі теоретичні відомості

Випробування на одноосьовий статичний розтяг є найбільш поширеним способом механічних випробувань матеріалу, що пояснюється наступними його перевагами:

➤ при одноосьовому розтягу в зразку виникає однорідний напружений стан. Це означає, що у всіх точках поперечного перерізу робочої частини зразка напруження однакові і, незалежно від того, деформується зразок пружно або пластично, вони визначаються за однією і тією ж формулою:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (2.1)$$

де F – навантаження, що розтягує, Н;

A_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, мм².

➤ методика проведення випробувань на розтяг не складна і добре відпрацьована;

➤ конструкції зразків і захватів випробувальних машин прості і технологічні.

Спостереження за поведінкою матеріалу і визначення його характеристик міцності і пластичності при розтягу – один із основних і найбільш розповсюджених видів випробувань. Отримані в результаті експерименту характеристики дозволяють зробити висновки про міцність матеріалу при статичних навантаженнях, обирати матеріал для конструкції, що проектується і вважаються основними під час розрахунків деталей машин, елементів конструкцій і споруд на міцність.

Випробування на статичний розтяг проводяться шляхом плавного безперервно зростаючого навантаження зразка круглого або прямокутного перерізу на випробувальній машині УИМ-50. При цьому процес деформування розвивається в такій послідовності: пружна деформація, пружно-пластична деформація і руйнування.

При звичайній кімнатній температурі матеріали можна умовно поділити на пластичні і крихкі. Пластичні матеріали руйнуються тільки після значних залишкових деформацій, крихкі – при досить малих залишкових деформаціях. Такий поділ, можна сказати, умовний, тому що, по-перше, не існує чіткої межі між пластичними і крихкими матеріалами, і, по-друге, пластичні властивості матеріалу змінюються залежно від певних умов.

До пластичних матеріалів відносяться: маловуглецева сталь, мідь, бронза та ін.; до крихких: чавун, бетон, цегла та ін.

Для випробувань на розтяг, відповідно до ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84) застосовують пропорційні циліндричні зразки діаметром d від 5 мм і більше (рис. 2.1, а,б,в) або плоскі (з листового матеріалу) товщиною a від 0,5 мм і більше (рис. 2.1, г).

Нормальна початкова розрахункова довжина зразка повинна становити:

$$l_0 = 10d_0,$$

де d_0 - початковий діаметр поперечного перерізу зразка, $d=10\text{мм}$.

На рисунку 2.1 представлено 4 види стандартизованих зразків:

- круглі з довжиною $l_0 = 15d_0$ - для зразків п'ятнадцятиразової довжини (рис. 2.1, а,);
- круглі з довжиною $l_0 = 10d_0$ - для зразків десятиразової довжини (рис. 2.1, б,);
- круглі з довжиною $l_0 = 5d_0$ - для коротких зразків (рис. 2.1, в,);
- для прямокутних зразків з розмірами $(a \times b)$ (рис. 2.1, г,):

$$l_0 = 11,3\sqrt{A} = 11,3\sqrt{a \cdot b},$$

$$l_0 = 5,65\sqrt{A} = 5,65\sqrt{a \cdot b}.$$

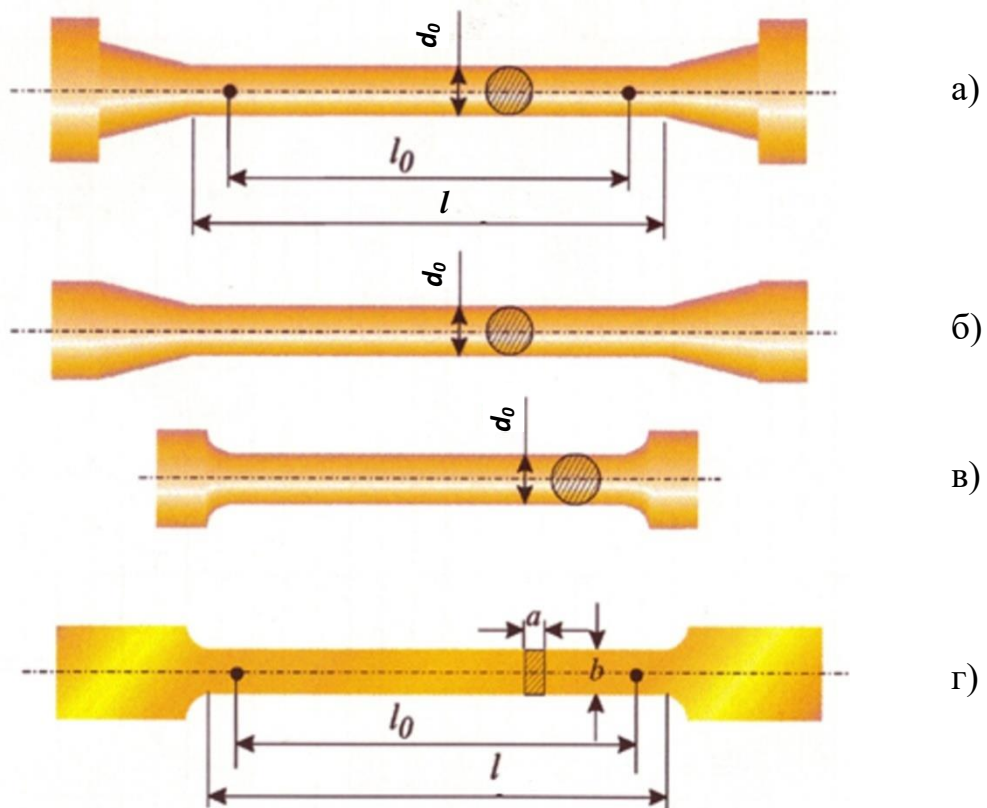


Рисунок 2.1 – Види зразків, що використовують для випробувань на розтяг (величина l на рисунках - це довжина робочої частини зразка).

Найбільш розповсюджені випробування на циліндричних зразках (рис. 2.2, а). Після випробувань зразок видовжується на довжину l_1 і ми отримуємо зруйнований зразок, на якому є в наявності звужене місце (рис. 2.2,б), яке має назву «шийка». Воно може з'явитися у будь якій послабленій точці розрахункової довжині l_0 зразка, це залежить від кількох факторів, які обумовлюють умови виробництва зразка та ін. Зразок має на кінцях потовщення, так звані головки для захоплення випробувальною машиною.

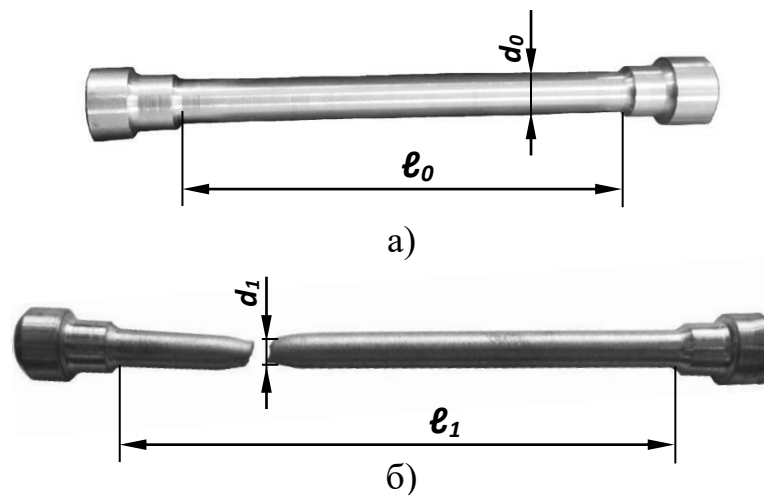


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд зразка:
а) до випробування, б) після випробування.

Вибір форми та розмірів зразка обумовлюється можливостями виготовлення, а також потужністю і конструкцією випробувальної машини, що використовується. З метою економії матеріалу при масових випробуваннях доцільніше застосування коротких зразків п'ятикратної довжини, для випробувань яких застосовують машину УММ-5 (максимальне навантаження 5 тон). Але для того, щоб більш наочно спостерігати за зміною властивостей матеріалу рекомендують використовувати 10-ти кратний зразок. Для його випробувань використовують універсальну випробувальну машину УИМ-50 (максимальне навантаження 50 тон). На рисунку 2.3 представлений циліндричний зразок, який виконано з м'якої сталі.

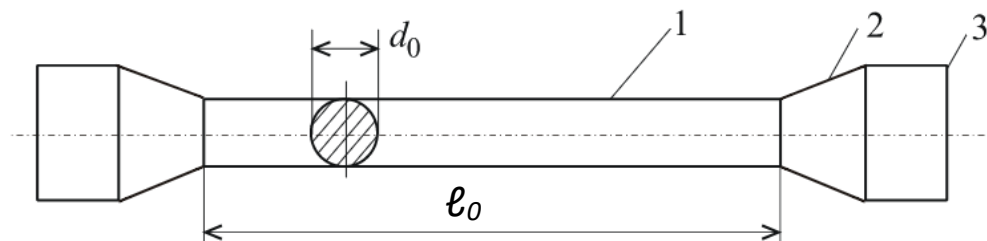


Рисунок 2.3 Циліндричний зразок для випробувань:
1 – робоча частина; 2 – перехідна частина; 3 – виступи для затискачів.

Під час проведення випробувань за допомогою діаграмного апарату випробувальної машини можна записати діаграму розтягу зразка, тобто залежність подовження зразка Δl від навантаження F . Розрізняють три типи діаграм розтягу (рис. 2.4):

а) діаграма розтягу зразка з пластичного матеріалу, що має виражений перехід з пружної області деформування в пружно-пластичну (рис. 2.4, а). На діаграмі цей перехід відображається появою «площини текучості», впродовж якої деформація в зразку зростає практично без збільшення навантаження. Такий тип діаграми характерний лише для деяких металевих сплавів (маловуглецеві сталі, деякі латуні, відпалені марганцевисті і алюмінієві бронзи). Іноді на початку «площини текучості» можна спостерігати «зуб» плинності (показаний тонкою перервною лінією). Для цих сплавів існує фізична границя текучості.

б) діаграма розтягу зразка з пластичного матеріалу, що має плавний перехід з пружної області деформування у пружно-пластичну (рис. 2.4, б), яка властива більшості чистих металів і металевих сплавів. Для них можна визначити лише умовну границю текучості.

в) діаграма розтягу зразка з крихкого матеріалу (рис. 2.4, в), є характерною для сірих і білих чавунів, загартованих і не відпущених сталей, литих алюмінієвих і цинкових сплавів, а також багатьох неметалів: каменю, цегли, бетону, деяких пластмас та ін. Діаграма розтягу таких матеріалів коротка в напрямку подовжень, що ілюструє їх крихкість (невелику пластичність).

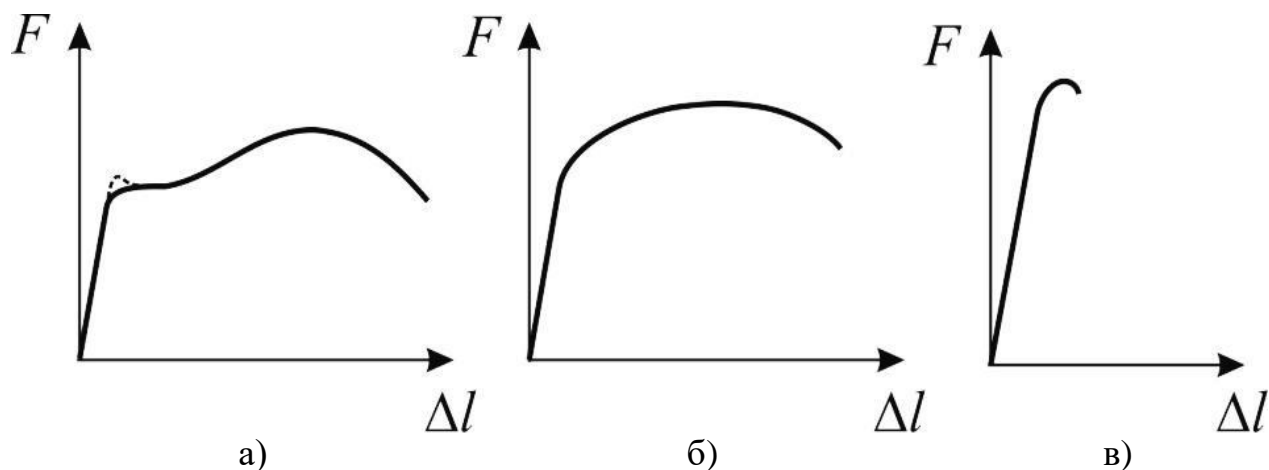


Рисунок. 2.4 – Типи діаграм розтягу.

Основні властивості матеріалу визначають з діаграми розтягу, яка будується в координатах $F - \Delta l$ за допомогою пристрою, що записує на випробувальній машині. Діаграма є наочним представленням того, що відбувається з матеріалом усередині.

Для маловуглецевої сталі Ст. 3 приблизний обрис цієї діаграми наведено на рисунку 2.5.

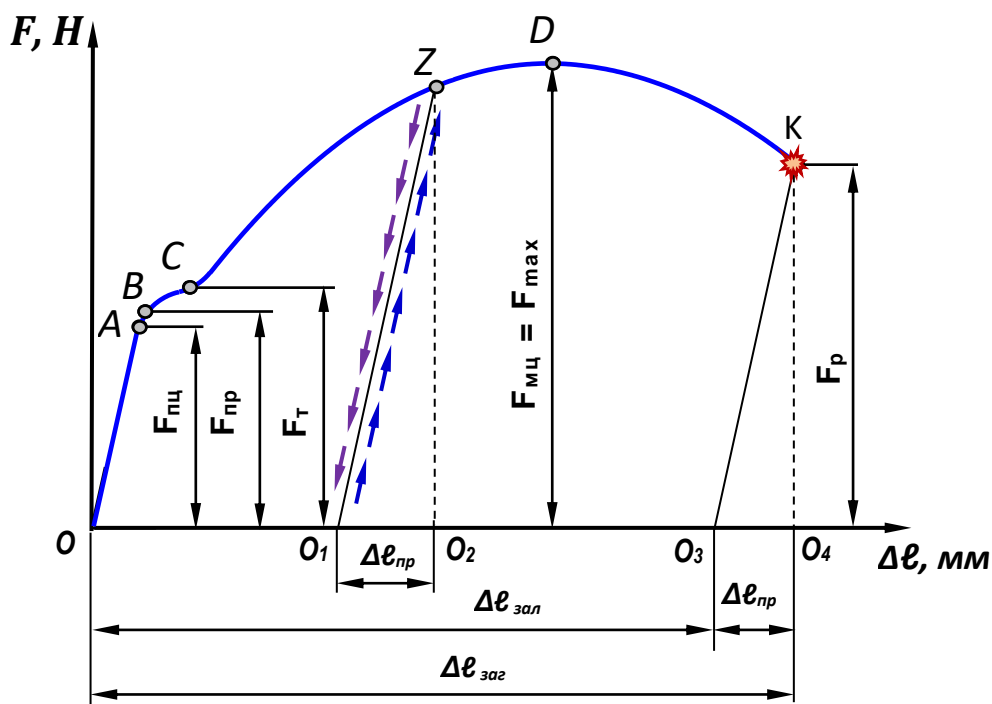


Рисунок 2.5 – Діаграма розтягу м'якої сталі.

Випробування проводять на універсальній випробувальній машині УИМ-50. На ній можливо випробувати зразки на розтяг, стиск, згин. Масштаб запису навантаження залежить від шкали, встановленої для проведення випробування. Машину можна налаштувати на максимальне навантаження 5, 10, 25 і 50 тон. Під час проведення випробувань на розтяг встановлюється максимальне навантаження на машині – 25 тон.

У такому випадку масштаб навантаження (в напрямку вертикальної осі F) становить $\mu_F = 1500 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$.

Масштаб запису деформації (в напрямку горизонтальної осі $\Delta \ell$) перед випробуванням приймається рівним $\mu_{\Delta \ell} = 1:2 = 0,5 \frac{\text{мм}}{\text{мм}}$.

Аналіз діаграми розтягу.

На етапі навантаження до деякої сили $F_{\text{пц}}$ (точка А) спостерігається пряма пропорційна залежність між видовженням зразка і силою F , що його викликала і зворотна пропорційна залежність до площі поперечного перерізу A . Позначаючи через $\Delta \ell$ приріст довжини від сили F , можемо записати формулу, що зв'язує ці дані, яка носить назву **закону Гука**:

$$\Delta \ell = \frac{F \cdot \ell}{E \cdot A}, \quad (2.2)$$

де: E – коефіцієнт пропорційності, який характеризує жорсткість матеріалу і має назву **модуль пружності I-го роду або модуль Юнга**, МПа;

A – площа поперечного перерізу зразка, мм^2 ;

$\Delta \ell$ – величина абсолютного видовження зразка:

$$\Delta l = l_1 - l_0,$$

де: l_1 – довжина зразка після руйнування, мм;

l_0 – початкова довжина зразка до руйнування, мм.

$E \cdot A$ – добуток, характеризує жорсткість стержня при розтягу (стиску).

Після розвантаження у точці А початкова довжина зразка відновлюється, тобто деформація зникає. Ця властивість називається **пружністю**, а навантаження на ділянці **ОА** є навантаженням $F_{\text{пн}}$, що відповідає границі пропорційності $\sigma_{\text{пн}}$.

При подальшому навантаженні починається незначне відхилення від прямої лінії. Якщо в точці В зупинити дослід, то після розвантаження деформація практично зникає, тобто з'являється залишкова деформація, що складає 0,001-0,005%. Тому вважатимемо, що взагалі ділянка **ОВ** є ділянкою пружності, а сила (точка В) називається навантаженням $F_{\text{пр}}$, що відповідає границі пружності $\sigma_{\text{пр}}$.

При досягненні навантаженням деякого значення F_T (точка С) зразок видовжується («тече») без збільшення, а інколи і при зменшенні навантаження. На діаграмі з'являється так звана «площина текучості». На цій ділянці з'являється залишкова (пластична) деформація $\Delta l_{\text{зал}}$, а матеріал на ділянці ВС проявляє властивість текучості.

Щоб зразок деформувався дедалі більше, потрібно збільшувати навантаження, матеріал знову здатний чинити опір розтягу. Пояснюється це явище зміцненням матеріалу. Якщо зразок повністю розвантажити, то пружна деформація $\Delta l_{\text{пр}}$ зникне, а залишкова $\Delta l_{\text{зал}}$ залишиться, перо самописа прокреслить пряму лінію ZO_1 (рис. 2.5), яка буде паралельна пропорційній ділянці ОА. При повторному навантаженні, яке буде відразу після розвантаження, перо спочатку накреслить лінію O_1Z , а зі збільшенням навантаження переміститься далі уздовж ділянки ZD . Властивості матеріалу змінюються: пластичні властивості погіршуються, а твердість підвищується. Відбуваються зміни в кристалічній решітці матеріалу, він зміцнює сам себе. Це призводить до появи явища об'ємного зміцнення. В одних випадках ці зміни корисні, в інших шкідливі і їх усувають. В результаті попередньої пластичної деформації метал стає більш міцним (явище наклепу), збільшується діапазон пружного розтягування. Пластичні властивості металу при цьому знижуються, зменшується також і його статична в'язкість. Остання обставина має велике значення для матеріалу, який піддається дії змінних напружень. Подальше збільшення навантаження призводить до появи «шийки» на зразку (точка D) – звуження в деякому одному місті зразка, і руйнуванню. До моменту появи шийки навантаження на зразок досягає свого максимального значення $F_{\text{мц}}$ або $F_{\text{тм}}$ і є навантаженням, що відповідає границі міцності $\sigma_{\text{мц}}$ (рис. 2.6, а,б) або тимчасовому опору $\sigma_{\text{тм}}$.

Як тільки на зразку утворилася «шийка» (точка D), навантаження знижується і подальше деформування зразка відбувається за рахунок видовження в зоні «шийки» (ділянка ДК) до точки К, в якій відбувається руйнування. Навантаження F_p в момент розриву називається навантаженням, що відповідає істинному опору розриву σ_p .

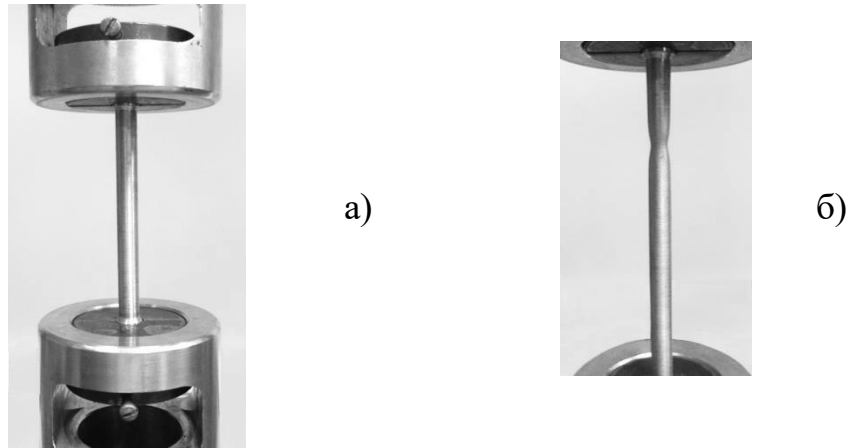


Рисунок 2.6 – Зразок в затискачах випробувальної машини:

а) на початку випробувань, б) перед руйнуванням.

До моменту розриву робоча частина зразка l_0 видовжилась на величину загальної деформації $\Delta l_{\text{заг}}$. Після розриву пружна частина загальної деформації зникає, залишається тільки залишкова деформація $\Delta l_{\text{зал}}$. На місці утворення «шийки» переріз зразка зменшився.

Руйнування крихких матеріалів відрізняється тим, що воно відбувається вже при невеликих деформаціях (рис. 2.4, в). При розтягу чавунного зразка, до моменту розриву виникають невеликі деформації, руйнування відбувається раптово, величини відносного звуження і відносного подовження є дуже малими. Як правило, крихкі матеріали погано опираються розтягу, їх границя міцності має невелике значення в порівнянні з границею міцності пластичних матеріалів. Якщо розглядати діаграму розтягу крихких матеріалів, то можна зазначити, що вона не має чітко вираженої прямої лінії, яка є на ділянці пропорційності для пластичних матеріалів (рис 2.5). Тому умовно прийнято говорити, що крихкі матеріали не мають пружних властивостей, а тому і не підкоряються закону Гука.

Оснащення робочого місця

- ❖ випробувальна машина УИМ-50, підготовлена до проведення експерименту;
- ❖ сталевий зразок круглого перерізу;
- ❖ штангенциркуль ШЦ-0,1;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання випробувань

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Розглянути зразки, які використовують для випробувань на розтяг.
2. Виміряти штангенциркулем початковий діаметр d_0 зразка і початкову довжину. Результати записати у журнал спостережень (табл.2.1):

Таблиця 2.1 – Данні обміру зразка.

Величини	До випробування	Після випробування
1 Розрахункова довжина, мм	$l_0 =$	$l_1 =$
2 Діаметр зразка, мм	$d_0 =$	$d_{ш} =$
3 Площа поперечного перерізу зразка, мм ²	$A_0 =$	$A_{ш} =$

3. Перевірити готовність машини для випробувань до експерименту, настроїти силовимірвач на шкалу з максимальним навантаженням **250кН**.

4. Встановити зразок у затискачі випробувальної машини і налаштувати діаграмний апарат.

5. Плавна навантажувати зразок з його розтягуванням до розриву.

6. Звільнити зразок з затискачів випробувальної машини.

7. Зі шкали силовимірвача зняти значення навантаження, що відповідає границі міцності $F_{мц}$ (це значення навантаження на шкалі фіксується стрілкою).

8. Виміряти штангенциркулем діаметр зразка в місці розриву $d_{ш}$ і робочу довжину зразка l_1 (для вимірювання $d_{ш}$ і l_1 обидві частини розірваного зразка щільно стикаються за місцем розриву). Результати записати у таблицю 2.1.

9. Зняти діаграму із записуючого пристрою та занести в журнал лабораторних робіт. Обробити отриману діаграму розтягу:

- зазначити характерні точки А, В, С, D, К;
- надати характеристики ділянок діаграми;
- визначити відповідне навантаження $F_{пц}$, $F_{пр}$, F_T , $F_{мц}$, F_p .

Для визначення навантаження F_i , що відповідає кожній точці машинної діаграми розтягу, необхідно виміряти ординату y_i навантаження до відповідної точки в міліметрах та помножити на масштаб сил:

$$F_i = \mu_F \cdot y_i,$$

де y_i – ординати машинної діаграми розтягу в осях F - Δl , мм.

Навантаження, що відповідає границі пропорційності:

$$F_{пц} = \mu_F \cdot y_{пц}.$$

Навантаження, що відповідає границі пружності:

$$F_{пр} = \mu_F \cdot y_{пр}.$$

Навантаження, що відповідає границі текучості:

$$F_T = \mu_F \cdot y_T.$$

Навантаження, що відповідає границі міцності:

$$F_{мц} = \mu_F \cdot y_{мц}.$$

Руйнівальне навантаження (навантаження, що відповідає істинному опору розриву):

$$F_p = \mu_F \cdot Y_p.$$

- результати розрахунків записати у журнал спостережень (табл. 2.2):

Таблиця 2.2 – Дані обміру діаграми розтягу.

Величина, розмірність	Позначення	Значення
1 Навантаження, що відповідає границі пропорційності, Н	$F_{пц}$	
2 Навантаження, що відповідає границі пружності, Н	$F_{пр}$	
3 Навантаження, що відповідає границі текучості, Н	F_r	
4 Максимальне навантаження, що відповідає границі міцності (тимчасовому опору), Н	$F_{мц}$	
5 Розривне зусилля, що відповідає істинному опору розриву, Н	F_p	

10. Відповісти на контрольні запитання.

11. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Яка одиниця вимірювання механічного напруження?

Н/м²;

Н/м;

Н/м³.

2. Яка одиниця вимірювання абсолютної деформації?

мм;

відсотки;

безрозмірна величина.

3. Яка одиниця вимірювання модуля поздовжньої пружності матеріалу E ?

Н/м²;

Н/м;

Нм.

4. Як позначається відносне подовження?

ϵ ;

Δl ;

М.

5. Як позначається абсолютна поздовжня деформація?

Δl ;

ϵ ;

μ .

6. В яких координатних осях на випробувальній машині записується діаграма розтягу?

$F-\Delta l$;

σ - ϵ ;
 σ - Δl .

7. Яка деформація називається пружною?

- та, що зникає після розвантаження;
- та, що залишається після розвантаження;
- та, що не виникає при навантаженні.

8. Яка деформація називається пластичною?

- та, що залишається після розвантаження;
- та, що зникає після розвантаження;
- та, що не виникає при навантаженні.

9. Чим характеризується «зона текучості» на діаграмі розтягу?

- зростанням пластичної деформації без зростання навантаження;
- зростанням пружної деформації без зростання навантаження;
- зростанням пружної та пластичної деформацій.

10. Після якої точки на діаграмі розтягу (діаграма) з'являється залишкова деформація?

- B;
- D;
- C.

11. Яка точка діаграми розтягу (діаграма) відповідає моменту появи «шийки» на зразку?

- D;
- B;
- C.

12. Яка ділянка діаграми розтягу (діаграма) відповідає зоні зміцнення матеріалу?

- CD;
- OA;
- BC.

13. Яка ділянка діаграми розтягу (діаграма) відповідає зоні текучості матеріалу?

- BC;
- OA;
- CD.

14. До якої точки на діаграмі розтягу (діаграма) можна навантажувати зразок, щоб після розвантаження довжина зразка не змінилась?

- B;
- D;
- K.

15. Ординату якої точки діаграми розтягу (діаграма) треба визначити, щоб розрахувати границю пропорційності?

A;
D;
C.

16.Ординату якої точки діаграми розтягу (діаграма) треба визначити, щоб розрахувати границю пружності?

B;
D;
C.

17.Ординату якої точки діаграми розтягу (діаграма) треба визначити, щоб розрахувати границю текучості?

C;
D;
B.

18.Ординату якої точки діаграми розтягу (діаграма) треба визначити, щоб розрахувати границю міцності (тимчасовий опір)?

D;
B;
C.

19.При розрахунку механічних характеристик міцності (границя пропорційності, границя пружності, границя текучості, тимчасовий опір) яка використовується площа перерізу зразка?

початкова площа до навантаження;
та, що є у зразка в момент розриву;
площа шийки.

20.При розрахунку істинного опору розриву матеріалу, яка використовується площа перерізу?

площа шийки;
початкова площа перерізу зразка;
площа, яка відповідає максимальному значенню сили.

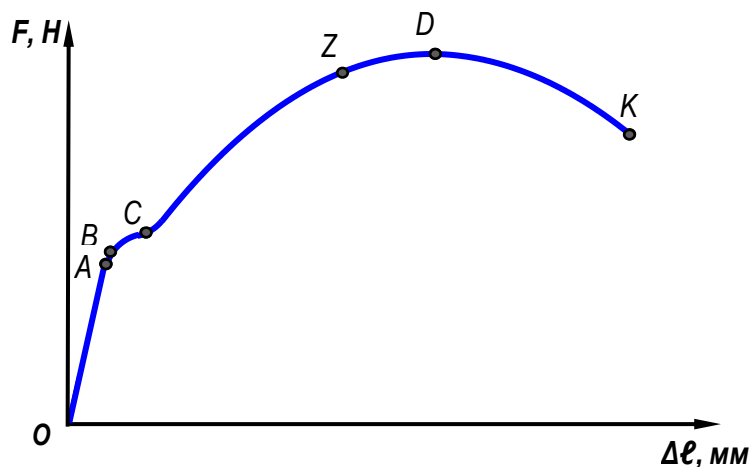


Рисунок – Діаграма розтягу маловуглецевої сталі.

2.2. Лабораторна робота

ВИПРОБУВАННЯ НА РОЗТЯГ МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ. ОСНОВНІ МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ

МЕТА РОБОТИ: визначення механічних характеристик міцності та пластичності при розтягу м'якої сталі та встановлення марки матеріалу, що досліджували.

Короткі теоретичні відомості

Механічні характеристики матеріалів, які визначаються при випробуваннях на розтяг, вважають основними. Однак в деяких випадках необхідно проводити випробування і при інших видах навантаження: при стиску, крученні, згині, зсуві. Крім статичних випробувань при нормальній температурі, проводяться також випробування матеріалів в умовах динамічних навантажень (удар), випробування при напружених, що змінюються циклічно, випробування при високих і низьких температурах та інші.

Для забезпечення порівнянності результатів механічних випробувань методика їх проведення і прийоми обробки отриманих даних регламентуються відповідними стандартами (ГОСТ, ІСО).

Для вивчення основних механічних характеристик міцності існує діаграма напружень (рис. 2.7), яка може бути отримана із діаграми розтягу зразка для заданого матеріалу. Треба зазначити, що діаграма розтягу будується в осях $F - \Delta l$ і залежить від вихідних розмірів зразка, а тому характеризує поведінку під навантаженням не тільки матеріалу, а й конкретного зразка.

Тому накреслену на випробувальній машині діаграму розтягу (у координатних осях $F - \Delta l$) перебудовують. По осі абсцис нової діаграми відкладають відносні подовження $\varepsilon = \Delta l / l$, а по осі ординат – нормальні напруження σ , що діють в поперечному перерізі зразка.

Отримана діаграма в осях $\sigma - \varepsilon$ називається **діаграмою умовних напружень** при розтягу. Обрис цієї діаграми для маловуглецевої сталі Ст.3 наведено на рисунку 2.7. **Умовною** її називають тому, що при визначенні її абсцис враховується *початкова* робоча довжина зразка l_0 , а при визначенні ординат – *початкова* площа поперечного перерізу зразка A_0 (штрихова лінія на рисунку 2.7). Вона не залежить від початкових розмірів зразка і характеризує поведінку матеріалу, що випробується при розтягу.

Однак у процесі розтягнення зразка впродовж часу змінюється і довжина зразка, і його площа поперечного перерізу. Враховуючи це зверху умовної діаграми будується істина діаграма напружень.

Істиною діаграмою називається діаграма, яка побудована з урахуванням зміни розмірів поперечного перерізу, а саме діаметру зразка в «шийці» (суцільна лінія на рисунку 2.7) $A_{ш}$.

Основні механічні характеристики міцності

Розглянемо істину і умовну діаграми напружень та визначимо основні механічні характеристики міцності.

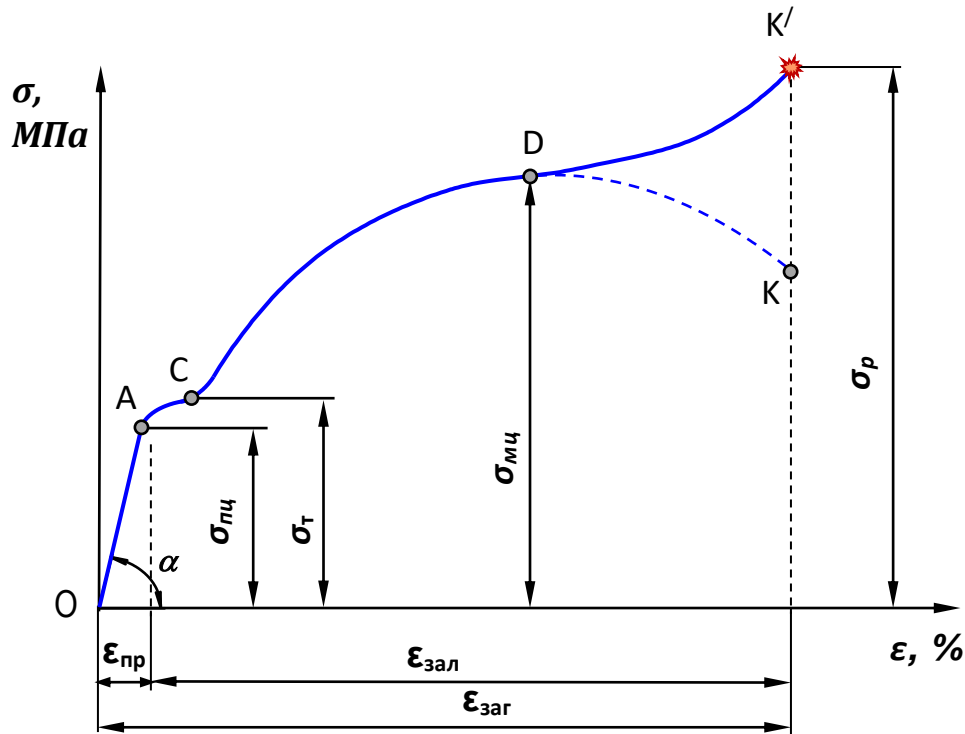


Рисунок 2.7 – Діаграма напружень:

умовна діаграма -----

істинна діаграма —————

На початку ділянки **ОА** діаграма являє собою похилу пряму. У цих межах нормальні напруження, що виникають в поперечному перерізі зразка, зростають прямопропорційно до відносних поздовжніх деформацій, тобто виникають пружні деформації, а це свідчить про те, що матеріал підкоряється закону Гука (формула 2.2).

Тому напруження, вище якого матеріал перестає підкорятися закону Гука називають **границею пропорційності** $\sigma_{пц}$:

$$\sigma_{пц} = \frac{F_{пц}}{A_0}, \quad (2.3)$$

де $F_{пц}$ – навантаження у зоні пружності (ордината точки А), Н;

A_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, мм.

Поблизу точки А, але не набагато вище її, знаходиться точка В, що відповідає границі пружності.

Границею пружності $\sigma_{\text{пр}}$ називають максимальне напруження, що може витримати матеріал, не виявляючи ознак залишкової деформації при розвантаженні зразка:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{пр}}}{A_0}, \quad (2.4)$$

де $F_{\text{пр}}$ – навантаження, що відповідає границі пружності (ордината точки В), Н.

Прийнято вважати, що до границі пружності в матеріалі є тільки пружні деформації, при напруженнях більших за границю пружності – пружні і залишкові деформації. У зв'язку з тим, що точка В розташована поряд із точкою А, то нею надалі нехтують.

Вище точки А деформації зростають швидше напружень і діаграма викривляється, тобто закон Гука порушується. Таким чином, закон Гука спостерігається тільки до границі пропорційності.

Починаючи від точки А і до точки С діаграма має горизонтальну (або майже горизонтальну) ділянку. На ділянці АС деформації збільшуються без збільшення напружень. Якщо уважно стежити за стрілкою силовимірювача випробувальної машини, то по досягненню площадки текучості (точка С діаграми) вона деякий час залишається нерухомою. Після розвантаження на зразку є в наявності значна залишкова деформація. Точка С відповідає границі текучості, яка визначається як відношення:

$$\sigma_{\text{Т}} = \frac{F_{\text{Т}}}{A_0}, \quad (2.5)$$

де $F_{\text{Т}}$ – навантаження площадки текучості (ордината точки С), Н.

Границею текучості $\sigma_{\text{Т}}$ (фізичною) називається напруження, при якому зразок деформується без помітного збільшення напружень (для сталі Ст. 3 $\sigma_{\text{Т}} = 240$ МПа). Деякі пластичні матеріали, наприклад, дюралюміній, не мають на діаграмі розтягу «площадки текучості». Для таких матеріалів вводиться умовна границя текучості.

Умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$ – це напруження, що відповідає відносній залишковій деформації, яка дорівнює 0,2%.

Після проходження «площадки текучості» при подальшому збільшенні відносної деформації напруження (а отже, і сила, що розтягує) знову збільшуються (рис. 2.7), матеріал знову здатний чинити опір розтягуванню. Відбувається як би «самозміцнення» сталі, і діаграма змінюється по плавній кривій з найвищою точкою D. Подальше збільшення навантаження призводить до появи «шийки» на зразку, а точка D відповідає границі міцності – тимчасовому опору розриву.

Границею міцності $\sigma_{\text{мц}}$ або тимчасовим опором розриву $\sigma_{\text{тм}}$ називається найбільше умовне напруження, що витримує зразок (для сталі Ст.3 $\sigma_{\text{мц}} = 400$ МПа):

$$\sigma_{\text{мц}} = \frac{F_{\text{мц}}}{A_0}, \quad (2.6)$$

де $F_{\text{мц}}$ – максимальне навантаження (ордината точки D), Н.

Напруження $\sigma_{\text{мц}}$ вважається умовним, тому що воно визначається по відношенню до початкової площі поперечного перерізу зразка A_0 , яка у дійсності зменшується під час деформації. Для $\sigma_{\text{мц}}$ і $\sigma_{\text{т}}$ це зменшення незначне, тому умовність цих характеристик зазвичай не обмовляється.

До того, як розтягування досягне границі міцності поздовжні і поперечні деформації зразка рівномірно розподіляються по всій його розрахунковій довжині. Після досягнення границі міцності ці деформації концентруються в одному найбільш слабкому місці. Тут з'являється значне місцеве звуження, утворюється так звана «шийка». Як тільки на зразку утворилася шийка (точка D), навантаження зменшується і подальше деформування зразка проходить за рахунок видовження у зоні «шийки». Це підтверджується і стрілкою шкали силовимірювача машини, яка після досягнення границі міцності починає обертатися проти годинникової стрілки. І тому після досягнення границі міцності відносне подовження у зразку зменшується відповідно до зменшення величини сили, що розтягує (ділянка DK). Істинне напруження у перерізі шийки при цьому зростає аж до розриву зразка (як показано на рис. 2.7 суцільною лінією DK).

Істинним опором розриву $\sigma_{\text{р}}$ називається напруження, що визначається відношенням навантаження $F_{\text{р}}$ в момент розриву до площі поперечного перерізу шийки $A_{\text{ш}}$ в місці розриву:

$$\sigma_{\text{р}} = \frac{F_{\text{р}}}{A_{\text{ш}}}, \quad (2.7)$$

де $F_{\text{р}}$ – навантаження при розриві зразка (ордината точки K), Н.

При розрахунках інженерних конструкцій використовують в основному границю текучості та границю міцності. Визначені у роботі напруження, що відповідають границі пропорційності та істинному опору розриву зразка (умовні і справжні), не характеризують властивості міцності матеріалу і тому мають чисто теоретичний інтерес.

Характер руйнування зразка. Механізм руйнування починається в області шийки з утворення дрібних пустот – пор, витягнутих у подовжньому напрямі (рис. 2.8). Під дією напружень, що розтягують, матеріал перемичок між порами руйнується, пори зливаються, у результаті чого з'являється центральна тріщина у напрямку, перпендикулярному осі розтягування.

Утворення тріщини поблизу центру перерізу пояснюється тим, що в цій зоні внаслідок виникнення неоднорідного напруженого стану, при якому нормальні напруження досягають на осі зразка максимального значення σ_{max} , матеріал має знижену здатність до пластичної деформації. Це в значній мірі сприяє початку руйнування зразка, яке на цій стадії має крихкий характер. Однак в іншій частині поблизу поверхні матеріал продовжує розтягуватися пластично. Потім тріщина починає поширюватися в обидві сторони у напрямку до поверхні, утворюючи злам. Збільшення розмірів тріщини відбувається за рахунок подальшого приєднання нових пустот у результаті розриву перемичок і раніше утвореної центральної зони тріщини. Процес розвитку тріщини супроводжується концентрацією напружень біля вершини (вістря) тріщини.

