

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ



Інженерно-енергетичний
факультет
Кафедра загальнотехнічних дисциплін

МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ.

Модуль "Основні види деформацій: згинання балок":
методичні рекомендації для виконання лабораторних робіт
здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП
"Агроінженерія" спеціальності 208 "Агроінженерія" денної та
заочної форм здобуття вищої освіти

Миколаїв
2025

УДК 539.3/.6
М55

Рекомендовано до друку рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 08.12.25, протокол №4.

Укладачі:

Н. А. Доценко – д-р. пед. наук, професор, професор кафедри загальнотехнічних дисциплін, Миколаївський національний аграрний університет

Д. В. Бабенко – канд. техн. наук, професор, перший проректор, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

О. А. Горбенко – канд. техн. наук, доцент кафедри агроінженерії, Миколаївський національний аграрний університет

Г. О. Іванов – канд. техн. наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін, Миколаївський національний аграрний університет

© Миколаївський національний аграрний університет, 2025

© Доценко Н. А., 2025

Зміст

<i>Вступ</i>	4
1. Згин. Теоретичні відомості	6
1.1. Плоский згин	6
1.2. Міцність балок при згині	16
1.3. Переміщення при згині.....	21
2. Розрахунок статично визначеної балки на згин	27
2.1. Приклад розрахунку статично визначеної балки на згин.....	27
2.2. Контрольні питання	30
2.3. Завдання для самостійного виконання	31
3. Аналіз напруженого стану та повний розрахунок на міцність. Визначення переміщень та розрахунок на жорсткість при поперечному згинанні	33
3.1. Приклад аналізу напруженого стану при згині	33
3.2. Контрольні питання	40
3.3. Завдання для самостійного виконання	41
3.4. Модульне тестування	42
4. Лабораторне устаткування.....	45
4.1. Машина типу УММ-5.....	46
Випробування маловуглецевої сталі на розтяг та згин.....	49
Випробування на розтяг маловуглецевої сталі. Основні механічні характеристики міцності та пластичності	56
4.2. Машина МУИ-6000.....	60
4.3. Машини з гідравлічним приводом П-125	61
Випробування на стиск сталі, чавуну та дерева	64
4.4. Машина КМ-501.....	74
Випробування на кручення сталі та чавуну	77
4.5. Машини для випробувань на удар	87
Визначення ударної в'язкості сталі при ударному згині та розтягу.....	89
4.6. Прилади для вимірювання абсолютних та відносних лінійних деформацій.....	98
<i>Література</i>	101

Вступ

Методичні рекомендації для виконання лабораторних робіт з модуля «Основні види деформацій: згинання балок» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія» денної та заочної форм здобуття вищої освіти розроблені відповідно до програми курсу «Механіка матеріалів і конструкцій». Вони призначені для комплексної підготовки майбутніх фахівців агроінженерного профілю та спрямовані на формування фундаментальних знань і практичних умінь у сфері механіки матеріалів, необхідних для проєктування, аналізу та експлуатації інженерних конструкцій різного призначення. У методичних рекомендаціях детально увагу приділено розумінню фізичної суті процесів деформації та їх впливу на роботу конструктивних елементів у реальних умовах.

Вивчення курсу передбачає формування у здобувачів умінь і навичок розрахунку інженерних об'єктів під впливом найбільш поширених у практиці видів деформацій: розтягання, стискання, кручення, зсуву та згину. Навчальні матеріали поєднують теоретичні положення з практичними прикладами, що ілюструють застосування формул і методів на конкретних конструкціях. Методичні рекомендації містять завдання для самостійного опрацювання, тестові завдання, а також приклади виконання лабораторних робіт, що допомагає здобувачам систематизувати знання та застосувати їх на практиці.

Завдання розроблені з урахуванням реальних інженерних ситуацій та спрямовані на розвиток аналітичного мислення, здатності обирати оптимальні методи розрахунку та оцінювати конструктивні рішення. Методичні рекомендації допомагають зрозуміти зв'язок між теоретичними моделями деформацій і їх практичними наслідками, що особливо важливо для майбутніх

інженерів аграрного профілю, які працюватимуть із сільськогосподарською технікою та спорудами.

Методичні рекомендації розглядають розрахункові моделі конструктивних елементів та використовують прозорі і зрозумілі підходи до оцінки міцності, жорсткості та стійкості елементів під зовнішніми навантаженнями. Особливу роль відіграє інтеграція знань з суміжних дисциплін, що дозволяє підвищити точність розрахунків, використовувати сучасні комп'ютерні методи аналізу та вдосконалювати підходи до проектування конструкцій.

Таким чином, дані методичні рекомендації сприяють формуванню фундаментальних знань, практичних навичок та інженерного мислення, необхідних для підготовки сучасного фахівця агроінженерного профілю, здатного застосовувати теоретичні знання в практичній діяльності, аналізувати деформаційні процеси та забезпечувати надійність і безпеку інженерних конструкцій.

Методичні рекомендації можуть використовуватися здобувачами вищої освіти та викладачами під час очної, дистанційної або змішаної форм навчання для виконання лабораторних робіт.

1. Згин. Теоретичні відомості

1.1. Плоский згин

1.1.1. Основні типи опорних в'язей. Визначення опорних реакцій

Стрижні, які працюють в умовах згину називаються балками.

Якщо на бокову поверхню балки нанести прямокутник, то в результаті дії зовнішнього згинального моменту поперечні риси залишаються прямими, але при цьому повернуться на деякий кут, а поздовжні викривляться, змінивши свою довжину. Тобто верхні волокна скорочуються, а нижні подовжуються (рис. 1.1).

На практиці відомі такі основні випадки згину:

а) чистий згин – коли в поперечному перерізі виникає тільки згинальний момент M_x (рис. 1.1 а).

б) поперечний згин – коли в поперечному перерізі виникає згинальний момент M_x і поперечна сила Q_y (рис. 1.1 б).

в) плоский згин – це коли поперечний переріз балки має вертикальну вісь симетрії і силова площина збігається з цією віссю. Деформована вісь балки також лежить у цій площині (рис. 1.1 в).

г) косий згин – коли силова площина не збігається з головною віссю (рис. 1.1 г).

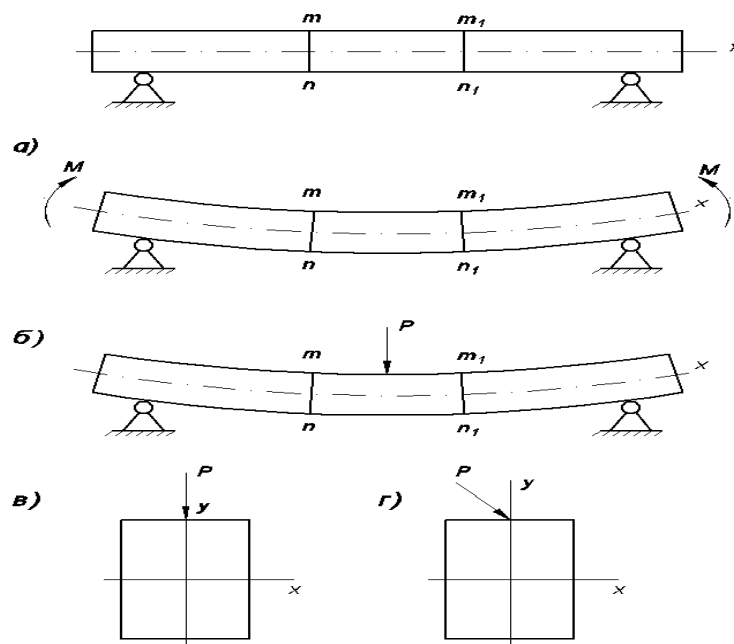


Рисунок 1.1. Випадки згину.

Для того, щоб балка могла сприймати зовнішнє навантаження і передавати його на основу, вона повинна бути закріплення за допомогою опорних в'язей (опор). Існують три види опор (рис. 1.2):

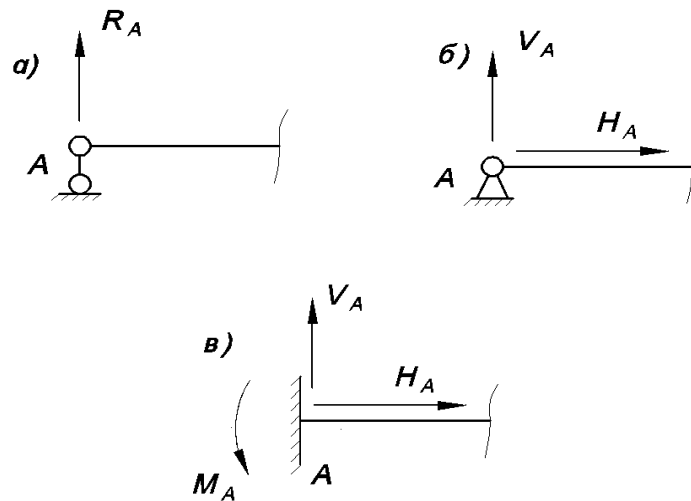


Рисунок 1.2. Види опор:

- а) шарнірно рухома опора; б) шарнірно нерухома опора;
 г) жорстке затиснення (защемлення).

Відповідно до умов закріплення, виділяють такі основні види балок (рис. 1.3):

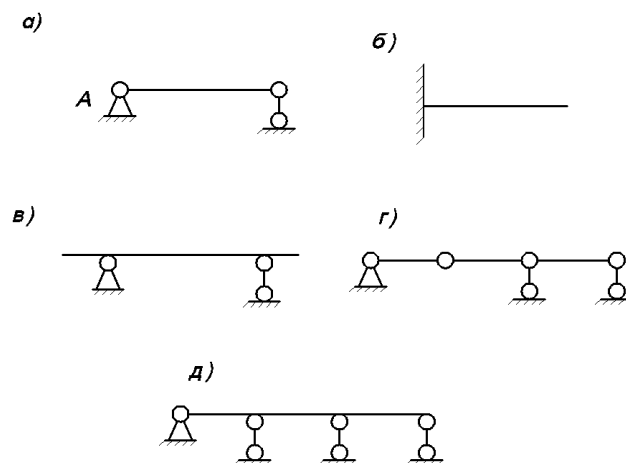


Рисунок 1.3. Види балок:

- а) проста однопрогінна балка; б) консольна балка;
 в) двохопорна балка з консолями; г) розрізна багатопрогінна балка; д) нерозрізна багатопрогінна балка.

1.1.2. Внутрішні сили при згині. Диференційні залежності між M_x, Q_y та q . Правила спрощеної побудови еюр M_x та Q_y

Для визначення внутрішніх зусиль при згині використовують **метод перерізів**, згідно з яким балку розтинають на дві частини і «працюють» з однією із них, а дію відкинутої частини замінюють внутрішніми зусиллями, які при згині зводять до поперечної сили Q_y і згинального моменту M_x (рис. 1.4).

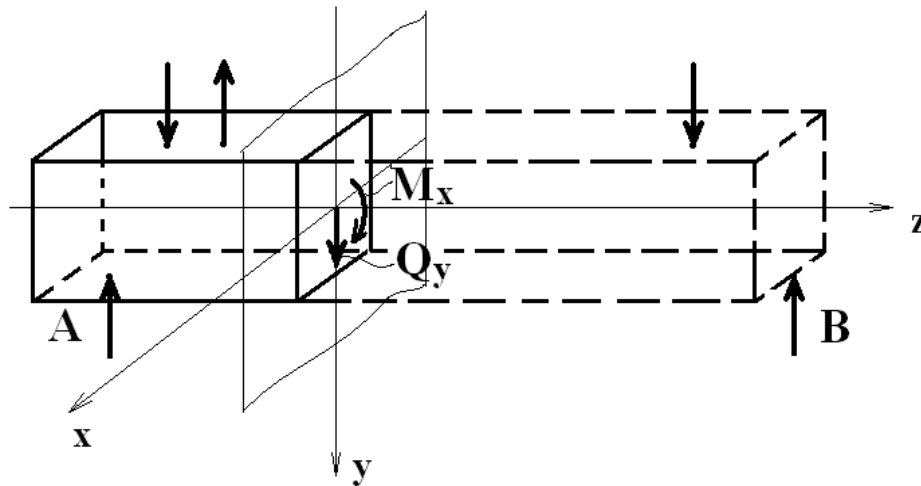


Рисунок 1.4. Метод перерізів у графічному відображенні при визначенні Q_y і M_x .

Величини поперечна сила Q_y і згинальний момент M_x обчислюються за такими робочими правилами:

- поперечна сила Q_y дорівнює сумі проекцій всіх зовнішніх сил на площину перерізу і обирається із знаком «+», якщо вона повертає відсічену частину відносно перерізу за годинниковою стрілкою, і навпаки;
- згинальний момент M_x дорівнює сумі моментів зовнішніх зусиль відносно центру ваги перерізу і обирається із знаком «+», якщо розтягуються нижні волокна, і навпаки.

Розглянемо ділянку балки довжиною dz і завантажимо її зовнішнім розподіленим навантаженням інтенсивності q (Н/м). Дію розподіленого навантаження на ділянці довжиною l можна

замінити зосередженою силою $Q=q \cdot l$. Знайдемо внутрішні зусилля (рис. 1.5).

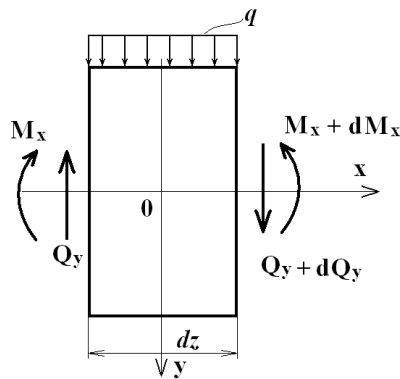


Рисунок 1.5. Завантаження ділянки балки із зображенням внутрішніх зусиль.

Із умов рівноваги маємо:

$$1. \quad \sum y = 0.$$

$$q \cdot dz - Q_y + (Q_y + dQ_y) = 0;$$

$$\text{Звідси} \quad \frac{dQ_y}{dz} = -q. \quad (1)$$

$$2. \quad \sum M_0 = 0.$$

$$M_x - (M_x + dM_x) + Q_y \cdot \frac{1}{2} dz + (Q_y + dQ_y) \cdot \frac{1}{2} \cdot dz = 0;$$

Величина $dQ_y \cdot \frac{1}{2} \cdot dz$ прямує до нуля, тому нею можна нехтувати.

Кінцево отримуємо:

$$\frac{dM_x}{dz} = Q_y. \quad (2)$$

Проаналізувавши вирази, можна отримати третю залежність:

$$\frac{d^2 M_x}{dz^2} = -q. \quad (3)$$

Для того щоб розв'язувати задачі міцності та жорсткості при згині необхідно знати $M_x^{\max}$ та $Q_y^{\max}$, тобто виникає необхідність побудувати епюри M_x та Q_y , що будуються за допомогою правил спрощення побудови, які впливають із диференційної залежності між M_x , Q_y і q .

Правила спрощення побудови епюр M_x та Q_y .

1. На ділянці балки, вільної від розподіленого навантаження ($q = 0$), поперечна сила постійна ($Q_y = \text{const}$) згинальний момент M_x змінюється за лінійним законом.

2. На ділянці балки, що завантажена рівномірно – розподіленим навантаженням ($q = \text{const}$):

а) Q_y змінюється за лінійним законом;

б) M_x змінюється за законом квадратної параболи.

3. На ділянці балки, де рівномірно розподілене навантаження більше за нуль ($q > 0$), поперечна сила Q_y зменшується із зростанням Z на величину рівнодіючої цієї ділянки.

4. На ділянці балки, де поперечна сила більша за нуль ($Q_y > 0$) із збільшенням Z , епюра M_x зростає на величину площі епюри Q_y цієї ділянки.

5. На ділянці балки, де поперечна сила Q_y змінюється за лінійним законом та в деякій точці дорівнює нулю, на епюрі згинального моменту M_x у тій же точці будемо мати екстремальне значення згинального моменту, причому максимальне значення згинального моменту M_x буде тоді, коли Q_y змінюється з «+» на «–».

6. На ділянці балки, де рівномірно розподілене навантаження більше за нуль ($q > 0$), епюра M_x має випуклість у бік додатних координат.

7. У точках прикладання зовнішніх зосереджених сил на епюрі поперечних сил Q_y буде стрибок на величину цієї сили.

8. У точках прикладання зовнішніх зосереджених моментів згинання на епюрі згинальних моментів M_x буде стрибок на величину цього зовнішнього моменту.

Розв'язання задач з побудови епюр Q_y та M_x поділяють на 4 етапи:

1. Визначення опорних реакцій. Вважаючи балку абсолютно жорстким тілом, замінюючи опори відповідними реакціями і складаючи рівняння рівноваги, визначаємо їх. Обов'язково здійснювати контроль правильності знаходження опорних реакцій.

2. Розбивають балку на ділянки. Границями ділянок є: початок і кінець балки; точки прикладання зовнішніх зосереджених зусиль і згинальних моментів, а також точки початку дії розподіленого навантаження q та його закінчення.

3. Визначаємо величину поперечної сили Q_y в характерних перерізах і будуємо її епюру.

4. Визначаємо величини згинальних моментів M_x в характерних перерізах і будуємо його епюру.

1.1.3. Приклади побудови епюр M_x і Q_y .

Приклади для правил спрощення побудови епюр.

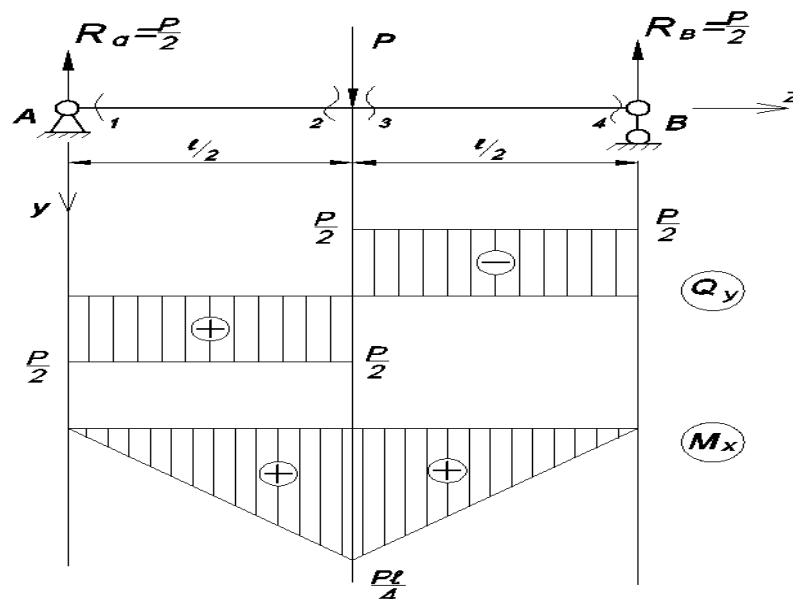


Рисунок 1.6. Побудова епюр Q_y , M_x .

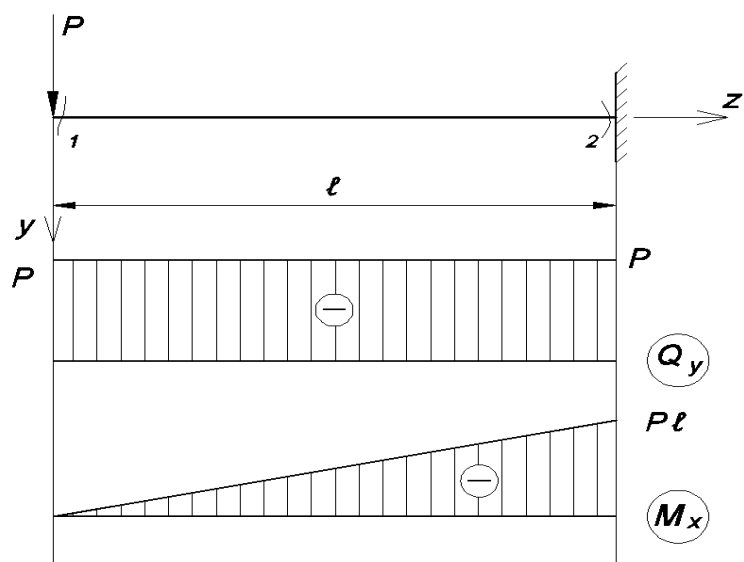


Рисунок 1.7. Побудова епюр Q_y і M_x .