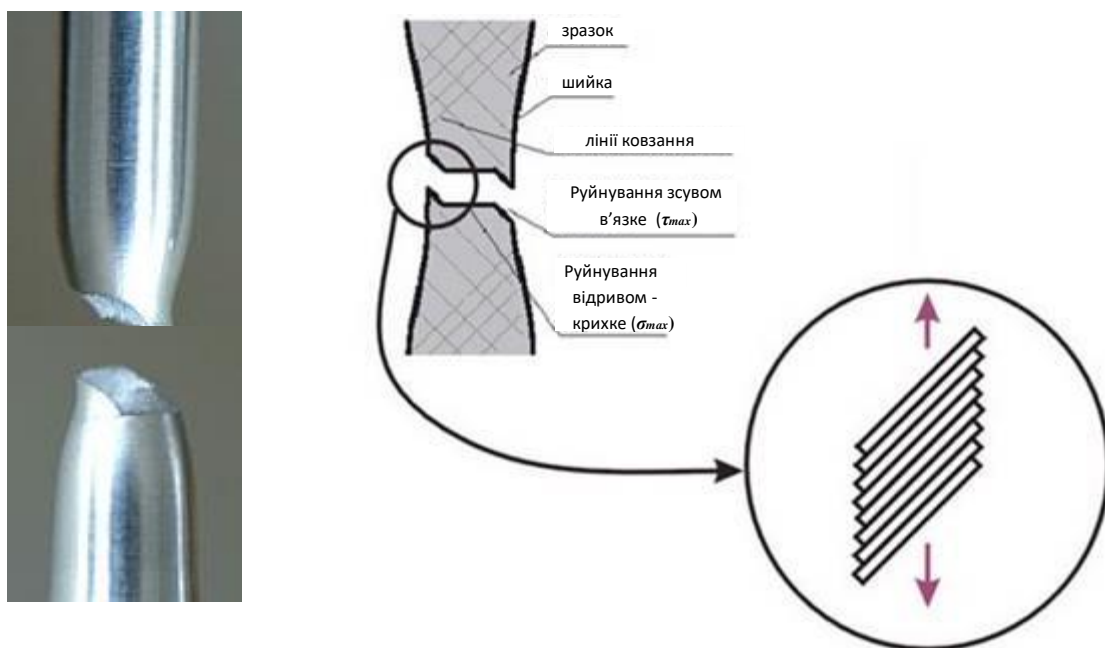


Рисунок 2.8 – Характер руйнування зразка.

При наближенні тріщини до поверхні створюються умови, при яких вона повертається під кутом, рівним приблизно 45° , до початкового напрямку поширення і, виходячи на поверхню, утворює конічну частину зламу. У цій стадії процес відбувається за механізмом, який багато в чому аналогічний розшаруванню у площинах ковзання або зісковзування. У зразку утворюються мікроскопічні нерівності, що виникають у наслідок незворотних зрушень, які відбуваються в кристалах під дією найбільших дотичних напружень τ_{max} .

Основні механічні характеристики пластичності

Ступінь пластичності матеріалу може бути охарактеризована величинами відносного залишкового подовження зразка, доведеного при розтягуванні до розриву, і відносного залишкового звуження шийки зразка в момент розриву.

Чим більше ці величини, тим пластичніше матеріал. До моменту розриву робоча частина зразка ℓ_0 видовжилась на величину загальної деформації $\Delta\ell_{\text{заг}}$.

Відношення приросту подовження зразка $\Delta\ell$ до його початкової довжини ℓ_0 називають **відносним залишковим подовженням ε** , або **подовжньо(е)ю деформацією**:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \cdot 100\%, \quad (2.8)$$

де $\Delta\ell$ – абсолютне видовження зразка, мм. Визначається як абсолютна різниця між довжиною зразка після випробування ℓ_1 і до випробування ℓ_0 :

$$\Delta\ell = \ell_1 - \ell_0;$$

ℓ_0 – початкова довжина зразка, мм.

На місці утворення шийки переріз зразка зменшується. Відношення зменшення площі поперечного перерізу в місці розриву ΔA до початкової площі A_0 зразка називають **відносним залишковим звуженням ψ** або **поперечною деформацією**:

$$\psi = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

де ΔA – абсолютне звуження зразка, $\Delta A = A_0 - A_w$, мм².

Відносне залишкове подовженням та відносне залишкове звуженням є безрозмірними величинами, тому оцінюються у відсотках.

Як ε , так і ψ характеризують пластичність матеріалу при розтягу, тобто його здатність отримувати залишкові деформації до руйнування. При великих значеннях ε і ψ матеріал вважається пластичним, при малих (зазвичай при $\varepsilon < 1\%$) – крихким.

Закон Гука

Сучасне трактування закону Гука належить Луї Нав'є, який встановив, що напруження і деформації матеріалу в точці пов'язані співвідношенням:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.10)$$

де σ – нормальні напруження, що відповідають пропорційній ділянці діаграми (границя пропорційності), МПа;

E – модуль пружності матеріалу I-го роду при розтягу, МПа;

ε – відносна лінійна деформація, що відповідає ділянці пропорційності.

Тангенс кута нахилу α прямолінійної ділянки ОА діаграми до осі абсцис (рис. 2.7) чисельно дорівнює **модулю подовжньої пружності E** :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E. \quad (2.11)$$

Кут нахилу ділянки пропорційності α свідчить про пластичні властивості матеріалу і характеризує опір матеріалу пружній деформації: чим більше α , тим міцніший матеріал, чим менше α , тим м'якше.

Для найбільш поширених матеріалів E має наступні значення:

сталь – $(2,0-2,1) \cdot 10^5$ МПа;
 мідь – $1,2 \cdot 10^5$ МПа;
 алюмінієво-магнієві сплави – $(0,7-0,8) \cdot 10^5$ МПа;
 дерево (вздовж волокон) – $(0,08-0,12) \cdot 10^5$ МПа;
 вапняк, граніт – $(0,4-0,5) \cdot 10^5$ МПа.

Вперше поняття про модуль поздовжньої пружності ввів у 1820 р. Томас Юнг, який визначив його чисельне значення для сталі, чавуну, міді і ряду інших матеріалів. Тому модуль поздовжньої пружності називають ще **модулем Юнга** (а також **модулем пружності I-го роду**).

Розглянемо формулу (2.2) закону Гука: якщо обидві її частини розділити на ℓ , отримаємо:

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{F \cdot \ell}{E \cdot A \cdot \ell}$$

Зробимо необхідні перетворення: права частина це є відносне видовження ε , в лівій частині відношення F/A це є напруження σ , отримаємо інший вираз закону Гука через відносну деформацію:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (2.12)$$

$$\text{або } \sigma = \varepsilon \cdot E. \quad (2.13)$$

Таким чином нормальне напруження σ при розтягу (стиску) прямопропорційне відносному видовженню ε з урахуванням коефіцієнта пропорційності E , яким є модуль Юнга.

Для проведення перевірного розрахунку необхідно знати значення допустимих напружень, після перебільшення яких конструкція втрачає міцність. Для забезпечення працездатності конструкції у разі статичних навантажень пластичного матеріалу допустиме нормальне напруження визначають як відношення небезпечного напруження до коефіцієнту запасу міцності. Для пластичних матеріалів визначається за формулою:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (2.14)$$

де σ_T – границя текучості, яка є небезпечним напруженням при розтягу пластичних матеріалів, МПа;

n_T – коефіцієнт запасу міцності відносно границі текучості:

$$n_T = 1,5 \dots 2,0.$$

Якщо мова йде про крихкі матеріали, то формула (2.14) буде мати вигляд:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{мц}}{n_{мц}},$$

де $\sigma_{мц}$ – границя міцності, яка є небезпечним напруженням при розтягу крихких матеріалів, МПа;

$n_{мц}$ – коефіцієнт запасу міцності відносно границі міцності:

$$n_{мц} = 3 \dots 5.$$

Оснащення робочого місця

- ❖ сталый зразок круглого перерізу, та зразок, що було розірвано при виконанні лабораторної роботи №1;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання випробувань

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Перенести в журнал лабораторних робіт діаграму розтягу зразка, перетворивши її у координатні осі $\sigma - \varepsilon$ (умовна діаграма).
2. Зверху умовної діаграми побудувати істинну діаграму напружень.
3. Використовуючи результати попередньої лабораторної роботи визначити механічні характеристики міцності м'якої сталі і розрахунки занести у журнал спостережень (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Розрахунок механічних характеристик міцності.

Механічне напруження	Формула	Значення
Границя пропорційності, МПа	$\sigma_{\text{нц}} = \frac{F_{\text{нц}}}{A_0}$	
Границя текучості, МПа	$\sigma_{\text{Т}} = \frac{F_{\text{Т}}}{A_0}$	
Границя міцності (тимчасовий опір), МПа	$\sigma_{\text{мц}} = \frac{F_{\text{мц}}}{A_0}$	
Істинний опір розриву матеріалу, МПа	$\sigma_{\text{р}} = \frac{F_{\text{р}}}{A_{\text{ш}}}$	

4. Визначити значення механічних характеристик пластичності і розрахунки занести в журнал спостережень (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Розрахунок механічних характеристик пластичності

Характеристики пластичності	Формула	Значення
Відносне залишкове подовження	$\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{зал}}}{l_0} \cdot 100\%$	
Відносне залишкове звуження	$\psi = \frac{A_0 - A_{\text{ш}}}{A_0} \cdot 100\%$	

5. По діаграмі напружень встановити небезпечне напруження: небезпечним напруженням вважається таке напруження, при якому виникають залишкові деформації. Із аналізу діаграми м'якої сталі (рис.2.7) таким напруженням є границя текучості σ_T , значення якого беремо з таблиці 2.3.

6. Аналізуючи визначені значення механічних характеристик та використовуючи довідкову літературу (див. Додаток1) встановити марку сталі.

7. Розрахувати допустимі напруження.

8. Визначити модуль пружності I-го роду (модуль Юнга).

9. Встановити і описати характер руйнування зразка у місці розриву: при розтягу зразка руйнування відбувається відриванням зі зсувом (рис. 2.8). Причому відрив частинок відбувається по центральній частині поперечного перерізу шийки (під дією нормальних напружень σ) інша частина сколюється під кутом 45° , з утворенням по периметру перерізу характерного віночка (зсув – під дією дотичних напружень τ) Така форма руйнування спостерігається тільки у пластичних матеріалів.

10. Відповісти на контрольні запитання.

11. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Чому діаграму розтягу зразка в координатах σ - ϵ називають умовною?

при розрахунках σ та ϵ не враховують зміну площі перерізу;

при розрахунках σ та ϵ не враховують зміну довжини зразка;

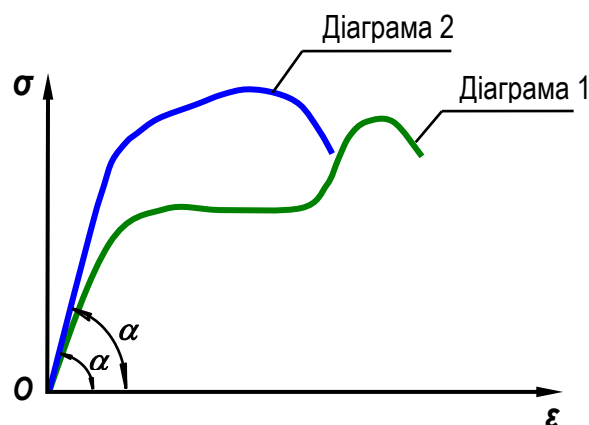
при розрахунках σ та ϵ не враховують зміну як довжини так і площі перерізу зразка.

2. Що можна сказати про механічні характеристики матеріалу (діаграма 2) у порівнянні з маловуглецевою сталлю (діаграма 1)?

матеріал більш міцний;

матеріал більш пластичний;

матеріал як більш пластичний так і більш міцний.

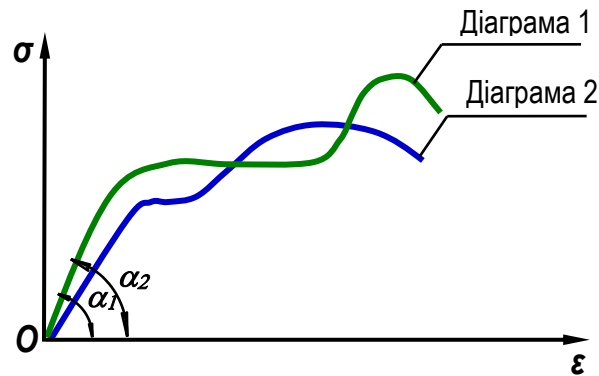


3. Що можна сказати про механічні характеристики матеріалу (діаграма 2) в порівнянні з маловуглецевою сталлю (діаграма 1)?

матеріал більш пластичний;

матеріал більш міцний;

матеріал менш пластичний та менш міцний.



4. Який параметр характеризує міцність матеріалу?

границя міцності $\sigma_{\text{мц}}$;

відносне залишкове видовження ϵ ;

відносне залишкове звуження ψ .

5. Які параметри характеризують пластичність матеріалу?

відносні залишкові видовження ϵ та звуження ψ ;

границя текучості $\sigma_{\text{т}}$ та границя міцності $\sigma_{\text{мц}}$;

зосереджена сила F та зосереджений момент M .

6. Яка механічна характеристика використовується для розрахунку допустимого напруження маловуглецевої сталі?

границя текучості $\sigma_{\text{т}}$;

границя пружності $\sigma_{\text{пр}}$;

границя міцності $\sigma_{\text{мц}}$.

7. Який запас міцності використовується при розрахунку допустимого напруження для маловуглецевої сталі?

1,5...2;

2...5;

5...10.

8. Які деформації виникають у зразку в процесі навантаження до розриву?

пружні та пластичні;

тільки пружні;

тільки пластичні.

9. До якої точки навантаження матеріал підкоряється закону Гука (рис. 2.8)?

A;

D;

C.

10. Яка характеристика визначається з діаграми розтягу як $\operatorname{tg} \alpha$?

модуль поздовжньої пружності (модуль Юнга);

границя пропорційності;

відносне видовження.

11. Як визначити допустиме напруження для пластичного матеріалу?

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T};$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пц}}}{n_{\text{пц}}};$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{мц}}}{n_{\text{мц}}}.$$

12. Чому дорівнює модуль поздовжньої пружності для сталі?

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$E = 0,7 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$E = 0,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

13. Як визначається відносне остаточне звуження?

$$\psi = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100\%;$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell} \cdot 100\%;$$

$$\Delta \ell = \ell_1 - \ell_0.$$

14. Як визначається відносне залишкове подовження?

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell} \cdot 100\%;$$

$$\Delta \ell = \ell_1 - \ell_0;$$

$$\psi = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100\%.$$

15. Що таке напруження в даному перерізі?

відношення зовнішньої сили на одиницю площі перерізу;

відношення зовнішнього моменту на одиницю площі перерізу;

відношення розподіленого навантаження на одиницю площі перерізу.

16. Як розрахувати границю пропорційності?

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

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0};$$

$$\sigma_{\text{мц}} = \frac{F_{\text{мц}}}{A_{\text{ш}}}.$$

17. Як розрахувати границю пружності?

$$\sigma_{\text{шц}} = \frac{F_{\text{шц}}}{A_0};$$

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{F_{\text{т}}}{A_0};$$

$$\sigma_{\text{мц}} = \frac{F_{\text{мц}}}{A_{\text{ш}}}.$$

18. Як розрахувати границю текучості?

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{F_{\text{т}}}{A_0};$$

$$\sigma_{\text{мц}} = \frac{F_{\text{мц}}}{A_{\text{ш}}};$$

$$\sigma_{\text{шц}} = \frac{F_{\text{шц}}}{A_0}.$$

19. Як розрахувати границю міцності?

$$\sigma_{\text{мц}} = \frac{F_{\text{мц}}}{A_{\text{ш}}};$$

$$\sigma_{\text{шц}} = \frac{F_{\text{шц}}}{A_0};$$

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{F_{\text{т}}}{A_0}.$$

20. Як розрахувати істинний опір розриву?

$$\sigma_{\text{р}} = \frac{F_{\text{р}}}{A_{\text{ш}}};$$

$$\sigma_{\text{мц}} = \frac{F_{\text{мц}}}{A_{\text{ш}}};$$

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{F_{\text{т}}}{A_0}.$$

2.3. Лабораторна робота

ВИПРОБУВАННЯ НА СТИСК СТАЛІ, ЧАВУНУ ТА ДЕРЕВА.

МЕТА РОБОТИ: дослідження поведінки сталі, чавуну і дерева при стиску та визначення основних механічних характеристик міцності.

Короткі теоретичні відомості

Випробування на стиск проводять для визначення здатності матеріалів чинити опір стискаючому навантаженню. Відносяться до числа найбільш поширених випробувань, особливо для крихких матеріалів. Випробування проводяться на зразках з круглим або квадратним поперечним перерізом, розміри яких визначаються відповідно до ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие».

Напруження і деформації при осьовому стиску визначаються так само, як і при розтягу. Тому всі механічні характеристики, які визначаються при випробуванні на стиск, зберігають ті ж визначення, що і при розтягу. Однак між процесом деформування матеріалу при стиску і при розтягу є суттєва відмінність, яке особливо проявляється при навантаженні зразка з пластичного матеріалу за межами пружності.

Випробування на стиск є основними при визначенні механічних характеристик крихких матеріалів, таких, як чавун, дерево, будівельні матеріали, тощо. На відміну від випробувань на розтяг випробування на стиск мають наступні особливості:

- в процесі випробування пластичні матеріали можуть стискатись, не руйнуючись, а крихкі – руйнуються;
- характеристики міцності і пластичності циліндричного зразка при випробуваннях на стиск суттєво залежать від відношення висоти зразка до його діаметра;
- на результати випробувань значно впливають умови тертя по торцях зразка, які перешкоджають появі поперечної деформації, і циліндричний (або призматичний) зразок набуває бочкоподібну форму.

Під дією стискаючого навантаження різні матеріали ведуть себе по різному. Тому для випробувань на стиск використовуємо дві групи матеріалів ізотропні та анізотропні, а також два види зразків за властивостями: пластичні і крихкі.

Ізотропними називаються матеріали, які мають однакові фізичні властивості у всіх напрямках. Для випробувань на стиск в якості ізотропного матеріалу використовується сталь, як пластичний, і чавун, як крихкий матеріал.

Зразки з них виготовляють циліндричної форми відповідно до ГОСТ 25.503-97 з відношенням висоти до діаметру $1 \leq h/d \leq 2$. В даній роботі використовують зразки із розмірами $\ell = 30$ мм, $d = 20$ мм (рис.2.9). Стискаюче навантаження прикладають уздовж поздовжньої осі у центрі ваги перерізу.

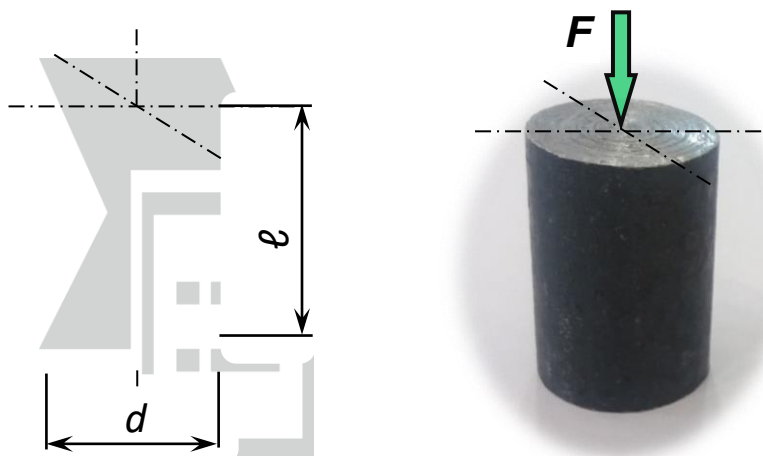


Рисунок 2.9 – Стальний та чавунний зразки для випробувань на стиск.

Матеріали, властивості яких змінюються залежно від напрямку, називають **анізотропними**. До таких матеріалів відносять такі матеріали, волокна яких орієнтовані в певних напрямках – однонаправлені, шаруваті і трьохмірноармовані.

Для випробувань за анізотропні матеріали використовують дерев'яні зразки кубічної форми із розмірами $a \times a \times h_0 = 40 \times 40 \times 40$ мм (рис. 2.10). Залежно від розташування волокон їх випробують уздовж волокон та упоперек.

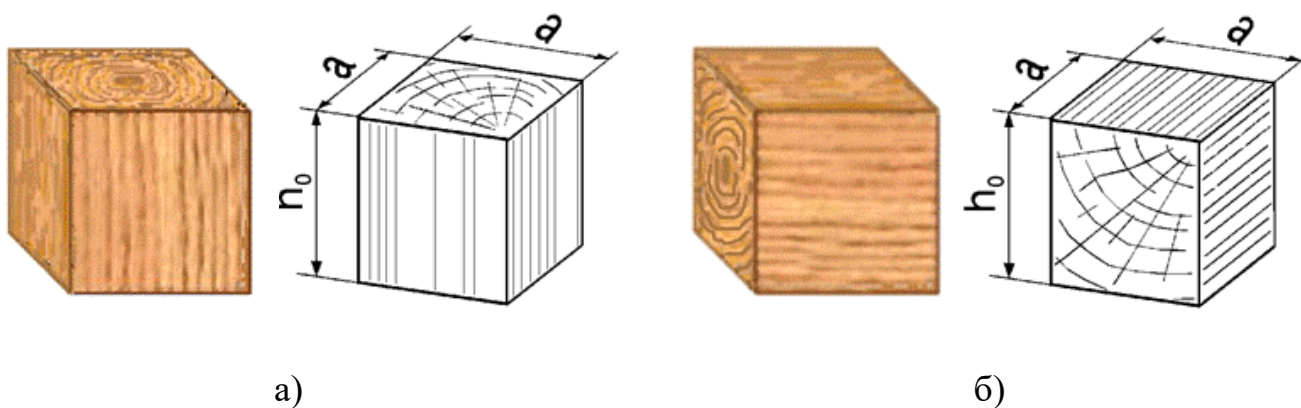


Рисунок 2.10 – Дерев'яні зразки для випробувань на стиск:
а) уздовж волокон, б) упоперек волокон.

Випробування на стиск проводять на універсальній випробувальній машині УИМ-50. Зразок встановлюють на опорну плиту нижньої траверси машини, притискаючи його до верхньої опорної плити (рис. 2.11) таким чином, щоб навантаження прикладалось строго уздовж осі зразка. Нижня траверса переміщується тільки уверх, утворюючи стискаюче зусилля.



а)

б)

в)

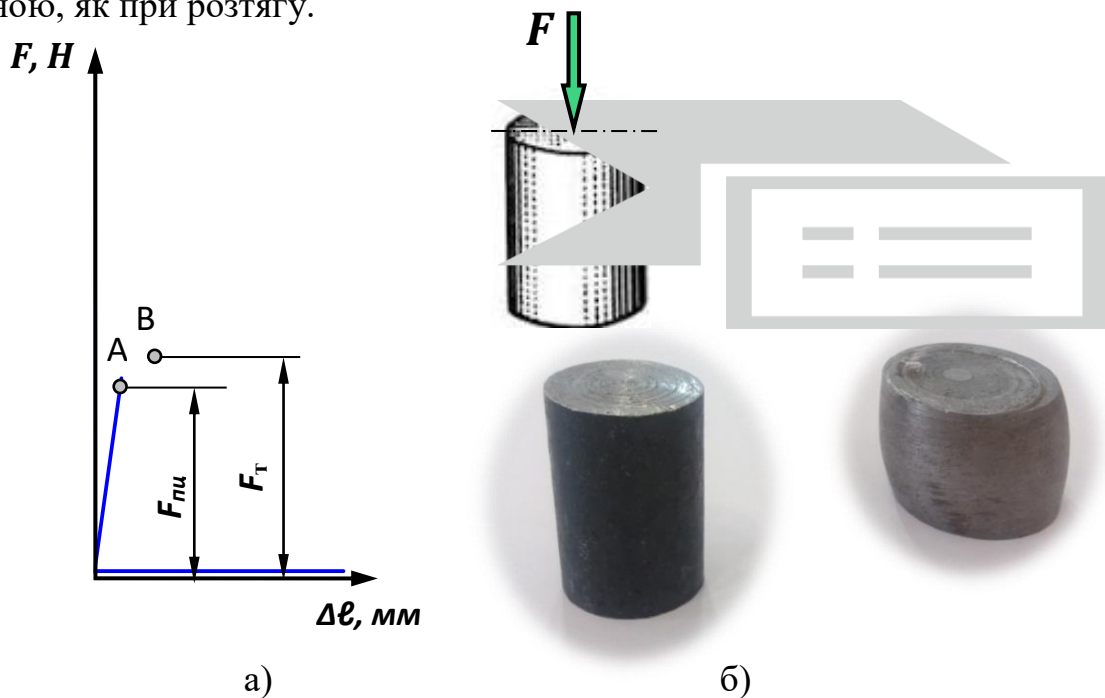
Рисунок 2.11 – Установка зразків на опори траверси машини УИМ-50:

а) сталевий та чавунний зразки; б) дерево удовж волокон,

в) дерево поперек волокон.

Випробування пластичного матеріалу. Сталь.

На початку завантаження до деякого навантаження $F_{пл}$ (рис. 2.12, а) діаграма напружень при стиску малоуглецевої пластичної сталі так само, як і діаграма розтягу, являє собою похилу пряму ОА. Спостерігається пропорційна залежність між деформацією і навантаженням, що викликало її. Це свідчить про наявність пружних властивостей матеріалу. Потім діаграма закруглюється і переходить у ділянку з найбільшим нахилом до горизонталі – ділянку текучості АВ. При стиску «площина текучості» не виходить настільки яскраво вираженою, як при розтягу.



а)

б)

Рисунок 2.12 – Діаграма стиску сталі (а) і зразок із неї в процесі деформування (б).

Кінцева точка діаграми стиску сталі відповідає не руйнуванню, як при розтягу, а просто закінченню випробування. Зразок зі сталі при стиску не руйнується. Закінчення випробувань (кінцева деформація стиску) визначається можливістю машини.

Так само, як при випробуванні на розтяг, при стиску аналізується діаграма стиску, яка може бути записана за допомогою діаграмного апарату випробувальної машини в координатах: стискаюча сила F – абсолютне укорочення Δl . При випробуванні на стиск мають місце лише дві характеристики міцності: границя пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ та границя текучості $\sigma_{\text{т}}$.

Навантаження, що відповідає границі пропорційності $F_{\text{пц}}$ та границі текучості $F_{\text{т}}$ визначаються за тією ж методикою, що описана у попередніх лабораторних роботах (лабораторна робота №1 і №2).

За границею пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ спостерігається незначне збільшення деформації, тобто, матеріал «тече», але без явно вираженої площини текучості. Зразок приймає бочкоподібну форму (рис. 2.12,б) внаслідок наявності тертя між торцями зразка і поверхнями стискаючих плит.

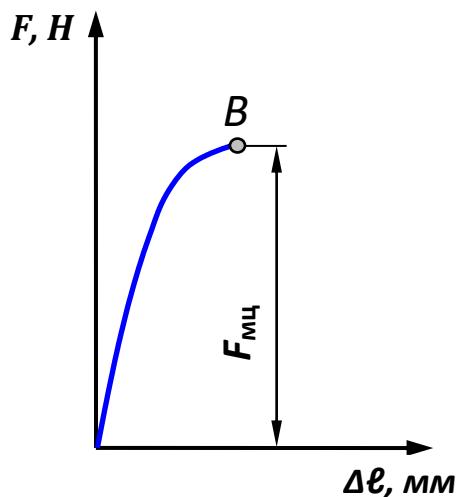
Сили тертя, що виникають по торцях зразка, перешкоджають поперечній деформації, і циліндричний (або призматичний) зразок набуває бочкоподібну форму. Для зменшення бочкоподібності існує кілька прийомів. Найпростіший з них – зниження сил тертя за рахунок шліфування торців зразків та їх змащення, наприклад, графітом.

Пластичні і крихкі матеріали по-різному поведуться при стисненні. У пластичних матеріалів границя пропорційності, а також фізична границя текучості виявляються досить близькими до відповідних значень, що отримані при розтягу. Тому вважається, що пластичні матеріали однаково працюють на розтяг і стиск. При стиску за границею текучості внаслідок інтенсивного поперечного розширення зусилля, яке необхідне для подальшої деформації зразка, швидко зростає. При цьому досить пластичні матеріали при стиску не руйнуються, а розплющуються під дією нормальних напружень. Тому визначити границю міцності не можливо. Чітко виражена тільки границя пропорційності.

Випробування крихкого матеріалу. Чавун.

Зразок з крихкого матеріалу при стиску може набувати бочкоподібну форму лише у дуже незначній мірі. Процес навантаження закінчується руйнуванням зразка – зсув під дією дотичних напружень τ . За руйнівного навантаження визначається тимчасовий опір (границя міцності) при стиску $\tau_{\text{мц}}$. Для крихких матеріалів випробування на стиск є основним видом випробувань. Зауважимо, що границя міцності при розтягу у крихких матеріалів істотно менша, ніж при стиску, тобто крихкі матеріали краще чинять опір стиску.

Процес випробування на стиск наочно зображується діаграмою стиску (рис. 2.13, а). Під час стиску чавунного зразка практично з початку навантаження і до руйнування спостерігається нелінійна залежність між навантаженням і деформацією (рис. 2.13, а). Можна сказати, що матеріал не підкоряється закону Гука, а значення модуля пружності E не є постійною величиною, воно змінюється в залежності від величини того напруження, для якого визначається деформація.



а)



б)

Рисунок 2.13 – Діаграма стиску чавуну (а) і зразок із нього в процесі деформування (б).

Однак в умовах тих невеликих деформацій, при яких матеріал використовують у різних деталях машин і споруд, діаграма $F-\Delta l$ являє собою лінію малої кривизни (рис. 2.13, а), тобто відхилення від закону Гука незначне. Тому у практичних розрахунках вважають, що матеріал підкоряється закону Гука, а значення модуля пружності E постійним.

Із аналізу діаграми видно, що чітко виражене тільки руйнівне навантаження $F_{\text{мц}}$, що відповідає границі міцності. Воно, до того ж, є максимальним. Відношення $F_{\text{мц}}$ до початкової площі A_0 поперечного перерізу називають **границею міцності $\sigma_{\text{мц}}$ (тимчасовим опором $\sigma_{\text{тм}}$)** чавуну при стиску:

$$\tau_{\text{мц}} = \frac{F_{\text{мц}}}{A_0}. \quad (2.15)$$

Зразок, укорочуючись (рис. 2.13, б), приймає бочкоподібну форму. Це свідчить про наявність невеликих пластичних деформацій. При стиску зразків відбувається ряд явищ, які суттєво відрізняють випробування на стиск від випробувань на розтяг. При зменшенні висоти стиснутого зразка і переміщенні часток у радіальному напрямку між торцями зразка й плитами преса виникають сили тертя, спрямовані у бік, протилежний напрямку поперечної деформації,

тобто радіально до центру. Ці сили тертя порушують одновісний характер деформації зразка.

Випробування показують, що руйнування чавунних зразків відбувається шляхом зсуву по площині, нахиленої до осі зразка приблизно на кут $\alpha = 45^\circ$, тобто, по перерізу, де діють **максимальні дотичні напруження τ** .

При руйнуванні навантажувальна здатність чавуну падає практично миттєво, що характерно для крихких матеріалів. Границя міцності чавуну зазвичай досягає 500-1000 МПа.

Слід пам'ятати, що значення $\tau_{\text{мц}}$ значно залежить від умов випробування і відношення висоти h до діаметра d зразка. Навіть вигляд руйнування крихких матеріалів залежить від відношення висоти до діаметра.

Границя міцності крихкого матеріалу при стиску в декілька разів більша за границю міцності при розтягу. Модулі пружності при розтягу та стиску також різні.

Необхідно відмітити, що зазвичай крихкі матеріали опираються стиску краще ніж розтягу. Це в значній мірі обмежує область їх застосування.

Випробування дерева.

Випробування дерев'яного зразка як представника анізотропних матеріалів проводять уздовж (рис. 2.10, а; 2.11, б) і упоперек (рис. 2.10, б; 2.11, в) волокон. Отримані діаграми стиску (рис. 2.14) різко відрізняються одна від одної.

Діаграма $F-\Delta l$ стиску зразка **уздовж волокон** (рис. 2.14, а), зовні схожа на діаграму стиску чавуну. Дубовий зразок, що випробують уздовж волокон на стиск до руйнування, зазнає порівняно невеликих пластичних деформацій. Між силою F і деформацією Δl на початку навантаження спостерігається незначна нелінійна залежність, причому нелінійність зростає у міру збільшення навантаження. Після досягнення граничного навантаження $F_{\text{мц}}$ зразок починає руйнуватися шляхом сколювання, що супроводжується характерним тріском (рис. 2.14, а – зигзагоподібна ділянка) з подальшим зменшенням навантаження.

Відношення навантаження, що відповідає границі міцності $F_{\text{мц}}$ до початкової площі A_0 поперечного перерізу зразка називають **границею міцності $\sigma_{\text{мц}}$** . Ця характеристика визначається за методикою, наведеною у попередніх лабораторних роботах (№1 і №2).

У звичайних умовах руйнування відбувається шляхом зсуву однієї частини зразка відносно другої (рис. 2.15, а).

Під час стиску зразка поперек волокон діаграма $F-\Delta l$ має інший вигляд (рис. 2.14, б). До деякої точки А спостерігається пропорційна залежність між силою і деформацією. Це дозволяє визначити **границю пропорційності**, яка є відношенням навантаження $F_{\text{пц}}$ до початкової площі A_0 поперечного перерізу.

Із подальшим збільшенням навантаження дерева значно ущільнюється без ознак руйнування зразка (рис. 2.15, б).

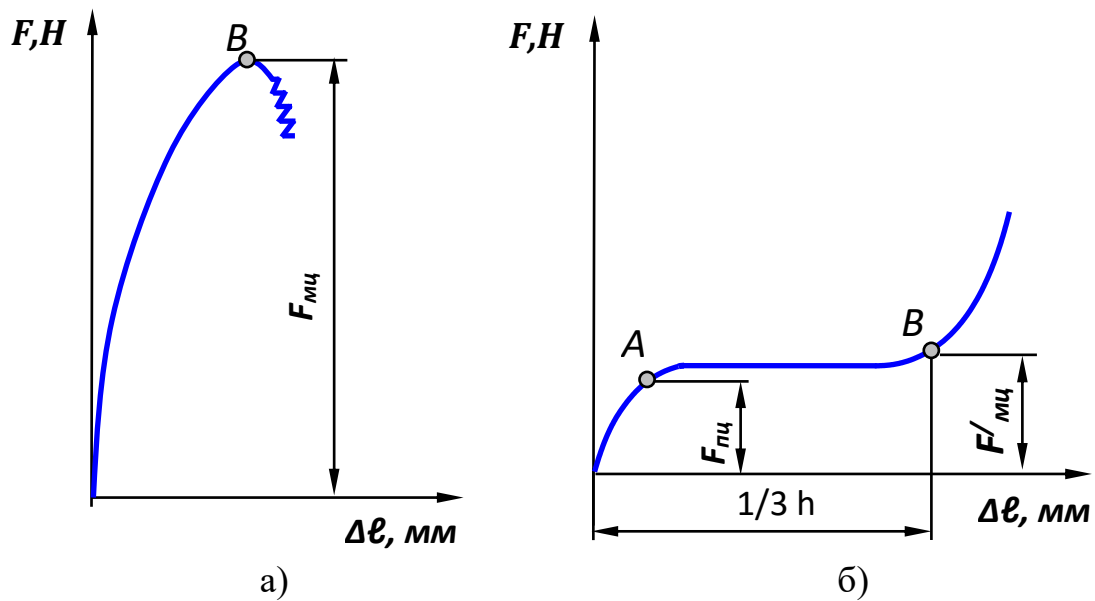


Рисунок 2.14 – Діаграми стиску дерева уздовж волокон (а) і поперек волокон (б).

Момент втрати несучої властивості зафіксувати немає можливості. Тому за руйнівну силу приймають умовно таку силу $F'_{мц}$, при дії якої деформація (ущільнення) зразка по висоті досягає $1/3$ початкового значення, тобто $\Delta\ell=1/3h_0$ (рис. 2.14, б).

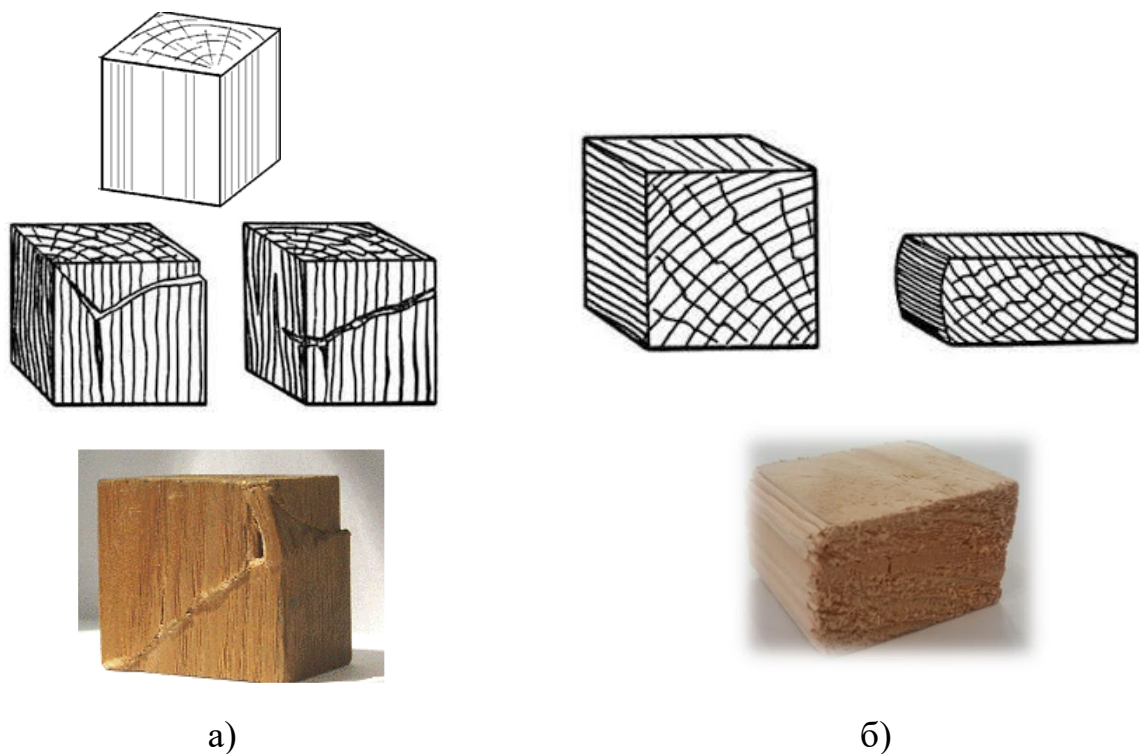


Рисунок 2.15 – Зразок із дерева після руйнування уздовж волокон (а) і поперек волокон (б).

Відношення $F'_{\text{мц}}$ до A_0 називають умовною границею міцності $\sigma'_{\text{мц}}$ дерева при стиску поперек волокон:

$$\sigma'_{\text{мц}} = \frac{F'_{\text{мц}}}{A_0}. \quad (2.16)$$

Порівнюючи діаграми стиску дерева уздовж і упоперек волокон з'ясовується, що при стиску до руйнування уздовж волокон зразок має значно менші деформації, ніж при стиску поперек волокон, характер руйнування в обох випадках різний. Міцність зразка в першому випадку в 7...10 разів вище, ніж у другому. Коефіцієнт анізотропії, що характеризує різні механічні властивості дерева уздовж і поперек волокон, являє собою відношення границі міцності при стиску уздовж волокон до границі міцності при стиску поперек волокон:

$$K = \frac{\sigma_{\text{мц}}}{\sigma'_{\text{мц}}}. \quad (2.17)$$

Таким чином крихкі й пластичні матеріали мають різні протилежні властивості у відношенні їх опору простому стиску або розтягу. Крихкі матеріали погано опираються розтягу і удару, чутливі до місцевих напружень. Пластичні матеріали таких недоліків не мають, тому пластичність є одним із найважливіших якостей матеріалу. Крихкі матеріали зазвичай дешевші і мають високу границю міцності при стиску, тому можуть бути використані при статичному навантаженні.

При визначенні допустимих напружень крихких матеріалів за небезпечне напруження приймають границю міцності $\sigma_{\text{мц}}$. В такому випадку отримаємо:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{мц}}}{n_{\text{мц}}}, \quad (2.18)$$

де $\sigma_{\text{мц}}$ – границя міцності, яка є небезпечним напруженням при випробуванні крихких матеріалів, МПа;

$n_{\text{мц}}$ – коефіцієнт запасу міцності відносно границі міцності: $n_{\text{мц}} = 3,0 \dots 5,0$.

Значення коефіцієнта запасу міцності залежить від характеру навантаження, властивостей матеріалу, розрахункової схеми, методу розрахунку, тощо.

Оснащення робочого місця

- ❖ машина УИМ-50, підготовлена до проведення експерименту;
- ❖ сталевий і чавунний циліндричні зразки;
- ❖ дерев'яні кубічні зразки – 2 шт.;
- ❖ штангенциркуль;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання випробувань

Робота проводиться на сталевих, чавунних і дерев'яних зразках. Сталеві і чавунні зразки – циліндричної форми, дерев'яні – кубічної. Дерев'яні і чавунні зразки доводяться до руйнування, сталеві не руйнуються. Дерев'яні зразки випробовують уздовж і поперек волокон.

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Перед проведенням досліджень перевірити підготовку випробувальної машини до проведення випробувань.
2. Зробити заміри зразків. Результати вимірювань фіксують у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Данні обміру зразків зі сталі та чавуну.

Параметр	Сталь	Чавун
1. Діаметр d , мм		
2. Довжина l , мм		
3. Площа поперечного перерізу A , мм ²		

3. Проконтролювати налагодження шкали силовимірювача перед проведенням досліджень. Сталь і дерево уздовж волокон випробують при максимальному навантаженні $F_{\max} = 250\text{кН}$, масштаб навантаження на діаграмному апараті становить $\mu_F = 1500\frac{\text{Н}}{\text{мм}}$. Чавун випробують при максимальному навантаженні $F_{\max} = 500\text{кН}$, масштаб навантаження становить $\mu_F = 3000\frac{\text{Н}}{\text{мм}}$. Дерево поперек волокон випробують при максимальному навантаженні $F_{\max} = 100\text{кН}$, масштаб навантаження становить $\mu_F = 600\frac{\text{Н}}{\text{мм}}$.

Масштаб запису деформації (в напрямку горизонтальної осі Δl) перед випробуванням приймається рівним $\mu_{\Delta l} = 1:2 = 0,5\frac{\text{град}}{\text{мм}}$.

4. На опорну плиту нижньої траверси машини послідовно встановити зразки та притиснути до верхньої опорної плити. Увімкнути машину і прикласти повільне навантаження (чавунний та дерев'яний зразки доводять до руйнування).

5. За шкалою силовимірювача фіксується відповідне навантаження: для сталевих зразків навантаження, що відповідає границі пропорційності $F_{\text{мп}}$ і границі текучості $F_{\text{т}}$, для чавунних і дерев'яних навантаження, що відповідає границі міцності $F_{\text{мп}}$.

6. Занести в журнал лабораторних робіт діаграми стиску зразків, що випробувались.

7. Зробити аналіз отриманих діаграм, визначити відповідно до кожного виду матеріалу механічні характеристики міцності.

8. Провести необхідні розрахунки та результати занести у таблиці 2.6 і 2.7.

Таблиця 2.6 – Результати випробувань сталі та чавуну.

Параметри	Позначення	Сталь	Чавун
1. Максимальне навантаження, Н	F_{\max}		
2. Максимальне напруження, МПа	$\sigma_{\max} =$		
3. Навантаження, що відповідає границі пропорційності, Н	$F_{\text{пц}}$		
4. Границя пропорційності, МПа	$\sigma_{\text{пц}} =$		
5. Навантаження, що відповідає границі текучості, Н	F_T		
6. Границя текучості, МПа	$\sigma_T =$		

Таблиця 2.7 – Результати випробувань дерева уздовж і поперек волокон.

Позначення	Позначення	Уздовж	Поперек
Площа поперечного перерізу, мм ²	A		
Навантаження, що відповідає границі міцності, Н	$F_{\text{мц}}$		
Границя міцності, Н/мм ²	$\sigma_{\text{мц}}$		

9. За даними діаграми стиску встановити небезпечне напруження для кожного виду матеріалу. Для сталі небезпечним напруженням вважається границя текучості σ_T , для чавуну та дерева уздовж волокон – границя міцності $\sigma_{\text{мц}}$, для дерева поперек волокон – умовна границя міцності $\sigma'_{\text{мц}}$, яку визначають при стиску зразка на 1/3 висоти $\left(\frac{1}{3}h_0\right)$. Якщо висота зразка становить 40 мм, то 1/3 від 40 дорівнює 13,3мм. Відкладаємо це значення на осі абсцис (абсолютна деформація зразка Δl) з урахуванням масштабу, від цієї точки проводимо вертикаль уверх до перетинання з лінією діаграми. Таким чином знаходимо положення точки В (рис. 2.14, б), що відповідає умовному навантаженню по границі міцності $F'_{\text{мц}}$.

10. Розрахувати допустимі напруження для досліджуваних матеріалів.

11. Встановити і описати характер руйнування зразків.

12. Відповісти на контрольні запитання.

13. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Яке напруження приймається за небезпечне для м'якої сталі?
границя текучості σ_T ;
границя пружності $\sigma_{пр}$;
границя міцності $\sigma_{мц}$.
2. Зразки якої форми використовують при випробовуванні на стиск сталі?
циліндричної;
конусної;
прямокутного паралелепіпеду.
3. Зразки якої форми використовують при випробовуванні на стиск чавуну?
циліндричної;
прямокутного паралелепіпеду;
конусної.
4. Зразки якої форми використовують при випробовуванні на стиск деревини?
прямокутного паралелепіпеду;
циліндричної;
конусної.
5. Який матеріал має анізотропні властивості?
деревина;
сталь;
чавун.
6. Які матеріали при стиску не мають границі міцності?
пластичні матеріали (сталь);
крихкі матеріали (чавун);
пластичні і крихкі матеріали.
7. Яку механічну характеристику не можна визначати під час стиску маловуглецевої сталі (пластичний матеріал)?
границю міцності $\sigma_{мц}$;
границю пропорційності $\sigma_{пц}$;
границю текучості σ_T .
8. В яких координатних осях на випробувальній машині записується діаграма при стиску зразків?
 $F - \Delta l$;
 $F - f$;
 $\sigma - \epsilon$.
9. Як руйнується при стиску зразок із пластичного матеріалу?
не руйнується, а розплющується;
розтріскується;

- руйнується зсувом по площині близько до кута 45° .
10. Як руйнується при стиску зразок із крихкого матеріалу – чавуну?
руйнується зсувом по площині близько до кута 45° ;
розтріскується;
не руйнується, а розплющується.
11. Як руйнується зразок із деревини при стиску його вздовж волокон?
розтріскується та зминаються торці зразка;
спресовується;
руйнується зсувом по площині близько до кута 45° .
12. Як руйнується зразок із деревини при стиску його поперек волокон?
спресовується;
розтріскується та зминаються торці зразка;
руйнується зсувом по площині близько до кута 45° .
13. Яка механічна характеристика для м'якої сталі однакова при стиску і розтягу?
границя пропорційності $\sigma_{пц}$;
границя міцності $\sigma_{мц}$;
відносна залишкова деформація $\epsilon_{зал}$.
14. Яка механічна характеристика визначається при стиску зразка з чавуну, як небезпечна?
границя міцності $\tau_{мц}$;
границя пропорційності $\sigma_{пц}$;
границя текучості $\sigma_{т}$.
15. Яка механічна характеристика визначається при стиску зразка з деревини уздовж волокон?
границя міцності $\sigma_{мц}$;
границя пропорційності $\sigma_{пц}$;
границя текучості $\sigma_{т}$.
16. При визначенні границі міцності дерева при стиску поперек волокон умовно приймають таку силу, при дії якої:
деформація (ущільнення) зразка по висоті досягає $1/3$ початкового значення;
деформація зразка по висоті досягає $1/2$ початкового значення;
деформація зразка досягає $0,2\%$ початкового значення.
17. Як відрізняється міцність деревини при стиску уздовж і поперек волокон?
міцність значно вище при стиску уздовж волокон;
міцність однакова;
міцність значно вище при стиску поперек волокон.

18. При порівнянні механічних характеристик міцності під час розтягу і стиску пластичних матеріалів (м'якої сталі) можна зробити висновок, що:

- пластичний матеріал краще опирається розтягу;
- пластичний матеріал однаково працює на розтяг і стиск;
- пластичний матеріал краще опирається стиску.

19. При порівнянні механічних характеристик міцності під час розтягу і стиску крихких матеріалів (чавуну) можна зробити висновок:

- крихкий матеріал краще опирається стиску;
- крихкий матеріал краще опирається розтягу;
- крихкий матеріал однаково працює на розтяг і стиск.

20. Яка з діаграм (рисунок-діаграми) є діаграмою стиску маловуглецевої сталі?

- діаграма 1;
- діаграма 3;
- діаграма 2.

21. Яка з діаграм (рисунок-діаграми) є діаграмою стиску крихкого матеріалу (чавуну)?

- діаграма 2;
- діаграма 1;
- діаграма 3.

22. Яка з діаграм (рисунок-діаграми) є діаграмою стиску деревини уздовж волокон?

- діаграма 3;
- діаграма 1;
- діаграма 2.

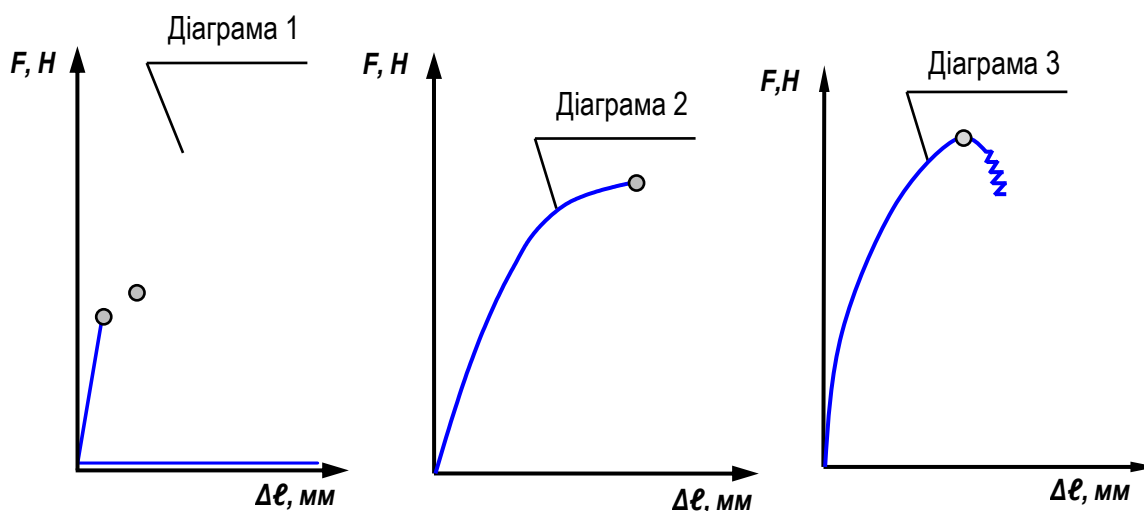


Рисунок – Діаграми стиску деяких матеріалів.

2.4. Лабораторна робота

ВИПРОБУВАННЯ НА КРУЧЕННЯ СТАЛІ ТА ЧАВУНУ

МЕТА РОБОТИ: дослідження поведінки сталі й чавуну при крученні та визначення основних характеристик міцності.

Короткі теоретичні відомості

В інженерній практиці на кручення в основному працюють деталі круглого поперечного перерізу: вали, витки пружин і т.п.

Крученням називається деформація стержня (вала) під дією пар сил (моментів), розташованих у площині, що перпендикулярна до осі вала, при додержанні умови рівноваги. Ці пари сил називаються моментами, що скручують M . При крученні у поперечних перерізах вала виникають внутрішні силові фактори – крутильні моменти $M_{кр}$.

В теорії кручення круглих валів, що виготовлені із однорідного пружного матеріалу прийняті наступні припущення:

1) гіпотеза плоских перерізів: поперечні перерізи, що були плоскі до деформації, залишаються плоскими і після скручування вала, лише зсуваються один відносно другого на деякий кут γ (кут зсуву);

2) вісь вала не викривляється;

3) відстані між поперечними перерізами не змінюються, тобто відсутні поздовжні деформації волокон вала;

4) радіуси поперечних перерізів залишаються прямими й тільки обертаються на деякий кут φ – кут закручування.

Таким чином, кручення можна розглядати як **чистий зсув**, викликаний поворотом одного перерізу відносно другого. При цьому в поперечних перерізах виникають тільки дотичні напруження τ , які перешкоджають скручуванню валів і діють в площині перпендикулярній до осі вала:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p}, \quad (2.19)$$

де $M_{кр}$ – крутильний момент, Н·м;

W_p – полярний момент опору, мм³.

Полярний момент опору є геометричною характеристикою перерізу вала (залежить від діаметра d), для круглого перерізу визначається за формулою:

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = 0,2d^3. \quad (2.20)$$

У будь-якому похилому перерізі виділеного елемента вала будуть діяти нормальні і дотичні напруження. Найбільші нормальні напруження діють на головних площадках, які, як відомо, нахилені під кутом 45^0 до утворюючої.

З теорії чистого зсуву відомо, що головні напруження по абсолютній величині рівні між собою і дорівнюють дотичним напруженням, тобто:

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \tau.$$

Таким чином, при крученні круглих валів небезпечними можуть бути як дотичні напруження, що виникають у поперечних і поздовжніх перерізах вала, так і нормальні напруження, що виникають у площині під кутом 45° до перших. У зв'язку з цим, характер руйнування зразка буде залежати від здатності матеріалу чинити опір дії дотичних і нормальних напружень.

Випробування на кручення проводять відповідно до ГОСТ 3565-80. Для випробування, застосовують циліндричні зразки з діаметром в робочій частині $d=10$ мм і з розрахунковою довжиною $l_0=100$ або 50 мм, з головками на кінцях для закріплення в затискачах випробувальної машини (рис. 2.16). Дослідження проводять для сталюого і чавунного зразків однакової форми і розмірів.

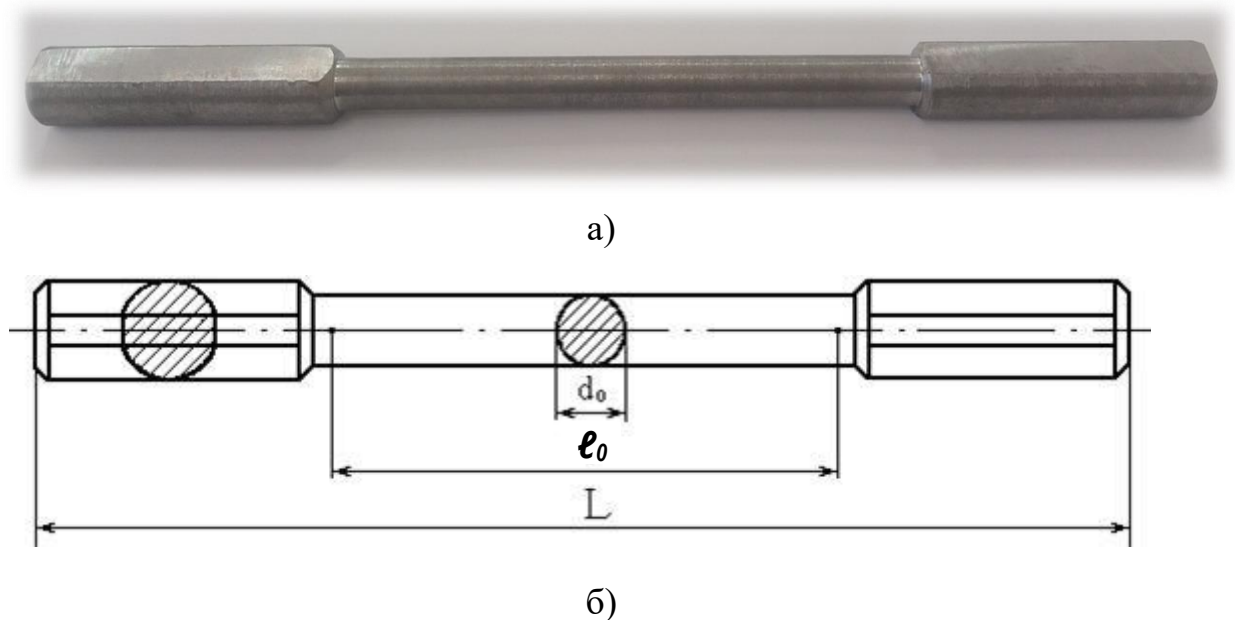


Рисунок 2.16 – Зразок для випробувань на кручення: а) загальний вигляд, б) ескіз зразка.

Розрахунковою довжиною вважають довжину циліндричної частини зразка l_0 , на якій проводять вимірювання кутової деформації (рис. 2.16), зазвичай довжина приймається $l_0=10d$. Випробування зразків з металопродукції діаметром менше 5 мм проводяться тільки з урахуванням вимог стандартів на ці види продукції.

Допускається випробування зразків і виробів, пропорційних нормальним, а також трубчастих зразків.

Форма і розміри головок зразка визначаються способом кріплення у затискачах випробувальної машини.

При крученні, так як нормальні і дотичні напруження дорівнюють між собою, руйнування зразка може статися при досягненні ними граничного значення. Так як опір зсуву і відриву у різних матеріалів неоднаковий, руйнування зразків буде відбуватися по-різному (рис. 2.17). Так, сталевий зразок руйнується від зсуву по поперечному перерізу (рис.2.17, а), чавунний – відривом по гвинтовій поверхні з кутом нахилу 45° до осі зразка (рис.2.17, б).

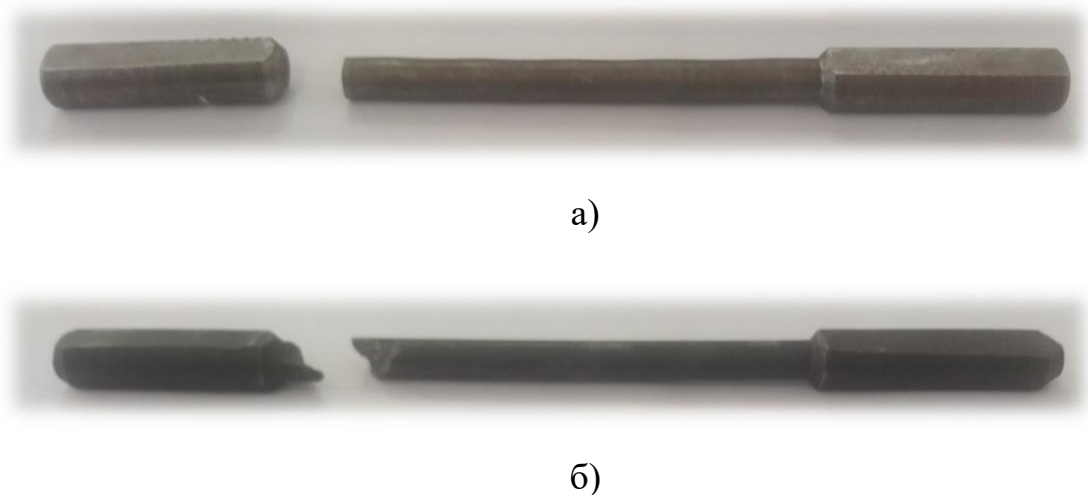


Рисунок 2.17 – Зруйнований зразок: а) сталевий, б) чавунний.

Випробування на кручення проводять на спеціальних машинах, які забезпечують надійне центрування, плавність навантаження і відсутність згинаючих зусиль, також із можливістю достатньо точно задавати і вимірювати крутильні моменти і кути закручування.

У лабораторії кафедри є в наявності крутильна машина КМ-50, яка призначена для випробувань на кручення з максимальним крутильним моментом $500\text{Н}\cdot\text{м}$. Машина має механічний привод. Шкала силовимірювача може настроюватись на три види навантаження 100 , 200 і $500\text{Н}\cdot\text{м}$. Для проведення досліджень сталюго та чавунного зразків машину настроюють на максимальний крутильний момент $200\text{Н}\cdot\text{м}$.

Масштаб крутильного моменту (в напрямку вертикальної осі M) при проведенні випробувань становить $\mu_M = \frac{200}{150} = 4/3 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$ (де 150мм – це довжина барабана діаграмного апарата).

Масштаб запису деформації (в напрямку горизонтальної осі φ) перед випробуванням приймається рівним $\mu_\varphi = 1:2 = 0,5 \frac{\text{град}}{\text{мм}}$.

На зразку проводять крейдою пряму лінію, і встановлюють його в затискачі крутильної машини (рис. 2.18, а). В процесі випробувань пряма лінія перетворюється в спіральну і, залежно від пластичних властивостей матеріалу, має відповідну кількість витків. На рисунку 2.18, б показана спіральна лінія для

зразка зі сталі Ст.3, яка утворилася в результаті закручування. Така процедура проводиться для того, щоб можна було наявно побачити деформацію зразка.



Рисунок 2.18 – Стальний зразок:

а) підготовка та встановлення зразка у випробувальну машину, б) спіральна крейдова лінія на зразку після випробування.

Випробування на кручення відрізняються тим, що під час закручування форма і розміри зразків не змінюються. Тому деформацію зразка наочно побачити неможливо, наприклад, як це було при розтягу (рис.2.2,б), або стиску (рис. 2.12, б; рис. 2.13, б; рис. 2.15).

При цьому максимальні дотичні напруження на поверхні зразка не перевищують границі пропорційності, тобто зразок працює у межах можливості застосування закону Гука:

$$\varphi = \frac{M_{кр} \cdot \ell}{G \cdot J_p}, \quad (2.21)$$

де $M_{кр}$ – крутильний момент у перерізі, що розглядається, Н·м;

ℓ – довжина ділянки, що підлягає закручуванню, м;

G – модуль пружності II роду (модуль зсуву) – характеризує жорсткість матеріалу при зсуві, МПа;

J_p – полярний момент інерції поперечного перерізу вала.

Тільки до цієї стадії навантаження справедливі формули для визначення величини дотичних напружень в будь-якій точці поперечного перерізу і на поверхні зразка, яка відображає закон розподілу напружень по діаметру перерізу вала:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{J_p} \cdot \rho, \quad (2.22)$$

де τ – дотичне напруження в точці поперечного перерізу на відстані ρ від осі вала.

Про пластичні властивості матеріалу можна судити за величиною відносної деформації – **відносний кут закручування Θ** , який визначається експериментально:

$$\Theta = \frac{\varphi}{\ell_0}, \text{ град/м} \quad (2.23)$$

і являє собою відношення повного кута закручування φ до робочої довжини зразка ℓ_0 .

Процес деформації зразка при крученні наочно відображає діаграма залежності абсолютного кута закручування φ від крутильного моменту M , яка будується за допомогою діаграмного апарату випробувальної машини КМ-50.

Випробування пластичного матеріалу. Сталь.

Аналогічно іншим статичним випробуванням матеріалів (розтяг, стиск та ін.) при крученні визначають характеристики міцності та пластичності. Для цього будують діаграму кручення в координатних осях M - φ . При чому, вісь φ повертається на кут α відносно свого горизонтально положення φ' (рис. 2.19). Цей поворот властивий саме випробувальній машині КМ-50 і враховує люфт затискача в момент увімкнення установки.

Розглянемо діаграму кручення м'якої сталі (рис. 2.19). Вона не має виступів або переходів, які характерні діаграмі розтягу (рис. 2.5), а складається з плавної кривої з переходом у прямолінійну ділянку.

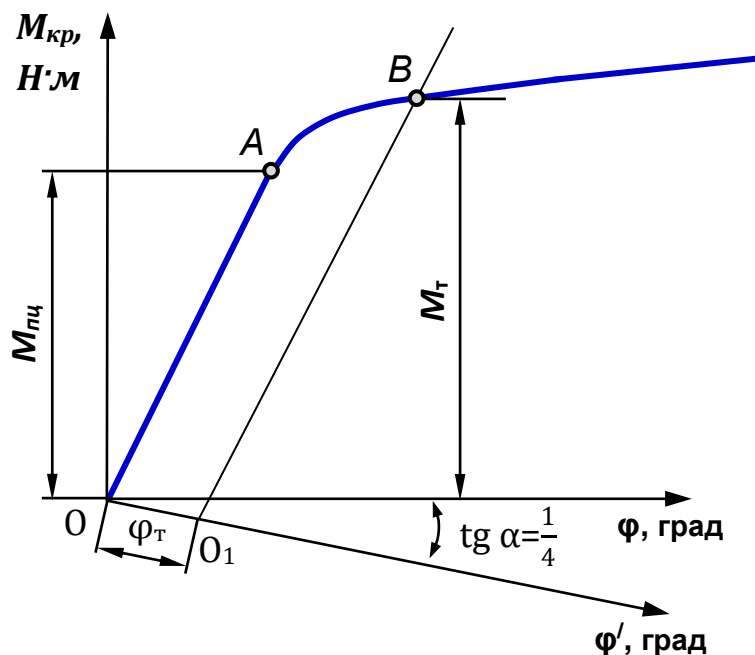


Рисунок 2.19 – Діаграма кручення м'якої сталі.

На початку навантаження (рис. 2.19) діаграма кручення пластичної сталі так само, як і діаграма розтягу, являє собою похилу пряму ОА, це свідчить про наявність пружних властивостей матеріалу. Навантаження до точки А – це крутильний момент, що відповідає границі пропорційності $M_{\text{пц}}$.

Відношення $M_{\text{пц}}$ до полярного моменту опору перерізу W_p називається **границею пропорційності** сталі при крученні:

$$\tau_{\text{пц}} = \frac{M_{\text{пц}}}{W_p}. \quad (2.24)$$

Після точки А діаграма закругляється і переходить у ділянку АВ – ділянку текучості. Але межа цієї ділянки на діаграмі ні як не виражена. Для знаходження границі текучості необхідно знайти положення точки В, яка обмежує «площину текучості». Це можливо зробити графічним способом.

Відкладаємо на похилій осі φ діаграми, що побудована за допомогою самописного пристрою випробувальної машини, відрізок OO_1 , який дорівнює значенню кута закручування з урахуванням допуску на залишковий зсув 0,3% і відповідає границі текучості:

$$\varphi_T = \frac{\ell}{r} \cdot \gamma \cdot \frac{180}{\pi},$$

де ℓ – довжина зразка, м;

r – радіус перерізу зразка, м;

γ – відносний залишковий зсув, $\gamma = 0,003$.

Із точки O_1 проводимо лінію, яка паралельна пропорційній ділянці діаграми ОА, до перехрестя з графіком залежності $M-\varphi$ в точці В.

Ордината точки В буде відповідати крутильному моменту по границі текучості M_T . Відношення M_T до полярного моменту опору перерізу W_p називається **границею текучості** сталі при крученні:

$$\tau_T = \frac{M_T}{W_p}. \quad (2.25)$$

Кінцевої точки діаграма кручення для маловуглецевої сталі не має, тому що кут закручування φ на стільки великий, що повна діаграма уздовж осі абсцис не вміщується на діаграмному апараті. Зразок зі сталі руйнується **зсувом** під дією дотичних напружень τ (рис. 2.20, б). У момент руйнування машина автоматично вимикається.

Значення крутильного моменту, при якому відбувається руйнування фіксується нерухомою стрілкою на силівимірювачу.

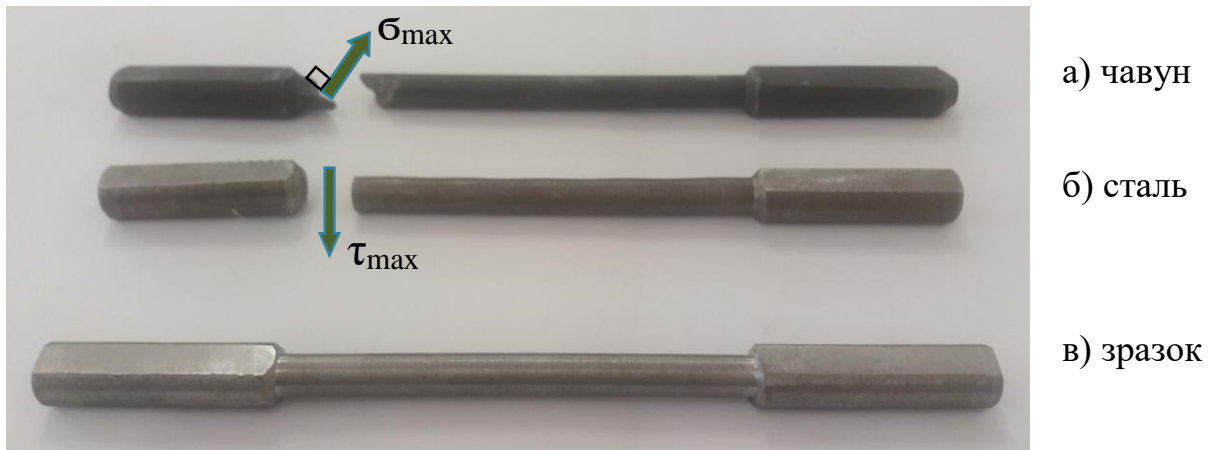


Рисунок 2.20 – Руйнування сталюого зразка.

Значення повного кута закручування знімаємо з лімбу, що розташований в нижній частині випробувальної машини (рис. 2.21).



Рисунок 2.21 – Пристрій для визначення повного кута закручування крутильної машини КМ-50.

Пластичні і крихкі матеріали по-різному поведуть себе під час кручення. Сталь, як пластичний матеріал закручується на декілька обертів відносно нерухомого перерізу. Неозброєним оком цю деформацію побачити неможливо. Вимірявши довжину і діаметр зразка після випробувань, можна підтвердити незмінність форми і розмірів. Тому проводять крейдою пряму лінію на зразку (рис. 2.18), яка потім перетворюється у гвинтову. Випробування сталі на кручення більш відповідальні, за інші випробування. Аналіз діаграми кручення підтверджує наявність пружних властивостей матеріалу.

Випробування крихкого матеріалу. Чавун.

Чавунний зразок при крученні закручується на досить невеликий кут закручування і руйнується відривом під дією нормальних напружень σ . А так як чавун – крихкий матеріал і погано опирається розриву, то і на кручення він теж не має переваг у використанні. За руйнівного навантаження $M_{\text{мц}}$ визначається границя міцності $\sigma_{\text{мц}}$. Процес випробування на кручення наочно відображається діаграмою кручення (рис. 2.22).

З початку навантаження і до моменту руйнування спостерігається нелінійна залежність між крутильним моментом $M_{\text{кр}}$ і кутом закручування φ (рис. 2.22).

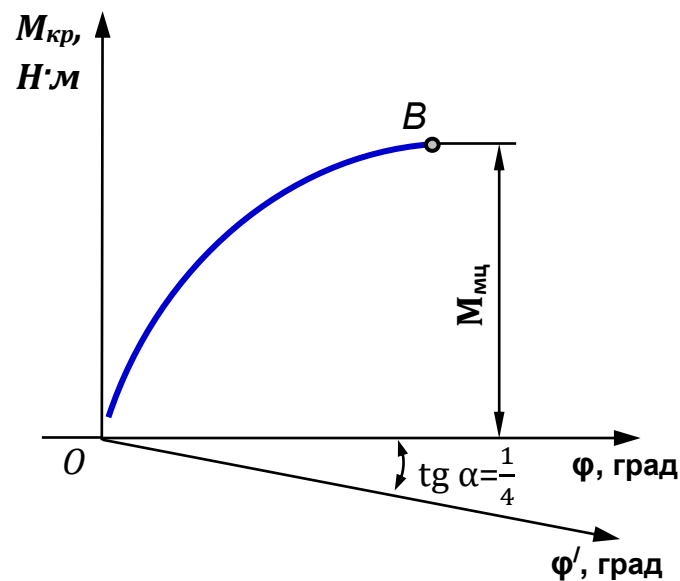


Рисунок 2.22 – Діаграма кручення чавуну.

Випробування показують, що руйнування чавунних зразків відбувається шляхом відриву по площині, нахиленої до осі зразка приблизно на кут $\alpha = 45^\circ$ під дією нормальних напружень, які направлені перпендикулярно до площини відриву (рис. 2.20, а).

Оснащення робочого місця:

- ❖ лабораторна установка – машина для випробування матеріалів на кручення КМ-50;
- ❖ зразки із сталі та чавуну;
- ❖ штангенциркуль;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання випробувань

Робота проводиться на зразках двох видів: крихкий і пластичний. В якості крихкого випробується чавун, а в якості пластичного – м'яка сталь. При випробуванні зразків проводиться запис діаграми «крутильний момент – кут закручування».

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Розглянути ескізи зразків до випробування.
2. Виміряти діаметр та довжину зразка. Результати занести у таблицю 2.8.

Таблиця 2.8 – Данні обміру зразків.

Розміри	Сталь	Чавун
Діаметр d , мм		
Робоча довжина l , мм		
Полярний момент опору $W_p = 0,2d^3$, мм ³		

3. Перевірити готовність машини КМ-50 до роботи, шкалу силовимірювача настроїти на максимальний крутильний момент 200Н·м.

4. На зразку по утворюючій поверхні нанести крейдою лінію, паралельну осі зразка та закріпити зразок у затискачах випробувальної машини.

5. Встановити необхідний масштаб запису крутильного моменту та кута закручування.

6. Увімкнути машину, довести зразки до руйнування і записати діаграми на діаграмному апараті.

7. За шкалою силовимірювача зняти величину крутильного моменту, що відповідає руйнуванню зразків.

8. Визначити величину повного кута закручування (знімається з двох лімбів машини): як суму кількості обертів малого лімбу і кута на великому лімбі.

9. Перенести у журнал лабораторних робіт діаграми кручення сталі та чавуну, приймаючи до уваги, що горизонтальну вісь кута закручування необхідно повернути на кут $\text{tg}\alpha = 1/4$.

10. Визначити основні механічні характеристики міцності та пластичності, результати занести у таблиці 2. 9, 2.10.

Таблиця 2.9 – Результати випробувань сталі та чавуну.

Навантаження і деформації	Сталь	Чавун
Крутильний момент, що відповідає границі пропорційності $M_{пц}$, Н·м		
Крутильний момент, що відповідає границі текучості M_t , Н·м		
Руйнівальний крутильний момент $M_{мц}$, Н·м		
Повний кут закручування до руйнування ϕ , град		

Таблиця 2.10 – Результати розрахунків основних механічних характеристик сталі та чавуну.

Величини	Сталь	Чавун
Характеристики міцності		
Границя пропорційності $\tau_{пц}$, Н/мм ²		
Границя текучості τ_t , Н/мм ²		
Границя міцності $\sigma_{мц}$, Н/мм ²		
Характеристики пластичності		
Відносний повний кут закручування θ , град/мм		

11. Встановити і описати характер руйнування сталюго та чавунного зразків.

12. Побудувати епюру розподілу дотичних напружень по висоті перерізу сталюго вала.

Використовуючи формулу (2.22) визначаємо дотичні напруження в центрі перерізу (в полюсі) та на поверхні вала. Зображуємо епюру (рис. 2.23).

13. Відповісти на контрольні запитання.

14. Захистити лабораторну роботу у викладача.

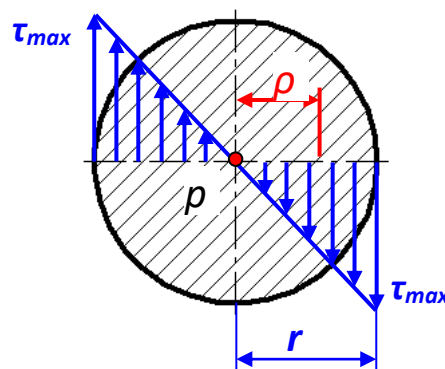


Рисунок 2.23 – Епюра розподілу дотичних напружень.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Які зразки використовують при випробуванні матеріалів на кручення?

- круглого перерізу;
- прямокутного перерізу;
- кільцевого перерізу.

2. Як змінюються лінійні розміри зразка при крученні?

- не змінюються;
- діаметр зменшується, довжина зростає;
- діаметр зростає, довжина зменшується.

3. Закон Гука для пластичних деформацій при крученні має вигляд:

$$\tau = \gamma \cdot G;$$

$$\varphi = \ell \cdot \theta;$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$

4. Які матеріали підкоряються закону Гука при крученні?

сталь;
чавун;
і сталь і чавун.

5. В яких одиницях вимірюється повний кут закручування зразка?

град;
 Н/м^2 ;
 $\text{Н}\cdot\text{м}$.

6. За якою формулою визначається полярний момент опору для круглого перерізу?

$$W_P = \frac{\pi \cdot d^3}{16};$$

$$W_P = \frac{\pi \cdot d^3}{32};$$

$$W_P = \frac{\pi \cdot d^3}{4}.$$

7. Геометричними характеристиками зразків при крученні є:

I_P та W_P ;
 A та I_P ;
 W_P та A .

9. У яких координатах записується на випробувальній машині діаграма кручення?

$M - \varphi$;
 $F - \Delta \ell$;
 $M - \Theta$.

10. Діаграма кручення записується для того, щоб:

визначити основні механічні характеристики міцності і пластичності матеріалів;

визначити основні механічні характеристики міцності матеріалів;

визначити основні механічні характеристики пластичності матеріалів.

11. Кут повороту одного перерізу відносно другого називається:

кутом закручування φ ;
кутом нахилу α ;
кутом зсуву γ .

12. Який матеріал – сталь, або чавун краще опирається крученню?

сталь;
сталь і чавун однаково опираються;
чавун.

13. Як відносно осі зразка діють дотичні напруження у поперечному перерізі при крученні сталі?

перпендикулярно осі;

паралельно осі;

під кутом 45° .

14. Як відносно осі зразка при крученні чавуну діють нормальні напруження?

під кутом 45° ;

паралельно осі зразка;

перпендикулярно осі зразка.

15. Як визначити найбільші дотичні напруження при крученні?

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_p};$$

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\max}}{I_p};$$

$$\tau_{\max} = \frac{Q_{\max}}{A}.$$

16. Як відбулось руйнування сталевого зразка при крученні і під дією яких напружень?

зсув під дією дотичних напружень τ ;

відрив під дією нормальних напружень σ ;

зріз уздовж осі зразка від дотичних напружень τ .

17. Як відбулось руйнування чавунного зразка і під дією яких напружень?

відрив під дією нормальних напружень σ ;

зсув під дією дотичних напружень τ ;

зріз уздовж осі зразка від дотичних напружень τ .

18. Як розподілені дотичні напруження по площині круглого перерізу для сталі?

по прямолінійному закону;

по параболічному закону;

однакові по всій площині.

19. Що характеризує жорсткість при крученні?

$G \cdot J_p$;

$E \cdot J_{н.л.}$;

$E \cdot A$.

20. Величина, що характеризує жорсткість матеріалу при деформації зсуву називається:

модуль пружності II-го роду G ;

модуль пружності I-го роду (модуль Юнга) E ;

нормальні напруження σ .

2.5. Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ ТРЬОХ ПРУЖНИХ СТАЛИХ ВЕЛИЧИН E , G , μ

МЕТА РОБОТИ: ознайомлення з методикою вимірювання деформацій важільним тензометром та експериментальне визначення значень модуля пружності I-го роду E , модуля пружності II-го роду G і коефіцієнта Пуассона μ для м'якої сталі.

Короткі теоретичні відомості

Багаторічна практика будування інженерних конструкцій, досвід їх експлуатації і спостереження за поведінкою при різних типах зовнішніх впливів, в тому числі, і руйнівальних показали, що лінійні і кутові переміщення конструкцій в певних межах пропорційні діючим навантаженням. Вперше зазначена закономірність була висловлена у 1678 р. Робертом Гуком у книзі «Про відновлювальну здатність або про пружність», яка була першою друкованою роботою щодо пружних властивостей матеріалів. Гук сформулював свій закон наступним чином: «**Яке переміщення, така і сила**».

Цей закон носить назву **закону Гука**, є **основним законом опору матеріалів**. Таке трактування встановлює співвідношення між переміщенням u_A (кутовим або лінійним) довільної точки A системи від зовнішнього навантаження F у вигляді:

$$u_A = \Delta F.$$

У цій формулі Δ - деякий коефіцієнт, що залежить від типу зовнішнього навантаження, місця його прикладання, положення точки A , виду переміщення, геометричних особливостей тіла та фізико-механічних властивостей матеріалу.

Геометричні зміни тіла є проявом деформації її матеріалу, інтенсивність яких визначає міцність тіла в цілому.

Сучасне трактування *закону Гука* таке: напруження прямо пропорційне відносній поздовжній деформації, з урахуванням коефіцієнта пропорційності, яким є модуль пружності I-го роду (модуль Юнга), яке відображається формулою (2.10). Зазначена залежність має місце для пружних деформацій.

Модуль поздовжньої пружності є важливою механічною характеристикою матеріалу, яка показує, як матеріал чинить опір деформаціям. Для лінійно-пружних матеріалів він має постійне значення у межах зони пружності.

З фізичної точки зору модуль поздовжньої пружності – це напруження, при якому зразок збільшує свою довжину удвічі.