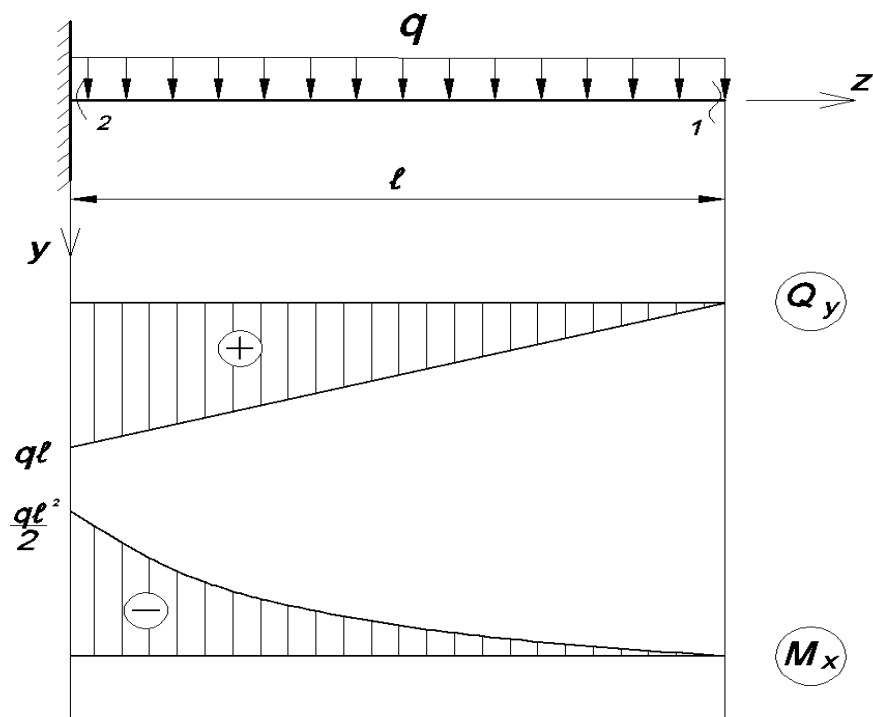


Рисунок 1.8. Побудова епюр Q_y , M_x .

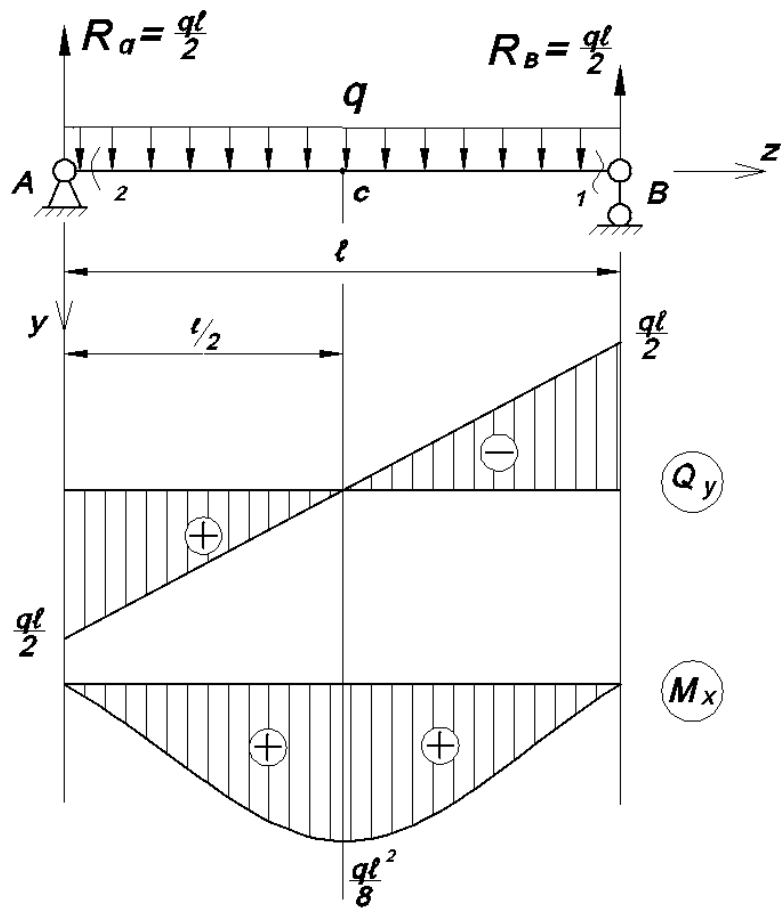


Рисунок 1.9. Побудова епюр Q_y , M_x .

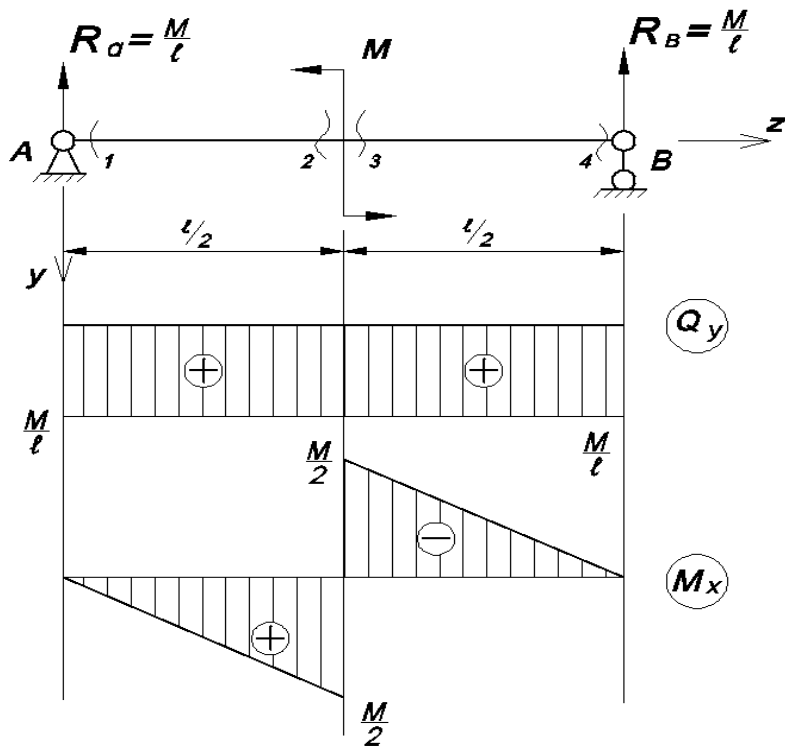


Рисунок 1.10. Побудова епюр Q_y , M_x .

Розглянемо більш складний приклад розв'язання задачі розрахунку балки на згин.

Побудувати епюри M_x та Q_y для заданої балки (рис. 1.11).

Розв'язання задачі поділяємо на чотири етапи:

1) Визначаємо опорні реакції. Вважаємо, що балка – абсолютно тверде тіло, складаємо для неї рівняння рівноваги, розв'язуючи які, знаходимо опорні реакції (рис. 6.11).

$$\sum M_B = 0;$$

$$10 \cdot P_1 + q \cdot 4 \cdot 8 - R_A \cdot 8 + P_2 \cdot 3 - M = 0;$$

$$R_A = 177,5 \text{ кН.}$$

$$\sum M_A = 0;$$

$$2 \cdot P_1 - 5 \cdot P_2 + 8 \cdot R_B - M = 0;$$

$$R_B = 102,5 \text{ кН.}$$

Перевірка (спроєктуємо всі сили на вісь Y):

$$\sum Y = 0;$$

$$P_1 + q \cdot 4 - R_A + P_2 - R_B = 0;$$

$$40 + 80 - 177,5 + 160 - 102,5 = 0.$$

2) Розбиваємо балку на ділянки. Границями ділянок є початок і кінець балки, точки прикладання зовнішніх зосереджених зусиль і згинальних моментів, а також точки початку дії розподіленого навантаження q та його закінчення.

Умовно балку поділено хвилястими перерізами, які відмічені на схемі (рис.6.11) цифрами вздовж балки.

3) Визначаємо величину поперечної сили Q_y в характерних перерізах і будуємо її епюру (рис. 1.11).

$$Q_{y(1)} = -P_1 = -40 \text{ кН.}$$

$$Q_{y(2)} = -P_1 - 2 \cdot q = -80 \text{ кН.}$$

$$Q_{y(3)} = -P_1 - 2 \cdot q + R_A = 97,5 \text{ кН.}$$

$$Q_{y(4)} = Q_{y(5)} = -P_1 - 4 \cdot q + R_A = 57,5 \text{ кН.}$$

$$Q_{y(6)}^{np} = -R_B + P_2 = 57,5 \text{ кН.}$$

$$Q_{y(7)}^{np} = Q_{y(8)}^{np} = -R_B = -102,5 \text{ кН.}$$

$$Q_{y(9)}^{np} = Q_{y(10)}^{np} = 0.$$

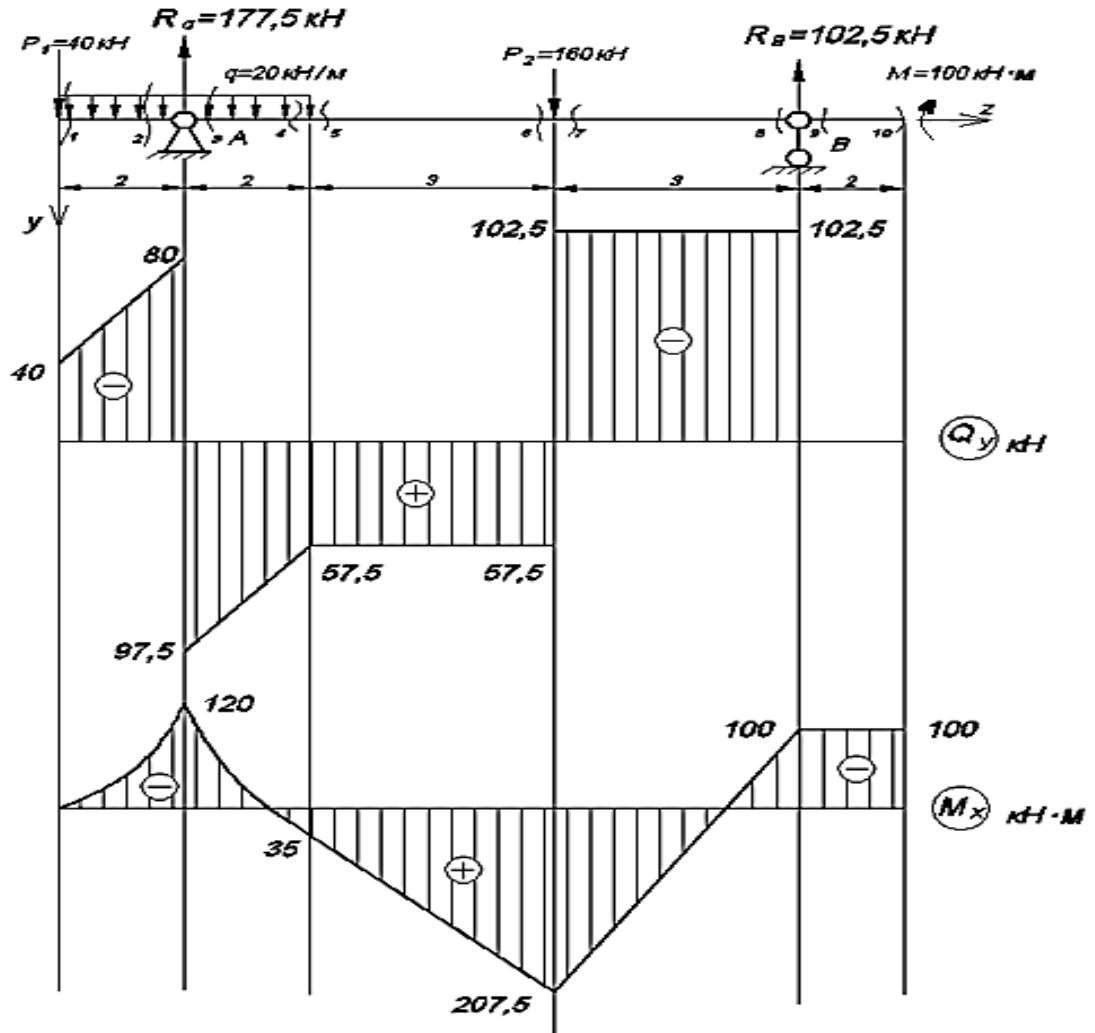


Рисунок 1.11. Схема балки до задачі з поетапним розв'язанням її.

4) Визначаємо величини згинальних моментів M_x в характерних перерізах і будуємо епюру (рис. 11).

$$M_{x(1)} = 0 \text{ кН}\cdot\text{м.} \quad M_{x(2)} = M_{x(3)} = -2 \cdot P_1 - 2 \cdot q = -120 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

$$M_{x(4)} = M_{x(5)} = -4 \cdot P_1 - 4 \cdot 2 \cdot q + 2 \cdot R_A = 35 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

$$M_{x(6)} = M_{x(7)} = -M + 3 \cdot R_B = 207,5 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

$$M_{x(8)} = M_{x(9)} = M_{x(10)} = -M = -100 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

1.2. Міцність балок при згині

1.2.1. Аналіз напруженого стану при згині

У загальному випадку плоского поперечного згину в поперечному перерізі балки виникають нормальні та дотичні напруження, які визначаються за формулами:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y; \quad \tau_x = \frac{Q_y \cdot S_x^{\text{відс.}}}{I_x \cdot b_y}.$$

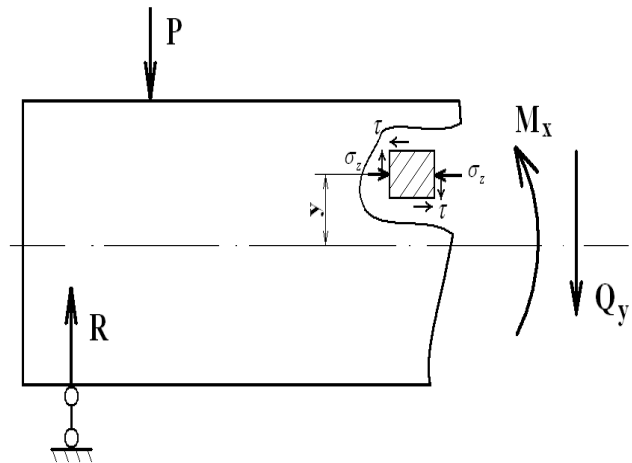


Рисунок 1.12. Загальний випадок плоского напруженого стану при згині.

При цьому в будь-якій точці має місце плоский напружений стан, для якого головні напруження і головні площадки визначаємо за формулами (рис. 1.12):

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2}. \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2 \cdot \tau_{zy}}{\sigma_z - \sigma_y}. \quad (5)$$

У нашому випадку, враховуючи, що поздовжні волокна не тиснуть одне на одне $\sigma_y = 0$ і $\sigma_z = \sigma$, $\tau_{zy} = \tau_{yz} = \tau$ то формули будуть такими:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}. \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2 \cdot \tau}{\sigma}. \quad (7)$$

При цьому дослідимо напружений стан у трьох точках по висоті перерізу балки; у верхньому стиснутому волокні; у нижньому розтягнутому волокні; на нейтральній лінії (рис. 1.13).

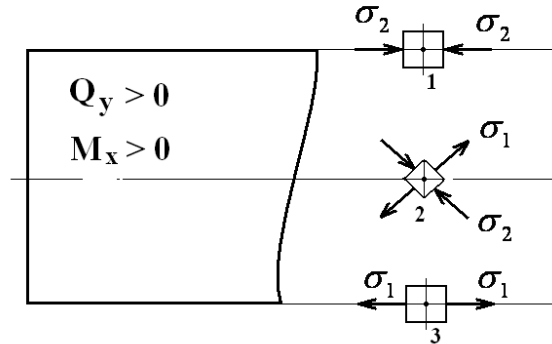


Рисунок 1.13. Дослідження напруженого стану по висоті перерізу.

Точка 1: $\tau = 0$; $\sigma_z = -\sigma$.

$$\sigma_1 = -\frac{\sigma}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(-\sigma)^2 + 4 \cdot 0} = 0;$$

$$\sigma_2 = -\frac{\sigma}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(-\sigma)^2} = -\sigma;$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2 \cdot 0}{-\sigma} = 0; \Rightarrow \alpha'_0 = 90^\circ; \quad \alpha''_0 = 0^\circ.$$

Точка 2: $\tau = \tau_{\max}$; $\sigma_z = 0$.

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}\sqrt{4 \cdot \tau_{\max}^2} = \tau_{\max};$$

$$\sigma_2 = -\frac{1}{2}\sqrt{4 \cdot \tau_{\max}^2} = -\tau_{\max};$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2 \cdot \tau_{\max}}{0} = \infty; \Rightarrow \alpha'_0 = 45^\circ; \quad \alpha''_0 = 135^\circ.$$

Точка 3: $\tau = 0$; $\sigma_z = \sigma$.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma)^2 + 4 \cdot 0} = \sigma;$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma)^2} = 0;$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2 \cdot 0}{-\sigma} = 0; \Rightarrow \alpha'_0 = 0^\circ; \quad \alpha''_0 = 90^\circ.$$

При цьому максимальні та мінімальні дотичні напруження виникають у площинах нахилених до головних площин під кутом 45° і визначаються за формулою:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}. \quad (8)$$

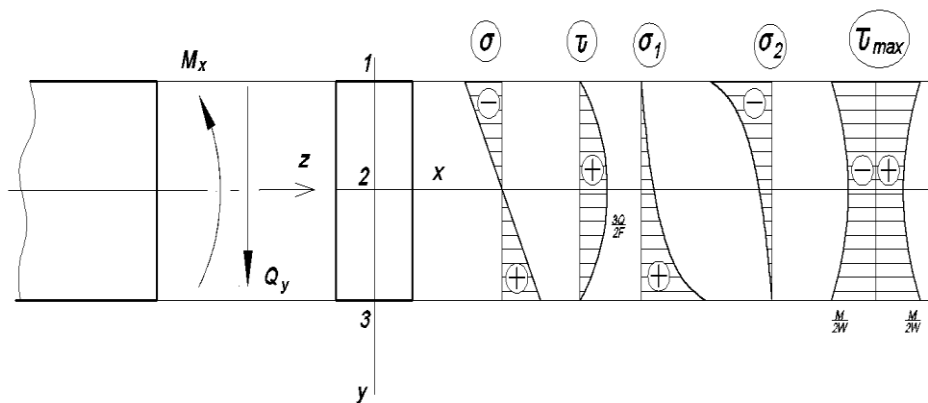


Рисунок 1.14. Епюри напружень у прямокутному поперечному перерізі.

Таким чином, знаючи величину поперечної сили Q_y та згинального моменту M_x в поперечному перерізі, а також розміри поперечного перерізу, використавши формули, побудуємо для прямокутного поперечного перерізу епюри нормальних σ , дотичних τ , головних нормальних σ_1 , σ_2 та максимальних дотичних $\tau_{\max}$ напружень, які виникають площинах, нахилених до головних під кутом 45° . Зробимо аналогічні побудови також для балки двотаврового поперечного перерізу.

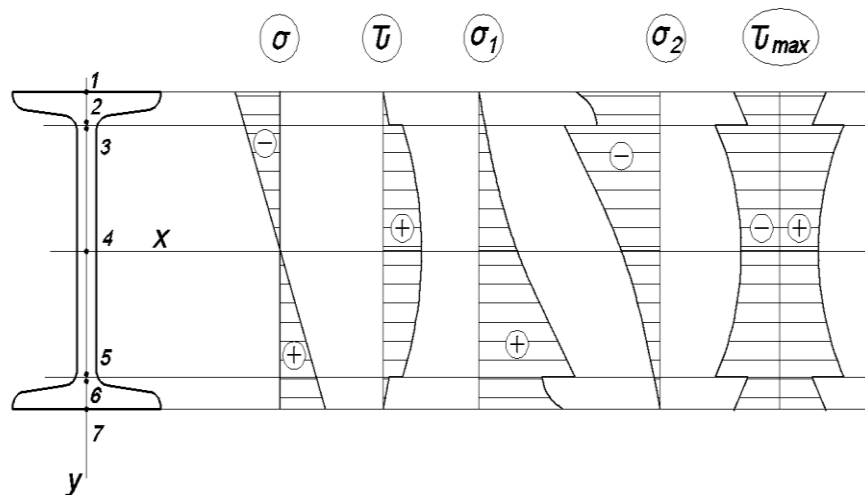


Рисунок 1.15. Напруження в двотавровому поперечному перерізі.

Характерною особливістю при цьому є стрибки на епюрах σ_1 , σ_2 та $\tau_{\max}$, викликані стрибками на епюрі τ , які в свою чергу, пов'язані із різкою зміною ширини перерізу в місцях з'єднання полиці зі стінкою.

1.2.2. Перевірка міцності балок при згині

Очевидно, що максимальні нормальні напруження σ виникають у крайніх волокнах, і не враховуючи знаку визначаються:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{I_x} \cdot y_{\max} = \frac{M_x}{W_x}. \quad (9)$$

де: W_x – момент опору, що характеризує опір поперечного перерізу.