При осьовому розтягу або стиску елементи конструкції зазнають поздовжню і поперечну деформації (рис. 2.24).

Поздовжня деформація це коли довжина бруса подовжується під час розтягу, або укорочується під час стиску. **Поперечна деформація** – коли поперечні розміри зменшуються під час розтягу, або збільшуються під час стиску.

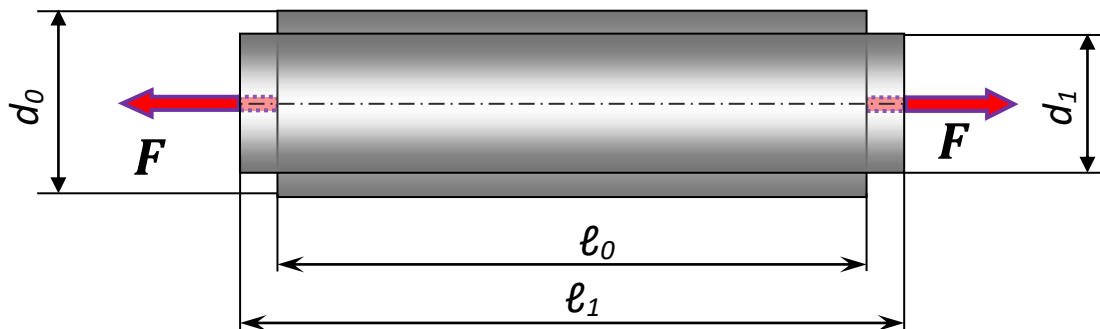


Рисунок 2.24 – Схема поздовжньої деформації під час розтягу.

Для кількісної оцінки зв'язку між поздовжніми і поперечними деформаціями визначається **коефіцієнт Пуассона – коефіцієнт поперечної деформації**, який дорівнює відношенню величини відносної поперечної деформації до величини відносної поздовжньої деформації:

$$\mu = \frac{|\varepsilon'|}{|\varepsilon|}, \quad (2.26)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона, безрозмірна величина;

ε' – відносна поперечна деформація (рис. 2.24):

$$\varepsilon_{\text{попер}} = \frac{\Delta d}{d_0}, \%$$

де Δd – абсолютне звуження, $\Delta d = d_0 - d_1$, мм;

ε – відносна поздовжня деформація (рис. 2.24):

$$\varepsilon_{\text{позд}} = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}, \%$$

де $\Delta \ell$ – абсолютне видовження, $\Delta \ell = \ell_1 - \ell_0$, мм.

Інакше вираз (2.24) можна записати так:

$$\varepsilon' = -\mu \cdot \varepsilon$$

Спостереження показують, що при розтягу в поздовжньому напрямку подовження бруса збільшується (а це знак «+»), а поперечні розміри його зменшуються (а це знак «-»).

Так само, як і модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона є характеристикою пружних властивостей матеріалу.

Для ізотропних матеріалів коефіцієнт Пуассона є однією з найбільш важливих механічних характеристик. Його значення знаходиться у межах:

$$0 \leq \mu \leq 0,5.$$

Нижня межа, тобто $\mu = 0$ свідчить про те, що це матеріали, абсолютно не мають поперечного звуження при розтягу (і розширення при стиску). Прикладом такого матеріалу є пробка. Верхня межа, тобто $\mu=0,5$ свідчить про те, що це пластичні матеріали, що змінюють при деформації тільки форму, але не об'єм (матеріал як би «перетікає» з однієї форми в іншу, не розтягуючись по суті). Прикладами таких матеріалів можуть служити парафін і деякі каучуки. Отримані з багатьох експериментів значення коефіцієнта Пуассона однакові як при розтягу, так і при стиску. Середньостатистичні значення μ для широкого кола різних металів при інженерних розрахунках зазвичай приймають рівними 0,30.

Для найбільш поширених матеріалів значення коефіцієнта Пуассона зведені до таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Значення коефіцієнта Пуассона для різних матеріалів.

№	Матеріал	Коефіцієнт Пуассона
1	Різні марки сталі	$\mu = 0,25 \dots 0,35$
2	Чавун	$\mu = 0,23 \dots 0,27$
3	Каучук	$\mu = 0,47$
4	Бронза	$\mu = 0,49$
5	Алюмінієво-магнієві сплави	$\mu = 0,32 \dots 0,36$
6	Мідь	$\mu = 0,31 \dots 0,34$
7	Скло	$\mu = 0,25$
8	Бетон	$\mu = 0,16-0,18$

Модуль пружності другого роду характеризує пружні властивості ізотропних твердих тіл в умовах деформації зсуву. Тому частіше його ще називають **модулем зсуву**.

Довільну деформацію ізотропного твердого тіла можна розбити на дві важливі складові – деформацію розтягу або стиску, яка пов'язана зі зміною лінійних розмірів тіла, та деформацію зсуву, при якій змінюється форма тіла.

Із розгляду деформації чистого зсуву шляхом перетворень з урахуванням узагальненого закону Гука для плоского напруженого стану модуль пружності II-го роду G визначається за формулою:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (2.27)$$

Прийнято вважати, що формула (2.27) пов'язує між собою три пружні сталі величини: модуль пружності I-го роду E , модуль пружності II-го роду G та коефіцієнт Пуассона μ .

Модуль пружності II-го роду при зсуві, так само як і модуль Юнга при розтягу-стиску, є коефіцієнтом пропорційності, який пов'язує дотичні напруження τ та кутову деформацію γ :

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (2.28)$$

Вираз (2.28) має назву **закону Гука при зсуві** і встановлює прямо-пропорційний зв'язок між напруженням τ та деформацією γ .

Для найбільш розповсюджених матеріалів модуль зсуву G має наступні значення (табл. 2.12):

Таблиця 2.12 – Значення модуля зсуву для різних матеріалів.

№	Матеріал	Модуль зсуву G , МПа
1	Різні марки сталі	$(0,80 \dots 0,83) \cdot 10^5$
2	Чавун	$(0,45 - 0,80) \cdot 10^5$
3	Алюмінієво-магнієві сплави	$0,27 \cdot 10^5$
4	Латунь	$0,35 \cdot 10^5$
5	Пластмаса	$(0,0002 - 0,25) \cdot 10^5$
6	Дерево	$0,0065 \cdot 10^5$

Дослідження пружних сталих величин проводять на зразку прямокутного перерізу (рис. 2.1, г), прикладаючи до нього осьове розтягуюче навантаження. Форма зразка регламентується ГОСТом.

Лабораторні дослідження проводяться з використанням універсальної випробувальної машини УИМ-50, встановлюючи зразок в затискачі машини, як показано на рисунку 2.25, а. У трьох напрямках до зразка кріпляться тензометри (рис. 2.25, б). Два з них (лівий і правий) призначені для вимірювання поздовжніх деформацій, а один (середній) – для вимірювання поперечної деформації.

Оскільки випробування повинні відбуватись у межах пружних деформацій, то спочатку треба визначити максимальне навантаження, при якому напруження не перевищують границі пропорційності:

$$F_{\text{пц}} \leq \sigma_{\text{пц}} \cdot A.$$

А потім, проводжуючи дослідження, прикласти статичне навантаження до границі пропорційності.



а)



б)

Рисунок 2.25 – Підготовка зразка до випробувань:
а) встановлення зразка в затискачі машини УИМ-50,
б) кріплення тензометрів.

Оснащення робочого місця:

- ❖ лабораторна установка – універсальна випробувальна машина УИМ -50;
- ❖ сталевий зразок прямокутного перерізу, встановлений у затискачах машини;
- ❖ важільно-стрілочний механічний тензометр Гугенбергера – 3 шт;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання випробувань

Експериментальне визначення модуля Юнга, модуля зсуву і коефіцієнта Пуассона проводиться на сталевому зразку у вигляді довгої пластини, що піддається розтягуванню.

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Виміряти розміри зразка та визначити площу поперечного перерізу.
2. Встановити зразок в затискачах випробувальної машини.
3. Підібрати три тензометри з однаковою базою та закріпити їх на зразку згідно схеми (рис. 2.26). База тензометрів повинна складати 20мм.

4. Визначити початкове та максимальне навантаження, зробити експеримент при шістьох рівнях навантаження, при цьому $\Delta F = 20\text{кН}$.

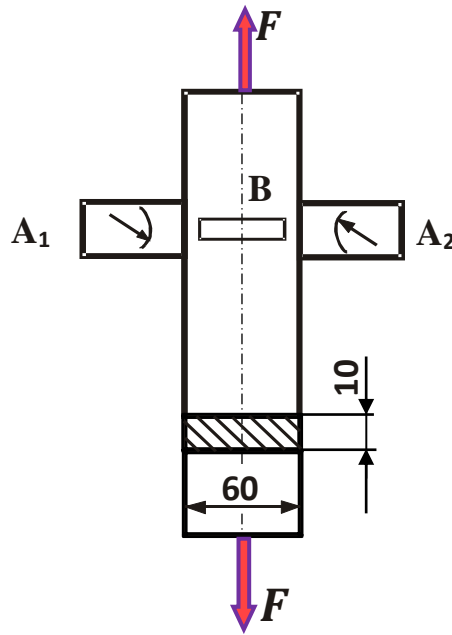


Рисунок 2.26 – Схема установки тензометрів та ескіз зразка.

5. При кожному рівні навантаження зняти показання з тензометрів та занести до журналу спостережень (табл. 2.12), підрахувати абсолютну різницю показань.

Таблиця 2.12 – Журнал спостережень.

Навантаження, кН		Показання тензометрів та їх прирощення					
F	ΔF	A_1	ΔA_1	A_2	ΔA_2	B	ΔB
0			-		-		-
20							
40							
60							
80							
Σ	-	-		-		-	

6. Провести обробку результатів вимірювань.

Визначити середні значення прирощень показників поздовжньої деформації (тензометри А) та поперечної деформації (тензометр В):

$$\Delta A_{\text{cp}} = \frac{\Sigma(\Delta A_{1i} + \Delta A_{2i})}{2 \cdot i};$$

$$\Delta B_{\text{cp}} = \frac{\Sigma \Delta B_i}{i}.$$

7. Визначити значення поздовжньої та поперечної деформації за формулами:

$$\Delta\varepsilon_{\text{Аср}} = \frac{\Delta A_{\text{ср}}}{\ell_A \cdot K_A};$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{Вср}} = \frac{\Delta B_{\text{ср}}}{\ell_B \cdot K_B}.$$

8. Коефіцієнт Пуассона визначити за формулою:

$$\mu = \left| \frac{\Delta\varepsilon_{\text{Вср}}}{\Delta\varepsilon_{\text{Аср}}} \right|.$$

9. Модуль пружності I роду визначити за формулою:

$$E = \frac{\Delta F}{A \cdot \Delta\varepsilon_{\text{Аср}}},$$

де А – площа поперечного перерізу зразка, А = 600 мм².

10. Модуль пружності II роду визначити за формулою:

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

11. Порівняти отримані результати випробувань з довідковими даними (табл. 2.13).

Таблиця 2.13 – Порівняння отриманих результатів з довідковими даними.

Величина	Довідникові дані (для сталі)	Експериментальні дані
E	2 · 10 ⁵ МПа	
G	8 · 10 ⁴ МПа	
μ	0,3	

12. Відповісти на контрольні запитання.

13. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Який зв'язок між пружними сталими величинами матеріалу?

$$\sigma = \frac{E}{2(1 + \mu)};$$

$$\tau = G \cdot \gamma;$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$

2. Який вигляд має закон Гука при чистому зсуві:

$$\tau = G \cdot \gamma;$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon;$$

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

3. Як позначається модуль Юнга(модуль поздовжньої пружності матеріалу)?

E;

G;

μ.

4. Як позначається модуль пружності матеріалу при зсуві?
G;
E;
 μ .
5. Який фізичний зміст модуля пружності матеріалу E ?
характеризує його жорсткість;
характеризує його міцність;
характеризує його стійкість.
6. Який параметр характеризує жорсткість матеріалу при розтягу-стиску?
модуль пружності I роду E ;
модуль пружності II роду G ;
границя міцності матеріалу $\sigma_{\text{мц}}$.
7. Який параметр характеризує жорсткість матеріалу при зсуві (зрізі)?
модуль пружності II роду G ;
модуль пружності I роду E ;
коефіцієнт Пуассона μ .
8. Яка пружна стала матеріалу характеризує зв'язок поперечної та поздовжньої його деформації?
коефіцієнт Пуассона μ ;
модуль пружності I роду E ;
модуль пружності II роду G .
9. Яка одиниця вимірювання модуля Юнга матеріалу E ?
Н/м²;
Н/м;
Н·м.
10. Яка одиниця вимірювання модуля пружності матеріалу при зсуві G ?
Н/м²;
Н/м;
Н·м.
11. Яка одиниця вимірювання коефіцієнта Пуассона μ для сталі?
безрозмірна величина;
мм;
відсотки.
12. Значення коефіцієнта Пуассона для сталі?
 $\mu=0,3$;
 $\mu=0,5$;
 $\mu=0$.
13. Для якого матеріалу коефіцієнт Пуассона має значення $\mu=0$?
для пробки;
для чавуну;
для сталі.

14. Для якого матеріалу коефіцієнт Пуассона має значення $\mu=0,5$?
для каучуку;
для пробки;
для сталі.
15. Від чого залежить значення трьох пружних сталих величин матеріалу?
від властивостей матеріалу;
від розмірів деталі;
від зовнішніх навантажень.
16. Яка пружна стала величина пов'язує нормальні напруження і деформації при розтягу (стиску) матеріалу?
модуль пружності I роду;
модуль пружності II роду;
коефіцієнт Пуассона.
17. Яка пружна стала величина пов'язує дотичні напруження і кут зсуву при деформації зсуву?
модуль пружності II роду;
модуль пружності I роду;
коефіцієнт Пуассона.
18. Пружні сталі матеріалу експериментально визначаються при навантаженні зразка:
в зоні пружних деформацій;
в зоні текучості матеріалу;
до появи найбільших напружень.
19. Для всіх відомих матеріалів відносна поперечна деформація завжди
менша за відносну поздовжню деформацію;
дорівнює відносній поздовжній деформації;
більша за відносну поздовжню деформацію.
20. Що називають базою тензметра при експериментальному визначенні пружних сталих матеріалу?
частину довжини зразка, де вимірюється зміна її величини;
повну довжину зразка, що розтягують;
поперечний розмір зразка.

2.6. Лабораторна робота ВИЗНАЧЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ СТАЛІ ПРИ УДАРНОМУ ЗГІНІ ТА РОЗТЯГУ

МЕТА РОБОТИ: дослідження поведінки сталевих зразків під час ударного згину і розтягу та визначення питомої ударної в'язкості.

Короткі теоретичні відомості

Рішення інженерних задач базується на наближеній теорії пружного удару, у якій приймаються такі основні припущення:

1. Кінетична енергія тіла, що вдаряється, цілком переходить у потенційну енергію деформацій, при цьому зневажають енергією, яка йде на деформацію тіла, що вдаряється.

2. Закон розподілу напружень і деформацій по об'єму тіла залишається таким же, як і при статичній дії сил, при цьому не враховується зміна розподілу напружень і деформацій у тому місці, де відбувається співудар тіл, а також за рахунок коливань високої частоти, що супроводжують явище удару у всьому обсязі тіла.

Припустимо, що дуже жорстке тіло A вагою Q , деформацією якого можна зневажати, падаючи з деякої висоти h , ударяє по іншому тілу B , яке опирається на пружну систему C . В окремому випадку це може бути падіння вантажу на кінець призматичного стержня, інший кінець якого закріплений (поздовжній удар), падіння вантажу на балку, що лежить на опорах (згинаючий удар).

Матеріал у порівнянні зі статичним навантаженням інакше реагує на удар.

Одержані при статичних випробуваннях, тобто під дією дуже повільно наростаючого навантаження, механічні характеристики не можуть оцінити здатність матеріалу протистояти ударному навантаженню. Випробування на ударну в'язкість відносяться до динамічних видів випробувань, які застосовують, щоб оцінити властивість матеріалів витримувати ударні навантаження. Ці випробування особливо важливі для високоміцних сплавів, які можуть мати задовільні характеристики пластичності при звичайних випробуваннях, але крихко руйнуються у реальних конструкціях при наявності концентраторів. Швидкість деформування і деформація при динамічних випробуваннях на декілька порядків більші, ніж при статичних. При великих швидкостях збільшується небезпека крихкого руйнування. Ця небезпека особливо зростає при наявності в деталі різного роду надрізів (отвори, виточки, галтелі, канавки і т. п.).

Зазначені обставини призводять до необхідності введення деякої характеристики, що дає оцінку поведінки матеріалу при динамічних навантаженнях і виявляє небезпеку крихкого руйнування. Для цього призначені

спеціальні випробування на ударну в'язкість – **ударна проба матеріалу**.

Ударна в'язкість – це складна комплексна характеристика, яка залежить від декількох більш простих механічних властивостей.

Випробування на удар проводять на спеціальних маятникових копрах із застосуванням стандартних зразків. Щоб можна було порівнювати отримані результати, ГОСТ 9454-78 стандартизує методи визначення ударної в'язкості, форму й розміри зразків, надрізів (рис. 2.27), а також умови їх механічної обробки, якість обробки поверхні, оскільки всі ці фактори впливають на величину ударної в'язкості.

Необхідність стандартизації викликана тим, що неоднорідність напруженого стану в зоні надрізу і складність явищ, які протікають при ударному руйнуванні, не допускають застосування закону подібності (як, наприклад, в разі розтягу гладких зразків). Це означає, що для геометрично подібних, але різних за розмірами зразків величина ударної в'язкості не буде однаковою, вона залежить від температури зразка при випробуваннях.



а)



б)

Рисунок 2.27 – Зразки для випробувань на ударну в'язкість:
а) при ударному згині, б) при ударному розтягу.

Ударний згин зразка

Найбільш поширеним видом ударних випробувань є випробування на ударний згин зразка з надрізом, загальний вигляд якого зображено на рисунку 2.27, а. На рисунку 2.28 зображено ескіз зразка з надрізом. Надріз роблять для

того, щоб створити додаткову умову, що полегшує крихке руйнування зразка. Поблизу надрізу виникає об'ємний напружений стан (тривісний розтяг), що ускладнює розвиток пластичної деформації і сприяє крихкому руйнуванню.

Наявність різкого переходу в розмірах поперечного перерізу виробу, а також перші сліди тріщин сприяють виникненню крихкості та викликають передчасне руйнування матеріалу. Тому випробовувані зразки надрізають з одного боку, щоб викликати в них різку неоднорідність напружень при ударі й ускладнити пластичну деформацію, що полегшує оцінку схильності металу до переходу в крихке становище.

Ударна в'язкість при згині a_H визначається як відношення роботи A , необхідної для руйнування ударом спеціального зразка, до площі поперечного перерізу в місці надрізу:

$$a_H = \frac{A}{S}, \quad (2.29)$$

де a_H – питома ударна в'язкість, Дж/м²;

A – робота, витрачена на руйнування (злом) зразка при ударі, Дж;

S – площа перерізу зразка в місці надрізу (рис. 2.28), м².

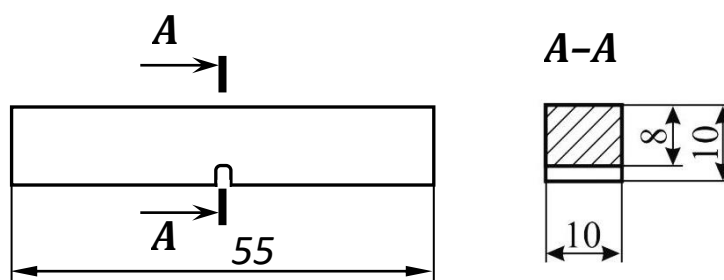


Рисунок 2.28 – Ескіз зразка для випробувань на ударну в'язкість при згині.

Чим більш пластичний матеріал, тим більше величина роботи, що витрачається на його руйнування. Тобто пластичний матеріал краще чинить опір ударним навантаженням.

Величина ударної в'язкості залежить від температури зразків при випробуваннях. Для порівняльної оцінки якості матеріалу проводять випробування при кімнатній температурі. Ударна в'язкість сильно залежить також від наявності різного роду дефектів в структурі металу (тріщини, порожнечі, неметалеві включення та ін.). Тому випробування на ударну в'язкість відносяться також до числа поширених технологічних проб, які виявляють якість матеріалу. При ударному згині пластичний матеріал змінює свої властивості і руйнування набуває крихкого характеру (рис. 2.29, б).



а)



б)

Рисунок 2.29 – Зразок при випробуванні на ударний згин: а) загальний вигляд, б) зруйнований зразок.

Поява крихкого зламу пояснюється тим, що діаграма розтягу волокон, що прилеглі до надрізу, і особливо границя текучості сильно підвищені, як під впливом швидкості, так і під впливом надрізу, що створює різкий градієнт напружень і тим ускладнює деформацію. А істинний опір розриву не залежить від цих чинників і, при досить інтенсивній дії останніх, може виявитися нижче опору пластичної деформації (границі текучості). Завдяки цьому, на появу крихкості впливають:

- а) температура зразка, при зниженні якої підвищується границі текучості, збільшуючи внутрішню тертя, що полегшує появу крихкості;
- б) швидкість удару, збільшення якої також підвищує границю текучості;
- в) форма зразка, так як широкі зразки з ускладненою поперечною деформацією легше призводять до крихкого зламу, ніж вузькі.

Крихкий злам при кімнатній температурі проявляється у таких матеріалів, що пройшли неналежну термічну і механічну обробку, наприклад, крупнокристалічне залізо (рекристалізація після появи критичного наклепу), зістарене залізо (що отримало деформацію при 200-300°C), хромонікелева сталь, відпущена з малою швидкістю охолодження (крихкість відпустки), інші види випробування, в тому числі ударний розрив. Випробування на удар без надрізу застосовується тільки під час випробувань колій.

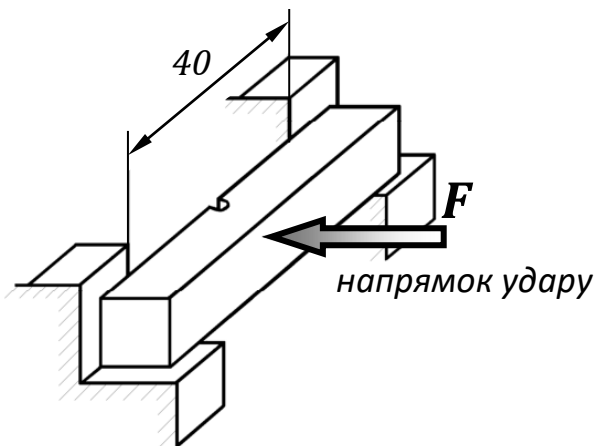
Наявність різкого переходу в розмірах поперечного перерізу виробу, а також перші сліди тріщин сприяють виникненню крихкості та викликають передчасне руйнування матеріалу. Тому випробовувані зразки надрізають з

одного боку, щоб викликати в них різку неоднорідність напружень при ударі й ускладнити пластичну деформацію, що полегшує оцінку схильності металу до переходу в крихке становище.

Зразок для випробувань встановлюють на опори копра (рис. 2.30, а) і піддають ударній дії масивним маятником, що падає з певної висоти. Ескіз установки зразка наведено на рисунку 2.30, б).



а)



б)

Рисунок 2.30 – Установка зразка на опори а) та його ескіз при випробуваннях на ударний згин б).

Біля дна надрізу при ударі, внаслідок різкої зміни площі поперечного перерізу разом з напруженнями, спрямованими уздовж осі зразка, з'являються напруження, перпендикулярні до осі, тобто виникає об'ємний напружений стан із позитивними головними напруженнями. Ці напруження ускладнюють пластичну деформацію в матеріалі зразка. Ще більш суттєве те, що надріз зосереджує всю деформацію, поглинаючи енергію удару, в порівняно невеликому об'ємі матеріалу.

Ударні випробування зразків на ударний згин проводять на маятниковому копрі МК-30 з граничною енергією копра 300 Дж. Швидкість ножа копра змінюється від 4 до 7 м/с, що відповідає підняттю ножа маятника на висоту від 0,8 до 2,6 м.

Роботу, що витрачається на руйнування зразка, визначають, як різницю запасів енергії маятника до і після удару:

$$A = mg \cdot (H - h),$$

де H – висота підняття центру ваги маятника до удару, м;

h – висота підняття центру ваги маятника після удару, м.

Ударний розтяг зразка

Для випробувань на ударний розтяг використовують зразок циліндричної форми (рис. 2.31), на кінцях якого нарізана різьба, довжиною ℓ_2 .

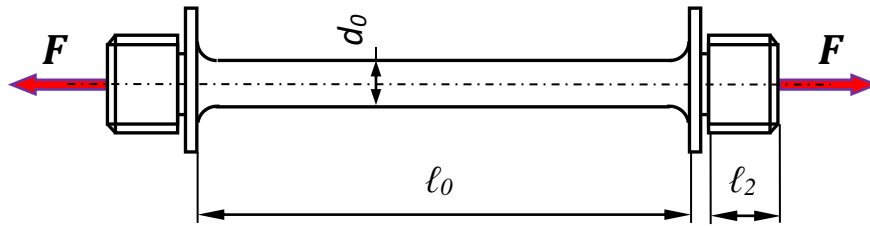


Рисунок 2.31 – Ескіз зразка для випробувань на ударний розтяг.

Один кінець зразка вкручують в спеціальне пристосування в молоті маятника, а на другий накручують «тарілку» (рис. 2.32).



Рисунок 2.32 – Зразок вкручений у маятниковий пристрій.

Розтягуюче навантаження миттєво подається на зразок в момент удару фіксуючого бруска по ковадлах. Цей тип кріплення зразка дає постійний розподіл енергії удару в розрахунку на площу зразка. Після випробування на ударний розрив отримуємо зразок з такими ж наслідками, як і при випробуванні на статичний розтяг. За короткий період часу зразок стає довшим, з'являється слабке місце – «шийка» і відбувається відрив (рис.2.33). Характер руйнування зразка – відривання зі зсувом.

При ударному розриві деформації та напруження залежать від довжини стержня ℓ_0 і модуля поздовжньої пружності E . Таким чином, для зниження напружень збільшують довжину зразка. Отже, при поздовжньому ударі величина напружень залежить від об'єму. Таким чином **питома ударна в'язкість** a_n визначається як відношення роботи, витраченої на руйнування зразка, до його об'єму:

$$a_H = \frac{A}{V}, \quad (2.30)$$

де a_H – питома ударна в'язкість, Дж/м³;

A – робота, витрачена на руйнування (розтяг) зразка при ударі, Дж;

V – об'єм матеріалу зразка, м³.



а)



б)

Рисунок 2.33 – Руйнування зразка при ударному розриві:

а) зруйнований зразок (частина зразка залишилась у «тарілці», а частина – у маятнику), б) загальний вигляд зразка до та після руйнування.

Роботу руйнування визначають на спеціальному ударному копрі Шарпи, визначаючи кут підйому маятника після удару. По спеціальним таблицям (Додаток 4) цей кут переводять в роботу руйнування.

У результаті випробувань завжди виявляється, що динамічний тимчасовий опір вище статичного (перевищення до 100%), границя текучості також підвищена, і до того ж більша ніж тимчасовий опір на 20-60%. Подовження або дорівнює або більше статичного; звуження шийки майже таке ж саме. Характерна ударна крихкість проявляється при цьому випробуванні у дуже небагатьох металів (наприклад у сталі з вмістом фосфору > 0,10%).

Вимірювання сил при ударі представляє великі труднощі і у лабораторну практику ще не увійшло. Одним з недоліків традиційного методу випробування

на удар є те, що в результаті визначається лише сумарна енергія руйнування. Іноді застосовують інструментальні методи контролю випробування, суть яких полягає в безперервному вимірюванні навантаження в процесі руйнування. Це дає можливість для оцінки крім енергії руйнування ще й максимального зусилля при руйнуванні, що дозволяє оцінити перехід від крихкого до пластичного механізму руйнування при зниженні температури.

Оснащення робочого місця

- ❖ лабораторні установки – маятниковий копер МК-30А та копер Шарпі;
- ❖ зразки на ударний розтяг та згин;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Проведення випробувань

Робота складається з двох етапів: на першому етапі проводимо випробування на ударний згин, на другому етапі – випробування на ударний розтяг.

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Перед випробуваннями слід обміряти розміри зразків: на ударний згин – у місці надрізу, на ударний розтяг – робочу довжину і діаметр.
2. Для випробувань на ударний згин: встановити відстань між опорами. Якщо поперечний переріз зразка становить $10 \times 10 \text{ мм}^2$, то відстань між опорами 40 мм.
3. Злегка відхиливши маятник в сторону його підйому, покласти зразок на опори так, щоб удар падаючого маятника припадав з боку, протилежного надрізу, відносно опор з похибкою не більше $\pm 0,5$ мм, а надріз знаходився в одній площині з вістрям ножа маятника (рис. 2.30, б).
4. Підняти маятник на висоту, відповідну енергії удару, що задається і закріпити заціпку стопором. Не рекомендується встановлювати надмірно велику енергію удару в порівнянні з необхідною для руйнування зразка, так як це знижує точність результату випробування.
5. Звільнити запобіжник, маятник вільно падає, руйнуючи зразок. При цьому показчик шкали покаже величину роботи, витраченої на руйнування зразка. Після руйнування зразка зупинити гойдання маятника гальмом.
6. Знайти енергію, витрачену на руйнування зразка $A_n = A_0 - A_1$.
7. Визначити ударну в'язкість матеріалу зразка a_n . Результати розрахунків занести у таблицю 2.14.

Таблиця 2.14 – Журнал спостережень при ударному згині.

Потенційна енергія маятника до руйнування зразка (робота)	Потенційна енергія маятника після руйнування зразка (робота)	Робота руйнування А, Н·м	Питома ударна в'язкість a_H , Н·м/см ²
$A_0 =$	$A_1 =$	$A = A_0 - A_1$	$a_H = \frac{A}{S}$

8. Для випробувань на ударний розтяг: накрутити на один кінець зразка спеціальний пристрій «тарілку», а другий вкрутити в молот маятника.

9. Підняти маятник на висоту, що відповідає нульовій відмітці на шкалі силовимірювача і закріпити запобіжником.

10. Звільнити запобіжник. Розтягуюче навантаження миттєво подається на зразок у момент удару фіксуєної «тарілки» бруска по ковадлах Зупинити маятник при зворотному ході за допомогою стрічкового гальма.

11. Визначити за шкалою копра кут зльоту маятника після удару, та за допомогою спеціальних таблиць перевести його в роботу руйнування.

12. Визначити об'єм робочої частини зразка та розрахувати ударну в'язкість матеріалу a_H . Результати випробувань занести у таблицю 2.15

Таблиця 2.15 – Журнал спостережень при ударному розтягу.

Кут зльоту маятника до руйнування зразка, град	Кут зльоту маятника після руйнування зразка, град	Робота руйнування А, Н·м (по таблиці)	Питома ударна в'язкість a_H Н·м/см ³
$\alpha_0 =$	$\alpha_1 =$		$a_H = \frac{A}{V}$

13. Під час проведення випробувань висувають наступні вимоги: при вирізанні заготовок метал зразків не повинен піддаватися наклепу та нагріву, які змінюють властивості металу; якщо в результаті випробування зразок не зруйнувався повністю, то показник якості матеріалу вважається не встановленим.

14. Відповісти на контрольні запитання.

15. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Що таке динамічне навантаження?

короткочасний силовий вплив;

навантаження, що відповідає границі пропорційності;

навантаження, що відповідає границі міцності.

2. Величина, що оцінює вплив частоти вимушених коливань називається:

коефіцієнтом динамічності;
коефіцієнтом пружності;
коефіцієнтом запасу міцності.

3. Навантаження, при якому швидкість деформування взаємодіючих тіл, змінюється за короткий період часу називається:

ударним;
статичним;
крутильним.

4. Відношення роботи руйнування стандартного зразка до площі його поперечного перерізу в місці надрізу називається:

питомою ударною в'язкістю;
коефіцієнтом запасу міцності;
границею міцності.

5. За допомогою якого пристрою проводять випробування на удар?

маятниковий копер;
крутильна машина;
універсальна розривна машина.

6. Зразок якого перерізу використовують на ударний згин?

прямокутного;
круглого;
двотаврового.

7. Зразок якого перерізу використовують на ударний розтяг?

круглого;
прямокутного;
двотаврового.

8. Що характеризує здатність матеріалу протистояти крихкому руйнуванню?

ударна в'язкість;
граніця міцності;
відносне залишкове видовження.

9. Для чого роблять надріз на зразку при випробуваннях на ударний згин?

для того, щоб створити концентратор напружень;
для того, щоб зразок не перевернувся;
для того, щоб зразок розтягнувся.

10. Для чого проводять випробування на ударну в'язкість?

щоб оцінити властивість матеріалів витримувати ударні навантаження;
щоб оцінити опір розриву;
щоб оцінити властивість матеріалу витримувати зовнішні навантаження.

11. Яку геометричну характеристику використовують при ударному розтягу?

об'єм зразка;
момент опору перерізу зразка;
момент інерції перерізу зразка.

12. Яку геометричну характеристику використовують при ударному згині?

площу перерізу зразка;

момент інерції перерізу зразка;

момент опору перерізу зразка.

13. Як визначають роботу руйнування при ударних випробуваннях на маятниковому копрі?

як різницю запасів енергії маятника до і після удару;

як суму кінетичної та потенційної енергії;

як різницю зовнішніх сил.

14. Яким символом позначається робота руйнування?

A;

F;

σ_t .

15. Одиниці вимірювання роботи руйнування при ударі?

Дж;

МПа;

H.

16. З яких одиниць складається Джоуль?

H·м;

H/м²;

кH.

17. Який характер руйнування зразка з пластичного матеріалу під час випробувань на ударний згин?

крихкий;

пластичний;

стійкий.

18. Одиниці вимірювання питомої ударної в'язкості?

$\frac{H \cdot m}{mm^2}$;

$\frac{H}{mm^2}$;

$\frac{H}{mm^2}$;

$\frac{град}{m}$.

19. Яким символом позначається питома ударна в'язкість?

α_H ;

λ ;

ε .

20. Який діаметр зразка, що використовують при випробуваннях на ударний розтяг?

5мм;

10мм;

15мм.

Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЕФОРМАЦІЙ ТА НАПРУЖЕНЬ ЄЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

Роботи цього циклу мають велике значення для засвоєння і закріплення основного теоретичного матеріалу курсу механіки матеріалів і конструкцій. По суті вони носять характер лабораторно-практичних занять. У кожній роботі студенту пропонується вирішити задачу на визначення деформацій, напружень, зусиль або переміщень у тому чи іншому об'єкті, після чого перевірити відповідність теоретичних розрахунків з результатами експерименту. Частина робіт містить елементи дослідження. По кожній роботі наводяться теоретичні відомості, необхідні формули і порядок виконання роботи.

Експериментальні та теоретичні результати порівнюють між собою. Відхилення значень повинно знаходитись у межах [15%], у такому випадку експеримент достовірно підтверджує теоретичні передумови.

Частина робіт третього розділу виконується не на універсальних випробувальних машинах, а на спеціалізованих універсальних стендах (столах). Це створює сприятливі умови для самостійного проведення робіт.

3.1. Лабораторна робота

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ НОРМАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ ПО ВИСОТІ ПЕРЕРІЗУ БАЛКИ

МЕТА РОБОТИ: визначення нормальних напружень по висоті перерізу двотаврової балки і порівняння величин, отриманих експериментально, з відповідними значеннями, знайденими теоретично.

Короткі теоретичні відомості

Згином називається такий вид навантаження, при якому в поперечних перерізах стержня виникають згинальні моменти. У разі, якщо згинальний момент є єдиним силовим фактором у перерізі, то згин називається **чистим**. Якщо в поперечних перерізах бруса поряд із згинальним моментом також виникають поперечні сили (це спостерігається в більшості випадків), такий згин називають **поперечним**. Якщо площина дії згинального моменту проходить через одну з головних центральних осей поперечного перерізу, то згин називають **прямим**. Стержень, що працює на згин, називають **балкою**.

Як показують досліди, при вказаній дії сил вісь балки викривляється і вона згинається. Балки є найбільш поширеними елементами споруд і машин, що приймають тиск від інших елементів конструкцій і передають їх тим частинам, які підтримують балку. Таким чином на балку діють прикладені сили і реакції опор. Опори бувають трьох типів:

- шарнірно-нерухомі;
- шарнірно-рухомі;
- жорстко-закріплені.

Для визначення невідомих реакцій використовують рівняння статки, які відображають умову, що балка в цілому при дії всіх сил і реакцій знаходиться в рівновазі. Так як ці сили лежать в одній площині, то для них можна скласти три рівняння рівноваги.

При згині в перерізах балки виникають внутрішні силові фактори: поперечні сили Q_y і згинальні моменти M_x . Сила Q_y зсуває переріз відносно суміжного уздовж вертикальної осі Y , а згинальний момент M_x повертає переріз відносно суміжного навколо осі X , що призводить до викривлення осі балки, тобто згину.

Розглянемо призматичний брус з вертикальною площиною симетрії. Брус згинається парами сил M , розташованими по його торцях (рис. 3.1).

У будь-якому поперечному перерізі такого бруса діятиме тільки згинальний момент, що дорівнює M ($M = const$), поперечна сила дорівнює нулю $Q = 0$. Такий згин є **чистим згином** (рис. 3.1).

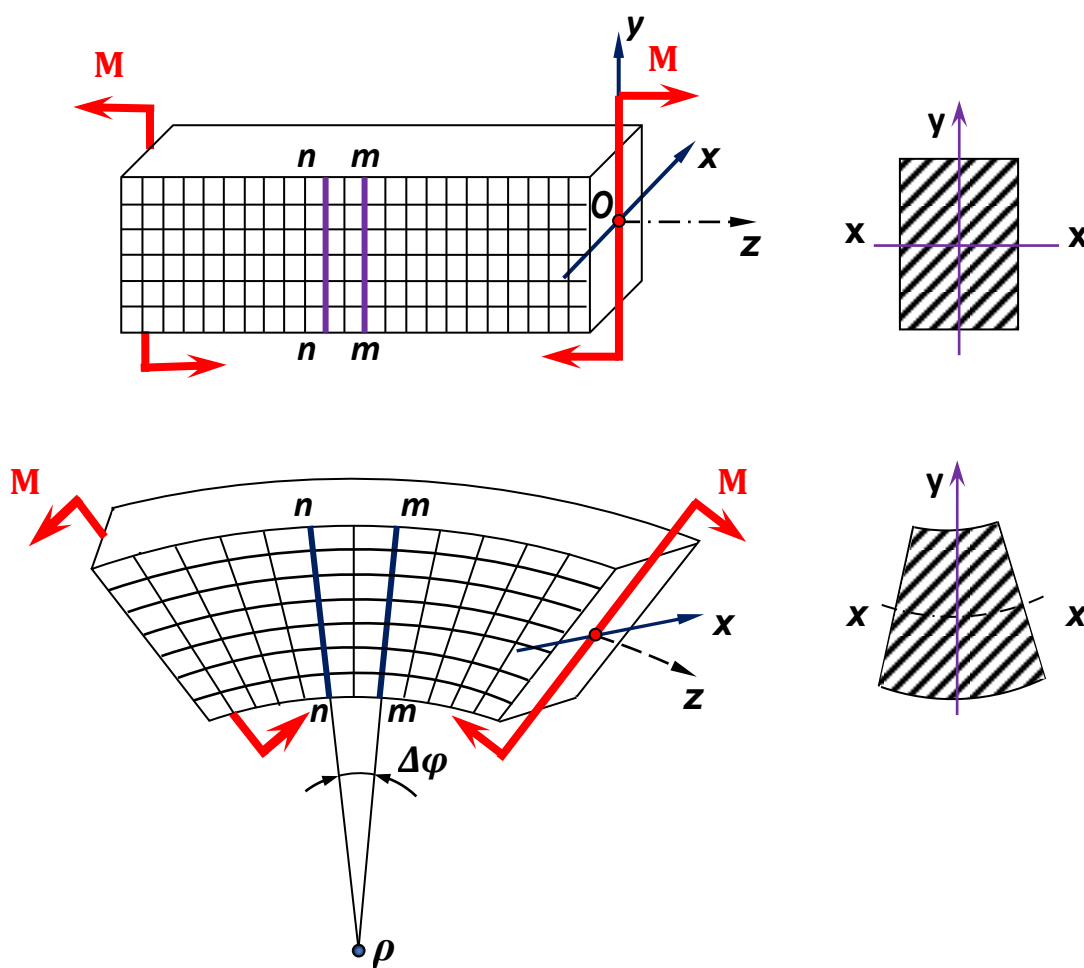


Рисунок 3.1 – Деформація бруса в площині симетрії.

Після згину виявляється:

- первісно паралельні прямі $n-n$, $m-m$ і після деформації бруса залишаються прямими, але повертаються одна відносно одної на деякий кут $\Delta\varphi$;
- у верхніх частинах бруса відстань між вертикальними лініями сітки збільшується, в той час як у нижніх частинах вона зменшується;
- ширина поперечного перерізу бруса у верхній його частині дещо зменшується, а в нижній – збільшується.

Аналіз поведінки матеріалу при чистому згині дав змогу сформулювати наступні гіпотези, які покладені в основу елементарної теорії чистого згину:

1. Матеріал балки підкорюється закону Гука;
2. При чистому згині плоскі перерізи бруса не викривляються, залишаються плоскими і при деформації обертаються один відносно одного (гіпотеза плоских перерізів).
3. Поздовжні волокна бруса зазнають простого розтягу або стиску, не спричиняючи взаємного бокового тиску.
4. Нормальні напруження, змінюючись по висоті перерізу, залишаються однаковими по ширині.

Деформація згину складається з деформації розтягу і стиску, які відокремлюються **нейтральним шаром**. Лінія перетину нейтрального шару з площиною поперечного перерізу називається **нейтральною віссю** перерізу.

Визначимо закон розподілу нормальних напружень, що виникають при чистому згині бруса, по висоті перерізу балки. Для цього розглянемо деформацію ділянки бруса, вирізаної двома перерізами $m-m$ і $n-n$, який показано на рисунку 3.1. Відстань між вказаними перерізами елементарно мала і складає dx .

Після деформації ця ділянка має такий вигляд, як показано на рисунку 3.2.

Нейтральний шар зображений лінією $O_1O_2 = dx$. Він розділяє зону розтягу бруса від зони стиску, волокна нейтрального шару не зазнають ніякої деформації. Лінія перетину нейтрального шару з площиною поперечного перерізу бруса є **нейтральною**.

Позначимо радіус кривизни нейтрального шару через ρ , а кут взаємного повороту перерізів через $d\varphi$.

Розглянемо деформацію довільного волокна AB , розташованого на відстані y від нейтрального шару.

До деформації довжина цього волокна:

$$dx = \Delta_{AB} = \overset{\cup}{AB} = \rho \cdot d\varphi. \quad (3.1)$$

Після деформації волокно AB подовжилось на величину BB_1 :

$$\Delta_{BB_1} = \overset{\cup}{BB_1} = (\rho + y) \cdot d\varphi. \quad (3.2)$$

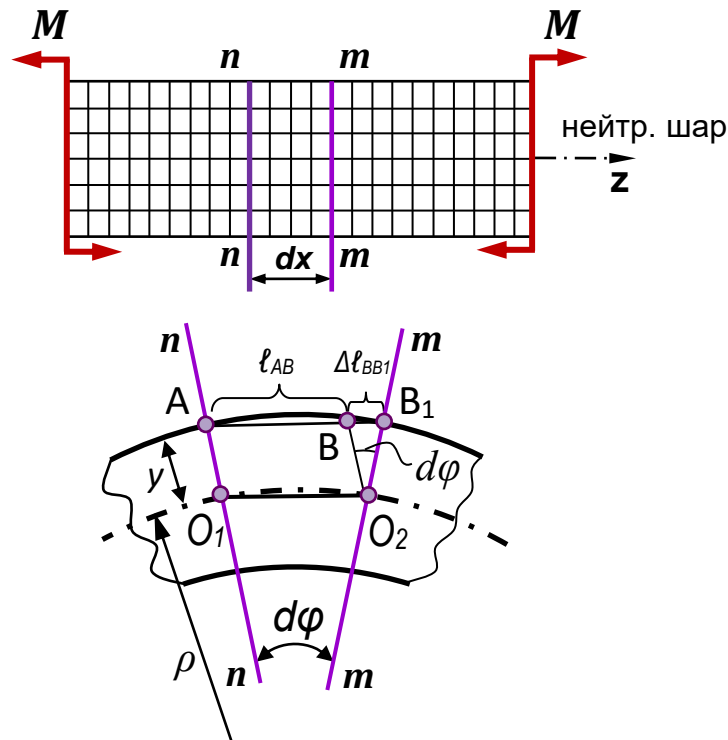


Рисунок 3.2 – Визначення нейтрального шару.

Абсолютне подовження волокна AB :

$$\Delta l_{BB1} = \overset{\frown}{AB_1} - \overset{\frown}{BB_1} = (\rho + y) \cdot d\varphi - \rho \cdot d\varphi = y \cdot d\varphi. \quad (3.3)$$

Відносне подовження цього ж волокна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_{BB1}}{l_{AB}} = \frac{\Delta l_{BB1}}{\overset{\frown}{AB}} = \frac{y \cdot d\varphi}{\rho \cdot d\varphi} = \frac{y}{\rho}, \quad (3.4)$$

де ρ – радіус кривизни, $\rho = \text{const}$.

Із виразу (3.4) видно, що відносна деформація ε пропорційна y .

Так як волокна бруса зазнають тільки простий розтяг або стиск, то для визначення пружних сил можна застосувати закон Гука при розтягу-стиску:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \frac{y}{\rho}. \quad (3.5)$$

В цьому виразі ρ – невідома ще величина. Уявно розсічемо брус перерізом, перпендикулярно до його осі і розглянемо рівновагу лівої частини.

Дію відкинутої правої частини на ліву замінюємо внутрішніми силами (рис. 3.3). На елементарній площадці dA з координатами x та y діє нормальне зусилля $\sigma \cdot dA$.

Складемо рівняння рівноваги для частини бруса, що залишилася:

$$\Sigma F_z = 0 \Rightarrow \int_A \sigma \cdot dA = 0; \quad (3.6)$$

$$\Sigma M_x = 0; \quad -M + \int_A \sigma \cdot dA \cdot y = 0 \Rightarrow \int_A \sigma \cdot dA \cdot y = M;$$

(3.7)

$$\Sigma M_y = 0 \Rightarrow \int_A \sigma \cdot dA \cdot x = 0. \quad (3.8)$$

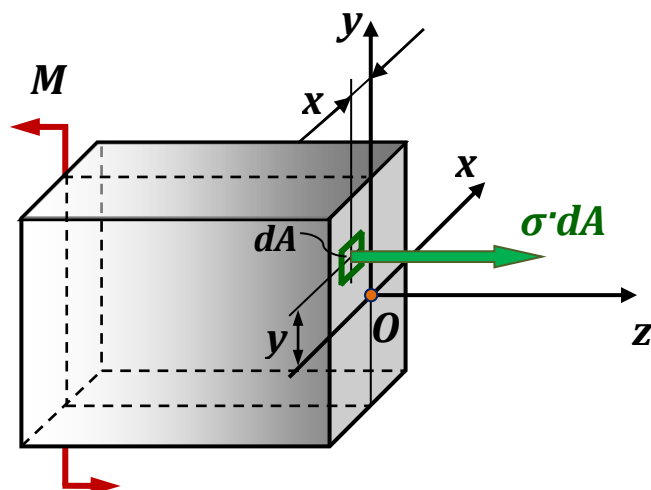


Рисунок 3.3 – До визначення внутрішніх зусиль.

Підставимо у рівняння (3.6) вираз (3.5), отримаємо:

$$\int_{(A)} E \cdot \frac{y}{\rho} \cdot dA = \frac{E}{\rho} \cdot \int_{(A)} y \cdot dA = 0,$$

де $\int_{(A)} y \cdot dA = S_x$ – статичний момент площі перерізу балки.

При згині радіус кривизни $\rho \neq \infty$, а отже $E \neq 0$, тоді відношення також не може дорівнювати нулю $\frac{E}{\rho} \neq 0$.

Звідси виходить, що статичний момент площі дорівнює нулю, тобто $\int_{(A)} y \cdot dA = S_x = 0$.

Статичний момент площі відносно осі дорівнює нулю тільки в тому випадку, якщо ця вісь проходить через центр ваги перерізу. Отже, **нейтральна вісь при згині проходить через центр ваги поперечного перерізу**.

Із рівняння суми моментів сил відносно нейтральної лінії (3.7), підставивши вираз (3.5), одержимо:

$$\begin{aligned} \int_{(A)} \frac{E}{\rho} \cdot y^2 \cdot dA &= M; \\ \frac{E}{\rho} \cdot \int_{(A)} y^2 \cdot dA &= M; \\ \frac{E}{\rho} \cdot J_z &= M. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Виразимо звідси величину кривизни поздовжньої осі бруса при згині $\frac{1}{\rho}$:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot J_z}, \quad (3.10)$$

де $E \cdot J_z$ – називається **жорсткістю бруса при згині**.

Отриманий вираз (3.10) являє собою залежність між згинальним моментом і кривизною осі бруса при згині.

Підставляючи знайдене значення кривизни у формулу (3.5), отримаємо **закон розподілу нормальних напружень при чистому згині**:

$$\sigma = \frac{M}{J_x} \cdot y. \quad (3.11)$$

Епюра нормальних напружень по висоті перерізу балки зображена на рисунку 3.4.

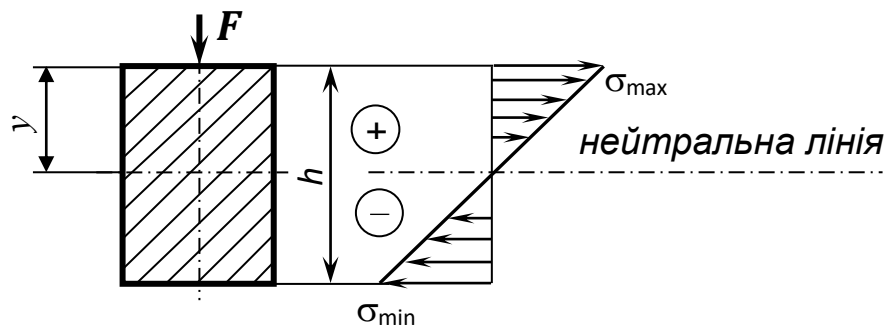


Рисунок 3.4 – Епюра нормальних напружень.

Найбільші напруження діють у точках найбільш віддалених від нейтральної лінії, для яких $y = y_{max} = \frac{h}{2}$. По нейтральній лінії нормальні напруження дорівнюють нулю, так як $y = 0$.

Осьові моменти інерції прокатних профілів швелера та двотавра наведені в таблицях сортamentів.

Експериментальна установка. Експериментальне дослідження закону розподілу нормальних напружень проводиться в лабораторії кафедри з використанням спеціального лабораторного стенду (рис. 3.5). Для досліджень використовують алюмінієву балку двотаврового перерізу №10.

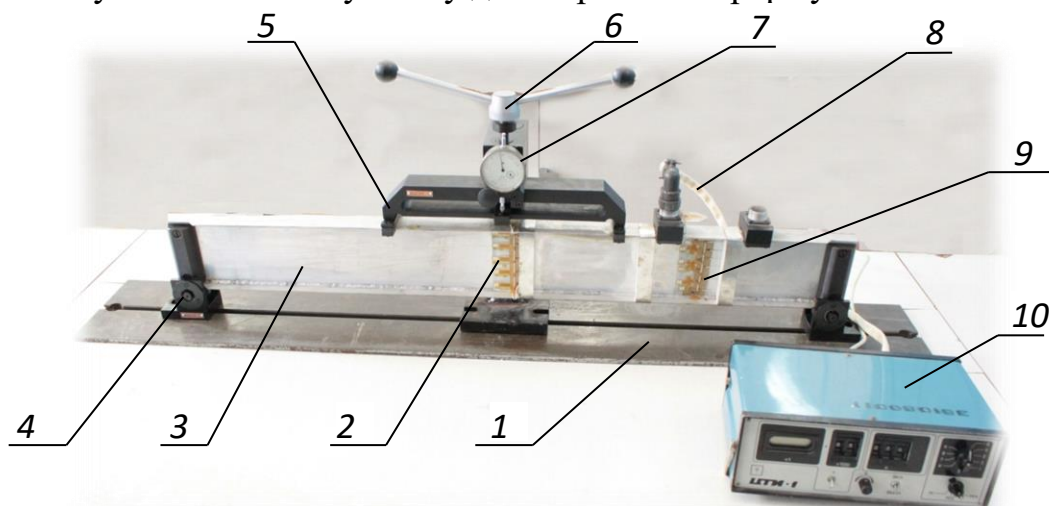


Рисунок 3.5 – Дослідна установка.

На плиті лабораторного стола за допомогою болтових з'єднань кріпляться стояки 4, на які встановлюється двотаврова балка 3.

На бічній поверхні посередині прольоту балки в зоні чистого згину зразка наклеєна група тензодатчиків 2. Їх підключають за допомогою жгутів 8 до вимірювача деформацій ИДЦ-1 (поз.9). Зверху на балку встановлюють коромисло 5 з індикатором часового типу 7. Навантаження зразка проводиться за допомогою гвинта 6.

Для визначення нормальних напружень на бічній поверхні балки наклеєні сім тензодатчиків (від 0 до 6), які фіксують значення пружних лінійних деформацій Δl у відповідній точці. Схема підключення тензодатчиків наведена на рисунку 3.6.

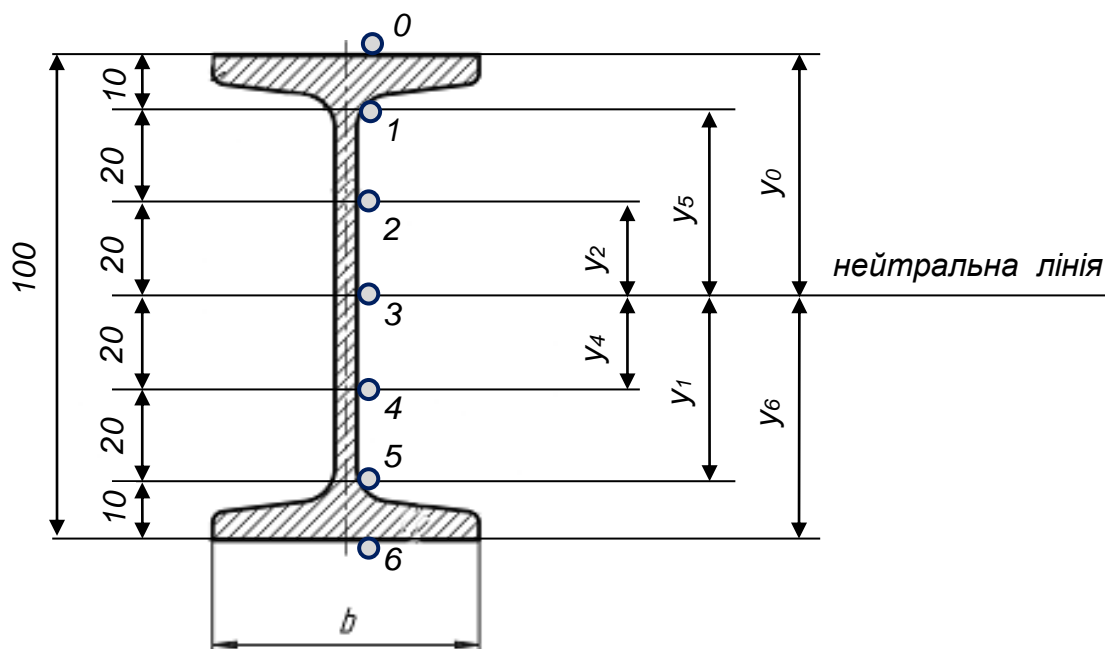


Рисунок 3.6 – Схема підключення тензорезисторів у поперечному перерізі балки.

Визначення напружень залежно від деформації, що вимірюється, називають **тензометруванням**. Електротензометричний метод вимірювання лінійних деформацій заснований на тому, що деформація провідника викликає зміну деяких його електричних параметрів (опору, ємності, індуктивності). Елемент, що сприймає деформацію тіла (тензодатчик) передає зміну електричного параметра на реєструючий пристрій, в якості якого використовують цифровий тензорезисторний вимірювач деформацій ИДЦ-1.

Так як тензодатчики фіксують деформації різних знаків (верхній – стиснення, нижній – розтягнення), то тензостанція реєструє відносну деформацію відповідно зі знаком «+» або «-», це необхідно враховувати при обробці результатів експерименту.

Точність вимірювання деформації за допомогою дротяних тензодатчиків дещо менша, ніж при вимірюванні механічним або оптичним тензометром, але практично вона цілком достатня для надійного обчислення напружень.

Балку навантажують за допомогою спеціального гвинтового пристрою (рис. 3.7). Значення навантаження визначають за допомогою індикатора годинникового типу ИЧ-10. Принцип навантаження полягає у тому, що значення навантажень за допомогою тарирувального графіка переводять у значення показників індикатора. Тарирування отримано за допомогою динамометра стиску 3-го розряду.

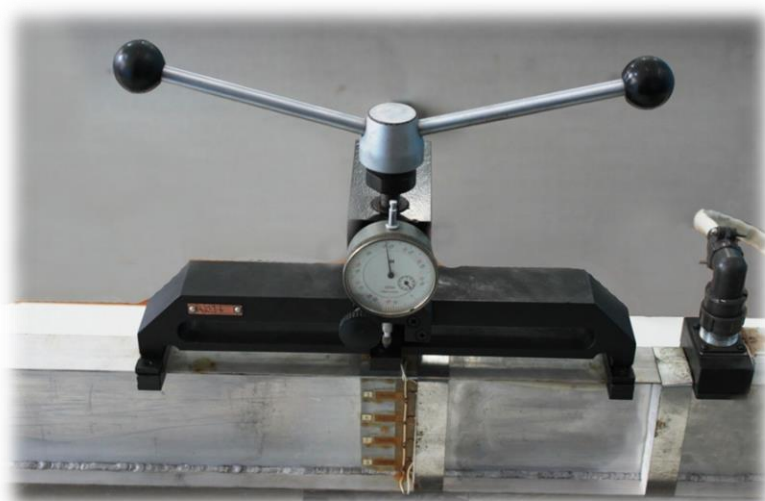


Рисунок 3.7 – Пристрій для навантаження балки.

Навантажують балку посередині прольоту, але навантаження рівномірно розподіляється на дві сторони. Таким чином, що відстань між точками прикладення складає 300 мм (рис. 3.8).

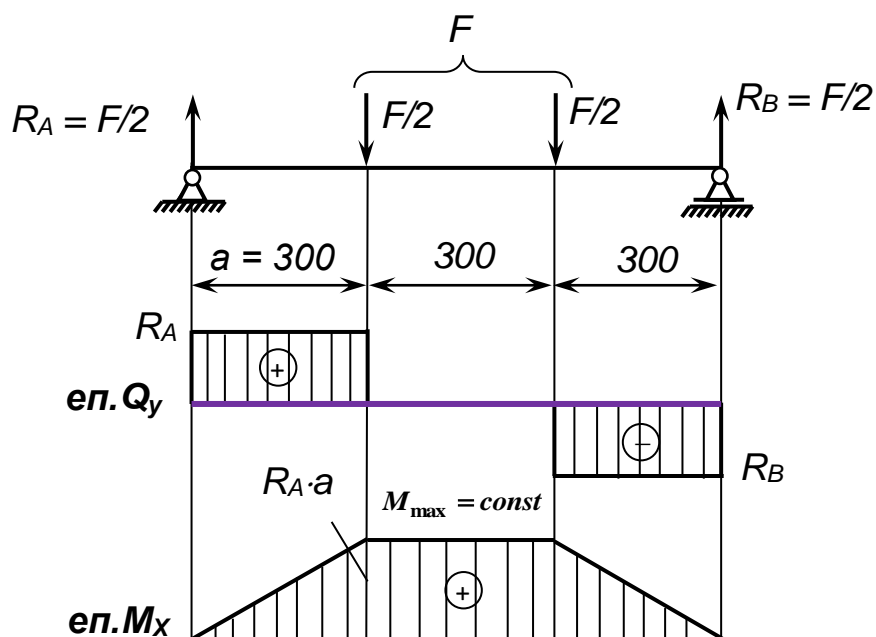


Рисунок 3.8 – Розрахункова схема балки з побудованими епюрами поперечних сил і згинальних моментів.

За результатами експерименту підраховують напруження для всіх точок, де розташовані тензорезистори за формулою:

$$\sigma_i^e = E \cdot \alpha \cdot \Delta i_{\text{ср}},$$

де α – ціна одиниці дискретності вимірювача деформацій, $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-6}$;

E – модуль пружності алюмінієвої балки $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа;

$\Delta i_{\text{ср}}$ – середні значення деформацій у відповідній точці балки.

Оснащення робочого місця

- ❖ лабораторна установка – балка з підключеними тензорезисторами в зоні чистого згину;
- ❖ індикатор годинникового типу ИЧ-10;
- ❖ цифровий тензорезисторний вимірювач деформацій ИДЦ-1;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок проведення досліджень

Для експериментального визначення головних напружень використовують алюмінієву балку двотаврового перерізу №10 довжиною $\ell = 900$ мм, яка вільно лежить на двох опорах. Балка має наступні дані:

- ширина перерізу $b = 38$ мм;
- висота перерізу $h = 100$ мм;
- осьовий момент інерції перерізу $I_{\text{н.л.}} = 516913$ мм⁴;
- матеріал балки – Д16Т ГОСТ 8617-81;
- модуль пружності матеріалу (алюміній) $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа.

Лабораторна робота проводиться в такій послідовності:

1. Розглянути схему пристрою для проведення експерименту та ознайомитись з принципом її роботи.

2. Скласти розрахункову схему балки. При складанні розрахункової схеми бажано застосовувати стандартні умовні позначення елементів балки.

3. Побудувати епюри поперечних сил Q_y та згинальних моментів M_x .
Визначити значення максимального згинального моменту:

$$M_x = R_A \cdot a = \frac{\Delta F}{2} \cdot a = \frac{1000}{2} \cdot 300 = 150\,000 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

4. Визначити, в якому перерізі балки буде спостерігатися явище чистого згину.

5. Підключити вимірювач деформацій (ВД) до тензорезисторів, які знаходяться в зоні чистого згину. Включити пристрій.

6. Послідовно навантажити балку за допомогою гвинтового пристрою трьома рівнями навантаження 1кН, 2кН, 3кН, переводячи їх у показники індикатора за допомогою тарировального графіка.

7. При кожному рівні навантаження зняти показники з вимірювача деформацій (ВД) для всіх тензорезисторів та записати в журнал спостережень (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Результати експерименту та їх обробка.

№ тензорезисторів		0	1	2	3	4	5	6
Навантаження, F	1 кН							
	2 кН							
	3 кН							
Абсолютне значення показань ВД	Δi_1							
	Δi_2							
	Δi_{cp}							
Експериментальне значення напружень	σ^e							
Теоретичне значення напружень	σ^T							
Координата	z	-50	-40	-20	0	20	40	50

8. Підрахувати середню різницю Δi_{cp} по кожному тензорезисторові для ступеня навантаження $\Delta F = 1\text{кН}$.

9. Визначити значення напружень для кожної точки, де підключено тензодатчик теоретичним шляхом. Результати занести у таблицю 3.1.

10. За даними експерименту підрахувати напруження для всіх точок, де розташовані тензорезистори.

11. Побудувати епюру напружень за теоретичними значеннями. Зверху нанести епюру напружень за експериментальними значеннями.

12. Порівняти експериментальні та теоретичні значення напружень:

$$\Delta\sigma = \left| \frac{\sigma^e - \sigma^T}{\sigma^T} \right| \cdot 100\%.$$

13. Відхилення значень повинні знаходитись у межах [15%], у такому випадку експеримент достовірно підтверджує теоретичні передумови.

14. Визначити закон розподілу напружень по висоті перерізу балки.

15. Зробити висновки та відповіді на контрольні запитання.
16. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Яка одиниця вимірювання напруження при згині?
Н/м²;
Н·м;
Н;
м.
2. Як позначається модуль Юнга, модуль поздовжньої пружності?
 E ;
 $\sigma_{\text{шц}}$;
 G ;
 μ .
3. Яка одиниця вимірювання модуля поздовжньої пружності матеріалу E ?
Н/м²;
Н;
м;
Н·м.
4. Згин, при якому поперечна сила в перерізах балки дорівнює нулю називається:
чистим згином;
поперечним згином;
поздовжнім згином;
згином з крученням.
5. Момент внутрішньої пари, що складається з елементарних нормальних зусиль, які виникають в поперечному перерізі балки при згині називається:
згинальним моментом;
крутильним моментом;
реактивним моментом;
зосередженим моментом.
6. Яка одиниця вимірювання згинального моменту?
Н·м;
Н;
м;
Н/мм².
7. Від чого залежить модуль поздовжньої пружності E ?
від властивостей матеріалу;
від навантаження;
від розмірів перерізу;

від розмірів деталі.

8. Який фізичний зміст модуля пружності матеріалу E ?
характеризує його жорсткість;

характеризує його міцність;
характеризує його пружність;
характеризує його стійкість.

9. Як розрахувати максимальні напруження при згині?

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{\text{н.л.}}};$$

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_p};$$

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A};$$

$$\sigma_{\max} = E \cdot \varepsilon.$$

10. Зразки якого перерізу використовують при випробуванні матеріалів на згин?

двотаврового перерізу;
круглого перерізу;
квадратного перерізу;
прямокутного перерізу.

11. З якого матеріалу виконана двотаврова балка?

алюміній;
сталь;
дерево;
чавун.

12. Чому дорівнює модуль пружності алюмінієвої балки?

$$E = 0,7 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$E = 0,84 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$E = 1 \cdot 10^4 \text{ МПа}.$$

13. Які силові фактори викликають нормальні напруження в поперечному перерізі балки?

згинальні моменти;
зосереджені сили і розподілені навантаження;
згинальні моменти і розподілені навантаження;
крутильні моменти.

14. Поверхня, що розділяє зону стиску від зони розтягу називається:

нейтральний шар;

нейтральна вісь;
лінія перетину;
площина перерізу.

15. Лінія перетину нейтрального шару з площиною поперечного перерізу називається:

нейтральна вісь;
нейтральний шар;
лінія перетину;
площина перерізу.

16. Як розподілені нормальні напруження по висоті перерізу балки?

за лінійним законом;
за криволінійним законом;
за гіперболічним законом;
за параболічним законом.

17. У скількох точках підключені тензометри по висоті перерізу двотаврової балки?

у 7-х точках;
у 4-х точках;
у 3-х точках;
у 12-х точках.

18. За допомогою якого пристрою вимірюються деформації при проведенні досліду?

вимірювача деформацій ИДЦ-1;
індикатором годинникового типу ИЧ-10;
штангенциркулем ШЦ-0,1;
силовимірювачем.

19. Як записується закон розподілу нормальних напружень?

$$\sigma = \frac{M}{J_{н.л.}} \cdot y;$$

$$\tau = \frac{M}{J_p} \cdot y;$$

$$\sigma = \frac{F}{A};$$

$$\tau = \frac{Q}{A}.$$

20. Чому дорівнює координата y по нейтральній лінії?

$y = 0$;
 $y = 50$;
 $y = 20$;
 $y = 40$.

3.2. Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ НАПРУЖЕНЬ В ПЕРЕРІЗАХ БАЛКИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ЗГІНІ

МЕТА РОБОТИ: експериментальне визначення головних напружень в перерізах двотаврової балки і порівняння їх з теоретичними значеннями.

Короткі теоретичні відомості

Під плоским **поперечним згином** розуміють навантаження балки парами сил, та силами, що перпендикулярні до поздовжньої осі, площиною дії яких є площина симетрії, яка проходить через вертикальну вісь балки.

При поперечному згині балка знаходиться в неоднорідному плоскому напруженому стані. Формулу для визначення нормальних напружень, виведену при чистому згині (3.11), можна застосовувати і при поперечному згині. По висоті перерізу нормальні напруження розподілені за лінійним законом: вони мають максимальні значення в точках, найбільш віддалених від нейтральної осі перерізу і дорівнюють нулю на нейтральній лінії; по ширині перерізу нормальні напруження не змінюються. Небезпечними можуть бути точки, розташовані в крайніх волокнах того перерізу, де згинальний момент має найбільше по абсолютній величині значення, отже, і нормальні напруження мають найбільше значення. У цих точках буде лінійний напружений стан.

У точках, розташованих на нейтральній лінії нормальні напруження дорівнюють нулю. Але в таких перерізах можуть діяти поперечні сили. Мало того, вони можуть мати максимальні значення. А наявність поперечних сил викликає виникнення дотичних напружень. А, отже, в таких перерізах дотичні напруження приймають максимальні значення. У цих точках спостерігається чистий зсув, і умова міцності має вигляд:

$$\tau_{max} \leq [\tau].$$

По висоті перерізу дотичні напруження розподіляються нелінійно, досягаючи максимуму на нейтральній осі, і дорівнюють нулю в точках, найбільш віддалених від неї. По ширині перерізу дотичні напруження не змінюються.

В інших точках перерізу присутні як нормальні так і дотичні напруження, а отже, реалізується плоский напружений стан (рис. 3.9), при якому мають місце два головних напруження σ_1 і σ_2 , а третє дорівнює нулю $\sigma_3 = 0$. При цьому перше σ_1 приймає максимальне значення, а друге σ_2 – мінімальне.

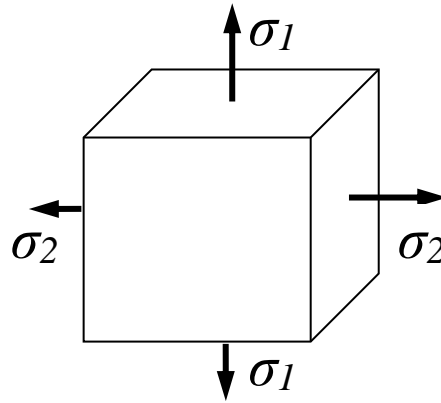


Рисунок 3.9 – Плоский напружений стан.

У цьому випадку перевірку міцності балки проводять **по головним напруженням** для перерізу, де діє максимальна поперечна сила Q_{\max} і максимальний згинальний момент M_{\max} .

Площини, по яких діють тільки нормальні напруження називаються **головними**. Напруження, що діють по головним площинам називають **головними напруженнями**.

Теоретично значення головних напружень в j -ій точці перерізу балки визначається за формулою:

$$\sigma_{1,2j} = \frac{\sigma_j}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_j^2 + 4\tau_j^2}, \quad (j = \overline{I, III}) \quad (3.12)$$

де σ_1 і σ_2 – відповідно найбільше і найменше напруження, МПа;

σ_j і τ_j – відповідно нормальні і дотичні напруження у j -ій точці перерізу балки, МПа.

Дотичні напруження в балці розраховуються за формулою Журавського:

$$\tau_j = \frac{Q_y \cdot S_j}{b_j \cdot J_{н.л.}}, \quad (3.13)$$

де Q_y – поперечна сила в дослідному перерізі, Н;

S_j – статичний момент площі частини перерізу, розташованої вище рівня j -ої точки відносно нейтральної лінії, мм^3 ;

$J_{н.л.}$ – осьовий момент інерції перерізу відносно нейтральної лінії, мм^4 ;

b_j – ширина перерізу в тому місці, де визначаються дотичні напруження.

Розрахунок нормальних напружень у j -ій точці перерізу балки σ_j проводимо за формулою Нав'є:

$$\sigma_j = \frac{M_x}{J_{н.л.}} \cdot y_j, \quad (3.14)$$

де M_x – згинальний момент у дослідному перерізі, Н·мм;

y_j – координата відносно нейтральної лінії в j -ій точці перерізу, мм;

$J_{н.л.}$ – осьовий момент інерції перерізу відносно нейтральної лінії, мм^4 .

Через те, що головні напруження залежать як від нормальних σ так і від дотичних τ напружень, то перевірка міцності підлягає той елемент балки, для якого σ і τ будуть одночасно можливо великими.

Експериментальна установка. Експериментальне дослідження головних напружень при поперечному згині проводять на універсальному стенді з використанням лабораторного обладнання, схема якого наведена на рисунку 3.5. Відмінність полягає у тому, що тепер тензодатчики 9 підключені у трьох точках (по два у кожній точці), у перерізі балки, де вона зазнає поперечного згину. Схема підключення тензодатчиків наведена на рисунку 3.10.

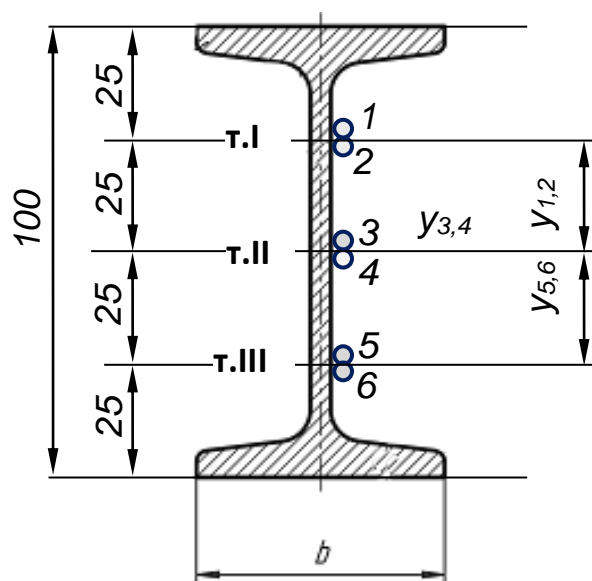


Рисунок 3.10 – Схема підключення тензорезисторів у поперечному перерізі балки.

Принцип роботи установки, та послідовність проведення досліджу така ж сама, як і у лабораторній роботі 3.1.

Розрахунковий проліт балки складає 900 мм, відстань від правої опори до перерізу, де підключені тензорезистори, $a = 200$ мм. Силу прикладають посередині балки за допомогою гвинтового пристрою (рис. 3.6), який розподіляє навантаження на 2 точки, відстань між якими складає 300 мм. Відстань між точками прикладання сил і опорами також складає по 300 мм з кожної сторони. Навантаження утворюють за допомогою індикатора годинникового типу, шток якого повинен торкатися коромисла (рис. 3.5, поз. 5). Перед початком роботи встановлюють індикатор на нуль, підключають тензорезистори до вимірювача деформацій. За допомогою тарировального графіка переводять значення навантаження у показники індикатора і послідовно навантажують балку трьома рівнями навантаження 1кН, 2кН, 3кН. При кожному рівні навантаження знімають показники з вимірювача деформацій

ИДЦ-1 для всіх тензорезисторів. За даними експерименту розраховують головні напруження σ_{1j}^e і σ_{2j}^e для кожної дослідної точки перерізу балки.

Головні напруження σ_{1j}^e і σ_{2j}^e для кожної дослідної точки перерізу балки визначають за формулами:

$$\begin{aligned}\sigma_{1j}^e &= \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu^2} (\Delta 1_{cpj} + \mu \cdot \Delta 2_{cpj}); \\ \sigma_{2j}^e &= \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu^2} (\Delta 2_{cpj} + \mu \cdot \Delta 1_{cpj}),\end{aligned}\tag{3.15}$$

де α – ціна одиниці дискретності ВД, $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-6}$;

E – модуль пружності алюмінієвої балки, МПа;

μ – коефіцієнт Пуасона, $\mu = 0,34$;

$\Delta 1_{cpj}$, $\Delta 2_{cpj}$ – відповідно середні значення головних деформацій у j -ій точці перерізу на першому і другому тензорезисторі.

Оснащення робочого місця

- ❖ лабораторна установка – балка з підключеними тензорезисторами в зоні поперечного згину;
- ❖ індикатор годинникового типу ИЧ-10;
- ❖ цифровий тензорезисторний вимірювач деформацій ИДЦ-1;
- ❖ методичні вказівки з виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок проведення досліджень

Для експериментального визначення головних напружень використовують алюмінієву балку двотаврового перерізу №10 довжиною $\ell = 900$ мм, яка вільно лежить на двох опорах. Балка має наступні данні:

- ширина перерізу $b = 38$ мм;
- висота перерізу $h = 100$ мм;
- осьовий момент інерції перерізу $I_{н.л.} = 516913$ мм⁴;
- статичний момент площі частини перерізу розташованої вище нейтральної лінії у точках I і III: $S_I = S_{III} = 4825$ мм³;
- статичний момент площі частини перерізу відносно нейтральної лінії у точці II: $S_{II} = 6050$ мм³;
- матеріал балки – Д16Т ГОСТ 8617-81;
- модуль пружності матеріалу (алюміній) $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа.

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Розглянути схему пристрою для проведення експерименту, ознайомитись з принципом її роботи.

2. Встановити балку на шарнірні опори. Перед початком роботи встановити нуль на індикаторі, підключити тензорезистори до вимірювача деформацій.

3. За допомогою тарировального графіка перевести значення навантажень у показники індикатора.

4. Навантажити балку трьома рівнями навантаження та зняти показники з вимірювача деформацій ВД для всіх тензорезисторів.

5. Підрахувати середню різницю Δi_{cp} по кожному тензорезисторові для ступеня навантаження $\Delta F = 1 \text{ кН}$.

6. За даними експерименту розрахувати головні напруження σ_{1j}^e і σ_{2j}^e для кожної дослідної точки перерізу балки. Результати занести у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Журнал спостережень і обробки результатів експерименту.

Дослідні точки		I		II		III	
№ тензорезисторів				4	5	6	
Рівні навантаження	1 кН						
	2 кН						
	3 кН						
Значення прирощень деформацій	Δi_1						
	Δi_2						
	Δi_{cp}						
Експериментальні значення головних напружень	σ_{1j}^e						
	σ_{2j}^e						
Теоретичні значення головних напружень	σ_{1j}^T						
	σ_{2j}^T						

7. Побудувати епюри поперечних сил Q_y та згинальних моментів M_x . Визначити значення згинального моменту в зоні поперечного згину:

$$M_x = R_A \cdot a = \frac{\Delta F}{2} \cdot a = \frac{1000}{2} \cdot 300 = 150\,000 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

8. Визначити значення напружень для кожної точки, де підключено тензодатчики теоретичним шляхом. Результати занести до таблиці 3.2.

9. Порівняти експериментальні та теоретичні значення напружень:

$$\Delta\sigma_{1,2} = \left| \frac{\sigma^e - \sigma^T}{\sigma^T} \right| \cdot 100\% \leq [15\%].$$

10. Зробити висновки та відповіді на контрольні запитання.

11. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Деформація, що виникає при сумісній дії поперечної сили та згинального моменту називається:

поперечним згином;

чистим згином;

повздовжнім згином.

2. Напруження, що діють по головним площинам називають:

головними;

дотичними;

повними.

3. За якою формулою визначають дотичні напруження?

за формулою Журавського;

за формулою Ясинського;

за формулою Ейлера.

4. Закон Гука для пластичних деформацій при згині має вигляд:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon;$$

$$\tau = \gamma \cdot G;$$

$$\varphi = \ell \cdot \theta.$$

5. У якості дослідної балки обрано двотавр номер:

№10;

№20;

№100.

6. Як позначається осьовий момент інерції перерізу відносно нейтральної лінії?

$J_{н.л.}$;

J_p ;

J_{xy} .

7. В яких точках поперечного перерізу балки при згині нормальні напруження приймають максимальні значення?

в крайніх точках перерізу;

в середній точці перерізу;

мають постійне значення по всьому перерізу.

8. При згині зовнішніми силовими факторами є:
 зосереджені сили, пари сил і розподілені навантаження;
 поздовжні сили і розподілені навантаження;
 скручувальні моменти і зосереджені сили.
9. При згині внутрішніми силовими факторами є:
 поперечні сили і згинальні моменти;
 поздовжні сили і нормальні напруження;
 крутильні моменти і згинальні моменти.
10. Які вимірювальні прилади використовують для визначення деформацій при згині?
 цифровий вимірювач деформацій (ИДЦ-1);
 індикатор годинникового типу (ИЧ-10);
 кутомір.
11. За допомогою якого вимірювального приладу утворюють навантаження балки при поперечному згині:
 індикатора годинникового типу (ИЧ-10);
 вимірювача деформацій (ИДЦ-1);
 кутоміру.
12. Як теоретично визначити значення головних напружень у j-ій точці перерізу балки:

$$\sigma_j = \frac{\sigma_j}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_j^2 + 4\tau_j^2};$$

$$\sigma_j = \frac{F}{A} \leq [\sigma];$$

$$\sigma_j = \frac{M}{W_x}.$$

13. Який вигляд має формула Журавського?

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{b \cdot I_{н.л.}};$$

$$\tau = \frac{Q}{A};$$

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p}.$$

14. Чому дорівнює проліт між опорами двотаврової балки?

900мм;

200мм;

100мм.

15. На якій відстані від правої опори до перерізу підключені тензорезистори?

200мм;

300мм;

400мм.

16. Як дослідним шляхом визначити головні напруження при поперечному згині?

$$\sigma_{ij}^e = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu^2} (\Delta 1_{cpj} + \mu \cdot \Delta 2_{cpj});$$

$$\sigma_j = \frac{F}{A} \leq [\sigma];$$

$$\sigma_j = \frac{M}{W_x}.$$

17. Закон розподілу нормальних напружень по висоті перерізу балки має вигляд:

$$\sigma_j = \frac{M_x \cdot z_j}{J_{н.л.}};$$

$$\sigma_j = \frac{F}{A} \leq [\sigma];$$

$$\tau_j = \frac{Q_x \cdot S_j}{b \cdot I_{н.л.}}.$$

18. У скількох точках поперечного перерізу підключено тензорезистори?