При цьому знаючи максимальний згинальний момент M_x , а також розмір поперечного перерізу, можна перевірити умову міцності балки за нормальними напруженнями. Вона має вигляд:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{W_x} \leq [\sigma]. \quad (10)$$

Із виразу можна розв'язати і зворотну задачу, тобто при заданому навантаженні і знаючи матеріал, визначити розміри поперечного перерізу:

$$W_x = \frac{M_x}{[\sigma]}. \quad (11)$$

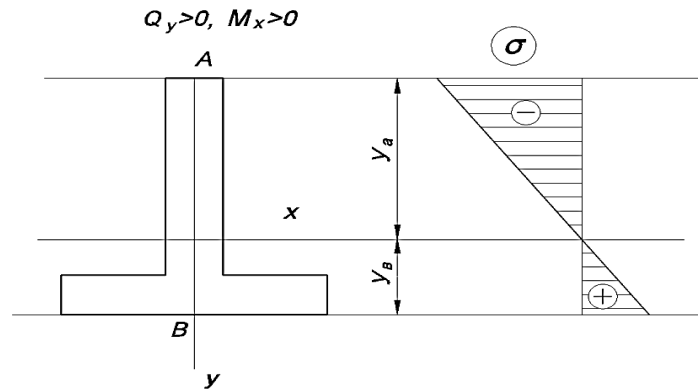


Рисунок 1.16. Переріз, що не має горизонтальної вісі симетрії.

Для перерізу, який не має горизонтальної вісі симетрії, виразом можна користуватися лише для найбільш віддалених волокон. При цьому, якщо балку виготовлено із крихкого матеріалу, то перевіряють умови міцності як на стиск, так і розтяг:

$$\sigma_A = \frac{M_x}{I_x} \cdot y_A \leq [\sigma]_{\text{стиск}}. \quad (12)$$

$$\sigma_B = \frac{M_x}{I_x} \cdot y_B \leq [\sigma]_{\text{розтяг}}. \quad (13)$$

Для балки двотаврового поперечного перерізу виконують перевірку умов міцності: для точки 1 перевіряють умову міцності нормальними напруженнями; для точки 4 перевірку міцності здійснюють за дотичними напруженнями; для точок з'єднання полиці і стійки (але належить стійці (точка 3)) перевіряють міцність за головними нормальними напруженнями:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma]; \quad (14)$$

або для цих точок виконують перевірку міцності, за 4 енергетичною теорією міцності, тобто:

$$\sigma_{еквівал}^{IV} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma]. \quad (15)$$

1.3. Переміщення при згині.

1.3.1. Диференціальне рівняння зігнутої осі балки, визначення прогинів та кутів повороту шляхом його інтегрування.

У результаті дії зовнішнього навантаження вісь балки викривляється, набуваючи форму кривої, яка називається **пружною лінією (пружна вісь балки)**.

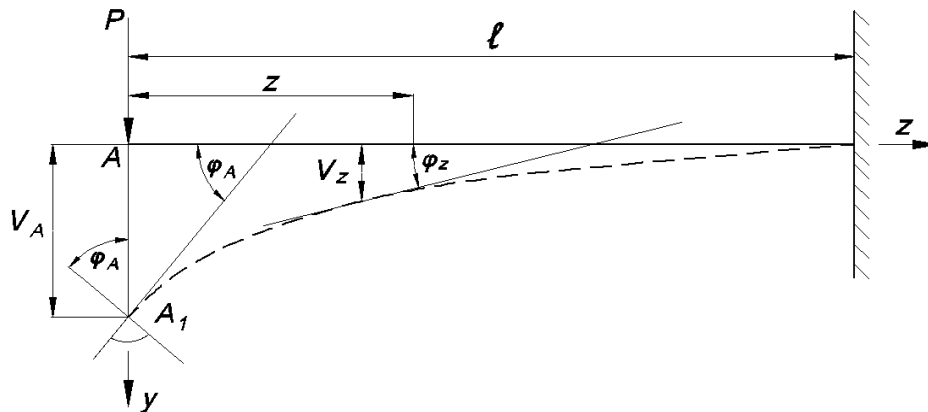


Рисунок 1.17. Деформації при згині.

Деформації при згині характеризуються двома величинами:

$V_{(z)}$ – прогин (переміщення центру ваги поперечного перерізу по вертикалі або *лінійна деформація*);

$\varphi_{(z)}$ – кут повороту перерізу (кут нахилу поперечного перерізу відносно свого попереднього положення, або кут нахилу дотичної до деформованої вісі в цьому перерізі до горизонтальної координатної вісі z). Її ще називають **кутовою деформацією**.

Враховуючи, що в зоні пружної деформації $\varphi(z) \leq 0,017 \text{ рад}$, то:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{dV}{dz} \approx \varphi. \quad (16)$$

Переміщення при згині $V_{(z)}$ та $\varphi_{(z)}$ можуть бути знайдені, коли буде відомо рівняння пружної лінії:

$$V_{(z)} = f(z). \quad (17)$$

У разі чистого згину рівняння кривизни набуває вигляду:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot I}. \quad (18)$$

З курсу математичного аналізу відомо, що кривизна плоскої кривої знаходиться за формулою:

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{\frac{d^2V}{dz^2}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{dV}{dz}\right)^2\right]^3}}. \quad (19)$$

Знехтувавши виразом $\left(\frac{dV}{dz}\right)^2 \approx 0$, вираз набуде вигляду:

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{d^2V}{dz^2}. \quad (20)$$

Прирівнявши праві частини виразів, отримаємо:

$$\frac{d^2V}{dz^2} = \pm \frac{M}{E \cdot I} \quad (21)$$

Вираз є диференціальним рівнянням зігнутої вісі балки.

Знаки в правій частині виразу залежать від вибору системи координат.

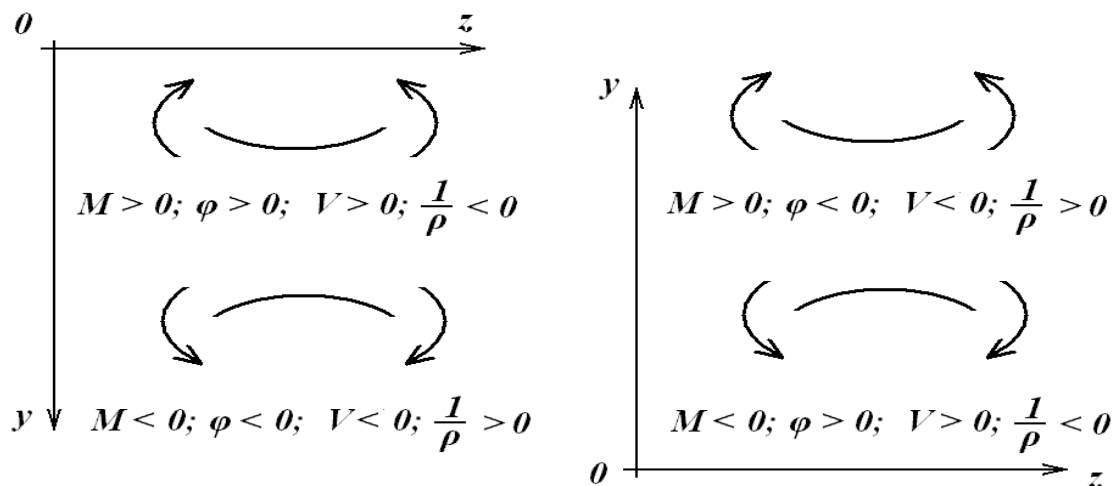


Рисунок 1.18. Залежність знаку у виразі в залежності від вибору системи координат.

Правило знаків для кута повороту $\varphi_{(z)}$:

$\varphi_{(z)} > 0$, якщо він відповідає коротшому шляху повороту вісь z до y .

Враховуючи викладене, очевидно, що у разі, коли вісь y напрямлена вниз в рівнянні (6.56) буде знак «мінус», тобто:

$$\frac{d^2V}{dz^2} = -\frac{M}{E \cdot I} \quad (22)$$

Для визначення кута повороту та прогину проінтегруємо вираз по z :

$$\frac{dV}{dz} = \varphi(z) = -\frac{1}{E \cdot I} \cdot \left[\int M_x \cdot dz + C \right] \quad (23)$$

В результаті другого інтегрування:

$$V(z) = -\frac{1}{EI} \left[\int dz \int M_x \cdot dz + Cz + D \right] \quad (24)$$

При цьому отримуємо сталі інтегрування C і D , які визначаються із граничних умов на кінцях ділянки балки. Кожен випадок матиме свої граничні умови.

1.3.2. Перевірка жорсткості балки при згині

В інженерній практиці відомі випадки, коли для балки, поперечний переріз якої підібрано із умов міцності, переміщення досягають значної величини і не дають можливість нормально експлуатувати такою конструкцію. При цьому величина максимального прогину f (стріла прогину) не повинна перевищувати допустиме значення $[f]$, що приводиться в нормах:

$$V_{\max} = f \leq [f] \quad (25)$$

Величина допустимого значення $[f]$, залежить від призначення конструкції і може коливатись:

$$[f] = \left(\frac{1}{150} \div \frac{1}{1000} \right) \cdot l. \quad (26)$$

1.3.3. Метод початкових параметрів

Застосування методу безпосереднього інтегрування диференціального рівняння зігнутої осі для балок з кількістю

ділянок навантаження $m > 3$, пов'язана із труднощами, викликаними знаходженням $2m$ постійних інтегрувань. Але для будь-якої балки кількість постійних інтегрувань можливо звести до двох, якщо враховувати нижче наведені для складання та інтегрування виразу моменту:

1. Початок координат суміщають з лівим кінцем балки і вважають постійною величиною для всіх ділянок балки.

2. У рівняння моментів включають тільки силові фактори, розташовані ліворуч від перерізу.

3. Зосереджений момент приймаємо із множником:
 $(z-a)^0 = 1$.

4. Розподілене навантаження розповсюджують до правого кінця балки, а для встановлення дійсної рівноваги докладають компенсуюче навантаження такої ж інтенсивності, але зворотного напрямку.

5. Вираз моменту інтегрують без розкриття дужок.

Розглянемо балку, яка має 5 ділянок завантаження:

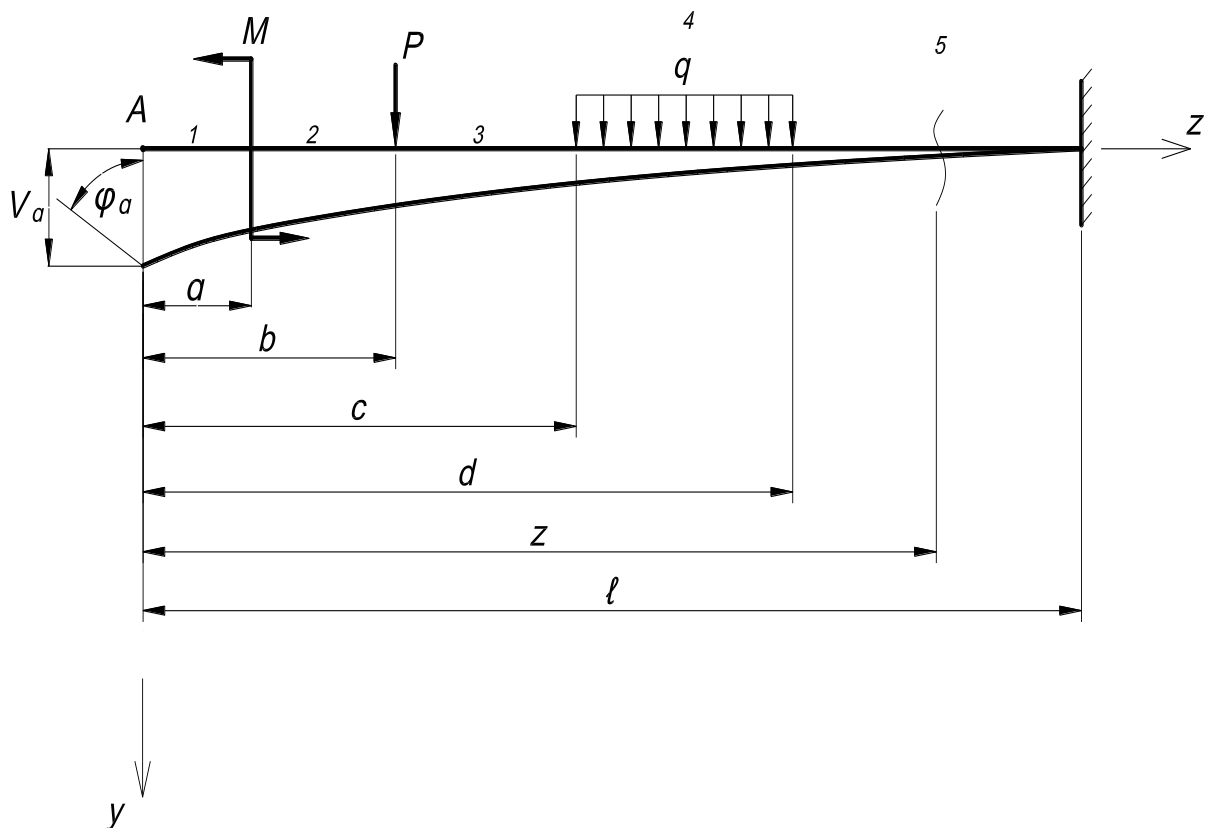


Рисунок 1.19. Схема балки, яка має п'ять ділянок завантаження.

Початок координат виберемо в точці А. Диференціальне рівняння зігнутої вісі балки має вигляд:

$$\frac{d^2V}{dz^2} = -\frac{M}{E \cdot I}.$$

Запишемо вираз для згинаючого моменту впоперечному перерізі на п'ятій ділянці:

$$M_5 = -\left[M(z-a)^0 + P(z-b) + q \frac{(z-c)^2}{2} - q \frac{(z-d)^2}{2} \right] \quad (27)$$

Диференційне рівняння має вигляд:

$$EI \frac{d^2V}{dz^2} = M(z-a)^0 + P(z-b) + q \frac{(z-c)^2}{2} - q \frac{(z-d)^2}{2}.$$

Проінтегрувавши один та два рази вираз (6.65), отримаємо вирази для кута повороту і прогину п'ятої ділянки балки, відповідно:

$$EI\varphi_{(z)} = EI \frac{dv}{dz} = M(z-a) + \frac{P(z-b)^2}{2} + q \frac{(z-c)^3}{6} - q \frac{(z-d)^3}{6} + C_5; \quad (28)$$

$$EIV_{(z)} = \frac{M(z-a)^2}{2} + \frac{P(z-b)^3}{6} + q \frac{(z-c)^4}{24} - q \frac{(z-d)^4}{24} + C_5 \cdot z + D_5. \quad (29)$$

Аналогічно для четвертої ділянки:

$$EI\varphi_{(z)} = EI \frac{dv}{dz} = M(z-a) + \frac{P(z-b)^2}{2} + q \frac{(z-c)^3}{6} + C_4; \quad (30)$$

$$EIV_{(z)} = \frac{M(z-a)^2}{2} + \frac{P(z-b)^3}{6} + q \frac{(z-c)^4}{24} + C_4 \cdot z + D_4. \quad (31)$$

Застосувавши вказані вище правила, отримаємо рівність сталих інтегрувань, що впливає з плавності з'єднання ділянок балки:

$$C_1=C_2=C_3=C_4=C_5$$

$$D_1=D_2=D_3=D_4=D_5$$

Геометричне тлумачення сталих інтегрувань з'ясуємо під час розгляду першої ділянки:

$$EI\varphi_{(0)} = C_1$$

$$EIV_{(0)} = C_1 \cdot z + D_1$$

Враховуючи, що $z = 0$, маємо:

$$C = EI\varphi_{(0)}$$

$$D = EIV_{(0)}$$

Таким чином, для балки з будь-якою кількістю ділянок завантаження сталих інтегрувань буде дві: V_0 та φ_0 , де: V_0 – прогин, а φ_0 – кут повороту лівого кінця балки.

Враховуючи викладене, вираз для прогинів запишеться:

$$EIV(z) = EIV_0 + EI\varphi_0 \cdot z + \frac{M(z-a)^2}{2} + \frac{P(z-b)^2}{6} + q \frac{(z-c)^4}{24} - q \frac{(z-d)^4}{24}. \quad (32)$$

Рівняння називають **універсальним рівнянням зігнутої вісі балки**.

У разі, коли до лівого кінця балки докласти зосереджені M_0 і P_0 , (статичні початкові параметри), то рівняння зігнутої осі балки набуде вигляду:

$$EIV(z) = EIV_0 + EI\varphi_0 \cdot z \pm M_0 \frac{z^2}{2} \pm P_0 \frac{z^3}{6} \pm \sum M \frac{(z-a)^2}{2} \pm \sum P \frac{(z-b)^3}{6} \pm \sum q \frac{(z-c)^4}{24} \pm \sum q \frac{(z-d)^4}{24} \quad (33)$$

Вираз (33) – **універсальне рівняння прогинів балки**.

Взявши похідну із виразу (33), можемо отримати **універсальне рівняння кутів повороту**:

$$EI\varphi(z) = EI\varphi_0 \pm M_0 z \pm P_0 \frac{z^2}{2} \pm \sum M(z-a) \pm \sum P \frac{(z-b)^2}{2} + \sum q \frac{(z-c)^3}{6} - \sum q \frac{(z-d)^3}{6} \quad (6.72)$$

2. Розрахунок статично визначеної балки на згин

2.1. Приклад розрахунку статично визначеної балки на згин

Для консольної балки необхідно:

- визначити опорні реакції;
- побудувати епюри поперечних сил і моментів згинання;
- із умови міцності по нормальних напруженнях підібрати:

а) діаметр d круглого поперечного перерізу;

б) висоту h і ширину b прямокутного поперечного перерізу, прийнявши $b = 0,5h$;

в) побудувати епюри нормальних і дотичних напружень в небезпечних перерізах

Дано: балку розмірами

$a_1 = 1,5 \text{ м}$; $a_2 = 2 \text{ м}$; $l = 5,5 \text{ м}$; $P = 5 \text{ кН}$; $q = 15 \text{ кН/м}$; $[\sigma] = 10 \text{ МПа}$

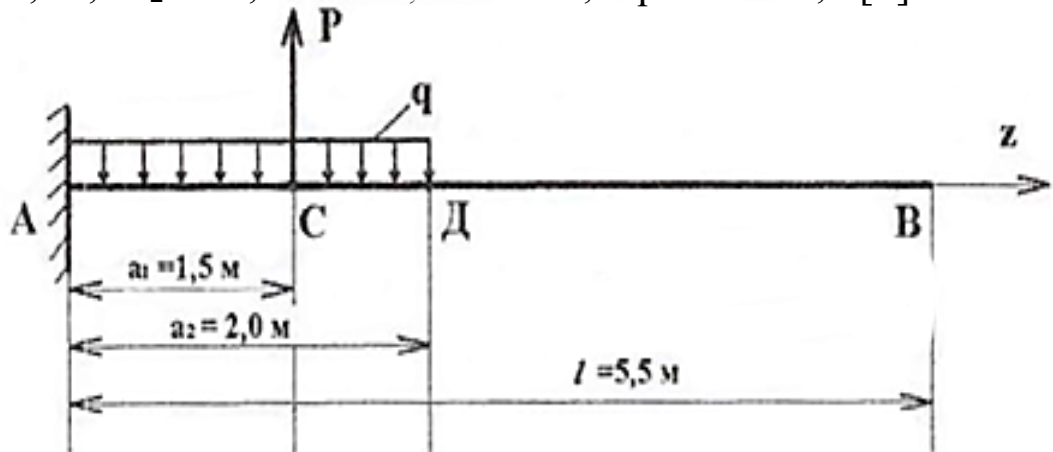


Рисунок 2.1. Схема до задачі

1. Визначаємо реакції опор за рівнянням рівноваги. В точці А маємо жорстке защемлення. В точці жорсткого защемлення маємо три складові реакції R_A , Z_A і пару сил з моментом защемлення M_A (реактивний момент).

$$\begin{cases} \Sigma Z_1 = 0; & Z_A = 0 \\ \Sigma Y_1 = 0; & -R_A - P + q \cdot a_2 = 0 \\ \Sigma \Sigma M_{iA} = 0; & -q \cdot a_2 \cdot \frac{a_2}{2} + P \cdot a_1 + M_A = 0 \end{cases}$$

Звідси визначаємо реакції: $R_A = 25 \text{ кН}$; $M_A = 22,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Поперечні сили у відповідних перерізах балки мають такі значення:

$$Q_{(Y)1}=Q_{(Y)2}=Q_{(Y)3}=0;$$

$$Q_{(Y)4}=q \cdot 0,5=15 \cdot 0,5=7,5 \text{ кН};$$

$$Q_{(Y)5}=Q_{(Y)4}-P=7,5-5=2,5 \text{ кН};$$

$$Q_{(Y)6}=q \cdot 2-P=15 \cdot 2-5=25 \text{ кН}.$$

2. Згинальні моменти у відповідних перерізах балки мають такі значення:

$$M_{(X)1} = M_{(X)2} = M_{(X)3} = 0;$$

$$M_{(X)4} = M_{(X)5} = -\left(q \cdot \frac{a_2}{4} \cdot \frac{a_2}{8}\right) = -(15 \cdot 0,5 \cdot 0,25) = -1,87 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{(X)6} = -\left(q \cdot a_2 \cdot \frac{a_2}{2}\right) + P \cdot a_1 = -(15 \cdot 2 \cdot 1) + 0,5 \cdot 1,5 = -22,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

3. Із умови міцності по нормальним напруженням підбираємо:

А) балку круглого перерізу з діаметром d .

$$W_{kp} = \frac{M_{x \max}}{[\sigma]} = \frac{22,5 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 2250 \text{ см}^3$$

$$W_x = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \approx 0,1 \cdot d^3$$

$$W_{kp} = 2250 = W = 0,1 \cdot d^3$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{2250}{0,1}} = \sqrt[3]{22500} = 28,2 \text{ см}$$

Б) балку прямокутного поперечного перерізу, прийнявши $b=0,4 \cdot h$.