у 3-х точках;

у 2-х точках;

у 6-х точках.

19. Яка відстань між точками підключення тензорезисторів?

25мм;

50мм;

80мм.

20. Скільки тензорезисторів підключено до перерізу балки?

6 тензорезисторів;

3 тензорезисторів;

1 тензорезистор.

3.3. Лабораторна робота

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ПЕРЕРІЗІВ БАЛКИ

МЕТА РОБОТИ: визначити експериментальним шляхом прогин і кути повороту перерізів балки та порівняння їх значення з теоретичними.

Короткі теоретичні відомості

Для елементів конструкцій та деталей машин дуже важливе значення має їх жорсткість. У багатьох випадках для деяких деталей машин (газорозподільні вали, проміжні вали коробок передач, задні мости, осі та інші), які приймають згинальні навантаження, розрахунок на жорсткість не менш важливий, ніж розрахунок на міцність.

Значні прогини валів призводять до порушення зчеплення в зубчастій передачі, недопустимого перекосу кілець підшипників у місцях опирання валів, що сприяє передчасному спрацюванню зубчастих коліс і шестерень та швидкому виходу з ладу підшипників. Якщо балка під навантаженням значно прогинається, то можуть виникнути її коливання з великими амплітудами і, як наслідок, великі додаткові напруження. Тому, виконуючи відповідні розрахунки на жорсткість, завжди потрібно вибирати такі поперечні розміри елемента, щоб пружні деформації не перевищували допустимих.

Деформація балки при згині характеризується для кожного перерізу з координатою x лінійними і кутовими переміщеннями (рис. 3.11):

➤ **Прогин** – переміщення центра ваги перерізу балки у напрямку, перпендикулярному до осі балки $Y(z)$.

➤ **Кут повороту** перерізу балки – кут, на який повертається переріз відносно свого початкового положення $\theta(z)$, або кут нахилу нормалі перерізу балки до її поздовжньої осі.

Найбільший прогин балки називається **стрілою прогину**.

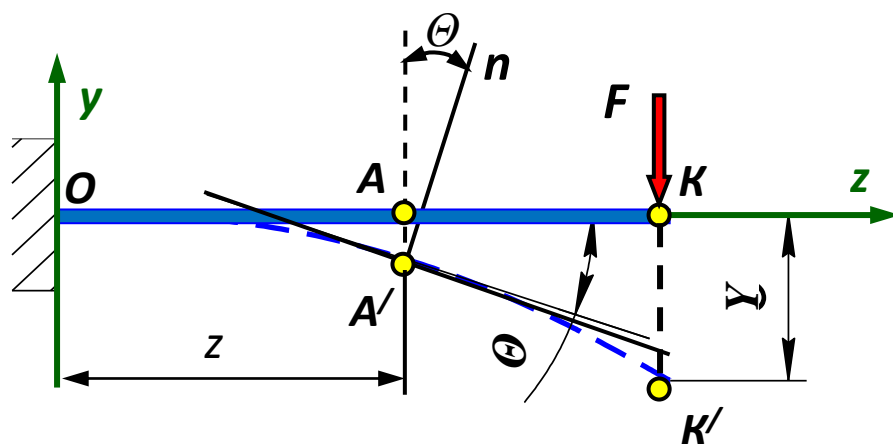


Рисунок 3.11 – Схема деформації балки при згині.

Закономірність зміни прогинів уздовж осі балки визначає форму зігнутої осі. Прогини і кути повороту за умови, що переміщення істотно менше довжини балки, пов'язані між собою диференціальним співвідношенням:

$$\theta(z) = Y'(z) = \frac{dy(z)}{dz}. \quad (3.16)$$

Величина найбільшого прогину може служити мірилом того, наскільки викривляється форма конструкції під дією зовнішніх сил. З метою збереження з'єднань частин балок від розхитування і зменшення коливань під дією рухомого навантаження обмежують величину найбільшого прогину балки під навантаженням.

Величина прогину і кута повороту можуть бути знайдені шляхом рішення наближеного диференціального рівняння зігнутої осі:

$$\frac{d^2y}{dz^2} = \frac{M(x)}{E \cdot J_{н.л.}}, \quad (3.17)$$

де $M(x)$ – згинальний момент, Н·м;

E – модуль пружності I-го роду, МПа;

$J_{н.л.}$ – осьовий момент інерції відносно нейтральної лінії, мм⁴;

$E \cdot J_{н.л.}$ – жорсткість балки при згині, Н·мм²;

$\frac{d^2y}{dx^2}$ – друга похідна від прогину по координаті x в будь-якій точці перерізу,

являє собою прогин балки.

Існує декілька методів визначення деформацій.

1. *Аналітичний* – інтегруванням наближеного диференційного рівняння (3.16) зігнутої осі (пружної лінії) балки:

Інакше можна записати рівняння зігнутої осі балки (3.16) так:

$$M(x) = Y'' E \cdot J_{н.л.} \quad (3.18)$$

До аналітичного методу належить **метод початкових параметрів**, відповідно до якого задають початкові параметри і вирішують рівняння пружної лінії балки.

2. *Енергетичний метод* – заснований на визначенні потенційної енергії деформації згину з використанням теореми Кастильяно – похідна потенційної енергії U по силі F дорівнює прогину балки, а по згинальному моменту M – куту поворота.

До енергетичного методу належать два способи:

- інтеграл Максвела-Мора;
- спосіб Верещагіна.

А.Н. Верещагін у 1924 р. запропонував свій спосіб для обчислення інтеграла Мора: спосіб перемноження епюр Верещагіна для прямого стержня постійного поперечного перерізу.

Прогин і кут повороту перерізу балки за способом Верещагіна визначається за формулами:

$$Y = \sum \frac{\omega_i \cdot M_{ci}}{E \cdot J_{н.л.}} ; \quad (3.19)$$
$$\Theta = \sum \frac{\omega_i \cdot M'_{ci}}{E \cdot J_{н.л.}},$$

де ω_i – площа епюри згинальних моментів від зовнішніх навантажень (вантажної епюри), $\text{Н} \cdot \text{мм}^2$;

M_{ci} – довжина ординати на епюрі згинальних моментів від одиничного навантаження ($\bar{S}=1$) під центром ваги вантажної епюри, мм ;

M'_{ci} – довжина ординати на епюрі згинальних моментів від одиничного моменту ($\bar{M}=1$) під центром ваги вантажної епюри, б/р ;

$E \cdot J_{н.л.}$ – жорсткість балки, $\text{Н} \cdot \text{мм}^2$.

Зауважимо, що при проведенні практичних вимірів буває зручніше визначати не нахил нормалі перерізу до нейтральної осі, а рівний йому нахил нормалі балки (позначений на рис. 3.11, як n) до перпендикуляру нейтральної осі.

Експериментальна установка. Експериментальне визначення переміщень перерізів балки проводять на універсальному стенді, закріплюючи на силовій плиті відповідне лабораторне обладнання. Схема і зовнішній вигляд лабораторної установки наведені на рисунку 3.12.

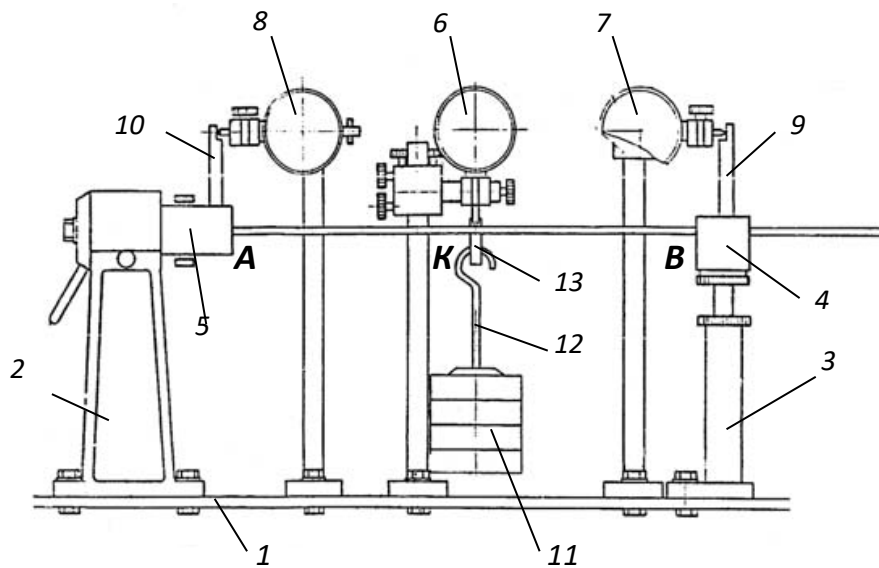
Порівняно гнучка балка, зазвичай прямокутного перерізу, спирається на дві опори 2 і 3, що закріплені болтами в Т-подібному пазу силовій плити. Розрахунковий проліт балки складає $\ell = 600$ мм .

На опорах змонтовані підшипникові вузли 4 і 5 досліджуваної балки, що дозволяє їй вільно повертатися на опорах.

Посередині балки, де необхідно вимірювати прогин розміщується підвіска 12 з вантажем 11. Відстань від опор до місця прикладення навантаження $\ell/2 = 300$ мм . Навантаження балки здійснюється додаванням одного, двох або більше зосереджених вантажів 11. У місці вимірювання прогину (точка К) на плиті 1 столу закріплена стійка з індикатором годинникового типу 6, який дозволяє визначати лінійні переміщення перерізів або прогини.

В опорах балки, які на розрахунковій схемі позначені точками А і В розташовані стояки з індикаторами 7 і 8, вимірювальні штифти яких впираються в упорні п'ятаки стержнів 9 і 10. Стержні жорстко з'єднані з досліджуваною балкою. За допомогою стрілочних індикаторів, визначаються кутові переміщення опорних перерізів балки.

Індикатори зазвичай мають ціну поділки 0,01 мм і межі вимірювань лінійних переміщень від 0 до 10 мм. Перед початком роботи встановлюємо їх на нуль.



а)



б)

Рисунок 3.12 – Схема (а) і зовнішній вигляд (б) устаткування.

Кути повороту опорних перерізів визначаються за показниками індикаторів 7 і 8, як $\text{tg } \alpha$. Відомо, що тангенси малих кутів дорівнюють самому куту:

$$\alpha = \text{tg } \alpha, \quad (3.20)$$

тоді на підставі заданої схеми (рис. 3.13) отримаємо співвідношення:

$$\theta_{A,B} = \text{tg } \theta = \frac{\Delta}{h}, \quad (3.21)$$

де Δ – показник індикатора, мм;

h – довжина стержнів, що встановлені в опорах А і В, $h = 100\text{мм}$.

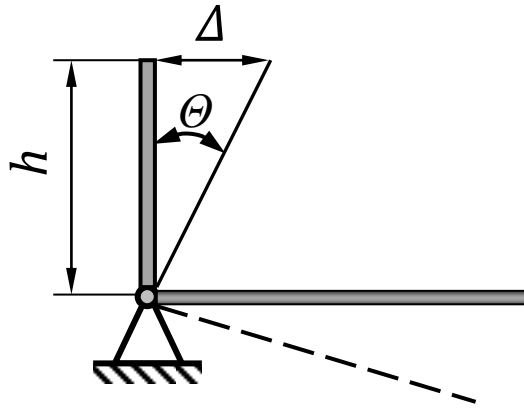


Рисунок 3.13 – Схема визначення кута повороту опорного перерізу.

Оснащення робочого місця

- ❖ лабораторна установка підготовлена до проведення експерименту;
- ❖ сталевий зразок у вигляді балки прямокутного перерізу (матеріал – сталь 65Г-Ш ГОСТ 1050-88);
- ❖ три індикатори годинникового типу;
- ❖ вантажі вагою у 1 кг;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання роботи

Для експериментального визначення головних напружень використовують сталеву балку прямокутного перерізу довжиною $\ell = 600\text{мм}$, яка лежить на двох опорах. Балка має наступні данні:

- ширина перерізу $b = 30\text{ мм}$;
- висота перерізу $h = 4\text{ мм}$;
- матеріал балки – сталь 65Г ГОСТ 1050-88;
- модуль пружності матеріалу $E = 2 \cdot 10^5\text{ МПа}$.

Лабораторна робота проводиться в такій послідовності:

1. Розглянути схему пристрою для проведення експерименту, ознайомитись з принципом її роботи.

2. Перевірити готовність установки до експерименту, встановити індикатори годинникового типу на нульову відмітку.

3. Встановити підвіску у центрі прольоту і повільно прикладати навантаження. Зняти показники з трьох індикаторів одночасно і підрахувати різницю показань відповідно приросту навантаження ΔF . Результати записати в журнал спостережень (табл. 3.3).

4. За різницею показань визначити вертикальне переміщення центру ваги перерізу в середині прольоту і кут повороту опорних перерізів відповідно до приросту навантаження ΔF . Результати записати у журнал спостережень (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Журнал спостережень і обробки результатів експерименту.

Інди- катори	Показники індикаторів		Різниця показань індикаторів, при $\Delta F = 10 \text{ Н}$	Дослідне значення переміщень		Теоретичне значення переміщень		Розход- ження результатів, %
	почат- кове	кінцеве		мм	рад	мм	рад	
A				-		-		
B				-		-		
K					-		-	

5. Визначити кут повороту, як тангенс кута відхилення стояка. Отримані значення кутів повороту записуємо в журнал спостережень (табл. 3.3).

6. Розрахувати прогин і кут повороту теоретичним шляхом, використовуючи спосіб Верещагіна. Результати записуємо в журнал спостережень (табл. 3.3).

7. Порівняти результати теоретичних і експериментальних розрахунків.

$$\Delta\theta_{A,B} = \left| \frac{\theta_{A,B} - \theta_T}{\theta_T} \right| \cdot 100\% \leq [15\%];$$

$$\Delta Y_K = \left| \frac{Y_K - Y_T}{Y_T} \right| \cdot 100\% \leq [15\%].$$

8. Зробити висновки та відповіді на контрольні запитання.

9. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

- Які деформації перерізів визначають у балках при згині?
 прогин та кут повороту;
 поздовжні деформації;
 поперечні деформації;
 відносні деформації.
- Як експериментально визначалась деформація прогину балки?
 за допомогою індикатора;
 за допомогою лінійки;
 за допомогою мікрометра;
 за допомогою штангенциркуля.

3. Як експериментально визначався кут повороту перерізу балки?
розраховувався тангенс кута повороту перерізу при замірюванні горизонтальної деформації ричага;
за допомогою лінійки;
за допомогою силовимірника;
за допомогою кутомірів.
4. Де в експериментальній балці найбільший прогин?
посередині балки;
на лівому опорному перерізі балки;
на правому опорному перерізі балки;
всі перерізи балки мають однаковий прогин.
5. Де в експериментальній балці найбільший кут повороту перерізу?
на правому та лівому торцевих перерізах балки;
посередині балки;
на правому опорному перерізі балки;
на лівому опорному перерізі балки.
6. За яким теоретичним способом визначались переміщення перерізів балки?
способом Верещагіна;
інтегралом Мора;
методом початкових параметрів;
за допомогою методу перерізів.
7. Де треба завантажити експериментальну балку, щоб одержати найбільший прогин?
посередині між опорами;
ближче до середини балки;
біля правого опорного перерізу;
біля лівого опорного перерізу.
8. Що називають жорсткістю балки при згині?
добуток модуля Юнга та моменту інерції перерізу;
осьовий момент інерції перерізу;
модуль пружності першого роду;
модуль зсуву.
9. Як можна зменшити прогин балки?
збільшити розміри поперечного перерізу;
зменшити розміри поперечного перерізу;
збільшити довжину балки;
збільшити навантаження.

10. Чи залежить найбільший кут повороту перерізу балки від точки прикладення навантаження?

- залежить;
- не залежить;
- змінний для даної балки;
- постійний для даної балки.

11. В яких одиницях визначається кут повороту?

- радіан;
- мм;
- кН;
- МПа.

12. Яка величина найбільше впливає на значення прогину балки?

- довжина балки;
- величина навантаження;
- матеріал балки;
- площа перерізу балки.

13. Від яких параметрів балки залежать деформація її перерізів?

- довжини балки і розмірів поперечного перерізу;
- площі поперечного перерізу балки;
- висоти поперечного перерізу балки;
- товщини поперечного перерізу балки.

14. В якому перерізі треба прикласти одиничну силу при теоретичному визначенні найбільшого прогину експериментальної балки способом Верещагіна?

- там, де треба визначити прогин;
- в опорному кінці балки;
- посередині балки;
- на краю балки.

15. В якому перерізі треба прикласти одиничний момент при теоретичному визначенні найбільшого кута повороту перерізу експериментальної балки способом Верещагіна?

- над правим, або лівим опорним перерізом балки;
- там, де прикладене звичайне навантаження балки;
- посередині балки;
- там, де визначається прогин балки.

16. Як визначити прогин балки способом Верещагіна?

$$y = \sum \frac{\omega_i \cdot M_{ci}}{E \cdot I_{н.л.}}$$

$$\theta = \sum \frac{\omega_i \cdot M'_{ci}}{E \cdot I_{н.л.}};$$

$$E \cdot I_{н.л.} \cdot y = \pm M_x;$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_x}{E \cdot I_{н.л.}}.$$

17. Як визначити кут повороту балки способом Верещагіна?

$$\theta = \sum \frac{\omega_i \cdot M'_{ci}}{E \cdot I_{н.л.}};$$

$$y = \sum \frac{\omega_i \cdot M_{ci}}{E \cdot I_{н.л.}};$$

$$E \cdot I_{н.л.} \cdot y = \pm M_x;$$

$$y = \int_o^e \frac{M_x \cdot M_o}{E \cdot I_{н.л.}} \cdot dx.$$

18. Як записується рівняння зігнутої осі балки (пружної лінії)?

$$E \cdot I_{н.л.} \cdot y = \pm M_x;$$

$$y = \sum \frac{\omega_i \cdot M_{ci}}{E \cdot I_{н.л.}};$$

$$\theta = \sum \frac{\omega_i \cdot M_{ci}}{E \cdot I_{н.л.}};$$

$$y = \int_o^e \frac{M_x \cdot M_o}{E \cdot I_{н.л.}} \cdot dx.$$

19. Який з наведених добутків є жорсткістю балки при згині?

$$E \cdot I_{н.л.};$$

$$E \cdot A;$$

$$G \cdot I_{н.л.};$$

$$\omega \cdot M_{ci}.$$

20. До якого методу визначення деформацій при згині належить спосіб Верещагіна?

енергетичний;

аналітичний;

графічний;

послідовний.

3.4. Лабораторна робота

СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧЕНІ БАЛКИ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРНОЇ РЕАКЦІЇ «ЗАЙВОЇ» НЕВІДОМОЇ

МЕТА РОБОТИ: експериментально і теоретично визначити опорну реакцію «зайвої» невідомої для статично невизначеної балки.

Короткі теоретичні відомості

Часто за умов роботи конструкції необхідно, наприклад, зменшити прогин балки АВ (рис. 3.14, а) поставивши додаткову опору ще й посередині, або зменшити деформацію балки, закріпленої одним кінцем (рис. 3.14, б), поставивши на вільному кінці опору. У таких випадках кількість опорних реакцій буде перевищувати кількість рівнянь статички і силові фактори в елементах таких конструкцій не можна визначити тільки з рівнянь рівноваги абсолютно твердого тіла.

Такі системи називають статично невизначними.

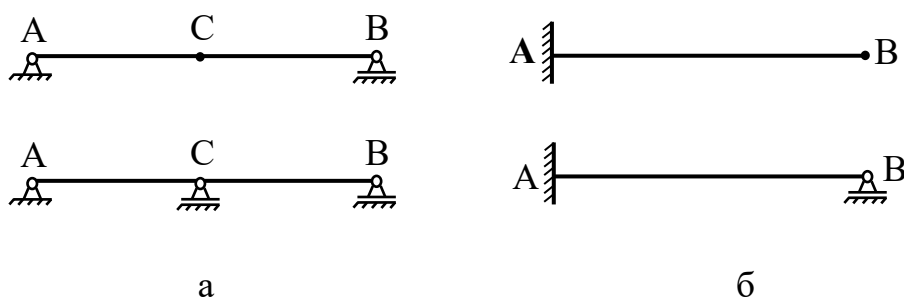


Рисунок 3.14 – Приклади статично визначних і статично невизначних балок.

Статична невизначеність системи виникає за наявності в ній зайвих зв'язків, тобто зв'язків, яких вона не потребує для збереження своєї геометричної незмінності і збереження рівноваги. «Зайвою» невідомою називають реакцію відкинутого зв'язку. За «зайву» невідому можна прийняти будь-яку реакцію в статично невизначеній балці.

Статично невизначеною вважається така балка, для якої реакції не можуть бути визначені за допомогою рівнянь рівноваги. Різниця між кількістю невідомих реакцій і кількістю незалежних рівнянь статички визначає **ступінь статичної невизначеності**, тобто вона дорівнює кількості додаткових зв'язків (по відношенню до кількості необхідних для фіксування балки, як жорсткого тіла), накладених на балку:

$$w = n - p, \quad (3.22)$$

де n – кількість невідомих реакцій;

p – кількість рівнянь статички.

Якщо зусилля (реакції зв'язків) не можна знайти за допомогою рівнянь статички, то треба скласти **додаткові рівняння**, так звані умови сумісності деформацій, які з урахуванням рівнянь рівноваги дають змогу встановити всі опорні реакції.

Статично невизначені системи мають декілька характерних особливостей:

❖ Статично невизначена система через наявність додаткових зайвих зв'язків, у порівнянні з відповідною статично визначеною системою виявляється більш жорсткою.

❖ Руйнування зайвих зв'язків у навантаженому стані, не веде до руйнування всієї системи в цілому.

❖ У статично невизначених системах виникають менші внутрішні зусилля, що визначає їх економічність в порівнянні зі статично визначеними системами при однакових зовнішніх навантаженнях.

❖ При розрахунку статично невизначених систем необхідно заздалегідь вибрати матеріал конструкції, так як необхідно знати його модулі пружності.

Вирішують такі системи шляхом складання так званої «основної системи», тобто «додаткові зв'язки» усуваються і балка стає статично визначеною. Відкинуті зв'язки замінюються відповідними зусиллями. Величина цих зусиль повинна бути такою, щоб обмеження, які накладалися на лінійні і кутові переміщення балки відкинутими зв'язками, виконувалися, тобто дотримувалися умови нерозривності деформацій (додаткове **рівняння сумісності деформацій**). При виконанні цих умов система стає еквівалентною до початкової. Для нескладних балок рівняння нерозривності деформацій складаються із застосуванням способу Верещагіна:

$$y = \sum \frac{\omega_i \cdot M_{Ci}}{E \cdot I_{н.л.}} = 0, \quad (3.23)$$

де ω_i – площа епюри згинальних моментів від зовнішніх навантажень (вантажна епюра), Н·мм²;

M_{Ci} – довжина ординати на епюрі згинальних моментів від одиничного навантаження ($\bar{S} = 1$) під центром ваги вантажної епюри, мм;

$E \cdot I_{н.л.}$ – жорсткість балки, Н·мм².

Якщо основну систему створити видаленням опори С (рис. 3.15), то в точці її розташування виникне деякий прогин. Для того, щоб зробити основну систему еквівалентною до початкової, в точці С необхідно прикласти таку зосереджену силу, яка б усунула цей прогин. В цьому випадку можна вважати, що прикладена зосереджена сила відповідає невідомій реакції R_C .

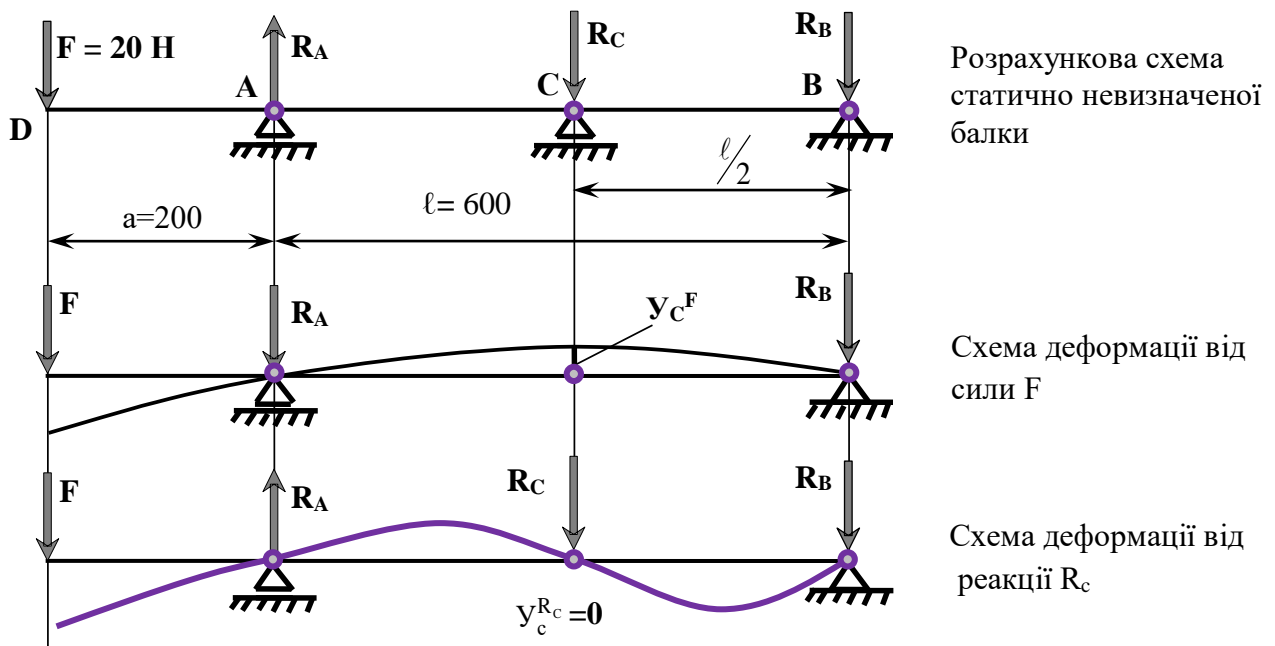


Рисунок 3.15 – Схема розкриття статичної невизначеності:
 а) розрахункова система, б) основна система, с) еквівалентна система.

На підставі цього додаткове рівняння сумісності деформацій буде мати вигляд:

$$y_c^F = y_c^{R_c}. \quad (3.24)$$

Таким чином, вимірявши величину прикладеної в точці С сили F , можна розрахувати невідому реакцію R_c статично невизначеної балки. Після цього балка стає статично визначеною і інші опорні реакції знаходяться традиційними методами статки (складанням силових і моментових рівнянь рівноваги).

Експериментальна установка. Експериментальне визначення зайвої невідомої проводять на універсальному стенді закріплюючи на силівій плиті відповідне лабораторне обладнання (рис. 3.16).

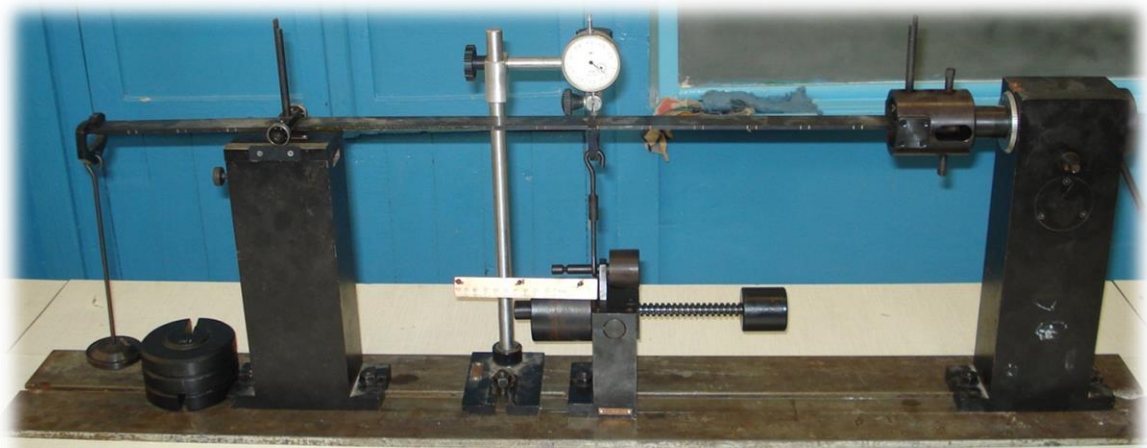
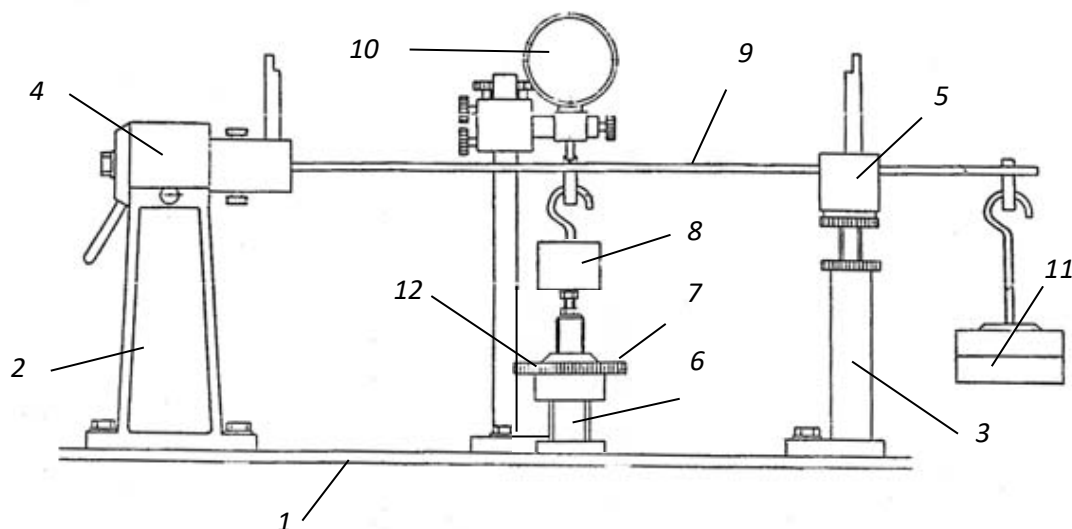


Рисунок 3.16 – Зовнішній вигляд лабораторної установки.

Установка складається з опорних стояків 2 і 3, закріплених в Т-подібному пазу силової плити 1 болтами. У стояку 2 закріплений підшипниковий вузол 4, а на стояк 3 спирається підшипниковий вузол 5 досліджуваної балки, які дозволяють їй вільно повертатися на опорах (рис. 3.17). Для досліджень використовують балку прямокутного перерізу.



Рисуюнок 3.17 – Схема устаткування.

У заданому місці розташування проміжної опори розміщена силова гвинтова стійка 6, яка з'єднана через підвіс і сергу з балкою 9.

На вільному перерізі балки встановлена серга з підвіскою для вантажу 11, за допомогою якого до балки прикладається зусилля. Відстань від опори до місця прикладення навантаження складає $a = 200$ мм. Навантаження балки проводиться повільно. При цьому максимальний прогин буде у середині балки в точці С, де і потрібно встановити додаткову опору. Індикатор годинникового типу 10, що контролює прогин балки в точці розташування проміжної опори повинен бути настроєним на нульову відмітку.

У разі, коли до балки прикладається зусилля, що забезпечує відсутність прогину в даній точці, можна вважати, що величина цього зусилля відповідає опорній реакції.

Додаткове навантаження прикладається у місці встановлення індикатора, переміщенням вантажу по розвантажувальному барабану поки балка не повернеться у початкове положення. При цьому стрілка індикатора повинна знову стати у нульове положення. За спеціальною шкалою навантажувального пристрою знімається величина додаткового навантаження, яке дорівнює величині опорної реакції R_C . Слід зауважити, що на розвантажувальному барабані **1 поділка** відповідає навантаженню у **2Н** (**1 поділка = 2Н**).

Оснащення робочого місця

- ❖ лабораторна установка, підготовлена до проведення експерименту;
- ❖ індикатор годинникового типу ИЧ-10;
- ❖ сталевий зразок у вигляді балки прямокутного перерізу (матеріал – сталь 65Г-Ш ГОСТ 1050-88);
- ❖ гирьова підвіска з вантажем 20 Н;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання роботи

Для експериментального визначення головних напружень використовують сталеву балку прямокутного перерізу довжиною $l = 600\text{мм}$, яка лежить на двох опорах і має консоль, що відстроїть від опори на 200мм .

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Скласти розрахункову схему статично невизначної балки.
2. Теоретичним шляхом, користуючись способом Верещагіна і методикою розрахунку статично невизначних балок, визначити чисельне значення «зайвої» невідомої (реакції відкинутого зв'язку) у місці розташування проміжної опори «С». Результат занеси у таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати визначення «зайвої» невідомої.

Величина навантаження, прикладеного до балки, Н	F	
Теоретичне значення реакції балки («зайвої» невідомої), Н	R_C^T	
Експериментальне значення реакції балки («зайвої» невідомої), Н	R_C^E	

3. Встановити індикатор годинникового типу у точці визначення опорної реакції і налаштувати його на нульову відмітку.

4. Встановити підвіску у крайньому лівому перерізі консольної частини балки і повільно навантажити балку силою $F = 20\text{кН}$.

5. Прикладаючи на вільному кінці балки навантаження, одночасно слідкувати за показаннями індикатора.

6. У місці встановлення індикатора прикласти додаткове навантаження, величина і напрямок якого забезпечить повернення балки у початкове положення (стрілка індикатора повинна знову стати у нульове положення).

7. Зафіксувати нульове положення індикатора. За спеціальною шкалою розвантажувального пристрою зняти величину додаткового навантаження, яке дорівнює величині опорної реакції R_C .

8. Результати експериментальних досліджень записати у таблицю 3.4.

9. Порівняти отримані результати реакції відкинутого зв'язку R_C , визначених теоретичним і експериментальним шляхом.

10. Зробити висновки та відповіді на контрольні запитання.

11. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Що таке статично невизначена балка?

балка, у якої кількість опорних реакцій більше кількості рівнянь рівноваги;

балка, у якої кількість опорних реакцій менше кількості рівнянь рівноваги;

балка, де однакова кількість опорних реакцій та рівнянь рівноваги.

2. Скільки прольотів повинна мати балка із шарнірними опорами, щоб вона була один раз статично невизначеною?

два прольоти;

один прольот;

чотири прольоти.

3. Скільки разів статично невизначена балка з трьома шарнірними опорами?

один раз;

два рази;

три рази.

4. Скільки разів статично невизначена балка с шарнірною опорою і жорстким закріпленням?

один раз;

два рази;

три рази.

5. Що таке «зайва» невідома?

невідома реакція, що виникає при звільнені балки від опори;

реакція балки, що виникає в опорах балки;

реакція балки, що визначається останньою з рівнянь рівноваги.

6. Що називають основною системою балки?

балку звільнену від зовнішнього навантаження та від «зайвої» опори;

балку без зовнішнього навантаження;

балку з усіма навантаженнями.

7. Що називають еквівалентною системою балки?

балку навантажену зовнішніми силами та «зайвою невідомою»;

балку звільнену від «зайвої невідомої» та без зовнішнього навантаження;

балку з навантаженням.

8. Яку реакцію двохпрольотної балки з трьома шарнірними опорами можна взяти як «зайву»?

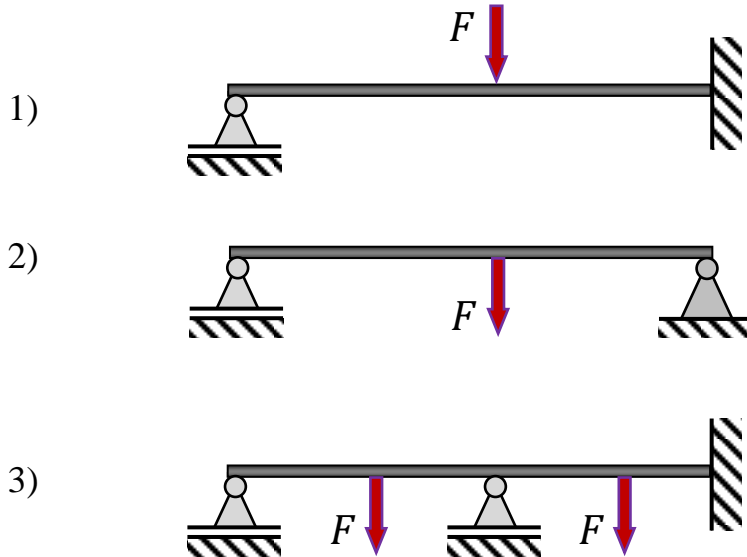
будь-яку з трьох;

тільки в лівій опорі;

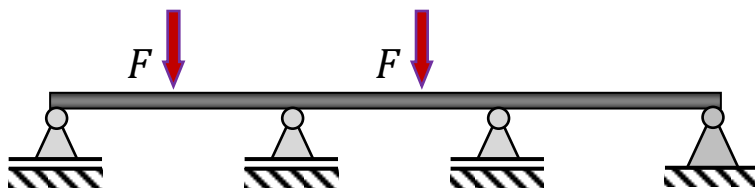
тільки в правій опорі.

9. Яким теоретичним способом у роботі визначали прогини перерізів балки?
 способом Верещагіна;
 інтегралом Мора;
 методом початкових параметрів.

10. Яка з цих балок один раз статично невизначена?



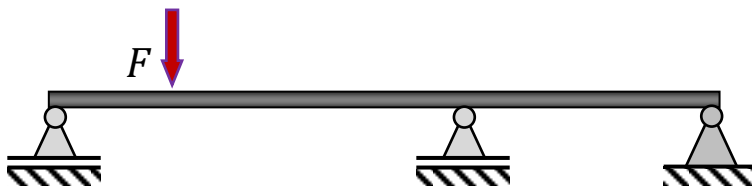
11. Яка ступінь статичної невизначеності цієї балки?



- два;
- три;
- один.

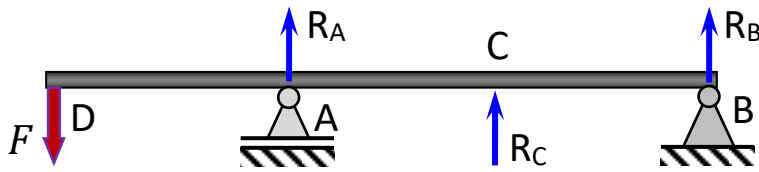
12. Як називається допоміжне рівняння до рівнянь рівноваги балки?
 рівняння сумісності деформацій;
 рівняння зігнутої осі балки;
 перевірочне рівняння рівноваги балки.

13. Яка ступінь статичної невизначеності цієї балки?



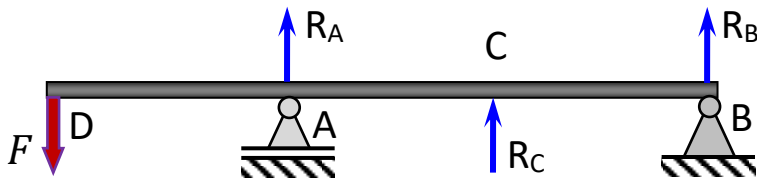
- Один;
- Два;
- Три.

14. В якому перерізі еквівалентної балки треба визначити прогин?



- в точці С;
- в точці А;
- в точці В.

15. Як для цієї еквівалентної балки записати рівняння сумісності деформацій?

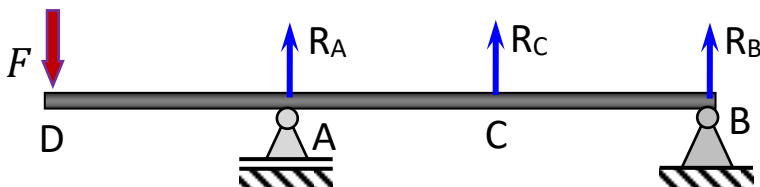


$$Y_C = Y_C^F + Y_C^{R_C} = 0;$$

$$Y_D = Y_D^F = 0;$$

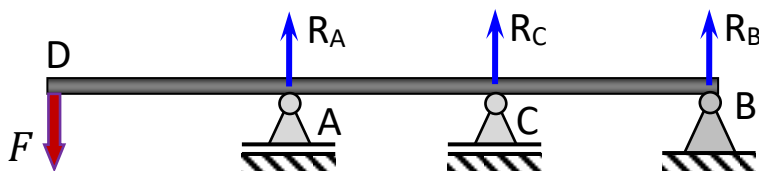
$$Y_B = Y_B^F + Y_B^{R_B} = 0.$$

16. В якому перерізі балки треба прикласти одиничну силу для вирішення рівняння сумісності деформацій способом Верещагіна?



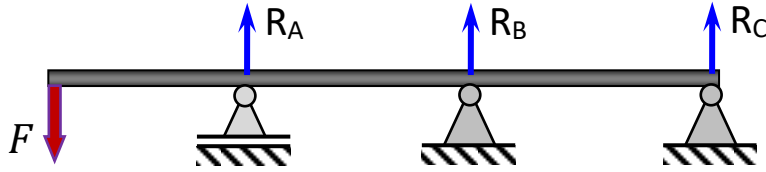
- В точці С;
- В точці А;
- В точці В.