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,4 \cdot h^3}{6}; \quad W_{kp} = 2250 \text{ см}^3$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{W_{kp} \cdot 6}{b}} = \sqrt[3]{\frac{2250 \cdot 6}{0,4}} = 32,3 \text{ см}$$

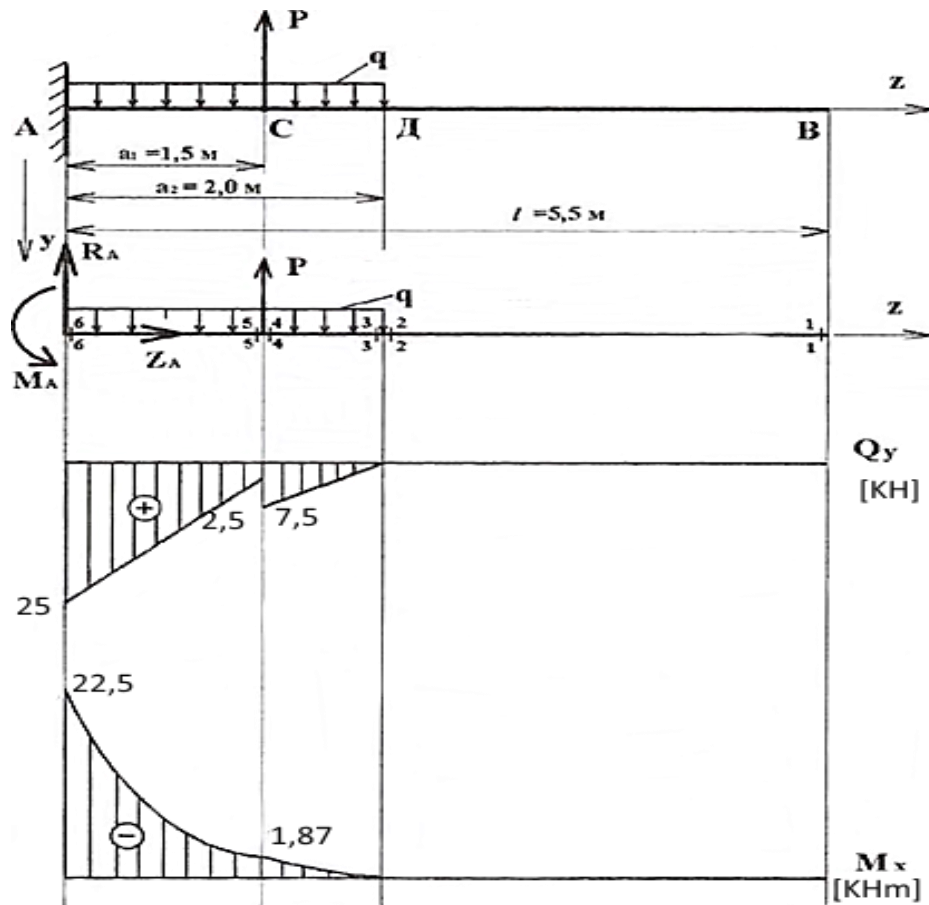


Рисунок 2.2. Побудова епюр

4. Будемо епюру нормальних і дотичних напружень в перерізах з максимальним значенням моменту $M_{\max}$ і максимальним значенням поперечної сили $Q_{\max}$. Таким перерізом виявився переріз в точці 6.

А) для круглого поперечного перерізу:

Нормальні напруження :

$$\sigma_{(1)} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{22,5 \cdot 10^3}{0,1 \cdot d^3} = \frac{22,5 \cdot 10^3}{0,1 \cdot (0,282)^3} = 10 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{(2)} = 0$$

$$\sigma_{(3)} = -10 \text{ МПа}$$

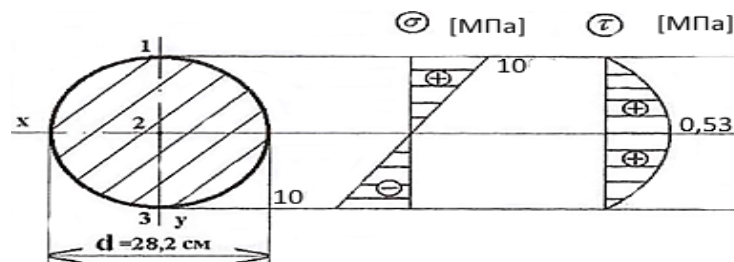


Рисунок 2.3. Побудова епюр для круглого поперечного перерізу

Дотичні напруження :

$$\tau = \frac{Q_y \cdot S_x}{I_x \cdot b}$$

$$\tau_{(1)} = \tau_{(3)} = 0; \quad \tau_{(2)} = \frac{4}{3} \cdot \frac{Q_{Y \max}}{F} = \frac{4}{3} \cdot \frac{25 \cdot 10^3}{3,14 \cdot (0,282)^2} = 0,53 \text{ МПа}$$

Б) для квадратного поперечного перерізу:

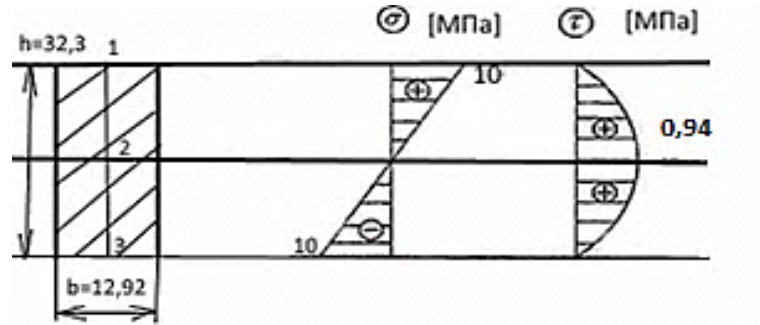


Рисунок 2.4. Побудова епюр для квадратного поперечного перерізу
Нормальні напруження:

$$\sigma_{(1)} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{22,5 \cdot 10^3}{0,1 \cdot d^3} = \frac{22,5 \cdot 10^3}{0,1 \cdot (0,282)^3} = 10 \text{ МПа}; \quad \sigma_{(2)} = 0;$$

$$\sigma_{(3)} = -10 \text{ МПа}$$

Дотичні напруження : $\tau_{(1)} = \tau_{(3)} = 0$

$$\tau_{(2)} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q_{Y \max}}{F} = \frac{3}{2} \cdot \frac{25 \cdot 10^3}{b \cdot h} = \frac{3 \cdot 25 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,1292 \cdot 0,323} = 0,94 \text{ МПа}$$

2.2. Контрольні питання

1. Як знаходиться момент згинання в поперечному перерізі балки?
2. В якому випадку момент згинання рахують позитивним?
3. Як знаходиться поперечна сила в довільному перерізі балки?
4. Правила знаків для поперечної сили.
5. Яка залежність між величинами $M(X)$, $Q(Y)$ і $q(X)$?
6. Як знаходять максимальний момент згинання?
7. Що таке чисте згинання?
8. По якій кривій згинається балка в випадку чистого згинання?
9. Як змінюється нормальні напруження по висоті балки?
10. Що називають моментом опору при згинанні?

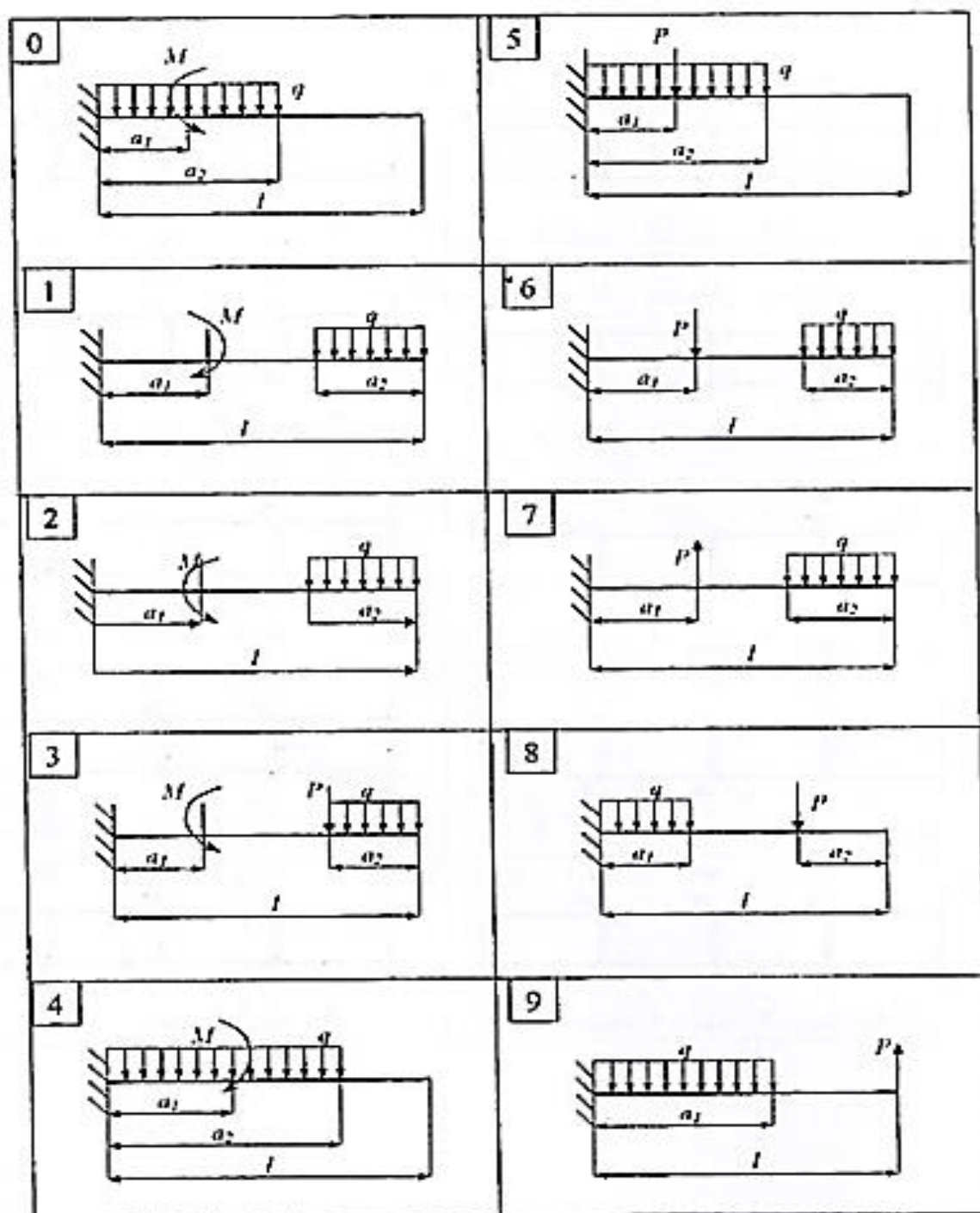
11. Що називають нейтральним шаром і де він знаходиться?
12. Як правильніше покласти балку прямокутного перерізу при роботі на згинання?
13. Який переріз має більший момент опору при однаковій площі: круглий чи квадратний?
14. В яких площинах виникають дотичні напруження при згинанні? Формула Журавського?
15. Як знаходяться головні напруження при згинанні?
16. Які напруження з'являються в балці, якщо площина дії навантаження не проходить через центр згинання?
17. Запишіть загальний вигляд диференціального рівняння зігнутої осі балки?
18. Як знаходяться сталі інтегрування?
19. Як визначають найбільшу величину прогину?

2.3. Завдання для самостійного виконання

Таблиця 2.1.

Варіанти завдань для самостійного виконання

№	L, m	a ₁ , m	a ₂ , m	M, кН·м	P, кН	Q, кН/м	[σ], МПа
1	5,0	1,0	2,0	10	5	5	12
2	4,0	1,5	1,5	20	10	10	10
3	3,5	1,0	1,5	3	3	3	8
4	4,5	2,0	1,0	4	4	4	12
5	5,5	1,5	2,0	5	5	5	10
6	5,0	2,0	1,5	6	6	6	8
7	4,5	2,0	0,5	7	7	7	12
8	4,0	1,0	1,0	8	8	8	10
9	3,0	1,8	0,9	9	9	9	8
10	4,5	1,5	1,5	10	10	10	12



3. Аналіз напруженого стану та повний розрахунок на міцність. Визначення переміщень та розрахунок на жорсткість при поперечному згинанні

3.1. Приклад аналізу напруженого стану при згині

Частина 1

Підібрати переріз балки, що складається з двох двотаврів, а також круглий та квадратний переріз і вибрати найбільш раціональний варіант. Схема розміщення навантаження показана на рисунку.

$[\sigma] = 160 \text{ МПа}$; $[\tau] = 100 \text{ МПа}$; $l = 2 \text{ м}$; $q = 40 \text{ кН/м}$; $M = 40 \text{ кН}$.

Знайти : $W_{\max}$ -? M_x -? Q_y -?

1. Визначення опорних реакцій.

Вважаємо балку абсолютно жорсткою. Знайдемо суму моментів сил відносно опор А і В та прирівняємо її до нуля. Момент сили, який здійснює обертання проти годинникової стрілки будемо враховувати зі знаком «+». Рівномірно розподілене навантаження інтенсивності q замінимо зосередженою силою Q . Точка прикладання сили Q знаходиться на відстані $l/2 = 1 \text{ м}$ від точки А.

$$Q = q \cdot l = 40 \cdot 2 = 80 \text{ кН};$$

$$\sum M_A = 0; -Q \cdot 1 + R_B \cdot 4 + M = 0 = -80 + 4 R_B + 40 = 0$$

$$\text{Звідси } R_B = 10 \text{ кН.}$$

$$\sum M_B = 0; -R_A \cdot 4 + 3Q + M = -4R_A + 240 + 40 = 0$$

$$4R_A = -280; \text{ звідси } R_A = 70 \text{ кН.}$$

$$\text{Перевірка: } \sum F_y = 0; -R_A + q \cdot 2 - R_B = -70 + 80 - 10 = 0$$

2. Намічаємо ділянки балки та вибираємо характерні перерізи.

❶ - Ділянка $0 \leq z \leq 2 \text{ м}$ (1,2 переріз)

❷ - Ділянка $0 \leq z \leq 4 \text{ м}$ (3,4 переріз)

❸ - Ділянка $0 \leq z \leq 5 \text{ м}$ (5,6 переріз)

2. Побудова епюр поперечних сил, враховуючи лінійний закон :

$$q_z = \text{const} :$$

$$Q_{z1} = R_A = 70 \text{ кН};$$

$$Q_{z2} = R_A - q \cdot 2 = 70 - 2 \cdot 40 = -10 \text{ кН};$$

$$Q_{z3} = -R_B = -10 \text{ кН} = Q_{z4};$$

$$Q_{z5} = 0 = Q_{z6}.$$

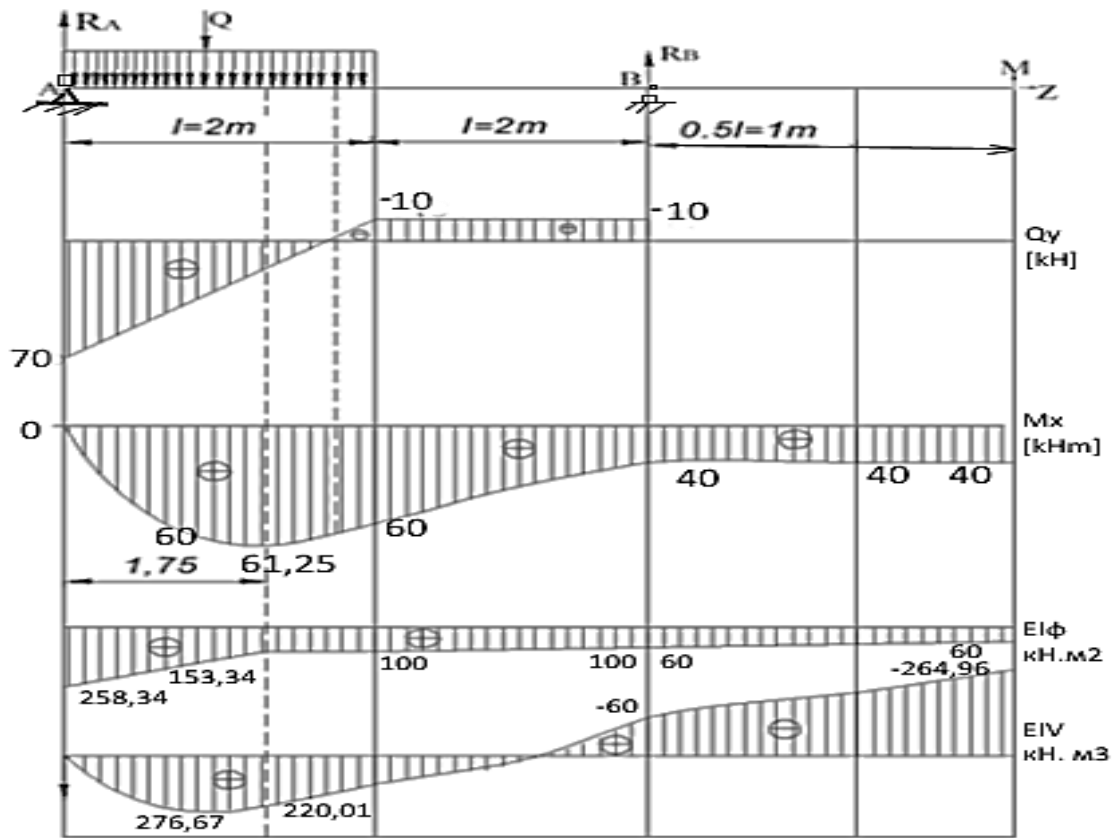


Рисунок 3.1. Розрахункова схема до задачі

4. Побудова епюри моментів згинання M_z на 1 ділянці, де розташоване рівномірно розподілене навантаження, має вигляд квадратної параболи. Знайдемо найвищу точку параболи:

$$Z_c = \frac{Q_y}{q} = \frac{70 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3} = 1,75 \text{ м}$$

Обчислюємо момент згинання

$$M_{z1} = 0; \quad M_{z2} = R_A \cdot 2 - q \cdot l \cdot \frac{l}{2} = 70 \cdot 2 - 40 \cdot 2 \cdot 1 = 60 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{z3} = R_A l - \frac{ql^2}{2} = 60 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{z3c}(1.75) = 70 \cdot 1.75 - 40 \cdot \frac{(1.75)^2}{2} = 61,25 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{z4} = M_{z5} = M_{z6} = 40 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

5. Підбір перерізу. Із побудованих епюр M_z і Q_y вибираємо максимальні значення.

$$Q_{y\max} = 70 \text{ кН}; \quad M_{z\max} = 61,25 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Визначаємо необхідний момент опору перерізу:

$$W_{\text{необх}} = \frac{Mz_{\text{max}}}{[\delta]} = \frac{61.25 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = \frac{0.0383}{10^3} = 383 \text{ см}^3$$

Поперечний переріз складається з двох двотаврів, то для 1 двотавра:

$$W_{\text{необх}} = \frac{Mz_{\text{max}}}{2} = \frac{383}{2} = 191 \text{ см}^3$$

По сортаменту вибираємо двотавр 20А, для якого $W_x > W_{\text{необх}}$
 $W_x = 203 \text{ см}^3$; $I_x = 2030 \text{ см}^4$; $S_x = 114 \text{ см}^3$; $d = 0,52 \text{ см}$

Оскільки W_x підбраного двотавра більше, ніж $W_{\text{необх}}$, то умова міцності за нормальними напруженнями виконується.

$$\sigma_{z_{\text{max}}} = \frac{Mz_{\text{max}}}{W_x} = \frac{61.25 \cdot 10^3}{2 \cdot 203 \cdot 10^{-6}} = 150,9 \text{ МПа} < [\sigma]$$

Перевіряємо умову міцності по дотичних напруженнях:

$$\tau_{y_{\text{max}}} = \frac{Qy_{\text{max}} \cdot S_x}{I_x \cdot b_y} = \frac{70 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 114 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 2030 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 0,52 \cdot 10^{-2}} = 3,57 \text{ МПа} < [\tau]$$

Підібраний переріз задовольняє умови міцності.