17. Скільки рівнянь рівноваги (рівнянь статyki) можна записати для цієї балки?



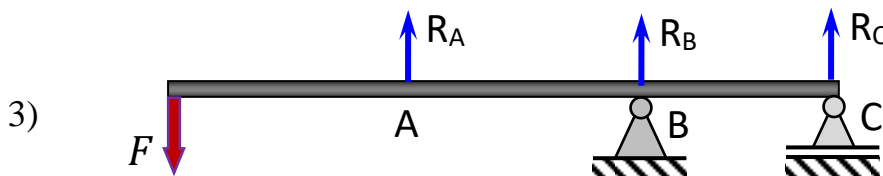
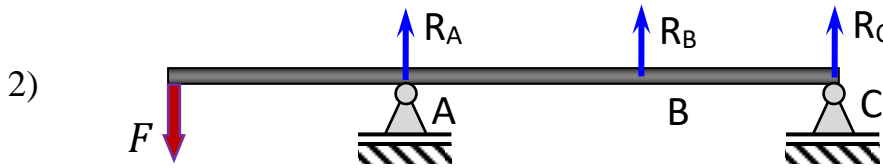
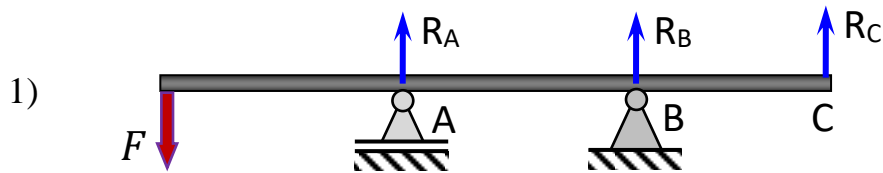
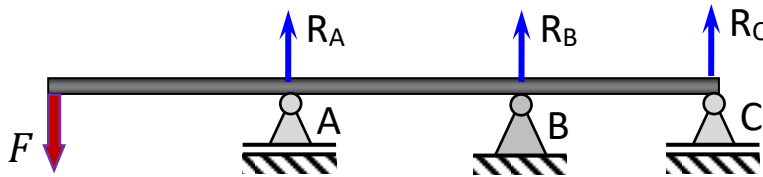
- Три;
- Два;
- Одне.

18. Скільки рівнянь сумісності деформацій треба написати для цієї балки?

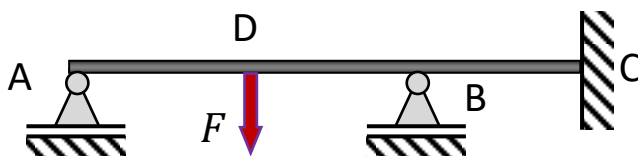


- Два;
- Одне;
- Три.

19. Яка еквівалентна система є найбільш оптимальною для цієї балки?



20. Яка ступінь статичної невизначеності для цієї балки?



- Два;
- Три;
- Чотири.

3.5. Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ

ПІД ЧАС КОСОГО ЗГИНУ

МЕТА РОБОТИ: визначити дослідним шляхом величину напружень у точці контрольного перерізу та величину й напрямок переміщення вільного кінця балки при косому згині і порівняти експериментальні дані з теоретичними.

Короткі теоретичні відомості

Часто площина дії зовнішніх сил і моментів не збігається ні з однією з головних осей інерції поперечного перерізу балки, у цьому випадку напрямок переміщення не співпадає з площиною прикладання зовнішніх сил. Такий вид деформації називається **косим згином** (рис. 3.18). Він відноситься до складного виду: в поперечних перерізах балки виникають поперечні сили і згинальні моменти відносно головних осей інерції X і Y поперечного перерізу балки. Тому косий згин можна розглядати як сполучення двох плоских згинів.

Головними площинами балки називаються площини, що проходять через поздовжню вісь балки і головні центральні осі інерції поперечних перерізів.

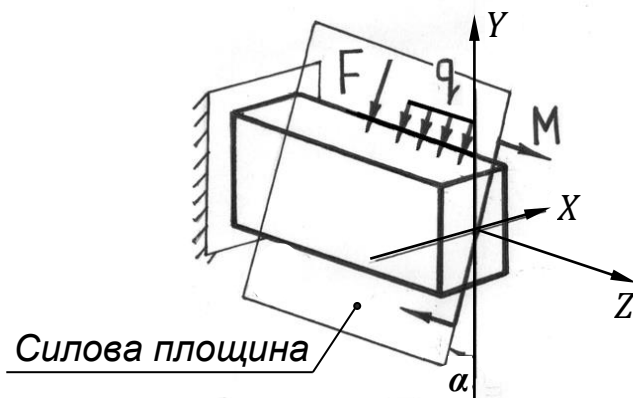


Рисунок 3.18 – Схема навантаження балки при косому згині.

Розглянемо навантаження жорстко закріпленого стержня прямокутного поперечного перерізу (рис. 3.19, а), у якого ширина прямокутника – b , висота – h , довжина стержня – l . Осі симетрії X і Y є головними центральними осями інерції поперечних перерізів.

На торці стержня під кутом α діє сила F , прикладена в центрі ваги цього перерізу. Силу F можна розкласти на дві складові: F_x і F_y , лінії дії яких паралельні відповідно до осей X і Y . При цьому:

$$F_x = F \cdot \sin\alpha;$$

$$F_y = F \cdot \cos\alpha.$$

У результаті ми приходимо до схеми навантаження стержня, зображеної на рис. 3.19, б).

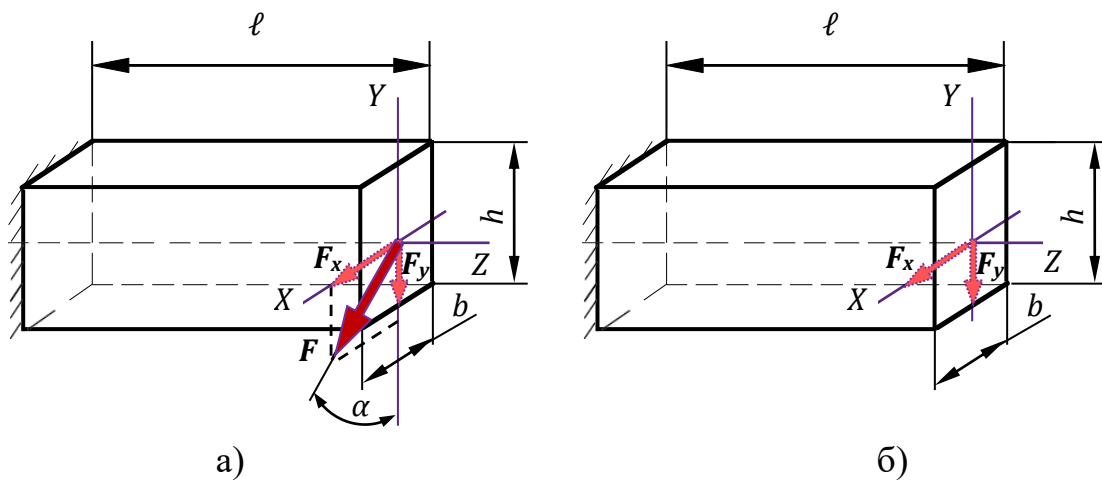


Рисунок 3.19 – Схема навантаження балки при косому згині.

На підставі принципу незалежності дії сил при пружному деформуванні наведена схему навантаження можна представити як суму двох прямих згинів у головних площинах. Тому в будь-якому поперечному перерізі балки згинальний момент M_z , розкладається на складові M_x і M_y , що згинають балку відносно осей X і Y . Їх величини визначаються так:

$$M_x = M \cdot \sin\alpha = F \cdot \ell \cdot \sin\alpha;$$

$$M_y = M \cdot \cos\alpha = F \cdot \ell \cdot \cos\alpha,$$

де M – згинальний момент у площині дії сили F ; Н·м;

F – навантаження на вільному кінці балки, Н;

ℓ – відстань від точки прикладення сили F до заданої точки (контрольний переріз).

Напруження. У будь-якій точці перерізу бруса з координатами x і y виникають нормальні напруження від кожного зі складових згинального моменту M_x і M_y (рис. 3.20). Використавши спосіб додавання сил, нормальне напруження в цьому перерізі знаходимо за формулою:

$$\sigma = \frac{M_y \cdot x}{J_y} + \frac{M_x \cdot y}{J_x} = M \left(\frac{x}{J_y} \sin\alpha + \frac{y}{J_x} \cos\alpha \right), \quad (3.25)$$

де x, y – координати точки де визначаються напруження, мм;

J_x, J_y – відповідно осьові моменти інерції відносно осей Y та X . Для прямокутного перерізу (рис. 3.19) із заданими розмірами b і h визначаються за формулами:

$$J_x = \frac{b \cdot h^3}{12}; \quad J_y = \frac{h \cdot b^3}{12}, \quad (3.26)$$

де α – кут нахилу площини дії сил, градуси.

Перетворимо формулу (3.25), прийнявши до уваги, що відношення:

$$\frac{J_x}{y} = W_x; \quad \frac{J_y}{x} = W_y.$$

Це є осьові моменти опору перерізу. Для прямокутного перерізу (рис. 3.19) із заданими розмірами b і h визначаються за формулами:

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}; \quad W_y = \frac{h \cdot b^2}{6}. \quad (3.27)$$

Отримаємо:

$$\sigma = \frac{M_y}{W_y} + \frac{M_x}{W_x}. \quad (3.28)$$

Положення нейтральної лінії знайдемо з умови, що в заданій точці напруження дорівнює нулю, тоді рівняння нейтральної лінії матиме вигляд:

$$\frac{M_y \cdot x_0}{J_y} + \frac{M_x \cdot y_0}{J_x} = 0. \quad (3.29)$$

Або

$$\frac{x_0}{J_y} \sin \alpha + \frac{y_0}{J_x} \cos \alpha = 0, \quad (3.30)$$

де y_0, x_0 – координати довільної точки В, що належить нейтральній осі, мм.

З отриманих рівнянь (3.29) та (3.30) витікає, що положення нейтральної лінії визначається наступним чином відповідно:

$$\begin{aligned} \frac{y_0}{x_0} &= \frac{M_y \cdot J_x}{M_x \cdot J_y} = \operatorname{tg} \beta, \\ \text{або} \quad \frac{y_0}{x_0} &= -\frac{J_x}{J_y} \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \beta, \end{aligned} \quad (3.31)$$

де β – кут нахилу нейтральної лінії до осі X поперечного перерізу, градуси.

Отже положення нейтральної лінії залежить не від величини сили, а лише від кута нахилу площини дії сили до осі та від форми перерізу.

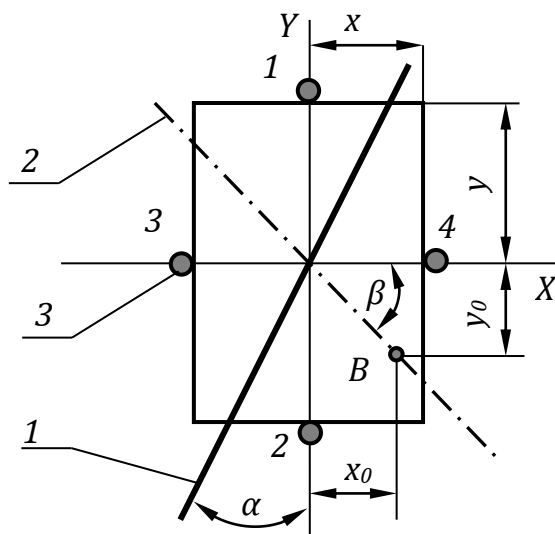


Рисунок 3.20 – Поперечний переріз бруса при косому згині:
1 – силова площина; 2 – нейтральна вісь; 3 – тензорезистори.

Із формули (3.28) витікає, що при косому згині в загальному випадку, коли $J_x \neq J_y$, нейтральна вісь не перпендикулярна силовій площині.

Теоретичне значення кута β визначається за формулою:

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(-\frac{J_x}{J_y} \operatorname{ctg} \alpha \right). \quad (3.32)$$

Із формули (3.29) видно: якщо $J_x = J_y$, то $\operatorname{tg} \beta = \operatorname{ctg} \alpha$, тобто нульова лінія і лінія дії сили F взаємно перпендикулярні.

Переміщення. Переміщення (прогин) будь-якої точки поперечного перерізу при косому згині f є векторною сумою переміщень (прогинів) від згинів у горизонтальному f_x і вертикальному f_y напрямках (рис. 3.21):

$$f_T = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (3.33)$$

У кожному конкретному випадку прогини у вертикальному і горизонтальному напрямках розраховуються за стандартними методиками, як для прямого згину (наприклад, способом Верещагіна).

У цій лабораторній роботі досліджується консольна балка, жорстко закріплена одним кінцем і завантажена на вільному кінці зосередженою силою. Для неї найбільші прогини будуть на кінці консолі. Вони визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_y} \cdot \cos \alpha; \\ f_y &= \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_x} \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (3.34)$$

де F – навантаження на балку, Н;

L – довжина балки, між жорстким закріпленням і ділянкою прикладення сили, $L = 700$ мм;

E – модуль пружності матеріалу балки, $E = 2 \cdot 10^5 \dots 2,15 \cdot 10^5$ Н/мм²;

α – кут між напрямком площини дії сил (вертикальною площиною) і площиною, сполученою з напрямком головної осі Y , задається викладачем.

Виходячи з рівнянь (3.31) і (3.32) при косому згині напрямок повного переміщення (рис. 3.21) визначається як

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{J_x}{J_y} \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.35)$$

або

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{J_x}{J_y} \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.36)$$

тобто при косому згині у загальному випадку, коли $J_x \neq J_y$, повні переміщення не лежать в силовій площині (як кажуть, балку «веде»).

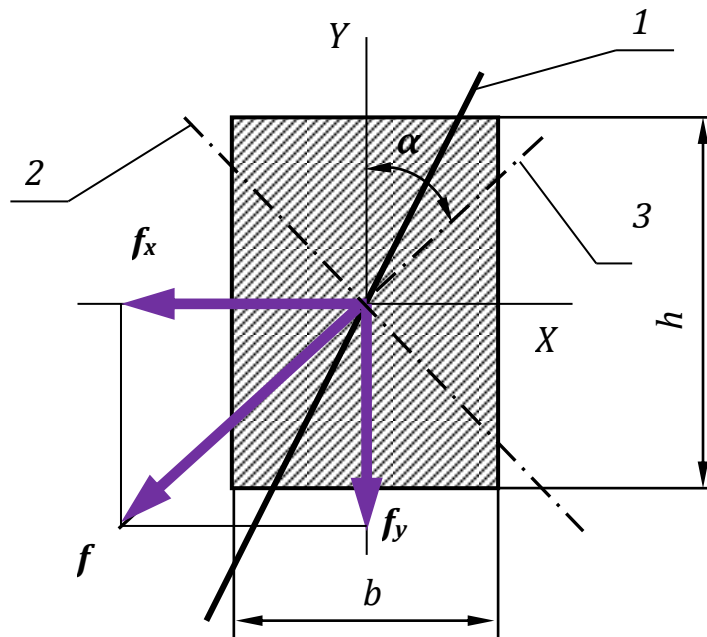


Рисунок 3.21 – Поперечний переріз бруса при косому згині:
1 – силова площина; 2 – нейтральна лінія; 3 – площина згину.

У той же час, оскільки при косому згині співвідношення

$$\frac{M_y}{M_z} = \operatorname{tg} \alpha$$

по довжині всієї балки є постійним, пружна лінія розташовується в одній площині – площині згину.

Отже, прогин балки відбувається не в площині дії зовнішніх навантажень, а в площині, перпендикулярній до нейтральної лінії.

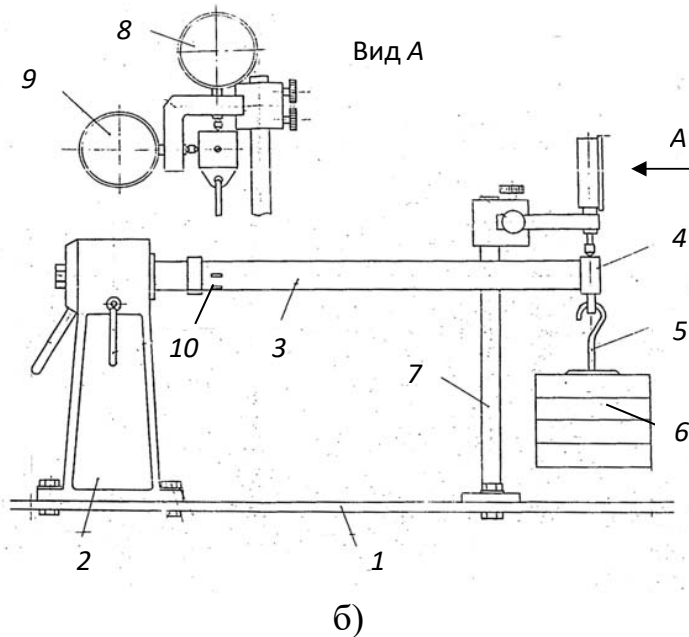
Експериментальна установка. На рисунку 3.22, а показано обладнання для проведення лабораторної роботи. Воно складається з опорного стояка 2, що закріплений в Т-подібному пазу силової плити 1 болтовими з'єднаннями, на якому кріпиться дослідна консольна балка прямокутного перерізу 3 (рис. 3.22, б). Балка повернута в стояку 2 на заданий кут α і зафіксована в такому положенні. На кінці балки є підшипниковий вузол 4, через який за допомогою підвісу 5 вона навантажується вантажами 6.

У перерізі балки поблизу закріплення, на бічних гранях наклеєні чотири тензодатчики 10, які з допомогою блоку вимірювання деформацій ВД реєструють деформації, що виникають при навантаженні балки. Тензодатчики № 1-2 і 3-4 наклеєні на протилежних гранях балки (рис. 3.20).

На стояку 7 встановлені два індикатори годинникового типу ИЧ-10, один з яких 8 вимірює переміщення кінця балки у вертикальному напрямку, а другий 9 – в горизонтальному.



а)



б)

Рисунок 3.22 – Зовнішній вигляд (а) та схема (б) лабораторної установки.

Оснащення робочого місця

- ❖ лабораторна установка – балка прямокутного перерізу із закріпленими тензодатчиком;
- ❖ два індикатори годинникового типу ИЧ-10;
- ❖ цифровий тензорезисторний вимірювач деформацій ИДЦ-1;
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання роботи

Для проведення експерименту використовують сталеву балку прямокутного перерізу довжиною $L = 700\text{мм}$ (рис. 3.23,а). Балка має наступні дані:

- ширина перерізу $b = 12\text{ мм}$;
- висота перерізу $h = 24\text{ мм}$;

- матеріал балки - сталь 45 ГОСТ 1050-88;
- модуль пружності матеріалу $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Встановити задане значення положення силової площини по відношенню до вертикальної осі (кут α) шляхом повороту балки в опорному стояку і зафіксувати її в такому положенні стопорним пристроєм (рис. 3.23,б).

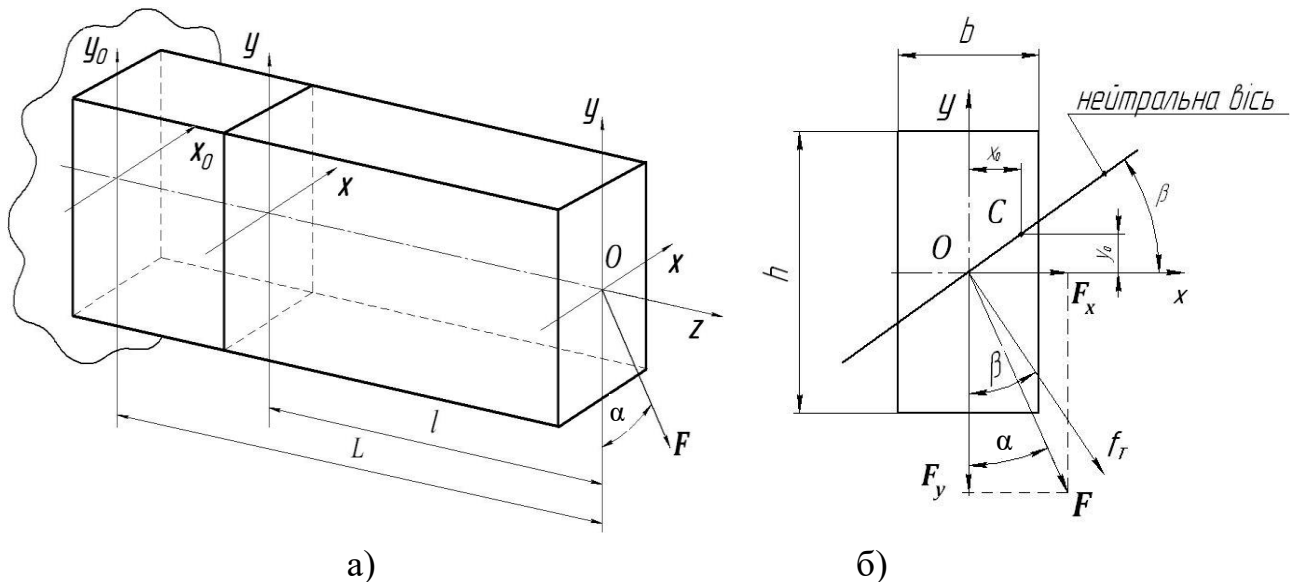


Рисунок 3.23 – Схема дослідної балки (а) та схема розташування навантажень і прогинів у перерізі (б).

2. На балку встановити індикатори годинникового типу у напрямках осей X і Y . Шкали обох індикаторів переміщень вивести на нуль.

3. Підключити тензодатчики у заданому перерізі балки, які знаходяться в зоні косоного згину та увімкнути вимірювач деформацій.

4. При відсутності зовнішнього навантаження зареєструвати показники тензорезисторів № 1, 2, 3, 4, які розглядаються в подальшому як вихідні – «умовний нуль». Результати занести в журнал спостережень (табл. 3.5).

5. Провести послідовне навантаження балки вантажами 10, 20, 30Н. Зняти відповідні показники з вимірювача деформацій A_1 і A_2 та індикаторів переміщень Δ_y та Δ_x . Визначити повний прогин f_e балки:

$$f_e = \sqrt{\Delta_z^2 + \Delta_y^2}.$$

Результати занести в журнал спостережень (табл. 3.5).

6. Визначити експериментально напруження в точках розташування тензорезисторів № 1-4, як:

$$\sigma^e = E \cdot \alpha \cdot (\Delta A_1 + \Delta A_2),$$

де α – ціна одиниці дискретності приладу (ВД), $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-6}$;

ΔA_1 і ΔA_2 – приращення деформацій у місцях встановлення тензодатчиків для збільшення навантаження $\Delta F=10\text{Н}$, як різниця першого і наступних показань приладу (ВД);

$E = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль поздовжньої пружності матеріалу дослідної балки.

Таблиця 3.5 – Журнал спостережень і обробки результатів експерименту.

Навантаження, Н	Показання індикаторів годинного типу $\times 0,01$; мм		Повний прогин, мм		Показання вимірювача деформацій, зняті з тензодатчиків				Внутрішні згинальні моменти, (розрахункові), Н·мм		Теоретичні та експериментальні значення напружень, МПа	
	уздовж осі Y, Δ_y	уздовж осі X, Δ_x	теоретичне f_T	експериментальне f_e	A_1	ΔA_1	A_2	ΔA_2	M_y	M_z	σ^T	σ^e
0												
10												
20												
30												

7. Визначити повний прогин та напруження в контрольному перерізі теоретичним шляхом та записати у журнал спостережень (табл. 3.5).

8. Порівняти теоретичні та експериментальні значення повного прогину та напруження в контрольному перерізі, визначити розбіжність між отриманими значеннями. Результати порівняння занести в таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Порівняння теоретичних і експериментальних величин переміщень та напружень при найбільшому навантаженні.

Величина	Теоретичні значення	Експериментальні значення	Розбіжність, %
повний прогин	$f_T =$ мм	$f_e =$ мм	
напруження в контрольному перерізі	$\sigma^T =$ Н/мм ²	$\sigma^e =$ Н/мм ²	

9. Зробити висновки та відповіді на контрольні запитання.

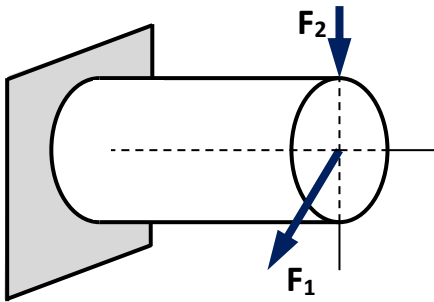
10. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Який опір буде складним?

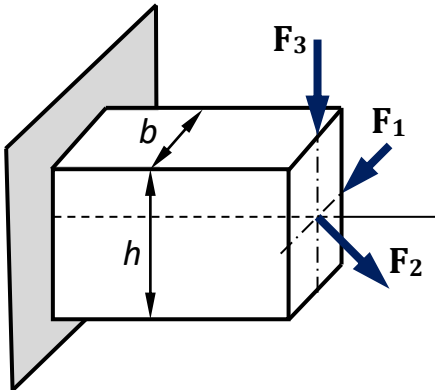
- якщо на брус діють 2 сили, що його згинають і розтягують;
- якщо на брус діють 2 сили, що його розтягують;
- якщо на брус діють 2 моменти, що його скручують;
- якщо на брус діють 2 сили, що його розтягують і стискають.

2. В якому випадку буде косий згин?



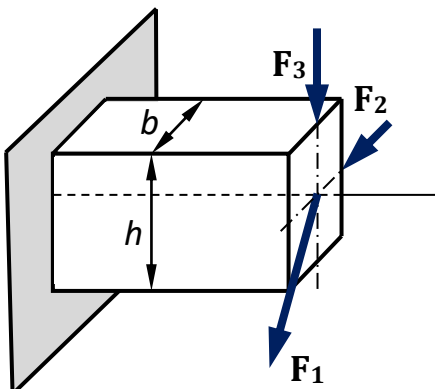
- якщо діє сила F_1 ;
- ні в якому;
- якщо діє сила F_2 ;
- якщо діє сила F_1 і F_2 .

3. В якому випадку буде косий згин?



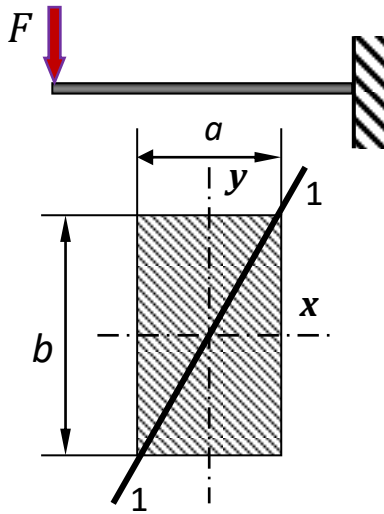
- якщо діє сила F_2 ;
- якщо діє сила F_1 ;
- якщо діє сила F_3 ;
- ні в якому.

4. В якому випадку буде косий згин?



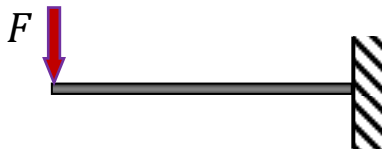
- якщо діє сила F_1 ;
- якщо діє сила F_2 ;
- ні в якому;
- якщо діє сила F_3 .

5. Як треба прикласти силу F на вільному кінці балки, щоб отримати косий згин?



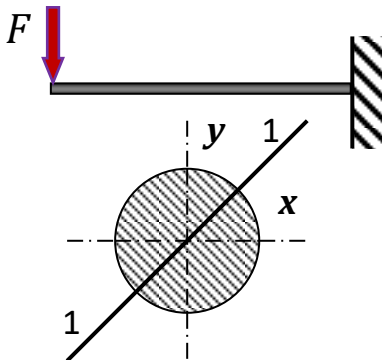
уздовж лінії 1-1;
уздовж осі x ;
уздовж осі y ;
ні якому випадку косоного згину не буде.

5. Де розташовано небезпечний переріз при косому згині балки?



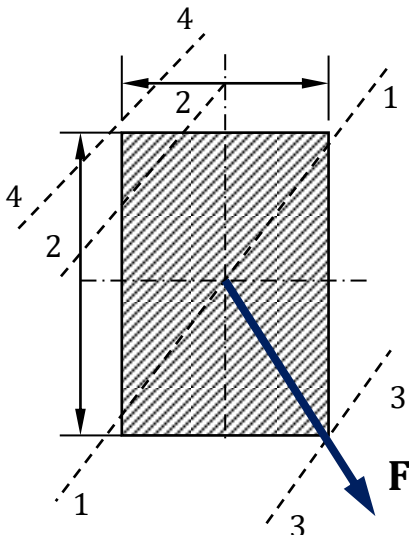
у перерізі жорсткого закріплення балки;
там, де діє сила F ;
по середині балки;
небезпечного перерізу немає.

6. Як треба прикласти силу F на вільному кінці балки, щоб був косий згин?



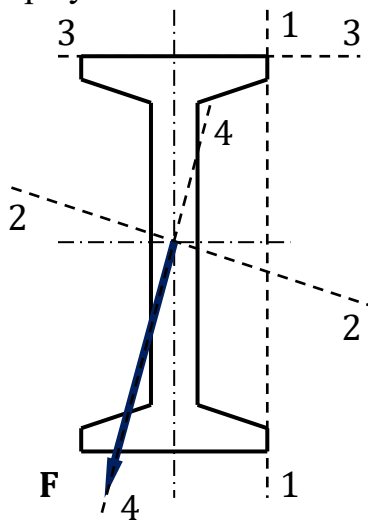
уздовж лінії 1-;
уздовж осі x ;
косоного згину не може бути;
уздовж осі y .

7. Як проходить нейтральна вісь у перерізі при косому згині балки?



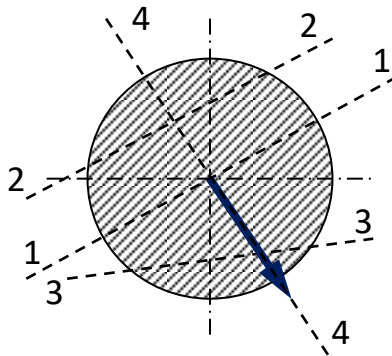
лінія 1-1;
лінія 2-2;
лінія 3-3;
лінія 4-4.

8. Як проходить нейтральна вісь у перерізі при косому згині балки даного перерізу?



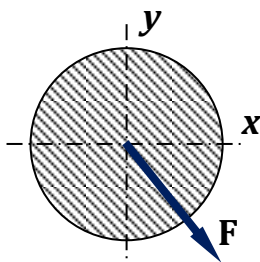
лінія 2-2;
лінія 1-1;
лінія 3-3;
лінія 4-4.

9. Як проходить нейтральна вісь у круглому перерізі балки?



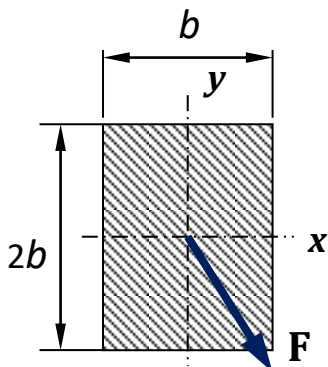
лінія 1-1;
лінія 2-2;
лінія 3-3;
лінія 4-4.

10. Прогин в якому напрямі x або y , буде більшим?



однаковий прогин в обох напрямках;
уздовж осі x ;
уздовж осі y ;
уздовж лінії дії сили F .

11. Як розрахувати повний прогин f балки при косому згині?



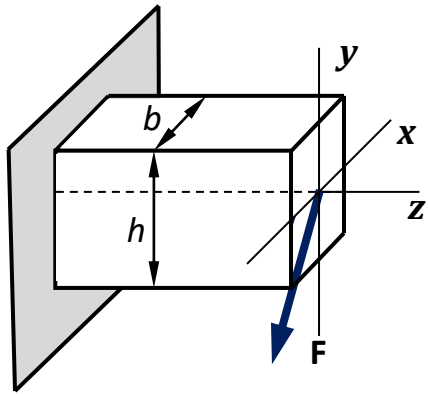
$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2};$$

$$f = f_x + f_y;$$

$$f = f_x - f_y;$$

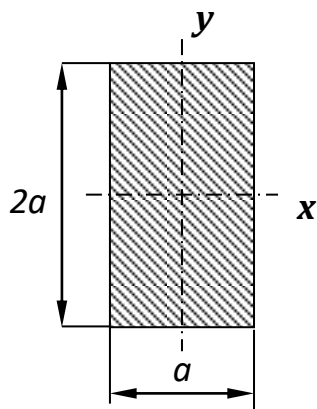
$$f = f_x \cdot f_y.$$

12. У якому перерізі найбільший згинальний момент при косому згині?



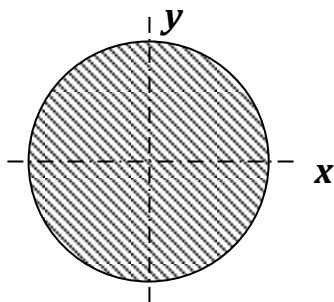
- в перерізі жорсткого закріплення балки;
- в перерізі де діє сила F ;
- в середині балки;
- на вільному кінці балки.

13. Який осьовий момент опору перерізу балки більший?



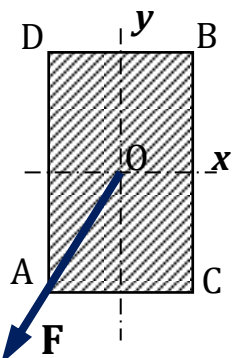
- відносно осі x ;
- однакові відносно осі x та y ;
- відносно осі y ;
- однакові відносно будь-якої осі перерізу.

14. Відносно до якої осі осьовий момент опору перерізу балки буде більший для круглого перерізу?



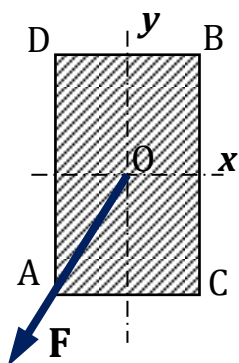
- однакові відносно будь-якої осі;
- відносно осі x ;
- відносно осі y ;
- однакові відносно осі x та y .

15. В якій точці перерізу балки при косому згині найбільші розтягуючі напруження?



- у точці B ;
- у точці A ;
- у точці C ;
- у точці D .

16. В якій точці перерізу балки при косому згині найбільші стискаючі напруження?



- у точці А;
- у точці В;
- у точці С;
- у точці D.

17. За якими напруженнями проводять розрахунок на міцність балки при її косому згині?

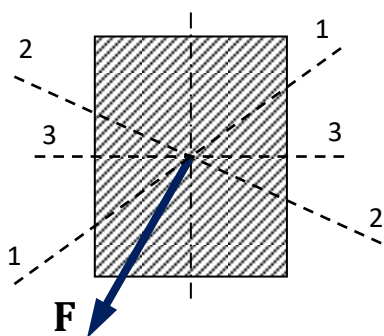
- за сумарними нормальними напруженням;
- за дотичними напруженням;
- за сумою нормальних і дотичних напружень;
- за нормальними напруженням.

18. Яка деформація називається косим згином?

коли площина, в якій згинається балка, не співпадає с площиною дії сили, що згинає;

- коли сила, що згинає балку, прикладена уздовж вертикальної площини;
- коли площина дії сили співпадає з площиною, в якій згинається балка;
- коли на балку діє сила, що розтягує.

19. На якій лінії перерізу сумарні нормальні напруження при косому згині дорівнюють нулю?



- на лінії 2-2;
- на лінії 1-1;
- на лінії 3-3;
- на лінії дії сили **F**.

3.6. Лабораторна робота

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ СИЛИ ДЛЯ СТИСНУТОГО СТЕРЖНЯ

МЕТА РОБОТИ: вивчення процесу втрати стійкості при осьовому стиску гнучких стержнів.

Короткі теоретичні відомості

Пружна система може перебувати в стійкому і нестійкому станах рівноваги. Стан рівноваги пружної системи називається **стійким**, якщо малі зовнішні збурювання викликають малі відхилення системи від цього положення рівноваги, і після припинення дії цих збурень система повертається в початковий стан рівноваги. Стан рівноваги пружної системи називається **нестійким**, якщо малі зовнішні збурювання викликають великі відхилення системи від цього стану рівноваги і після припинення дії збурень система в початковий стан рівноваги не повертається.

Для багатьох деталей машин, елементів конструкцій і споруд розрахунки на міцність і жорсткість бувають недостатніми, щоб отримати повне уявлення про їх працездатність, виявити, чи знаходиться конструкція або її частина у стані стійкої рівноваги, тому для надійної роботи конструкції необхідно, щоб усі її елементи були як міцними так і стійкими.

Вперше Ейлером було досліджене питання стійкості ідеального стержня: з геометрією без початкових дефектів, ідеальними шарнірними закріпленнями на кінцях та з ідеально пружного матеріалу. Цю задачу він сформулював і розв'язав у 1744 році.

Леонард Ейлер – російський математик і механік, академік Петербурзької академії наук. Народився в Швейцарії, був запрошений до Росії в 20-ти річному віці, де прожив 14 років, потім переїхав до Берліна. Другий раз запрошений у Росію Катериною II, де і прожив до кінця життя. Ейлер зробив істотний внесок у становлення російської науки.

За Ейлером, під втратою стійкості розуміють процес переходу від початкової прямолінійної форми рівноваги між навантаженням і внутрішніми силами до нової зігнутої форми рівноваги. При цьому припускається, що при збільшенні стискаючого статичного навантаження настає такий стан пружної системи (байдужа форма рівноваги), коли в той самий час можуть існувати і вихідна і суміжна з нею форма рівноваги. Такий стан пружної системи характеризується роздвоєнням форм рівноваги (біфуркацією).

Критичною силою за Ейлером вважається максимальна стискаюча сила, при якій настає роздвоєння форм рівноваги пружної системи. Якщо навантаження перевищує критичну силу, то відбувається перехід до нової, зігнутої форми рівноваги (втрата стійкості). Процес втрати стійкості супроводжується розвитком досить великих переміщень пружної системи за короткий час. Лінійна залежність між прирощенням навантаження і переміщенням, що виникає – відсутня. В інженерних конструкція втрата стійкості унеможлиблює їх подальшу експлуатацію.

Розглянемо прямолінійний стержень, що знаходиться під дією центрально-прикладеної стискаючої сили F , лінія дії якої співпадає з віссю стержня (рис. 3.24, а). Враховуючи умови закріплення можна прийняти схему стержня з шарнірно-закріпленними кінцями (рис. 3.24, б).

Якщо стержень стиснути силою F , то із зростанням цієї сили стержень спочатку тільки вкорочується, зберігаючи свою прямолінійну форму, а потім настає явище втрати стійкості – **стержень викривляється** (рис. 3.24, в).

Отже можна знайти таке значення стискаючої сили $F_{кр}$, при якому прямолінійна форма рівноваги стає нестійкою.

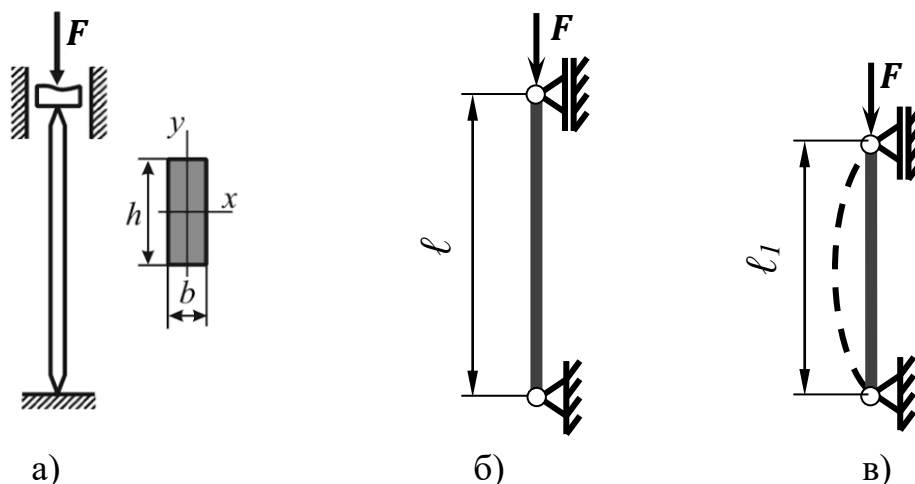


Рисунок 3.24 – Схема навантаження стержня (а), розрахункова схема (б) і схема деформації (в).

Якщо $F < F_{кр}$, то прямолінійна форма рівноваги стержня стійка. При $F > F_{кр}$, прямолінійна форма рівноваги нестійка. Зміна стійкої форми рівноваги відбувається при $F = F_{кр}$.

Відповідно до теорії Ейлера критична сила $F_{кр}$ для окремого центрально-стиснутого стержня визначається за формулою:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l^2}, \quad (3.37)$$

де E – модуль пружності I-го роду, МПа;

J_{min} – мінімальний момент інерції перерізу, мм⁴;

l – довжина стержня, мм.