6. Підберемо круглий переріз балки діаметром “d”:

$$W_{\text{необх}} = \frac{Mz_{\text{max}}}{[\delta]} = 383 \text{ см}^3$$

Для круглого прерізу:

$$W_x = \frac{\pi d^3}{32} = 0,1 \text{ д}^3; \quad \text{звідси} \quad d = \sqrt[3]{\frac{383}{0,1}} = 15,7 \text{ см}$$

Перевіримо умови міцності по нормальним напруженням

$$\sigma_{z_{\text{max}}} = \frac{Mz_{\text{max}}}{W_n} = \frac{61.25 \cdot 10^3}{383 \cdot 10^{-6}} = 159,9 \text{ МПа} \leq [\sigma]$$

Перевіримо умови міцності за дотичними напруженнями.

$$\tau_{z_{\text{max}}} = \frac{4}{3} \frac{Qy_{\text{max}}}{F} = \frac{4}{3} \frac{70 \cdot 10^3}{3,14 \cdot (15,7 \cdot 10^{-2})^2} = 4,8 \text{ МПа} < [\tau]$$

Круглий переріз $d = 15,7 \text{ см}$ задовольняє умови міцності.

7. Підбираємо квадратний переріз із стороною “a”

$$W_{\text{max}} = 383 \text{ см}^3; \quad W_x = \frac{a^3}{6}; \quad 383 = \frac{a^3}{6}$$

$$a = \sqrt[3]{383 \cdot 6} = 13,4 \text{ см}$$

Перевіримо умови міцності за нормальними напруженнями:

$$\sigma_{z \max} = \frac{M_{z \max}}{W_x} = \frac{61,25 \cdot 10^3}{383 \cdot 10^{-6}} = 160 \text{ МПа} \leq [\sigma]$$

Перевіримо умови міцності за дотичними напруженнями:

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \frac{Q_{y \max}}{F} = \frac{3}{2} \cdot \frac{70 \cdot 10^3}{(13,4 \cdot 10^{-2})^2} = 5,8 \text{ МПа} < [\tau]$$

Квадратний переріз із сторонами $a=13,4$ см задовольняє умови міцності. Вибираємо найбільш раціональний варіант перерізу балки і порівнюємо площі підібраних перерізів балок:

$$F_{\Pi} = 2 \cdot 28,9 = 57,8 \text{ см}^2;$$

$$F_0 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (15,7)^2}{4} = 194 \text{ см}^2;$$

$$F_{\blacksquare} = a^2 = (13,4)^2 = 180 \text{ см}^2$$

Найбільш раціональним є складовий переріз балки, що складається з двох двотаврів.

Частина 2.

За знайденими значеннями необхідно побудувати епюри нормальних, дотичних та головних нормальних і дотичних напружень

$$h = 200 \text{ мм} = 0,2 \text{ м};$$

$$S_x = 203 \text{ см}^3 = 2,03 \cdot 10^{-4} \text{ м}^6;$$

$$b = 110 \text{ мм} = 0,11 \text{ м};$$

$$I_x = 2030 \text{ см}^4 = 2,03 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4;$$

$$d = 5,2 \text{ мм} = 0,0052 \text{ м};$$

$$W_z = 203 \text{ см}^3 = 2,03 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3;$$

$$t = 86 \text{ мм} = 0,0086 \text{ м};$$

$$M_{\max} = 61,25 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$F = 28,9 \text{ см}^2 = 0,00289 \text{ м}^2;$$

$$Q_{\max} = 70 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

1. Знаходимо координати в точках

$$Y_1 = \frac{h}{2} = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ м};$$

$$Y_2 = Y_3 = h/2 - t = 0,1 - 0,0086 = 0,0914 \text{ м};$$

$$Y_4 = 0;$$

$$Y_5 = Y_6 = -0,0914 \text{ м};$$

$$Y_7 = -0,1 \text{ м}$$

2. Будуємо епюру нормальних напружень σ_z , для цього знайдемо їх значення в точках. Пам'ятаємо, що за умовою в конструкції 2 двотаври.

$$\sigma_z = \frac{M_x}{2W_x} = \frac{M \cdot y_i}{2I_x}$$

$$\sigma_{z1} = \frac{61,25 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{2 \cdot 2,003 \cdot 10^{-5}} = 150,9 \text{ МПа}; \quad \sigma_{z2} = \sigma_{z3} = \frac{61,25 \cdot 10^3 \cdot 0,0914}{2 \cdot 2,03 \cdot 10^{-5}} = 137,89 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{z4} = 0;$$

$$\sigma_{z5} = \sigma_{z6} = -137,89 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{z7} = -150,9 \text{ МПа}$$

3. Побудуємо дотичну напружень визначасмо їх значення з врахуванням подвійної жорсткості.

$$\tau_{zy} = \frac{Q_y \cdot S_x}{I_x \cdot b_i}$$

Спочатку знаходимо статичні моменти площі кожної ділянки перерізу.

$$S_{x1} = F \cdot x_1 = 0;$$

$$S_{x2} = b \cdot t \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right) = S_{x3} = 0.11 \cdot 0.0086 \cdot \left(\frac{0.2}{2} - \frac{0.0086}{2} \right) = 0.000946 \cdot 0.0957 =$$

$$= 0.000091 = 9.1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

$$S_{x4} = (b \cdot t) \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right) + \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right) = d \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right) = (0.11 \cdot 0.0086) \cdot \left(\frac{0.2}{2} - \frac{0.0086}{2} \right) =$$

$$0.000091 + (0.1 - 0.0086) \cdot 0.0052 \cdot \left(\frac{0.1 - 0.0086}{2} \right) =$$

$$0.000091 + 0.0914 \cdot 0.0052 \cdot 0.045 = 0.000091 + 0.0000217 = 0.000113 \text{ м}^3$$

$$= 11.3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$\tau_{zy1} = \frac{Q_y \cdot S_x}{2 \cdot I_x \cdot b_i} = 0;$$

$$\tau_2 = \tau_6 = \frac{70 \cdot 10^3 \cdot 9.1 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot 0.11} = 1426 \cdot 10^3 \text{ Па} = 1.43 \text{ МПа};$$

$$\tau_3 = \tau_5 = \frac{70 \cdot 10^3 \cdot 9.1 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot 0.0052} = 30.17 \text{ МПа};$$

$$\tau_{z4} = \frac{70 \cdot 10^3 \cdot 11.3 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot 0.0052} = 37.47 \text{ МПа}$$

4. Будуємо епюри головних нормальних напружень.

$$\sigma^{1/3} = \frac{\sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z}{2} \right)^2 + \tau_{zy}^2}$$

Точка 1

$$\sigma_1 = \frac{150.9}{2} + \sqrt{\left(\frac{150.9}{2} \right)^2 + 0^2} = 75.45 \text{ МПа};$$

$$\sigma_3 = \frac{150.9}{2} - \sqrt{\left(\frac{150.9}{2} \right)^2 + 0^2} = 0 \text{ МПа};$$

Точка 2

$$\sigma_1 = \frac{137.89}{2} + \sqrt{\left(\frac{137.89}{2} \right)^2 + 1.43^2} = 131.91 \text{ МПа};$$

$$\sigma_3 = \frac{137.89}{2} - \sqrt{\left(\frac{137.89}{2} \right)^2 + 1.43^2} = -0.1 \text{ МПа};$$

Точка 3

$$\sigma_1 = \frac{137,89}{2} + \sqrt{\left(\frac{137,89}{2}\right)^2 + 30,17^2} = 144,21 \text{ МПа};$$

$$\sigma_3 = \frac{137,89}{2} - \sqrt{\left(\frac{137,89}{2}\right)^2 + 30,17^2} = -6,31 \text{ МПа};$$

Точка 4

$$\sigma_1 = \frac{0}{2} + \sqrt{0^2 + 37,47^2} = 37,47 \text{ МПа};$$

$$\sigma_3 = \frac{0}{2} - \sqrt{0^2 + 37,47^2} = -37,47 \text{ МПа};$$

Точка 5

$$\sigma_1 = 6,31;$$

$$\sigma_3 = -144,21;$$

Точка 6

$$\sigma_1 = 0,1;$$

$$\sigma_3 = -131,91;$$

Точка 7

$$\sigma_1 = 0;$$

$$\sigma_3 = -75,45$$

5. Знайдемо максимальні значення напружень:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$\text{точка 1: } \tau_{\max 1} = \frac{75,45 + 0}{2} = 37,73 \text{ МПа};$$

$$\text{точка 2: } \tau_{\max 2} = \frac{131,91 - (-0,1)}{2} = 65,96 \text{ МПа};$$

$$\text{точка 3: } \tau_{\max 3} = \frac{144,21 - (-6,31)}{2} = 75,26 \text{ МПа};$$

$$\text{точка 4: } \tau_{\max 4} = \frac{37,47 - (-37,47)}{2} = 37,47 \text{ МПа};$$

$$\text{точка 5: } \tau_{\max 5} = \frac{6,31 - (-144,21)}{2} = 75,26 \text{ МПа};$$

$$\text{точка 6: } \tau_{\max 6} = \frac{0,1 - (-131,91)}{2} = 65,96 \text{ МПа};$$

$$\text{точка 7: } \tau_{\max 7} = \frac{0 - (-75,45)}{2} = 37,73 \text{ МПа}$$

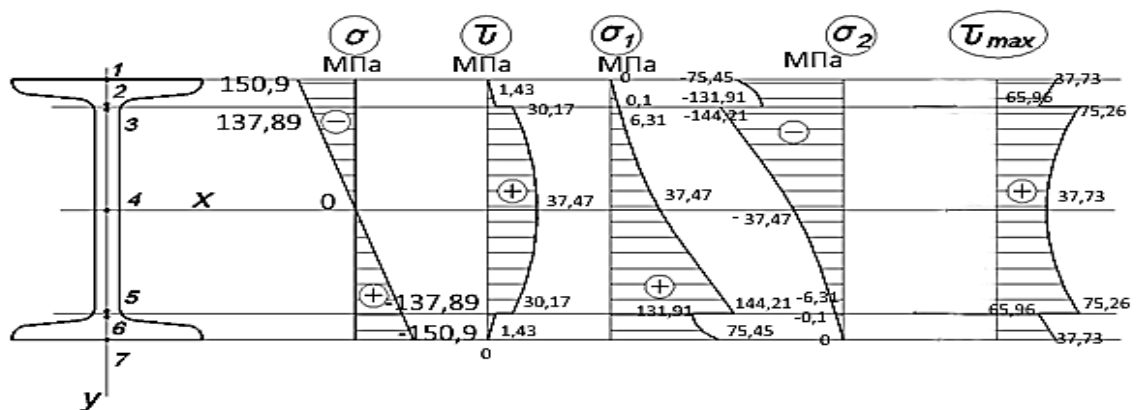


Рисунок 3.2. Епюри до частини 2

Частина 3.

Необхідно побудувати епюри кута повороту та прогину.

Розрахункові дані вибираємо з частини 1,2.

Дано:

$$R_B = 10 \text{ кН} = 10^3 \text{ М}$$

$$q = 40 \text{ кН/М} = 40 \cdot 10^3 \text{ кН/М}$$

$$M = 40 \text{ кН} \cdot \text{М} = 40 \cdot 10^3 \text{ кН} \cdot \text{М}$$

$$R_A = 70 \text{ кН} = 70 \cdot 10^3$$

$$I_x = 2030 \text{ см}^4 = 2,03 \cdot 10^{-5} \text{ М}^4$$

$$\left[\frac{f}{l} \right] = \frac{1}{100}$$

1. Запишемо універсальне рівняння прогинів

$$EIV(z) = EIV_0 + EI\varphi_0 \cdot z \pm \sum M \left(\frac{z-a}{2} \right)^2 \pm \sum P \frac{(z-b)^3}{6} \pm \sum q \frac{(z-c)^4}{24}$$

Використовуємо початкові умови прогин в опорах:

$$V(A) = 0; \quad V(B) = 0.$$

Запишемо рівняння для визначення початкових параметрів: EIV_0 ; $EI\varphi_0$

$$EIV(A) = EIV(0) = EIV_0 = EIV_0 + EI\varphi_0 \cdot z - \frac{R_A(0-0)^3}{6} = 0; \quad EIV_0 = 0;$$

$$EIV(B) = EIV(4) = EI\varphi_0 \cdot 4 - \frac{R_A \cdot 4^3}{6} + q \frac{(4-0)^4}{24} - q \frac{(4-2)^4}{24} = 0$$

$$0 + EI\varphi_0 \cdot 4 - \frac{70 \cdot 4^3}{6} + \frac{(4-0)^4}{24} - 4 \frac{(4-2)^4}{24} = 0; \quad EI\varphi_0 \cdot 4 = 746,67 + 26,67 - 426,67;$$

$$EI\varphi_0 = 286,67 \text{ кН} \cdot \text{М}^2$$

2. Знайдемо кути поворотів за допомогою універсального рівняння кутів повороту

$$EI\varphi(z) = EI\varphi_0 \pm \sum M (z-a) \pm \sum P \frac{(z-b)^2}{2} \pm \sum q \frac{(z-c)^3}{6}$$

$$EI\varphi(1) = EI\varphi_0 - \frac{R_A(1-0)^2}{2} + \frac{q(1-0)^3}{6} - \frac{q(1-1)^3}{6} = 286,67 - \frac{70 \cdot 1}{2} + \frac{40 \cdot 1^3}{6} = 258,34 \text{ кН} \cdot \text{М}^2;$$

$$EI\varphi(2) = EI\varphi_0 - \frac{R_A(2-0)^2}{2} + q \frac{(2-0)^3}{6} - \frac{q(2-2)^3}{6} = 286,67 - \frac{70 \cdot 2^2}{2} + \frac{40 \cdot 1^3}{6} = 153,34 \text{ кН} \cdot \text{М}^2;$$

$$EI\varphi(4) = EI\varphi_0 - \frac{R_A(4-0)^2}{2} + q \frac{(4-0)^3}{6} - q \frac{(4-2)^3}{6} = 286,67 - \frac{70 \cdot 4^2}{2} + \frac{40 \cdot 4^3}{6} - \frac{40(2)^3}{6} = 100 \text{ кН} \cdot \text{М}^2;$$

$$EI\varphi(5) = EI\varphi_0 - \frac{R_A \cdot 5^2}{2} + q \frac{(5-0)^3}{6} - q \frac{(5-0)^3}{6} - \frac{R_B(5-4)^2}{2} + M(5-5) = 60 \text{ кН} \cdot \text{М}^2$$

3. Знайдемо прогини за допомогою універсального рівняння прогинів

$$EIV(z) = EIV_0 + EI\varphi_0 \cdot z \pm \sum M \left(\frac{z-a}{2} \right)^2 \pm \sum P \frac{(z-b)^3}{6} \pm \sum q \frac{(z-c)^4}{24}$$

$$EIV(1) = EIV_0 + EI\varphi(z) - \frac{R_A \cdot (1-0)}{6} + q \frac{(1-0)^4}{24} - q \frac{(1-1)^4}{24} = 286,67 - \frac{70}{6} + \frac{40}{24}$$

=

$$276,67 \text{ кН} \cdot \text{м}^3;$$

$$EIV(2) = EIV_0 + EI\varphi(z) - \frac{R_A \cdot 2^3}{6} + q \frac{(2-0)^4}{24} - q \frac{(2-2)^4}{24} = 286,67 - 93,34 + 26,67 = 220,01 \text{ кН} \cdot \text{м}^3$$

$$EIV(4) = EIV_0 + EI\varphi(z) - \frac{R_A \cdot 4^3}{6} + q \frac{(4-0)^4}{24} - q \frac{(4-2)^4}{24} = 286,67 - 746,67 + 426,67 - 26,67 = -60 \text{ кН} \cdot \text{м}^3;$$

$$EIV(5) = EIV_0 + EI\varphi(z) - \frac{R_A \cdot 5^3}{6} + q \frac{(5-0)^4}{24} - q \frac{(5-2)^4}{24} + M \frac{(5-5)^2}{2} = 286,67 - 1458,34 + 1041,67 - 135 + 0 = -264,96 \text{ кН} \cdot \text{м}^3$$

4. Визначимо, чи забезпечена жорсткість.

Прольот, де прогин максимальний ($EIV(1) = 276,67 \text{ кН} \cdot \text{м}^3$) має довжину 4 м. $\left[\frac{f}{l} \right] = \frac{1}{100} = \frac{f}{4} \Rightarrow [f] = 0,04$

$$f_{\text{розр.}} = \frac{V_{\text{max}}}{EI} = \frac{276,67 \cdot 10^3}{2 \cdot (2 \cdot 10^{11} \cdot 2,03 \cdot 10^{-5})} = 0,034$$

$$[f] > f; \quad 0,04 > 0,03 - \text{Умова жорсткості забезпечена}$$

3.2. Контрольні питання

1. Як знаходиться момент згинання в поперечному перерізі балки?
2. В якому випадку момент згинання рахують позитивним?
3. Як знаходиться поперечна сила в довільному перерізі балки?
4. Правила знаків для поперечної сили.
5. Яка залежність між величинами $M(x)$, $Q(y)$ і $q(x)$?
6. Як знаходять максимальний момент згинання?
7. Що таке чисте згинання?
7. По якій кривій згинається балка в випадку чистого згинання?
8. Як змінюється нормальні напруження по висоті балки?
9. Що називають моментом опору при згинанні?
10. Що називають нейтральним шаром і де він знаходиться?

11. Як правильніше покласти балку прямокутного перерізу при роботі на згинання?
12. Який переріз має більший момент опору при однаковій площі: круглий чи квадратний?
13. В яких площинах виникають дотичні напруження при згинанні? Наведіть формулу Журавського.
14. Як знаходяться головні напруження при згинанні?
15. Які напруження з'являються в балці, якщо площина дії навантаження не проходить через центр згинання?
16. Запишіть загальний вигляд диференційного рівняння зігнутої вісі балки?
17. Як знаходяться сталі інтегрування?
18. Як визначають найбільшу величину прогину?