Якщо умови закріплення стержня однакові у всіх поздовжніх площинах, то втрата стійкості відбувається в площині найменшого опору. А це означає, що у формулі (3.37) використовується найменша величина осевого момента інерції J_{min} . Наприклад, стержень прямокутного перерізу (рис. 3.23, а) втрачає стійкість (згинається) в площині OXZ. У цьому випадку значення мінімального момента інерції, при $h > b$, визначиться так:

$$J_y = \frac{h \cdot b^3}{12}. \quad (3.38)$$

Пізніше, досліджуючи питання втрати стійкості формула Ейлера (3.37) була удосконалена Феліксом Ясинським (XIX сторіччя), російським ученим-механіком і інженером, фахівцем у галузі будівельної механіки, професором Петербурзького інституту інженерів шляхів сполучення. Ним було досліджено стійкість за границю пропорційності і встановлена залежність гнучкості стержня від способів закріплення його кінців. На сьогодні формула Ейлера має вигляд:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{(\mu \cdot \ell)^2}, \quad (3.39)$$

де μ – коефіцієнт приведеної довжини, який для стержня на шарових опорах (рис. 3.24, б) дорівнює $\mu = 1$;

$\mu \cdot \ell$ – приведена (розрахункова) довжина стержня.

Значення коефіцієнта приведеної довжини μ залежить від умов закріплення стержня і визначається як:

$$\mu = \frac{1}{n}, \quad (3.40)$$

де n – число, що показує кількість довжин півхвиль синусоїди, яка відповідає формі втрати рівноваги стержня (формі зігнутої осі стержня). Для стержня на рисунку 3.24, б: $n = 1$, а отже $\mu = 1$.

Фелікс Ясинський також ввів поняття **критичних напружень** $\sigma_{кр}$ та критичної гнучкості, або **граничної гнучкості** $\lambda_{гр}$.

Отримавши значення критичної сили за формулою Ейлера, можемо визначити критичне напруження, що виникає в момент втрати стійкості:

$$\sigma_{кр} = \frac{F_{кр}}{A} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{(\ell)^2 \cdot A} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\ell / i_{min}\right)^2} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(\lambda_{гр})^2}, \quad (3.41)$$

де i_{min}^2 – мінімальний осевий радіус інерції стержня, мм²:

$$i_{min}^2 = J_{min} / A,$$

де A – площа поперечного перерізу стержня, мм².

$\lambda_{гр}$ – гнучкість стержня.

Із формули 3.41 легко знайти граничну гнучкість. Її значення залежить від властивостей матеріалу і характеристик міцності – границі пропорційності $\sigma_{пц}$:

$$\lambda_{гр} \geq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{пц}}} . \quad (3.42)$$

Для звичайної конструкційної сталі – $\lambda_{гр} > 100$, для чавуну – $\lambda_{гр} > 80$, для дюралюмінію – $\lambda_{гр} > 76$, для сосни – $\lambda_{гр} > 110$.

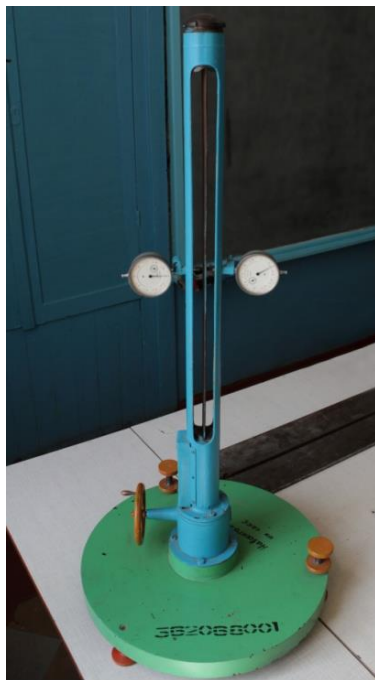
Розрахункову гнучкість стержня λ можна визначити по формулі:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i_{min}}, \quad (3.43)$$

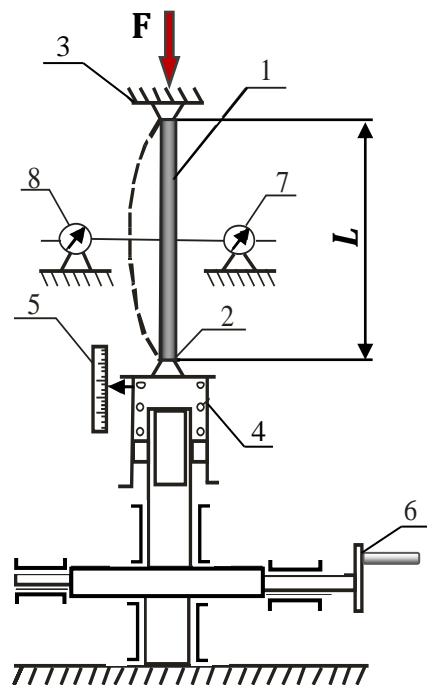
де i_{min} – мінімальний радіус інерції перерізу стержня, мм:

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{A}} .$$

Експериментальна установка. Для проведення досліджень використовуємо лабораторну установку для визначення критичної сили, загальний вигляд якої зображено на рисунку 3.25 (а). Дослідний стержень 1 встановлюємо на шарнірні опори 2 і 3. При чому опора 2 – рухома, а опора 3 – нерухома. По середині зразка, де у наслідок прикладення сили буде максимальний прогин, встановлюємо індикатори годинникового типу 7 і 8. При проведенні дослідження стискання стержня здійснюється за допомогою навантажувального пристрою через еластичну пружину 4. Обертаючи маховик черв'ячного редуктора 6, повільно навантажуюмо балку. Кожні **10 обертів** маховика відповідають навантаженню у **22 Н**.



а)



б)

Рисунок 3.25 – Лабораторна установка для визначення критичної сили:

а) загальний вигляд, б) принципова схема.

В процесі навантаження необхідно слідкувати за індикаторами доки не відбудеться втрата стійкості (стрілка індикатора почне дуже швидко обертатися).

Оснащення робочого місця

- ❖ установка, підготовлена до проведення експерименту;
- ❖ 2 індикатори годинникового типу;
- ❖ сталевий призматичний зразок прямокутного перерізу (матеріал – сталь 65Г-Ш ГОСТ 1050-88);
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання роботи

Для експериментального визначення критичної сили використовують сталеву балку прямокутного перерізу довжиною $l = 500\text{мм}$, яка встановлена вертикально на двох шарнірних опорах (рис. 3.25).

Балка має наступні дані:

- ширина перерізу $b = 2\text{ мм}$;
- висота перерізу $h = 35\text{ мм}$;
- матеріал балки - 65Г-Ш ГОСТ 1050-88;
- модуль пружності матеріалу $E = 2 \cdot 10^5\text{ МПа}$.

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Перевірити готовність установки до експерименту, виставити індикатори на нульову відмітку.
2. Визначити геометричні характеристики перерізу – момент інерції відносно осі Y (рис. 3.24) за формулою 3.38.
3. Визначити гнучкість стержня та граничну гнучкість за формулами (3.42) та (3.43) і порівняти їх значення між собою.
4. Визначити значення критичної сили за формулою Ейлера (3.39).
5. Провести експеримент: ступенево навантажити балку, кожного разу на 22Н, ретельно слідкуючи за показниками індикаторів.
6. Записати показання індикаторів на кожному етапі навантаження в журнал спостережень до того моменту, поки не відбудеться втрата стійкості (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Результати експериментальних спостережень.

№	Навантаження F, Н	Абсолютний поперечний прогин f, мм
1	22	
2	44	
3	66	
4	88	
5	110	
6	132	
7	154	
8	176	
9	198	
10	220	
11	242	

7. За отриманими даними будемо діаграму прогинів у координатах **F-f**. Провівши дотичну до отриманого графіка проєціюємо її на вертикальну вісь і визначаємо значення критичної сили $F_{кр}$ (рис. 3.26).

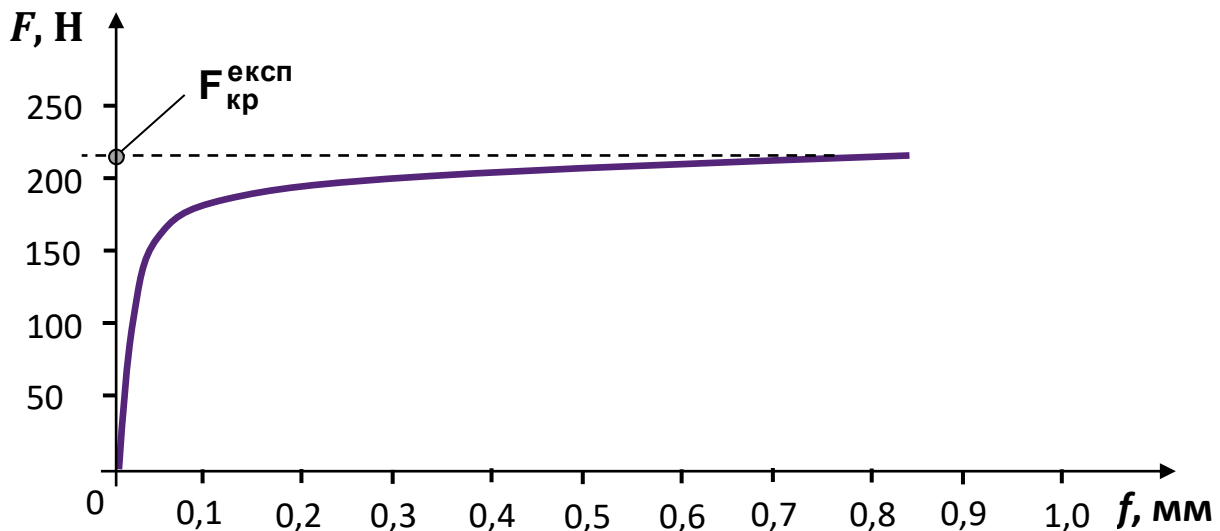


Рисунок 3.26 – Приблизний вигляд діаграми прогинів.

8. Порівняти отримані результати, визначаючи розбіжність:

$$\Delta F = \frac{F_{кр}^T - F_{кр}^{експ}}{F_{кр}^T} \cdot 100\% \leq [15\%].$$

9. Зробити висновки та відповіді на контрольні запитання.

10. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

1. Які зразки використовують при випробуванні матеріалів на стійкість?
прямокутного перерізу;
круглого перерізу;
трубчастого перерізу;
квадратного перерізу.
2. Відхилення стержня від свого рівноважного положення називається:
втратою стійкості;
згином;
крученням;
стиском.
3. Найменша центрально-прикладена стискаюча сила, що виводить стержень з прямолінійної рівноваги називається:
критичною силою;
зовнішньою силою;
поперечною силою;
внутрішньою силою.
4. Які геометричні характеристики використовують при розрахунку стержнів на стійкість:
площа перерізу A та момент інерції $J_{н.л.}$;
момент опору $W_{н.л.}$ та площа перерізу A ;
момент опору $W_{н.л.}$ та момент інерції $J_{н.л.}$;
статичний момент площі перерізу S та момент інерції $J_{н.л.}$.
5. Як позначається критична сила?
 $F_{кр}$;
 Q ;
 $\sigma_{кр}$;
 $\lambda_{кр}$.
6. Прямолінійна форма рівноваги гнучкого стержня буде стійкою, якщо:
стискаюча сила F менше критичної $F_{кр}$ ($F < F_{кр}$);
стискаюча сила F більше критичної $F_{кр}$ ($F > F_{кр}$);
стискаюча сила F дорівнює критичній $F_{кр}$ ($F = F_{кр}$);
стискаюча сила F більше або дорівнює критичній $F_{кр}$ ($F \geq F_{кр}$).
7. За формулою Ейлера і Ясинського розраховують силу:
критичну;
допустиму;
внутрішню;
розрахункову.

8. Здатність стержнів, під дією поперечного навантаження, відхилятися від свого рівноважного положення, а при знятті навантаження приймати свою первісну форму рівноваги називається:

гнучкістю;
згином;
крученням;
стиском.

9. Як позначається гнучкість стержня?

λ ;
 F ;
 τ ;
 σ .

10. Як позначаються критичні напруження?

$\sigma_{кр}$;
 $\tau_{кр}$;
 $F_{кр}$;
 $\lambda_{кр}$.

11. Для заданого матеріалу критичні напруження, що виникають у момент втрати стійкості можна визначити за формулою:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2};$$
$$\sigma_{кр} = \frac{F}{A};$$
$$\tau_{max} = \frac{M_{max}}{W_p};$$
$$\sigma_{кр} = \frac{M}{W}.$$

12. Як позначається коефіцієнт, що залежить від способів закріплення кінців стержня?

μ ;
 λ ;
 φ ;
 ℓ .

13. В яких одиницях вимірюється гнучкість стержня ?

безрозмірна величина;
Н;
м;
МПа.

14. Граничну гнучкість стержня можна визначити за формулою:

$$\lambda_{гр} \geq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{пц}}};$$

$$\sigma_{кр} \leq \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2};$$

$$\lambda_{гр} \leq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{пц}}};$$

$$\sigma_{кр} \leq \frac{F}{A}.$$

15. Як записати формулу Ейлера для розрахунку критичної сили?

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{(\mu \cdot l)^2};$$

$$F_{кр} = (a - b \cdot \lambda) \cdot A;$$

$$F_{кр} = \sigma \cdot A;$$

$$F_{кр} = \frac{F}{n_y}.$$

16. Діапазон застосування формули Ейлера:

$$\lambda_{зр} \geq 100;$$

$$\lambda_{зр} > 100;$$

$$\lambda_{зр} = 100;$$

$$\lambda_{зр} < 100.$$

17. Як визначити розрахункову гнучкість стержня?

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i_{min}};$$

$$\lambda_{гр} \geq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{пц}}};$$

$$\sigma_{кр} \leq \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2};$$

$$\lambda_{гр} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{пц}}.$$

18. Що означає величина i_{min} :

мінімальний радіус інерції;

мінімальний момент інерції;

мінімальний статичний момент перерізу;

мінімальний момент опору.

19. За допомогою чого експериментально визначали значення відхилень стержня від положення рівноваги?

індикаторами годинникового типу;

вимірювачем деформацій;

за допомогою тарирувального графіка;

лінійкою.

20. Який спосіб закріплення кінців стержня використовували при експериментальному визначенні критичної сили?

коли коефіцієнт приведеної довжини стержня $\mu = 1$;

коли коефіцієнт приведеної довжини стержня $\mu = 2$;

коли коефіцієнт приведеної довжини стержня $\mu = 0,7$;

коли коефіцієнт приведеної довжини стержня $\mu = 0,5$.

21. За допомогою чого визначали значення критичної сили експериментальним шляхом?

за допомогою діаграми прогинів;

за допомогою діаграми розтягу;

за допомогою тарирувального графіка;

за допомогою діаграми напружень.

22. В яких координатах побудовано діаграму прогинів?

$F-f$;

$F-\Delta l$;

$\sigma-\Delta l$;

$\sigma-\varepsilon$.

23. Яка фізична суть критичної сили?

максимальна сила, при якій стержень втрачає стійкість;

максимальна сила, при якій стержень здобуває стійкість;

мінімальна сила взаємодії між частками;

мінімальна сила тиску.

24. Якій величині дорівнює гранична гнучкість для сталі?

$\lambda_{cr} \approx 100$;

$\lambda_{cr} \approx 80$;

$\lambda_{cr} \approx 110$;

$\lambda_{cr} \approx 76$.

25. Що іноді називають поздовжнім згином?

втрату стійкості;

згин;

кручення;

стиск.

3.7. Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СПОСОБІВ ЗАКРІПЛЕННЯ КІНЦІВ СТЕРЖНЯ НА ЙОГО СТІЙКІСТЬ

МЕТА РОБОТИ: вивчення процесу втрати стійкості при осьовому стиску гнучких стержнів із різними способами закріплення кінців стержня та порівняння їх значень із теоретичними.

Короткі теоретичні відомості

Стійкість – це здатність елемента конструкції опиратися виникненню великих відхилень від положення рівноваги. Тому в деяких випадках, а саме для стиснутих стержнів, крім перевірки на міцність потрібно ще й перевіряти на стійкість за умовою:

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq [\sigma] \cdot \varphi, \quad (3.44)$$

де σ – нормальні напруження, МПа;

F – зосереджена сила, Н;

A – площа поперечного перерізу, мм²;

$[\sigma]$ – допустимі напруження на стиск, МПа;

φ – коефіцієнт зниження основних допустимих напружень, який залежить від гнучкості стержня, приймає значення у межах $0 \leq \varphi \leq 1$.

Процес переходу від прямолінійної форми до зігнутої форми рівноваги називається **втратою стійкості стержня**.

При досягненні силою, що стискає критичного значення $F_{кр}$, стержень втрачає стійкість і відбувається швидке збільшення прогинів при відносно невеликому зростанні сили. Це призводить до різкого збільшення згинальних напружень, що може призвести до руйнування. Втрата стійкості стержня відбувається в площині найменшої згинальної жорсткості.

Деформація згину стержня під дією поздовжньої сили називається **поздовжнім згином**, тому що саме під дією поздовжніх сил стержень значно викривляється. Поздовжній згин може відбуватися як при пружних, так і при пружно-пластичних деформаціях. Якщо поздовжній згин відбувається при пружних деформаціях, то після припинення дії стискаючої сили розміри і форма стержня повністю відновлюються.

Знаходження критичних навантажень вважається найвідповідальнішою частиною інженерного розрахунку конструкції і дозволяє уникнути втрати стійкості введенням необхідного запасу стійкості.

Під час розрахунку на стійкість критичне навантаження подібне руйнівному, як те, що використовують під час розрахунків на міцність.

Для забезпечення певного запасу стійкості необхідно, щоб задовольнялася умова:

$$F \leq [F], \quad (3.45)$$

де F – діюче навантаження на стержень, Н;

$[F]$ – допустиме навантаження на стержень. Визначається як:

$$[F] = \frac{F_{кр}}{n_{ст}}, \quad (3.46)$$

де $F_{кр}$ – критична сила, Н;

$n_{ст}$ – коефіцієнт запасу стійкості, приймається у межах $n_{ст} = 1,8 \dots 3$.

Вперше формулу (3.39) для визначення критичної сили $F_{кр}$ винайшов Леонард Ейлер – російський вчений швейцарського походження. У цій формулі коефіцієнт приведеної довжини стержня μ залежить від способу закріплення його кінців. Фізична суть коефіцієнта μ полягає у тому, що він показує скільки довжин стержня вміщується в одній напівхвилі синусоїди.

Основні схеми закріплення кінців стержня і, відповідно до них, значення коефіцієнта μ наведені на рисунку 3.27.

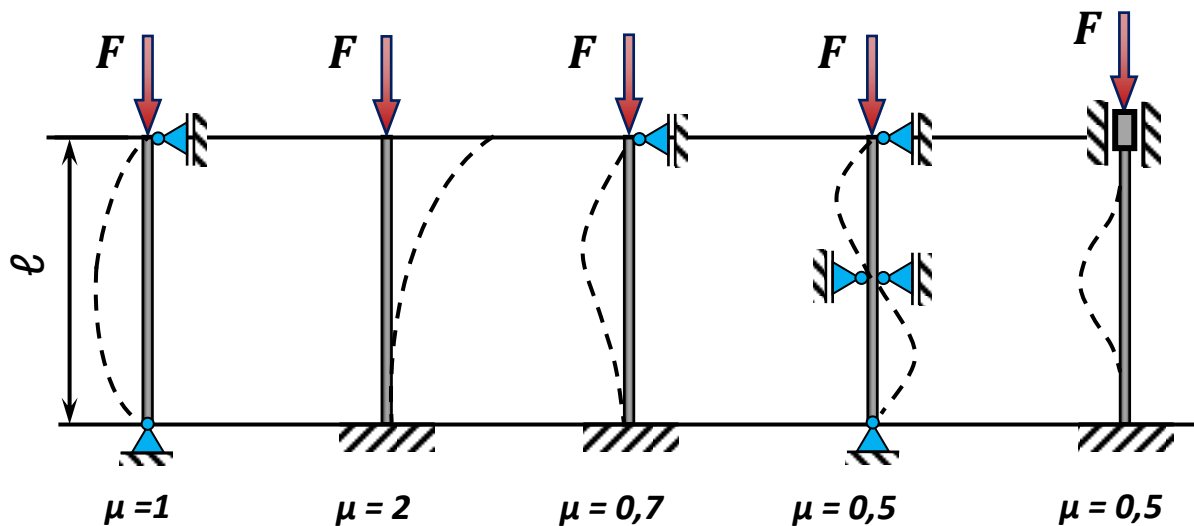


Рисунок 3.27 – Основні схеми закріплення кінців стержня.

Розглянемо визначення критичних напружень. Формула (3.41) для визначення критичних напружень, що виникають у момент втрати стійкості справедлива тоді, коли $\sigma_{кр}$ не більше границі пропорційності $\sigma_{пц}$:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(\lambda_{гр})^2} \leq \sigma_{пц}. \quad (3.47)$$

Досліджуючи питання стійкості за границею пропорційності Ясинським було отримано формулу, що дозволяє визначити значення критичних напружень в залежності від гнучкості, коли напруження в стиснутому стержні більше границі пропорційності $\sigma_{пц}$, але менше за границю текучості:

$$\sigma_{кр} = (a - b \cdot \lambda), \quad (3.48)$$

де a і b – коефіцієнти, які залежать від властивостей матеріалу і підбираються так, щоб при гнучкості $\lambda_p = \lambda_{кр}$, критичне напруження дорівнювало границі пропорційності $\sigma_{кр} = \sigma_{пл}$.

λ – гнучкість стержня (розрахункова), яка визначається за формулою (3.43).

Якщо гнучкість даного стержня буде більша або дорівнювати граничній $\lambda \geq \lambda_{кр}$, то розрахунок критичної сили необхідно вести по формулі Ейлера. Якщо гнучкість стержня буде менша за граничну $\lambda < \lambda_{кр}$, то розрахунок критичної сили необхідно вести за формулою Ф. Ясинського:

$$F_{кр} = \sigma_{кр} \cdot A = (a - b \cdot \lambda) \cdot A, \quad (3.49)$$

де a і b – коефіцієнти, які залежать від матеріалу і підбираються так, щоб при гнучкості $\lambda_p = \lambda_{кр}$, критичне напруження дорівнювало границі пропорційності $\sigma_{кр} = \sigma_{пл}$.

Значення коефіцієнтів a і b для деяких матеріалів наведені в додатку 2.

Експериментальна установка. Для проведення досліджень використовуємо пристрій, в якому можливо змінювати способи закріплення кінців стержня. Навантаження прикладається вручну на універсальному стенді СМУ з горизонтальним розташуванням стержня (рис. 3.28). Опорні пристрої стенду дозволяють здійснювати як шарнірне закріплення стержня, так і жорстке закріплення будь-якого з його кінців. Деформація стержня (прогин) спостерігається візуально.

У даній роботі потрібно визначити величину критичної сили для стиснутого стержня при трьох видах закріплення його кінців:

- а) стержень має шарнірні опори на його кінцях, $\mu = 1$;
- б) один кінець стержня має шарнірну опору, а інший – жорстко закріплений, $\mu = 0,7$;
- в) один кінець стержня затиснений жорстко, а другий також закріплений, але має можливість переміщення уздовж осі стержня, $\mu = 0,5$.



Рисунок 3.28 – Універсальний стенд СМУ для визначення критичної сили.

Обертаючи маховик на установці, повільно прикладається навантаження на балку. Навантажуємо за рахунок індикатора з ціною поділки 0,001мм, показники осідання пружини якого переводимо у значення навантажень за допомогою тарирувального графіку. Для кожного способу навантажуємо балку на декількох рівнях і визначаємо момент втрати стійкості по індикатору з ціною поділки 0,01мм, який встановлено посередині балки, у місці максимального прогину.

Оснащення робочого місця

- ❖ установка, підготовлена до проведення експерименту;
- ❖ індикатор годинникового типу з ціною поділки 0,01мм (ИЧ-10) та індикатор з ціною поділки 0,001мм (МИГ-1);
- ❖ сталевий призматичний зразок прямокутного перерізу (матеріал – сталь 65Г-Ш ГОСТ 1050-88);
- ❖ методичні вказівки до виконання лабораторної роботи;
- ❖ калькулятор, олівець, лінійка;
- ❖ журнал лабораторних робіт.

Порядок виконання роботи

Для експериментального визначення критичної сили використовують сталеву балку прямокутного перерізу довжиною $l = 500\text{мм}$, яка встановлена горизонтально на двох опорах (рис. 3.28).

Балка має наступні данні:

- ширина перерізу $b = 2\text{ мм}$;
- висота перерізу $h = 35\text{ мм}$;
- матеріал балки - 65Г-Ш ГОСТ 1050-88;
- модуль пружності матеріалу $E = 2 \cdot 10^5\text{ МПа}$.

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:



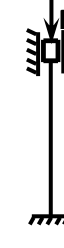
1. Перед початком досліджень ретельно виміряти розміри поперечного перерізу, та довжину зразка. Визначити геометричні характеристики перерізу.
2. Розглянути можливі способи закріплення кінців стержня і визначити коефіцієнт приведеної довжини μ .
3. Для кожного способу закріплення розрахувати теоретичним шляхом гнучкість, граничну гнучкість, порівняти отримані результати і вибрати формулу для розрахунку критичної сили.
4. Перевірити готовність установки, встановити зразок в опори та перевірити прямолінійність встановлення, виставити індикатори на нульову відмітку.

5. За допомогою тарирувального графіку визначити значення осідання пружини для заданих рівнів навантаження при різних способах закріплення стержня.

6. Визначити значення критичної сили експериментальним шляхом.

7. Фіксуємо навантаження у момент втрати стійкості та записуємо його у журнал спостережень (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Результати експериментальних спостережень.

Спосіб закріплення стержня	№	Осідання пружини, мм	Навантаження F, Н	Абсолютний поперечний прогин, мм
 $\mu = 1$	1		100	
	2		200	
	3		300	
	4			втрата стійкості
 $\mu = 0,7$	1		50	
	2		100	
	3		150	
	4			втрата стійкості
 $\mu = 0,5$	1		200	
	2		400	
	3		600	
	4			втрата стійкості

8. Порівнюємо отримані результати, визначаючи розбіжність. Результати заносимо у таблицю 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати теоретичних і експериментальних значень величини критичної сили при різноманітних способах закріплення кінців стержня.

Величина критичної сили	$\mu = 1$	$\mu = 0,7$	$\mu = 0,5$
Знайдена з експерименту $F_{кр}^e$, Н			
Отримана по формулі Ейлера $F_{кр}^T$, Н			
Розбіжність, %			

9. Зробити висновки та відповіді на контрольні запитання.
10. Захистити лабораторну роботу у викладача.

Тестові запитання для самоконтролю

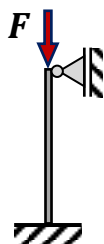
1. Коефіцієнт μ , що залежить від способів закріплення кінців стержня називається:
 - коефіцієнтом приведеної довжини стержня;
 - коефіцієнтом приведеної ширини стержня;
 - коефіцієнтом приведеного діаметра стержня;
 - коефіцієнтом приведеної товщини стержня.
2. Величина $\mu \cdot l$, це:
 - приведена довжина стержня;
 - приведена ширина стержня;
 - приведений діаметр стержня;
 - приведена товщина стержня.
3. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт μ ?
 - безрозмірна величина;
 - Н;
 - м;
 - МПа.
4. При визначенні граничної гнучкості, яку механічну характеристику сталі використовують?
 - границю пропорційності;
 - границю текучості;
 - границю пружності;
 - границю міцності.
5. За допомогою чого експериментально визначається значення абсолютного поперечного прогину?
 - індикаторами годинникового типу;
 - вимірювачем деформацій;
 - за допомогою тарирувального графіка;
 - лінійкою.
6. Для яких способів закріплення кінців стержня проводили експериментальне дослідження критичної сили?
 - коли $\mu = 1$, $\mu = 0,7$, $\mu = 0,5$;
 - коли $\mu = 2$ та $\mu = 1$;
 - коли $\mu = 1$ та $\mu = 0,5$;
 - коли $\mu = 0,7$ та $\mu = 0,5$.

7. За допомогою чого визначають значення критичної сили експериментальним шляхом?

- за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділки 0,001мм;
- за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділки 0,01мм;
- за допомогою штангенциркуля з ціною поділки 0,1мм;
- за допомогою лінійки з ціною поділки 1мм.

8. Чому дорівнює значення коефіцієнта μ для заданого способу закріплення кінців стержня?

- $\mu = 0,7$;
- $\mu = 1$;
- $\mu = 0,5$;
- $\mu = 2$.



9. Чому дорівнює значення коефіцієнта μ для заданого способу закріплення кінців стержня?

- $\mu = 0,5$;
- $\mu = 1$;
- $\mu = 0,7$;
- $\mu = 2$.



10. Чому дорівнює значення коефіцієнта μ для заданого способу закріплення кінців стержня?

- $\mu = 2$;
- $\mu = 1$;
- $\mu = 0,7$;
- $\mu = 0,5$.



11. Який вигляд має формула Ясинського для розрахунку критичної сили?

$$F_{кр} = (a - b \cdot \lambda) \cdot A;$$

$$F_{кр} = \frac{\pi \cdot E \cdot J_{min}}{(\mu \cdot \ell)^2};$$

$$F_{кр} = \tau \cdot A;$$

$$F_{кр} = \varphi \cdot \sigma \cdot A.$$

12. В яких одиницях вимірюються коефіцієнти a і b у формулі Ясинського ?

МПа;

безрозмірні величини;

Н;

мм².

13. Від чого залежить значення коефіцієнтів a і b у формулі Ясинського?

від властивостей матеріалу;
від розмірів перерізу стержня;
від величини деформації;
від гнучкості.

14. Яким символом позначається коефіцієнт запасу стійкості?

$n_{ст}$;

$n_{пц}$;

$n_{мц}$;

$n_{т}$.

15. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт запасу стійкості $n_{ст}$?

безрозмірна величина;

Н·м;

МПа;

Н.

16. В яких межах приймається значення коефіцієнта запасу стійкості $n_{ст}$ для сталі?

$n_{ст} = 1,8 - 3$;

$n_{ст} = 5 - 5,5$;

$n_{ст} = 2,8 - 3,2$;

$n_{ст} = 1,5 - 2$.

17. Як розраховувати допустиме значення навантаження на стиснутий стержень?

$$[F] = \frac{F_{кр}}{n_{ст}};$$

$$[F] = (a - b \cdot \lambda) \cdot A;$$

$$[F] = \varphi \cdot \sigma \cdot A;$$

$$[F] = \frac{\pi \cdot E \cdot J_{min}}{(\mu \cdot \ell)^2}.$$

18. Від чого залежить значення коефіцієнта φ ?

від гнучкості стержня;

від величини напружень;

від зовнішнього навантаження;

від величини критичної сили.

19. Що таке границя пропорційності?

це напруження, при якому матеріал підкоряється закону Гука;

це напруження, при якому матеріал «тече»;

це напруження, при якому виникають залишкові деформації;

це напруження, при якому утворюється шийка зразка.

20. Якщо $\lambda \geq \lambda_{зр}$, то для розрахунку критичної сили приймають формулу:

Ейлера;

Ясинського;

Журавського;

Верещагіна.

21. Якщо $\lambda < \lambda_{cr}$, то для розрахунку критичної сили приймають формулу:
Ясинського;
Верещагіна;
Журавського;
Ейлера.
22. Який метод використовують для підбору перерізу стержня, що працює на стійкість?
метод послідовних наближень;
метод Верещагіна;
метод Максвелла-Мора;
метод перерізів.
23. В яких межах приймають значення коефіцієнта зниження основних допустимих напружень φ для сталі?
від 0 до 1;
від 1 до 2;
від 2 до 3;
від 3 до 5.
24. Як позначається коефіцієнт зниження основних допустимих напружень?
 φ ;
 μ ;
 μ_T ;
 λ .
25. В якості першого наближення рекомендується приймати значення φ :
 $\varphi = 0,5$;
 $\varphi = 0,2$;
 $\varphi = 0$;
 $\varphi = 1,0$.

Бібліографічна довідка

Гук Роберт (1635 – 1703) – англійський фізик, закінчив Оксфорд. Член Лондонського королівського товариства (вчений секретар та куратор експериментаторів), професор Лондонського університету. Наукові роботи відносяться до теплотехніки, пружності, оптиці, небесної механіки.

Нав'є Луї Марі Анрі (1785 – 1836) – французький математик і механік, закінчив Політехнічну школу і школу мостів і доріг. Член Паризької академії наук, професор Політехнічної школи. Наукові роботи відносяться до теорії пружності, будівельної механіки, опору матеріалів. Один з основоположників теорії пружності.

Пуассон Симон Дені (1781 – 1840) – французький механік, фізик і математик, закінчив Політехнічну школу. Член Паризької і Петербурзької академії наук, професор Політехнічної школи і Паризького університету. Наукові роботи відносяться до теоретичної і небесної механікам, математики, математичної фізики, балістики, торії пружності, гідромеханіки. Один з основоположників математичної фізики.

Юнг Томас (1773 – 1829) – англійський фізик, астроном і лікар, закінчив Кембридж. Професор Королівського інституту (Лондон), секретар Лондонського королівського товариства. Наукові роботи відносяться до фізики, хімії, астрономії, геофізики, механіки, оптики, філософії, медицині. Один з основоположників опору матеріалів.

Верещагін Андрій Костянтинович (1896 – 1959) – талановитий радянський вчений і винахідник, великий фахівець в області мінної електротехніки. Будучи студентом Московського інституту інженерів транспорту, запропонував правило для обчислення інтеграла Максвелла - Мора для окремого випадку прямого стержня постійного поперечного перерізу.

Журавській Дмитро Іванович (1821 – 1891) – руський вчений-механік і інженер, фахівець в області мостобудування і будівельної механіки. Будівельник знаменитого Вереб'їнського моста і Миколаївської залізниці Лауреат Демидівської премії Петербурзької академії наук. Видатним внеском в теорію опору матеріалів став проведений Д. І. Журавським аналіз дії дотичних напружень в балці при її згині, В ході проектування залізничних мостів Журавський виявив, що дотичні напруження, що виникають в дерев'яних балках прямокутного перерізу, мають значний вплив на працездатність балок при згині.

Ейлер Леонард (1707 – 1783) – математик, механік, фізик і астроном, акад. Петербурзької АН. Ейлер є одним з основоположників гідродинаміки і гідравліки як окремих наук. Іноземний почесний член Петербурзької АН, член

Паризької АН, Берлінської АН, Лондонського королівського товариства і багатьох інших академій наук і наукових товариств, Наукові роботи відносяться до математики, фізики і теоретичної механіки, природознавства, гідродинаміки, небесної механіки, теорії теплоти, оптики, опору матеріалів. Вперше виклав динаміку точки за допомогою математичного аналізу і ввів поняття сили інерції. У 1744 була опублікована його праця "Метод знаходження кривих ліній ..." - перша книга з варіаційного числення, в якій, крім того, містився перший систематичний виклад теорії пружних кривих і результати з опору матеріалів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М.: Наука, 1976. – 590с.
2. Писаренко Г.С. Опір матеріалів /Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; за ред. Г. С. Писаренка. - К.: Вища шк., 1993. - 655с; іл.
3. Цурпал І.А. Механіка матеріалів і конструкцій /І.А.Цурпал - К.: Вища освіта, 2005. -367с.
4. Методичний посібник до лабораторних робіт з опору матеріалів (для студентів усіх спеціальностей) / Ф.Л.Шевченко, О.Г. Татьянченко, С.М. Царенко, В.М. Савенков, О.М. Картунов, Л.В. Оберемок - Донецьк: ДонНТУ, 2014. – 66с.
5. Гурняк Л.І. Опір матеріалів / Л.І.Гурняк, Ю.В. Гуцуляк, Т.В. Юзьків - Львів: "Новий світ - 2000", 2006. - 364с.
6. Дарков А.В. Сопротивление материалов /А.В.Дарков, Г.С.Шпиро - М.: Высшая школа, 1989. - 622с.
7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. – 11-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 592с.
8. Степин П.А. Сопротивление материалов / П.А. Степин. – М.: Высш. шк., 1983.-303с.
9. Сайт в інтернеті з навчальними матеріалами по курсу «Опір матеріалів» <http://www.isopromat.ru>
10. ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84) Металлы. Методы испытаний на растяжение.- Москва: ИПК Изд-во стандартов, 1984. – 28 с.
11. ГОСТ 25.503-97 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие.- Москва: ИПК Изд-во стандартов, 1984. – 28с.
12. ГОСТ 1050-88 Прокат сортовой калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали.- Москва: ИПК Изд-во стандартов, 1988. – 17с.
13. ГОСТ 3565-80 Металлы. Метод испытания на кручение.- Москва: ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 17с.

ДОДАТОК 1

Таблиця 1

Механічні властивості прокатної вуглецевої сталі звичайної якості
за ГОСТ 380-2005.

Марка сталі*	Границя міцності σ_B , МПа	Границя текучості σ_T , МПа	Відносне подовження ϵ , %		
			при σ_B , МПа	для довгого зразка	для короткого зразка
				не менше	
Ст.0	320-470	-	320-470	18	22
Ст.1	320-400	-	320-400	28	33
Ст.2	340-420	220	340-420	26	31
Ст.3	380-470	240	380-400	23	27
			410-430	22	26
			440-470	21	25
Ст.4	420-520	260	420-440	21	25
			450-480	20	24
			490-520	19	23
Ст.5	500-620	280	500-530	17	21
			540-570	16	20
			580-620	15	19
Ст.6	600-630	310	600-630	13	15
			640-670	12	14
			680-720	11	13
Ст.7	700 та більше	-	700-740	9	11
			750 та більше	8	10

* Використання в промисловості: несучі елементи зварних і незварних конструкцій і деталей, що працюють при позитивних температурах

Таблиця 2

Механічні властивості вуглецевих якісних сталей
у нормалізованому стані за ГОСТ 1050-88

Марка сталі	Границя міцності σ_B , МПа	Границя текучості σ_T , МПа	Відносне подовження ϵ , %	Відносне звуження ψ , %
08	320	196	33	60
10	330	205	31	55
15	370	225	27	55
20	410	245	25	55
25	450	275	23	50
30	490	295	21	50
35	530	315	20	45
40	570	335	19	45
45	600	355	16	40
50	630	375	14	40
55	650	380	13	35
58	600	315	12	28
60	680	400	12	35

Таблиця 3

Механічні властивості вуглецевих легованих сталей
за ГОСТ 1050-88

Марка сталі	Границя міцності σ_B , МПа	Границя текучості σ_T , МПа	Відносне подовження ϵ , %	Відносне звуження ψ , %
20X	720	400	12	40
35X	910	735	11	45
40X	730	650	10	45
45X	850	700	9	45
40ХН	1000	80	11	45
30ХГСА	1100	850	10	45
60Г	710	420	9	35

ДОДАТОК 2

Таблиця 1

Механічні характеристики деяких матеріалів

№	Матеріал	Границя міцності $\sigma_{\text{мц}}$, МПа			Ударна в'язкість, кДж/м ²
		розтягу	стиску	статичному згині	
1	Бетон	-	5-35	-	-
2	Сосна:				
	уздовж волокон	80	40	-	-
	поперек волокон	-	5	-	-
3	Ялина:				
	уздовж волокон	65	85	-	-
	поперек волокон	-	4	-	-
4	Дуб:				
	уздовж волокон	95	50	-	-
	поперек волокон	-	15	-	-
5	Текстоліт	85-100	130-250	100-160	5
6	Ебоніт	60	58	70	1,5
7	Дельта-деревина плиткова	27-80	17,518,5	28,5-30	3
8	Скло віконне листове	67	99	-	-
9	Скло кварцове	12	197	-	-
10	Граніт	3	190	-	-
11	Піщаник	2	95	-	-

ДОДАТОК 3

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів для формули Ясинського (емпіричні коефіцієнти) і межі її застосування

№	Матеріал	$E, \text{МПа} \cdot 10^5$	$a, \text{МПа}$	$b, \text{МПа}$	$\lambda_{\text{пц}}$	$\lambda_{\text{гр}}$
1	Сосна	0,1	40	0,203	60	-
2	Сталь ст.3	2	310	1,1	100	61
3	Ст.5, сталь 30	2	464	3,26	90	60
4	15ХСНД	2	589	3,82	100	60
5	Дюралюміній Д16Т	0,7	380	2,19	50	20
6	Чавун	1,2	776	12	80	-

Навчальне видання

Бондаренко Лариса Юріївна
Вершков Олександр Олександрович
Антонова Галина Володимирівна

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
з механіки матеріалів і конструкцій

Навчальний посібник

Підписано до видання 26.12.2017.
Електронний ресурс. Авт. арк. 5,32.

Видано
у Таврійському державному агротехнологічному університеті
72318, м. Мелітополь, просп. Б. Хмельницького, 18.