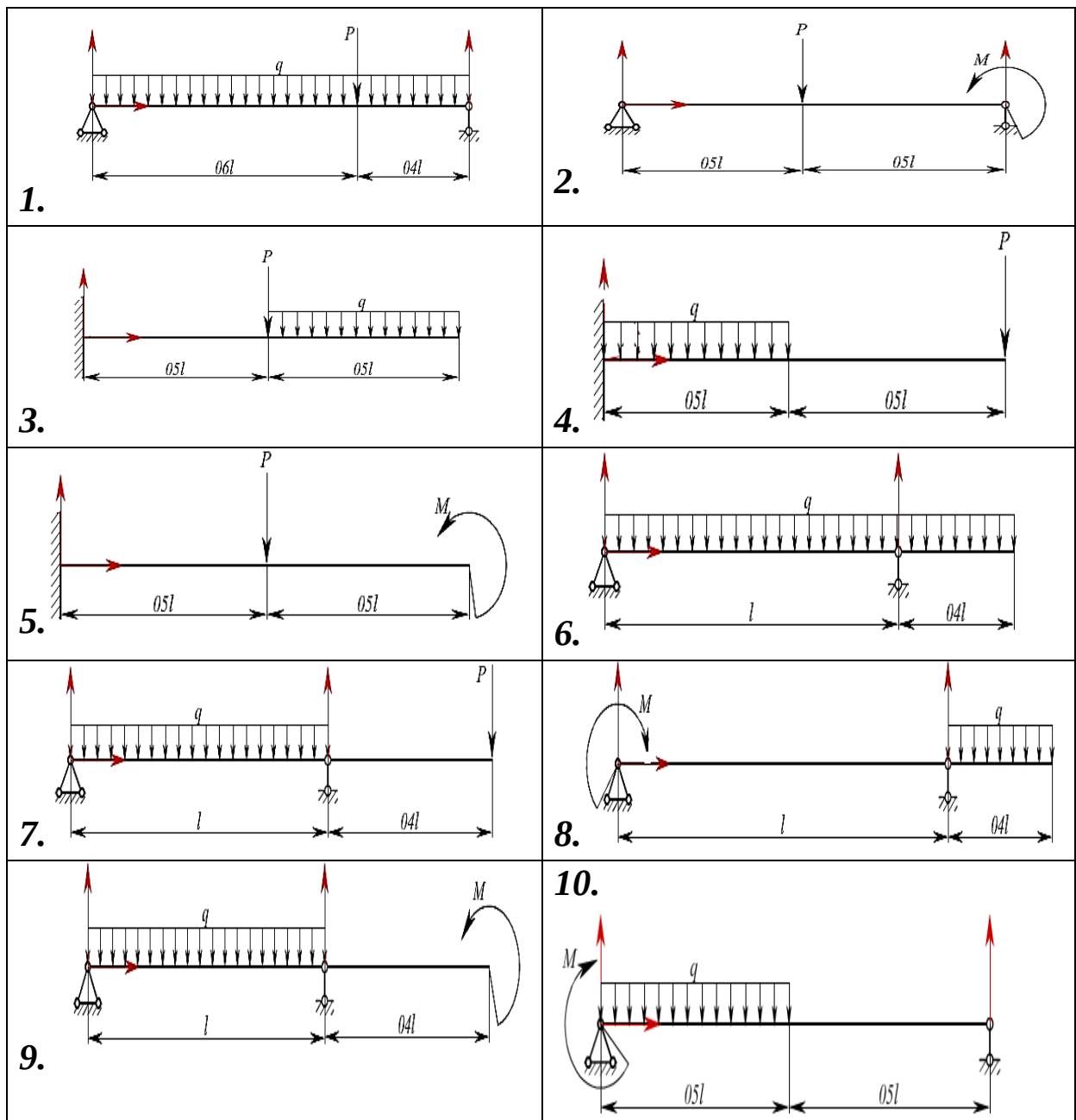
3.3. Завдання для самостійного виконання

Виконати аналіз напруженого стану та повний розрахунок на міцність. Визначити переміщення та провести розрахунок на жорсткість при поперечному згинанні.

Таблиця 3.1

Варіанти завдань для самостійного виконання

№ Вар.	№ Сх.	№ Рядка	Довжина, l (м)	P, МН	Навантаження q, МН/м	M, МН·м	1:(f/l)
1	1	1	3,0	0,010	0,005	0,004	1:500
2	2	2	3,2	0,011	0,006	0,005	1:520
3	3	3	3,4	0,012	0,007	0,006	1:540
4	4	4	3,6	0,013	0,008	0,007	1:560
5	5	5	3,8	0,014	0,009	0,008	1:580
6	6	1	4,0	0,015	0,010	0,009	1:600
7	7	2	4,2	0,016	0,011	0,010	1:620
8	8	3	4,4	0,017	0,012	0,011	1:640
9	9	4	4,6	0,018	0,013	0,012	1:660
10	0	5	4,8	0,019	0,014	0,013	1:680



3.4. Модульне тестування

1. Чистий згин –

А) коли в поперечному перерізі виникає тільки M_x ;

Б) коли в поперечному перерізі виникає M_x і Q_y ;

В) це коли поперечний переріз балки має вертикальну вісь симетрії і силова площина збігається з цією віссю. Деформована вісь балки також лежить у цій площині;

Г) коли силова площина не збігається з головною віссю.

2. Поперечний згин –

А) коли в поперечному перерізі виникає тільки M_x ;

Б) коли в поперечному перерізі виникає M_x і Q_y ;

В) це коли поперечний переріз балки має вертикальну вісь симетрії і силова площина збігається з цією віссю. Деформована вісь балки також лежить у цій площині;

Г) коли силова площина не збігається з головною віссю.

3. Плоский згин –

А) коли в поперечному перерізі виникає тільки M_x ;

Б) коли в поперечному перерізі виникає M_x і Q_y ;

В) це коли поперечний переріз балки має вертикальну вісь симетрії і силова площина збігається з цією віссю. Деформована вісь балки також лежить у цій площині;

Г) коли силова площина не збігається з головною віссю.

4. Косий згин –

А) коли в поперечному перерізі виникає тільки M_x ;

Б) коли в поперечному перерізі виникає M_x і Q_y ;

В) це коли поперечний переріз балки має вертикальну вісь симетрії і силова площина збігається з цією віссю. Деформована вісь балки також лежить у цій площині;

Г) коли силова площина не збігається з головною віссю.

5. Величини поперечної сили Q_y обчислюються за такими робочими правилами:

А) поперечна сила Q_y дорівнює сумі проекцій всіх зовнішніх сил на площину перерізу і обирається із знаком «+», якщо вона повертає відсічену частину відносно перерізу за ходом годинникової стрілки, і навпаки;

Б) поперечна сила Q_y дорівнює сумі проекцій всіх зовнішніх сил на площину перерізу і обирається із знаком «-», якщо вона повертає відсічену частину відносно перерізу за ходом годинникової стрілки, і навпаки;

В) поперечна сила Q_y дорівнює різниці проекцій всіх зовнішніх сил на площину перерізу і обирається із знаком «+», якщо вона повертає відсічену частину відносно перерізу за ходом годинникової стрілки, і навпаки.

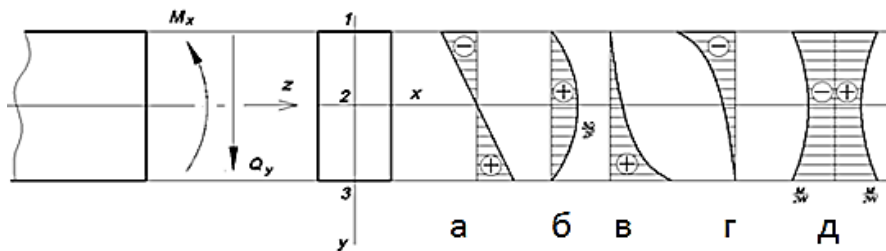
6. Величина згинального моменту обчислюються за такими робочими правилами:

А) згинальний момент M_x дорівнює сумі моментів зовнішніх зусиль відносно центру ваги перерізу і обирається із знаком «+», якщо розтягуються нижні волокна, і навпаки;

Б) згинальний момент M_x дорівнює сумі моментів зовнішніх зусиль відносно центру ваги перерізу і обирається із знаком «-», якщо розтягуються нижні волокна, і навпаки;

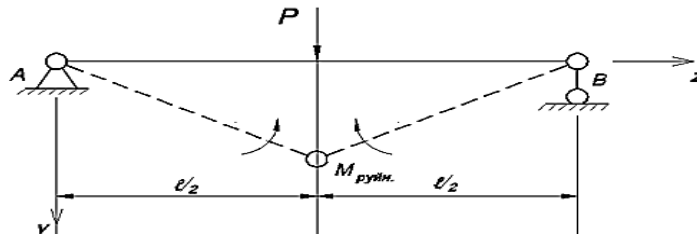
В) згинальний момент M_x дорівнює сумі моментів зовнішніх зусиль відносно центру ваги перерізу і обирається із знаком «+», якщо розтягуються верхні волокна, і навпаки.

7. Для прямокутного поперечного перерізу еюра дотичних напружень має вигляд:

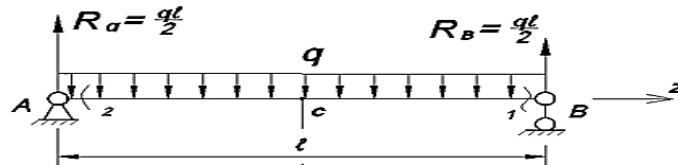


8. Найбільшого значення згинальний момент M_x досягне в точці дії сили:

А) R_a ; Б) R_b ; В) P .

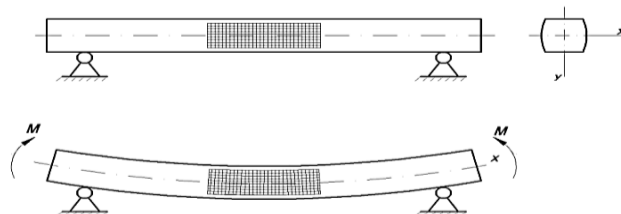


9. Еюра згинального моменту M_x матиме вигляд:



А) параболи; Б) лінійний; В) синусоїди.

10. На рисунку зображений випадок



А) чистого згину; Б) плоского згину; В) поперечного згину; Г) косого згину.

4. Лабораторне устаткування

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.

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 протизагу, яка відхиляється пропорційно до діючого на зразок навантаження.

4.1. Машина типу УММ-5

Машина типу УММ-5, яка використовується в лабораторії «Механіка матеріалів і конструкцій» кафедри загальнотехнічних дисциплін. Випробувальна машина двоколонна, вертикальна, з механічним переміщенням рухомої траверси нижнього затискача і маятниковим силовимірювачем. Дозволяє проводити випробування з максимальним навантаженням 5 тон. Для випробувань на даній машині використовують зразки відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019.

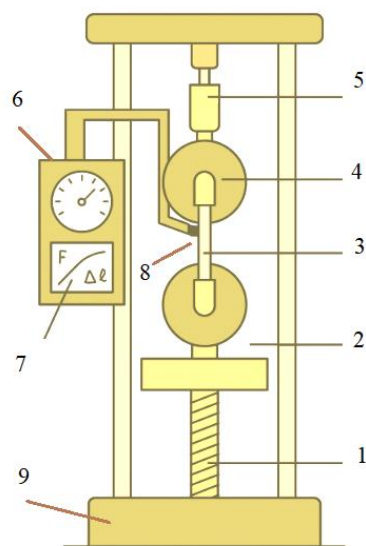


Рисунок 4.1 – Схема універсальної розривної машини УММ-5.
1 - нижня траверса; 2 - нижній затискач; 3 - випробовувальний зразок; 4 - верхній затискач; 5 - важіль маятника; 6 - силовимірювач; 7 - діаграмний апарат; 8 - напрямок розтягування зразка; 9 - чавунна литая станина; 10 - вантажний гвинт.

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 тон. 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.

УММ-5 випробовує матеріали на згин за класичною схемою триточкового або чотириточкового згину. Зразок укладають на опори (дві нижні опори з регульованою відстанню). Між опорами розташовується навантажувальний пуансон (для триточкового згину) або два пуансони (для чотириточкового). Машина починає плавно прикладати навантаження вниз через пуансон, створюючи

згинальний момент у зразку. Датчики машини вимірюють: силу навантаження, прогин зразка, характер руйнування.

На основі цих даних визначають межу міцності на згин, модуль пружності та інші параметри. Універсальні випробувальні машини можуть працювати в режимах розтягу, стиску і згину, бо мають: змінні захвати й оснастку; точне регулювання навантаження; можливість контролювати переміщення та деформацію.

1. Зразок лежить на двох опорах. Відстань між опорами задається залежно від стандарту та розмірів зразка.

2. Пуансон зверху тисне в центр (або два пуансони для чотириточкового згину).

3. УММ-5 прикладає плавно зростаюче навантаження F , поки зразок не зламається або не досягне заданої деформації.

4. Записуються сила, прогин, момент руйнування.

$$\sigma_{зг} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

5. За формулою

визначають міцність на згин (для триточкового згину), де:

L - відстань між опорами; b - ширина зразка; h - висота; F - максимальне навантаження.

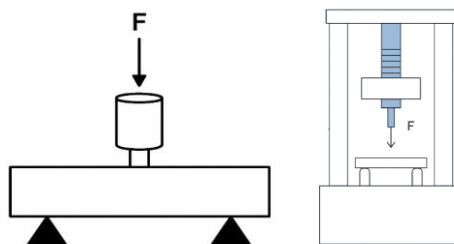


Рисунок 4.2. Розміщення зразка при випробуванні на згин

Отже, якщо УММ-5 укомплектована відповідними затискачами та пристосуваннями для згину також можна проводити дослід на згин. Верхня траверса – рухома частина, через яку прикладається сила згину (F). Зразок – матеріал, який піддають згину. Його укладають на нижні опори (дві чи три, залежно від типу випробування). Нижня траверса/опори – фіксують зразок і задають точку прогину.

Випробування маловуглецевої сталі на розтяг та згин

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

Випробування на одноосьовий статичний розтяг є найбільш поширеним способом механічних випробувань матеріалу, що пояснюється наступними його перевагами: Ø 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: $\sigma = F/A_0$, де F – навантаження, що розтягує, Н; A_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, мм².

Спостерігання 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 ДСТУ 1497-84 (ISO 6892-84) застосовують пропорційні циліндричні зразки діаметром d від 5 мм і більше (рис. 4.3, а,б,в) або плоскі (з листового матеріалу) товщиною a від 0,5 мм і більше (рис. 4.3, 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 4.4 представлено 4 види стандартизованих зразків: Ø круглі з довжиною $l_0 = 15d_0$ - для зразків п'ятнадцятиразової довжини (рис. 2.1, а.); Ø круглі з довжиною $l_0 = 10d_0$ - для зразків десятиразової довжини (рис. 2.1, б.); Ø круглі з довжиною $l_0 = 5d_0$ - для коротких зразків (рис. 4.3, в.); Ø для прямокутних зразків з розмірами $(a \times b)$ (рис. 4.3, г.):

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

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

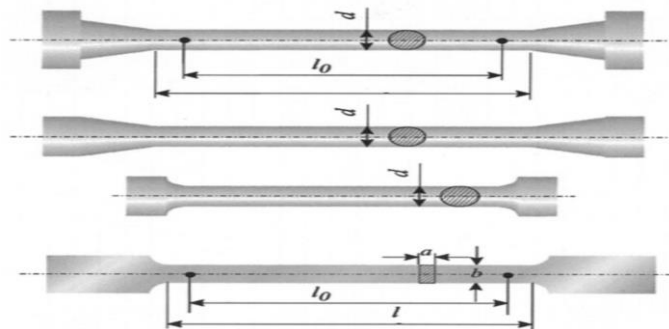


Рисунок 4.4 – Види зразків, що використовують для випробувань на розтяг (величина ℓ на рисунках - це довжина робочої частини зразка).

Найбільш розповсюджені випробування на циліндричних зразках (рис. 4.5, а). Після випробувань зразок видовжується на довжину ℓ_1 і ми отримуємо зруйнований зразок, на якому є наявності звужене місце (рис. 4.5,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.

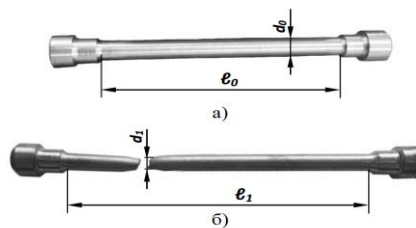


Рисунок 4.5 – Загальний вигляд зразка: а) до випробування, б) після випробування.

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 4.6 представлений циліндричний зразок, який виконано з м'якої сталі.

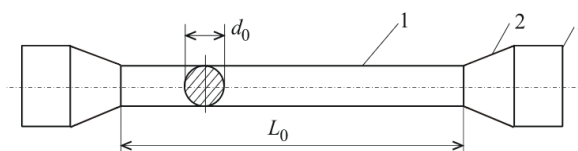


Рисунок 4.6 Циліндричний зразок для випробувань: 1 – робоча частина; 2 – перехідна частина; 3 – виступи для затискачів.

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. 4.7):

а) діаграма розтягу зразка з пластичного матеріалу, що має виражений перехід з пружної області деформування в пружно-пластичну (рис. 4.7, а). На діаграмі цей перехід відображається появою «площинки 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 «площадки 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. 4.7, 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. 4.8, 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).

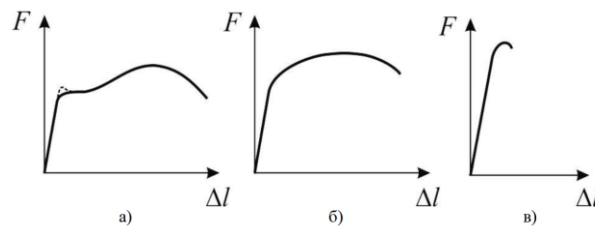


Рисунок. 4.8 – Типи діаграм розтягу.

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 4.9.

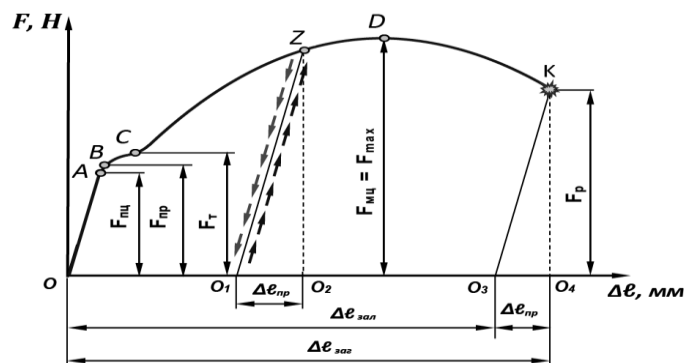


Рисунок 4.9 – Діаграма розтягу м'якої сталі.

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 $\mu F = 1500 \text{ Н/мм}$. Масштаб запасу деформації (в напрямку горизонтальної осі $\Delta \ell$) перед випробуванням приймається рівним $\mu \Delta \ell = 1:2 = 0,5 \text{ мм/мм}$.

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_r в момент розриву називається навантаженням, що відповідає істинному опору розриву σ_r .



Рисунок 4.10 – Зразок в затискачах випробувальної машини:
а) на початку випробувань, б) перед руйнуванням.

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

Випробування сталевих зразків на розтяг.

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.

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.4.1):

Таблиця 4.1 – Данні обміру зразка

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

3. Перевірити готовність машини для випробувань до експерименту, настроїти силовимірник 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 силовимірника 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 4.1.

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_r .

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 - $\Delta \ell$, 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): $F_r = \mu F \cdot y_r$.

Результати розрахунків записати у журнал спостережень (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – 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_t	
4. Максимальне навантаження, що відповідає границі міцності (тимчасовому опору), Н	$F_{мц}$ F_r	
5. Розривне зусилля, що відповідає істинному опору розриву, Н		

Випробування на розтяг маловуглецевої сталі. Основні механічні характеристики міцності та пластичності

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

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 (ДСТУ, ІСО).

Для вивчення основних механічних характеристик міцності існує діаграма напружень (рис.4.11), 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 4.11. 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 4.11) Аш. Основні механічні характеристики міцності Розглянемо істину і умовну діаграми напружень та визначимо основні механічні характеристики міцності.

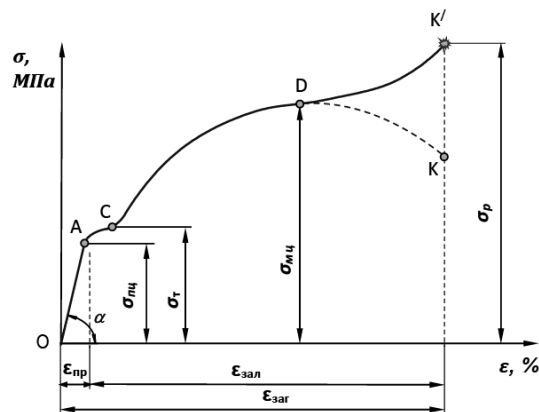


Рисунок 4.11 – Діаграма напружень

Механізм руйнування починається в області шийки з утворення дрібних пустот – пор, витягнутих у подовжньому напрямі (рис. 4.12). 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 тріщини.

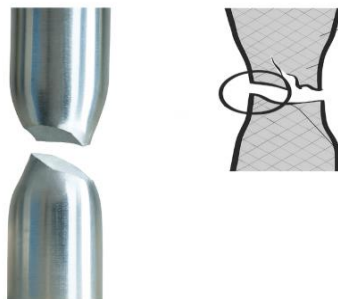


Рисунок 4.12 – Характер руйнування зразка.

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 $\tau_{\max}$.

Оснащення робочого місця

- ✓ сталевий 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

Лабораторна робота проводиться у такій послідовності:

1. Перенести в журнал лабораторних робіт діаграму розтягу зразка, перетворивши її у координатні осі $\sigma - \epsilon$ (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.

Таблиця 4.3 – Розрахунок механічних характеристик міцності

Механічне напруження	Формула	Значення
Границя пропорційності, МПа	$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}$	
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.

Таблиця 4.4 – 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 таким напруженням є границя текучості $\sigma_{\text{т}}$, значення якого беремо з таблиці 4.3.

6. Аналізуючи визначені значення механічних характеристик та використовуючи довідкову літературу 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.

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.

4.2. Машина МУИ-6000

Машина МУИ-6000 призначена для виробництва випробувань при чистому повторно-змінному згині, коли режим зміни напруги у зразку відбувається за симетричним циклом. На рис. 2.8 показано схематичне пристрій машини МУИ-6000. Машина складається з двох вузлів: шпиндельних бабок з приводом та лічильником оборотів; механізму навантаження. Електродвигун з числом оборотів 2800 за хвилину через клинопасову передачу 3 і гнучкий вал 4 обертає зі швидкістю 6000 об/хв шпиндель 5, а отже, і випробуваний зразок 10.

Усередині кожного шпинделя вмонтовані цанги із затискачами 9 і 14, якими кріпляться головки випробуваного зразка. Шпиндельні корпуси 7 спираються на шарикопідшипники 6 і 13, а зусилля навантаження передаються на них через цапфи 8 і 12.

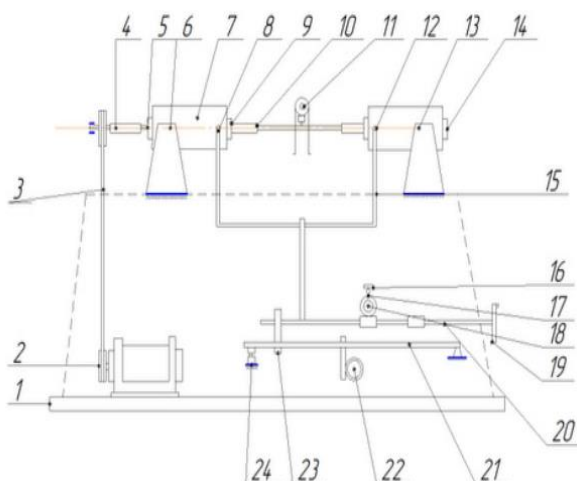


Рисунок 4.13. Машина МУИ-6000

Механізм навантаження складається з важеля 21, шарнірно пов'язаного з сирецькою 15, яка і передає зусилля на цифри. При

обертанні гвинта 20 маховиком 19 вантаж 23 переміщається по важелю, одночасно величина підготовленого навантаження (в межах 100-200 Н) фіксується шкалою 18. Навантаження понад 200 Н можна створити, відкривши корпус і поклавши на підвіску важеля 20 Н. Для передачі навантаження на цапфи при працюючій машині слід повільно обертати проти годинникової стрілки маховик 22 до збігу покажчика 17 ризиком 16 на корпусі машини. В кінці випробування при руйнуванні зразка важіль опускається на відключачем двигуна 24 і відключає його. Машина має пакетний вимикач, кнопки «пуск» і «стоп», лічильник оборотів з кнопкою скидання показань і прозорий кожух над зразком (на схемі не показано).

4.3. Машини з гідравлічним приводом П-125

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. Силівимірювач цієї машини являє собою комбінацію гідравлічного силівимірювального 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 4.14. Універсальна випробувальна машина складається з трьох частин: робочої частини (гідравлічний прес) I, силівимірювального пристрою II та силового агрегата (насосної станції) III з регулятором і пусковою апаратурою. На чавунній основі машини I встановлені чотири колони 2, що з'єднані зверху нерухомою поперечиною 7, на якій міститься робочий циліндр 8 із поршнем 9, що при підкачуванні мастила піднімає траверсу 6.

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.

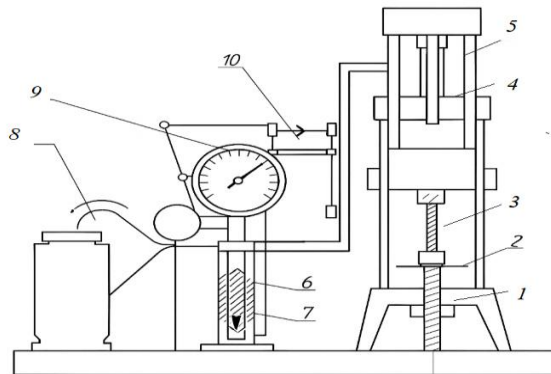


Рисунок 4.14. – Схема універсальної машини УИМ-50



Рисунок 4.15. Прес П-125

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 переміщуючись, 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.

Випробування на стиск сталі, чавуну та дерева

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

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 ДСТУ 25.503-97.

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: Ø в процесі випробування пластичні матеріали можуть стискатись, не руйнуючись, а крихкі – руйнуються; Ø характеристики міцності і пластичності циліндричного зразка при випробуваннях на стиск суттєво залежать від відношення висоти зразка до його діаметра; Ø 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 ДСТУ 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.4.16). Стискаюче навантаження прикладають уздовж поздовжньої осі у центрі ваги перерізу.

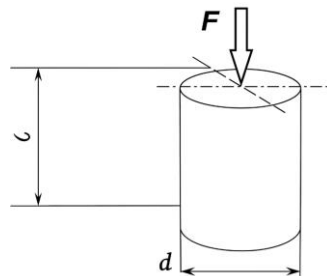


Рисунок 4.15 – Стальний та чавунний зразки для випробувань на стиск.

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. 4.16). Залежно від розташування волокон їх випробують уздовж волокон та уперек.

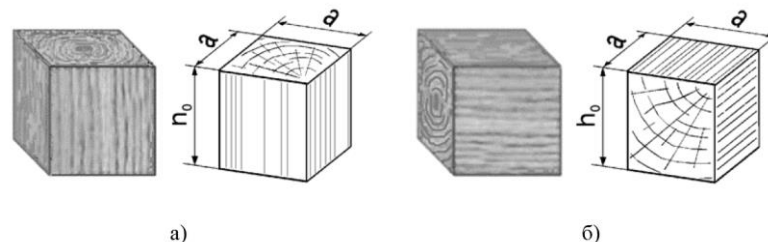


Рисунок 4.16 – Дерев'яні зразки для випробувань на стиск: а) уздовж волокон, б) уперек волокон.

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. 4.17) таким чином, щоб навантаження прикладалось строго уздовж осі зразка. Нижня траверса переміщується тільки уверх, утворюючи стискаюче зусилля.

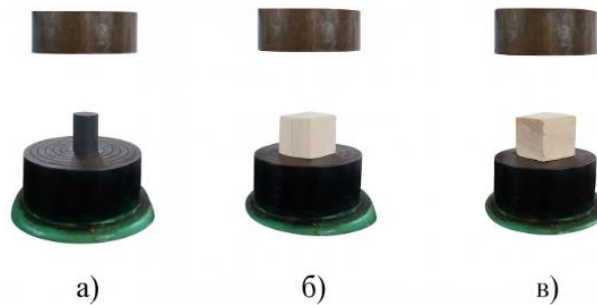


Рисунок 4.17 – Установка зразків: а) сталевий та чавунний зразки; б) дерево уздовж волокон, в) дерево поперек волокон.

Випробування пластичного матеріалу. Сталь.

На початку завантаження до деякого навантаження $F_{пц}$ (рис. 4.18, 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 закругляється і переходить у ділянку з найбільшим нахилом до горизонталі – ділянку текучості АВ. При стиску «площина текучості» не виходить настільки яскраво вираженою, як при розтягу.

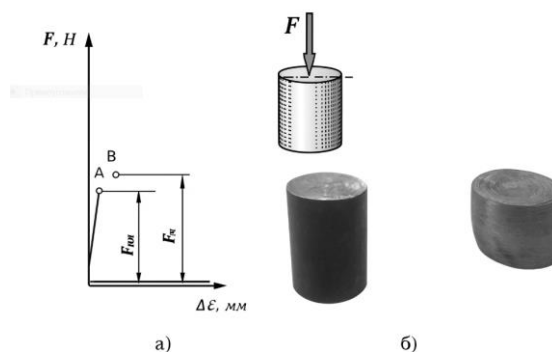


Рисунок 4.18 – Діаграма стиску сталі (а) і зразок із неї в процесі деформування (б).

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 $\sigma_{пц}$ та границя текучості σ_t . Навантаження, що відповідає границі пропорційності $F_{пц}$ та границі текучості F_t визначаються за тією ж методикою, що описана у попередніх лабораторних роботах.

За границею пропорційності $\sigma_{пц}$ спостерігається незначне збільшення деформації, тобто, матеріал «тече», але без явно вираженої площини текучості. Зразок приймає бочкоподібну форму (рис. 4.18,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 $\sigma_{\text{тмц}}$. 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. 4.19, а). Під час стиску чавунного зразка практично з початку навантаження і до руйнування спостерігається нелінійна залежність між навантаженням і деформацією (рис. 4.13, 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.

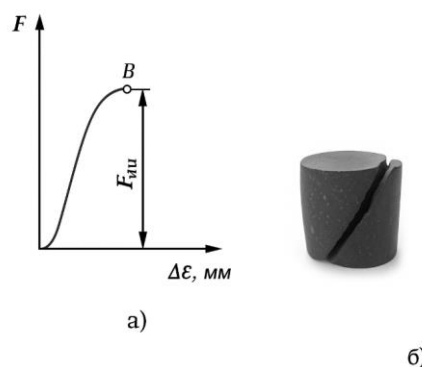


Рисунок 4.19 – Діаграма стиску чавуну (а) і зразок із нього в процесі деформування (б).

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. 4.19, 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:

$$\tau_{\text{мц}} = \frac{F_{\text{мц}}}{A_0}.$$

Зразок, укорочуючись (рис. 4.19, 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. 4.20, а; 4.21, а) і упоперек (рис. 4.20, б; 4.21, б) волокон. Отримані діаграми стиску різко відрізняються одна від одної. Діаграма $F-\Delta l$ стиску зразка уздовж волокон, 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 (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 $\sigma_{\text{мц}}$. У звичайних умовах руйнування відбувається шляхом зсуву однієї частини зразка відносно другої. Під час стиску зразка поперек волокон діаграма $F-\Delta l$ має інший вигляд (рис. 4.20, 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.

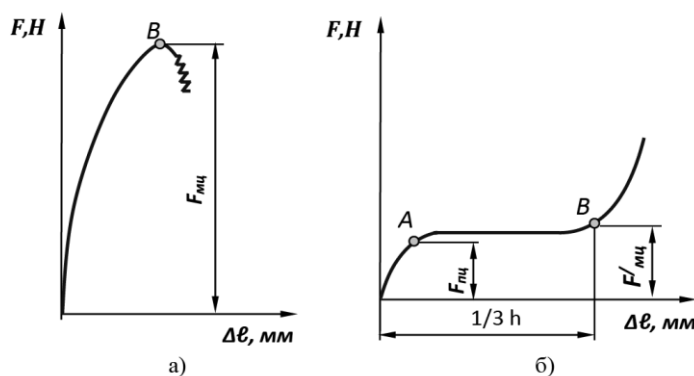


Рисунок 4.20 – Діаграми стиску дерева уздовж волокон (а) і поперек волокон (б).

Момент втрати несучої властивості зафіксувати немає можливості. Тому за руйнівну силу приймають умовно таку силу $F_{\text{мц}}$, при дії якої деформація (ущільнення) зразка по висоті досягає $1/3$ початкового значення, тобто $\Delta \ell = 1/3 h_0$ (рис. 4.21, б).

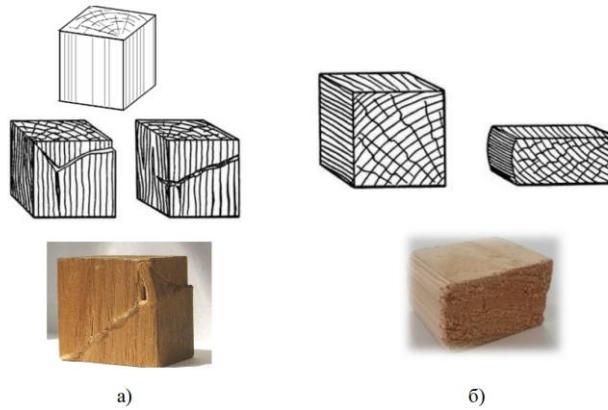


Рисунок 4.21 – Зразок із дерева після руйнування уздовж волокон (а) і поперек волокон (б).

Відношення $F_{\text{мц}}$ до A_0 називають умовною границею міцності $\sigma_{\text{мц}}$ дерева при стиску поперек волокон:

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

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:

$$K = \frac{\sigma_{\text{мц}}}{\sigma_{\text{мц}}'}.$$

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 $\sigma_{мц}$. В такому випадку отримаємо:

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

де $\sigma_{мц}$ – границя міцності, яка є небезпечним напруженням при випробуванні крихких матеріалів, МПа; $n_{мц}$ – коефіцієнт запасу міцності відносно границі міцності: $n_{мц} = 3,0 \dots 5,0$.

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;
стальний 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 4.5.

Таблиця 4.5 – 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 $\mu F = 1500 \text{ Н/мм}$. Чавун випробують при максимальному навантаженні $F_{\max} = 500 \text{ кН}$, масштаб навантаження становить $\mu F = 3000 \text{ Н/мм}$. Дерево поперек волокон випробують при максимальному навантаженні $F_{\max} = 100 \text{ кН}$, масштаб навантаження становить $\mu F = 600 \text{ Н/мм}$.

Масштаб запису деформації (в напрямку горизонтальної осі Δl) перед випробуванням приймається рівним $\mu \Delta l = 1:2 = 0,5$ град/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 $F_{\text{пц}}$ і границі текучості $F_{\text{т}}$, для чавунних і дерев'яних навантаження, що відповідає границі міцності $F_{\text{мц}}$.

Таблиця 4.6 – 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	$F_{\text{т}}$		
6. Границя текучості, МПа	$\sigma_{\text{т}} =$		

Таблиця 4.7 – Результати випробувань дерева уздовж і поперек волокон

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

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 $\sigma_{мц}$, для дерева поперек волокон – умовна границя міцності $\sigma_{м/ц}$, яку визначають при стиску зразка на 1/3 висоти ($13 - h_0$). 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, що відповідає умовному навантаженню по границі міцності $F_{м/ц}$.

10. Розрахувати допустимі напруження для досліджуваних матеріалів.

11. Встановити і описати характер руйнування зразків.

4.4. Машина КМ-501

Для випробування зразків на кручення використовують випробувальну машину з механічним навантаженням, на який випробовують стандартні зразки з різних матеріалів. 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 2.22. Машина має станину, на якій змонтовані

механізми навантаження і силовимірювання. КМ-50 належить до машин з важільним маятниковим силовимірювачем.



Рисунок 2.22 – Загальний вигляд випробувальної машини КМ-501

Принципово-кінематична схема машини наведена на рисунку 2.23. На станині машини, що складається з основи 15, двох колон 14 і траверси 13, змонтовані усі основні вузли: механізм навантаження, силовимірювальний 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.

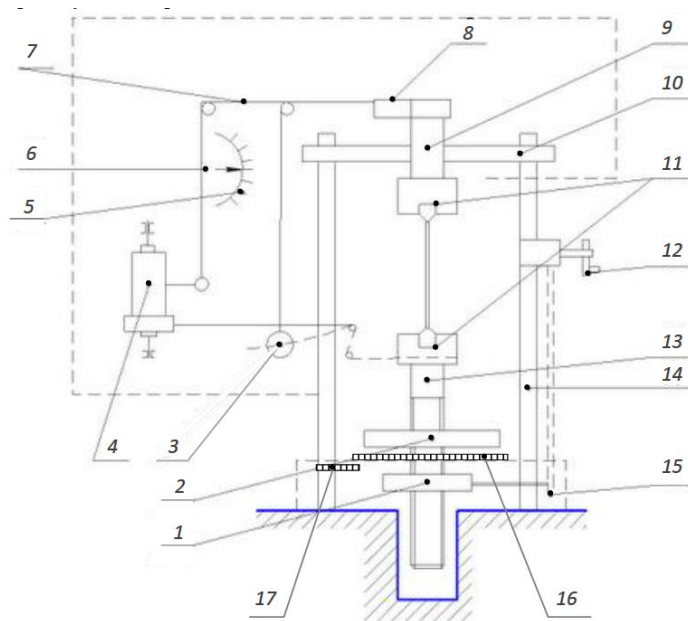


Рисунок 2.23 – Принципово-кінематична схема випробувальної машини КМ-50.

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. Силівимірювальний 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 3600 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 силовимірювання. 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 переміщує 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 закручування = 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).

Випробування на кручення сталі та чавуну

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

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:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p},$$

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:

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

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° 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 ДСТУ 3565-80. Для випробування, застосовують циліндричні зразки з діаметром в робочій частині $d=10$ мм і з розрахунковою довжиною $l_0 = 100$ або 50мм, з головками на кінцях для закріплення в

затискачах випробувальної машини. Дослідження проводять для сталюого і чавунного зразків однакової форми і розмірів.

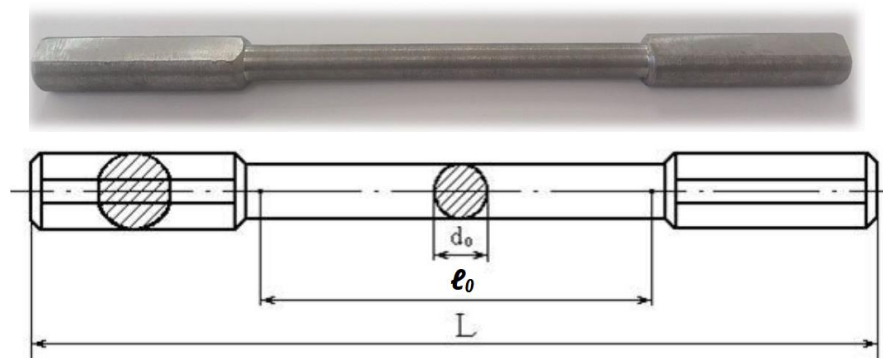


Рисунок 4.24 – Зразок для випробувань на кручення: а) загальний вигляд, б) ескіз зразка.

Розрахунковою довжиною вважають довжину циліндричної частини зразка l_0 , на якій проводять вимірювання кутової деформації, 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. Так, сталевий зразок руйнується від зсуву по поперечному перерізу, чавунний – відривом по гвинтовій поверхні з кутом нахилу 45° до осі зразка.

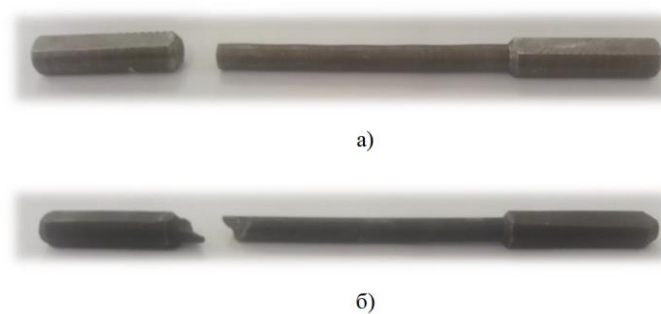


Рисунок 4.25 – Зруйнований зразок: а) сталюий, б) чавунний.

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 500Н·м. Машина має механічний привод. Шкала силовимірювача може налаштовуватись на три види навантаження 100, 200 і 500Н·м. Для проведення досліджень сталюого та чавунного зразків машину налаштовують на максимальний крутильний момент 200Н·м.

Масштаб крутильного моменту (в напрямку вертикальної осі М) при проведенні випробувань становить $\mu M = 200/150 = 4/3$ Н/мм (де 150мм – це довжина барабана діаграмного апарата). Масштаб запису деформації (в напрямку горизонтальної осі ϕ) перед випробуванням приймається рівним $\mu \phi = 1:2 = 0,5$ град/мм.

На зразку проводять крейдою пряму лінію, і встановлюють його в затискачі крутильної машини (рис. 4.26, а). В процесі випробувань пряма лінія перетворюється в спіральну і, залежно від пластичних властивостей матеріалу, має відповідну кількість витків. На рисунку 4.26, 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.

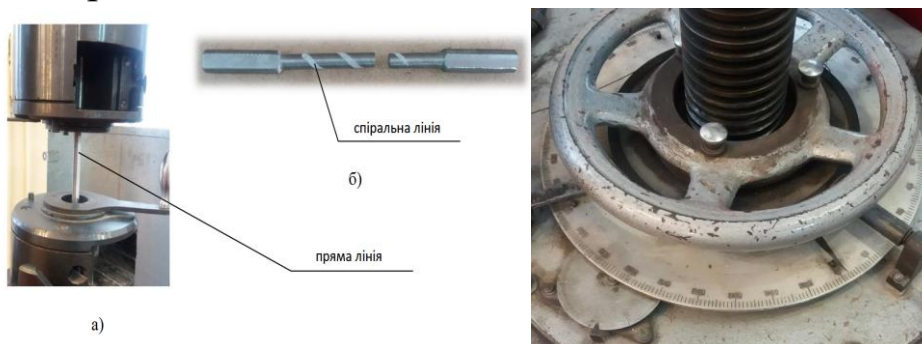


Рисунок 4.26 – Стальний зразок: а) підготовка та встановлення зразка у випробувальну машину, б) спіральна крейдова лінія на зразку після випробування.

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

$$\varphi = \frac{M_{кр} \cdot \ell}{G \cdot J_p},$$

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 – 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:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{J_p} \cdot \rho,$$

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:

$$\Theta = \frac{\varphi}{\ell_0}, \text{ град/м}$$

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' .

Цей поворот властивий саме випробувальній машині КМ-50 і враховує люфт затискача в момент увімкнення установки. Розглянемо діаграму кручення м'якої сталі (рис. 4.27). Вона не має виступів або переходів, які характерні діаграмі розтягу, а складається з плавної кривої з переходом у прямолінійну ділянку.

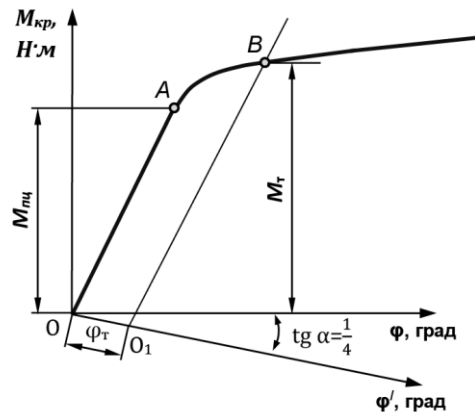


Рисунок 4.27– Діаграма кручення м'якої сталі.

На початку навантаження (рис. 4.27) діаграма кручення пластичної сталі так само, як і діаграма розтягу, являє собою похилу пряму OA , це свідчить про наявність пружних властивостей матеріалу. Навантаження до точки A – це крутильний момент, що відповідає границі пропорційності $M_{пц}$.

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

$$\tau_{пц} = \frac{M_{пц}}{W_p}.$$

Після точки A діаграма закругляється і переходить у ділянку AB – ділянку текучості. Але межа цієї ділянки на діаграмі ні як не виражена. Для знаходження границі текучості необхідно знайти положення точки B , 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 OA , до перехрестя з графіком залежності M - φ в точці B .

Ордината точки B 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:

$$\tau_T = \frac{M_T}{W_p}.$$

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 . У момент руйнування машина автоматично вимикається. Значення крутильного моменту, при якому відбувається руйнування фіксується нерухомою стрілкою на силовимірювачу. Значення повного кута закручування знімаємо з лімбу, що розташований в нижній частині випробувальної машини.

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

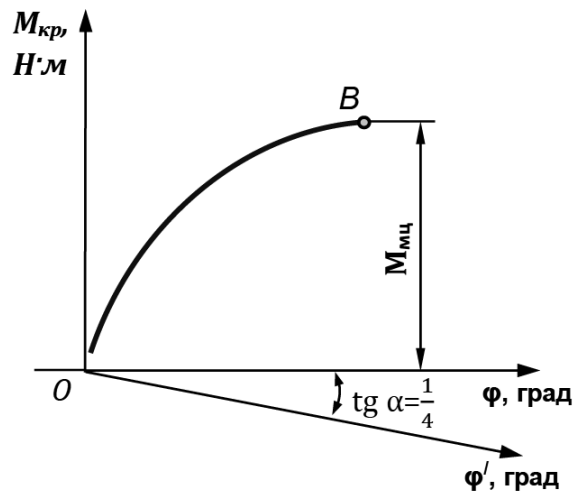


Рисунок 4.28 – Діаграма кручення чавуну.

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.

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.

Таблиця 4.8 – 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 утворюючий 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 4. 9, 4.10.

Таблиця 4.9 – 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 j , град		

Таблиця 4.10 – Результати розрахунків основних механічних характеристик сталі та чавуну.

Величини	Сталь	Чавун
Характеристики міцності		
Границя пропорційності $t_{пц}$, Н/мм ²		
Границя текучості t_t , Н/мм ²		
Границя міцності $b_{мц}$, Н/мм ²		
Характеристики пластичності		
Відносний повний кут закручування q , град/мм		

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

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

Визначаємо дотичні напруження в центрі перерізу (в полюсі) та на поверхні вала. Зображуємо епюру (рис. 4.29).

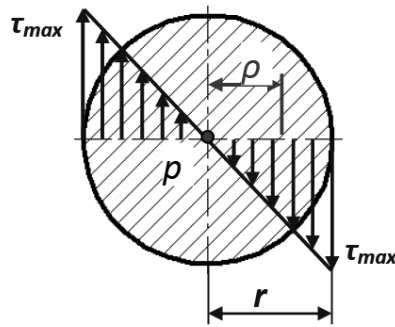


Рисунок 4.29 – Епюра розподілу дотичних напружень.

4.5. Машини для випробувань на удар

При виборі матеріалу для деталей, або елементів конструкцій, які піддаються динамічним впливам, керуються так званою ударної 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 4.30 наведено схему та загальний вид копра.

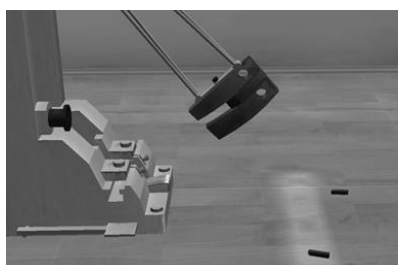
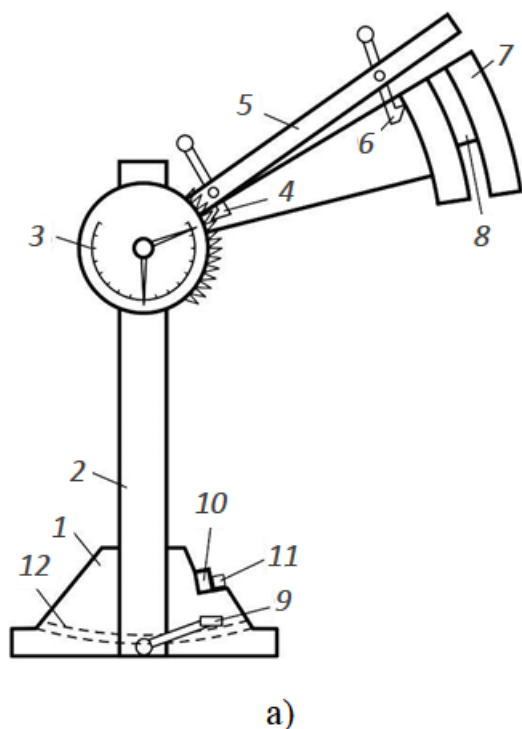


Рисунок 4.30 – Маятниковий копер МК-30: а) схема копра, б) зовнішній вигляд копра.

На масивній основі 1 (рис. 4.30, 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 маятник, 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). 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.

Визначення ударної в'язкості сталі при ударному згині та розтягу

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

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 А вагою Q , деформацією якого можна зневажати, падаючи з деякої висоти h , ударяє по іншому тілу В, яке опирається на пружну систему С. 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, ДСТУ 9454-78 стандартизує методи визначення ударної в'язкості, форму й розміри зразків, надрізів (рис. 4.31), 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.

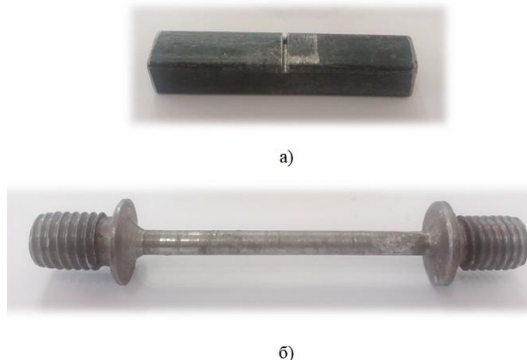


Рисунок 4.31 – Зразки для випробувань на ударну в'язкість: а) при ударному згині, б) при ударному розтягу.

Ударний згин зразка. Найбільш поширеним видом ударних випробувань є випробування на ударний згин зразка з надрізом, загальний вигляд якого зображено на рисунку 4.31, а. На рисунку 4.32 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_n визначається як відношення роботи A , необхідної для руйнування ударом спеціального зразка, до площі

поперечного перерізу в місці надрізу:
$$a_n = \frac{A}{S},$$
 де a_n – питома

ударна в'язкість, Дж/м²; A – робота, витрачена на руйнування (злом) зразка при ударі, Дж; S – площа перерізу зразка в місці надрізу (рис. 4.32), м².

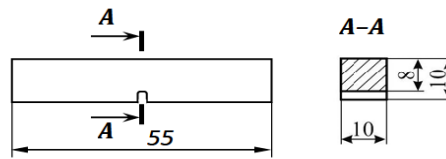


Рисунок 4.32 – Ескіз зразка для випробувань на ударну в'язкість при згині.

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. 4.33, б).

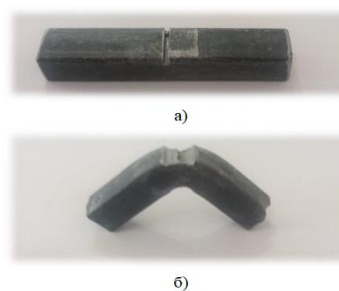


Рисунок 4.33 – Зразок при випробуванні на ударний згин: а) загальний вигляд, б) зруйнований зразок.

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

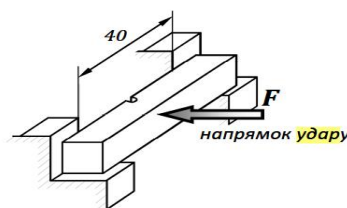
деформацію. А істинний опір розриву не залежить від цих чинників і, при досить інтенсивній дії останніх, може виявитися нижче опору пластичної деформації (границі текучості). Завдяки цьому, на появу крихкості впливають: а) температура зразка, при зниженні якої підвищується границя текучості, збільшуючи внутрішнє 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. 4.34, а) і піддають ударній дії масивним маятником, що падає з певної висоти. Ескіз установки зразка наведено на рисунку 2.30, б.



а)



б)

Рисунок 4.34 – 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. 4.35), на кінцях якого нарізана різьба, довжиною ℓ_2 .

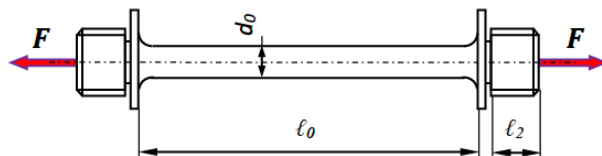


Рисунок 4.35 – Ескіз зразка для випробувань на ударний розтяг.

Один кінець зразка вкручують в спеціальне пристосування в молоті маятника, а на другий накручують «тарілку» (рис. 4.36).



Рисунок 4.36 – 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. 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:

$$a_n = \frac{A}{V},$$

де a_n – питома ударна в'язкість, Дж/м³; A – робота, витрачена на руйнування (розтяг) зразка при ударі, Дж; V – об'єм матеріалу зразка, м³.

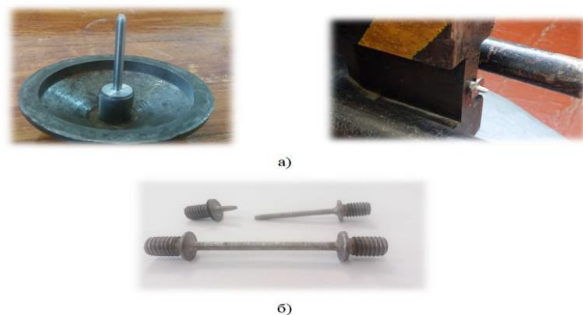


Рисунок 4.37 – Руйнування зразка при ударному розриві: а) зруйнований зразок (частина зразка залишилась у «тарілці», а частина – у маятнику), б) загальний вигляд зразка до та після руйнування.

Роботу руйнування визначають на спеціальному ударному копрі, визначаючи кут підйому маятника після удару. 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;

калькулятор, олівець, лінійка; журнал лабораторних робіт.

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 $\pm 0,5 \text{ мм}$, а надріз знаходився в одній площині з вістрям ножа маятника.

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 4.14.

Таблиця 4.14 – Журнал спостережень при ударному згині.

Потенційна енергія маятника до руйнування зразка (робота)	Потенційна енергія маятника після руйнування зразка (робота)	Робота руйнування A , $H \times m$	Питома ударна в'язкість a_n , $H \times m / cm^2$
$A_0 =$	$A_1 =$	$A = A_0 - A_1$	$a_n = \frac{A}{S}$

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 фіксуючої «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. Результати випробувань занести у таблицю 4.15

Таблиця 4.15 – 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 а _н Н×м/см ³
α ₀ =	α ₁ =		$a_n = \frac{A}{V}$

13. Під час проведення випробувань висувають наступні вимоги: при вирізання 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.

4.6. Прилади для вимірювання абсолютних та відносних 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.

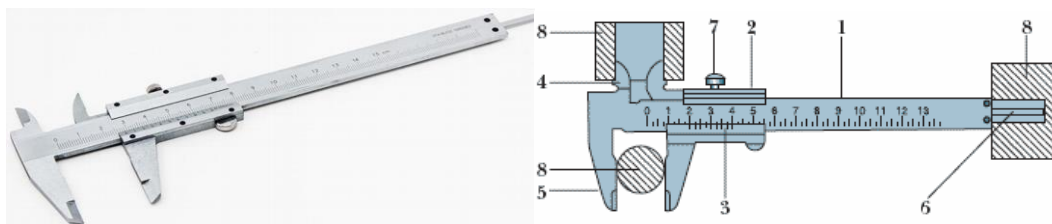


Рисунок 4.38 – Штангенциркуль: а) загальний вигляд, б) схема приладу.

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 губках 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.

Прилади, призначені для вимірювання відносних лінійних деформацій, називаються тензометрами. У лабораторних дослідженнях можуть використовуватися тензометри: механічні, оптичні, електричні або іншої конструкції. Важільно-стрілочний механічний тензометр Гугенбергера призначений для вимірювання малих лінійних деформацій, як правило, на відкритих поверхнях деталей з вільним доступом при статичному навантаженні. Загальний вид тензометра наведений на рисунку 4.39.

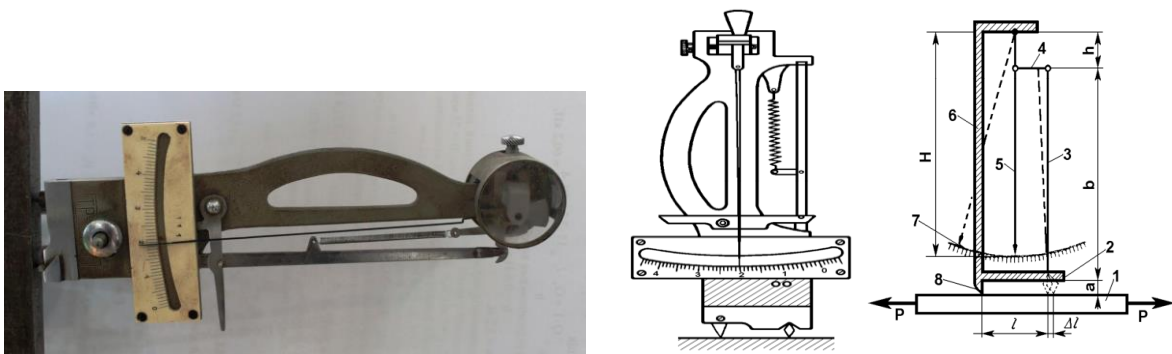


Рисунок 4.39 – Загальний вигляд важільного тензометра.

Кінематична схема тензометра наведена на рисунку 1.14. Тензометр 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 .

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. 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:

$\Delta l = (C1 - C0) \cdot KA$, де $C0$ – нульовий відлік за шкалою тензометра; $C1$ – відлік за шкалою після деформації зразка; KA – 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.

Література

1. Архіпова Т. Ф. Механіка матеріалів та конструкцій : Лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2024. 57 с.
2. Бабенко Д. В., Доценко Н. А., Горбенко О. А. Механіка матеріалів і конструкцій. Частина 1: практикум для навчання на основі інтерактивного графічно-цифрового контенту : навчальний посібник. Миколаїв : МНАУ, 2021. 176 с. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/10563>
3. Бондаренко Л.Ю., Вершков О.О., Антонова Г.О. Лабораторний практикум з механіки матеріалів і конструкцій : навч. посіб. Мелітополь : ТДАТУ, 2017. 183с.
4. Доценко Н.А. Робоча програма навчальної дисципліни «Механіка матеріалів і конструкцій» освітньо-професійна програма для здобувачів вищої освіти першого рівня (2 курс) денної форми здобуття освіти на 2024-2025 навчальний рік. Миколаїв : МНАУ, 2024. 37 с.
5. Курс «Механіка матеріалів і конструкцій». Платформа дистанційного навчання MOODLE МНАУ. URL: <https://moodle.mnau.edu.ua/course/view.php?id=355>
6. Литвинов О. І., Василюк В. І., Федорина Т. П. Механіка матеріалів і конструкцій : методичний посібник. Ніжин : НДУ ім. Гоголя, 2020. 180 с.
7. Механіка матеріалів і конструкцій : методичні рекомендації для виконання лабораторних робіт здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПІ «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія» денної та заочної форми здобуття вищої освіти / уклад. : Н. А. Доценко, Д. В. Бабенко. Миколаїв : МНАУ, 2024. 44 с. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/19253>
8. Механіка матеріалів і конструкцій. Частина 1. Просте навантаження : навчальний посібник / А. Є. Бабенко та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 203 с. URL:

<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/319cad55-3d27-48f5-9244-34fc1f9477d8/content>

9. Прикладна механіка : навчальний посібник для здобувачів першого «бакалаврського» рівня вищої освіти ОПП «Біотехнології та біоінженерія» спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» денної форми здобуття вищої освіти / Г. О. Іванов, В. С. Шебанін, Д. В. Бабенко та ін. Миколаїв : МНАУ, 2024. 316 с.
<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/19190>

10. Прикладна механіка. Практикум : навчальний посібник для здобувачів першого «бакалаврського» рівня вищої освіти ОПП «Біотехнології та біоінженерія» спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» денної форми здобуття вищої освіти / Г. О. Іванов, В. С. Шебанін, Д. В. Бабенко та ін. Миколаїв : МНАУ, 2024. 236 с.
<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/19187>

11. Babenko, D., Dotsenko, N., & Gorbenko, O. (2024). Study of structural and kinematic characteristics of an energy-efficient oil press. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 28(3), 41-54.
<https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/2.2024.41>

12. Babenko, D., Dotsenko, N., & Gorbenko, O. (2025). Justification of the design parameters of improved equipment for tomato processing. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 29(3), 9-22.
<https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/3.2025.09>

13. Babenko, D., Dotsenko, N., & Gorbenko, O. (2025). Justification of the design parameters of improved equipment for tomato processing. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 29(3), 9-22.
<https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/3.2025.09>

14. Babenko, D., Dotsenko, N., Batsurosvka, I., & Gorbenko, O. (2022). Determination of the parameters of the use of water-lifting equipment in the conditions of livestock farms. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 26(3), 32-46. [https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26\(3\)-3](https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26(3)-3)

15. Babenko, D., Dotsenko, N., Gorbenko, O., & Batsurosvka, I. (2023). Study of the nature of the movement of the crushed mass on the surface of the sieves of the vegetable and melon seed separator.

Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 27(4), 18-35.
<https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/4.2023.18>

16. Babenko, D., Dotsenko, N., Gorbenko, O., & Kim, N. (2021). Justification of the introduction of a seed separator for vegetable and tomato crops as part of a technological line. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 25(2), 80-87. [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-2\(110\)-10](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-2(110)-10)

17. Babenko, D., Gorbenko, O., Dotsenko, N., & Kim, N. (2018). Theoretical aspects of oil separation process by pressing. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 22(3), 94-98. DOI: 10.31521/2313-092X/2018-3(99)-16

18. Babenko, D., Gorbenko, O., Dotsenko, N., & Kim, N. (2020). Optimization of structural and kinematic parameters of separator of vegetable and melon crops. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 24(3), 105-112. DOI: 10.31521/2313-092X/2020-3(107)-13

19. Shebanin, V., Atamanyuk, I., Gorbenko, O., & Dotsenko, N. (2020). Determining the optimal parameters of machines for processing the seed mass of vegetable and melon crops. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 24(2), 95-103. DOI: 10.31521/2313-092X/2020-2(106)-11

Навчальне видання

**МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ.
Модуль "Основні види деформацій: згинання балок"**

Методичні рекомендації

Укладачі: **Доценко** Наталія Андріївна
Бабенко Дмитро Володимирович

Редактор: Н. А. Доценко

Комп'ютерний набір: Н. А. Доценко

Дизайн і верстка: Н. А. Доценко

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 6,5

Тираж 20 прим. Зам. №_

Надруковано у видавничому відділі

Миколаївського національного аграрного університету.

54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК№4490 від 20.02.2013р.