



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ  
З ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ ТА  
БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ**

*Навчальний посібник*

**Друге видання**

**Харків 2021**

**УДК 539.4 (076.5)**

**Л 125**

*Рекомендовано вченою радою Українського державного  
університету залізничного транспорту як навчальний посібник  
(витяг з протоколу № 13 від 24 грудня 2020 р.)*

**Рецензенти:**

д-р техн. наук, професор В. П. Кожушко (ХНАДУ),  
д-р техн. наук, професор В. Б. Гриньов (ХНУБА)

**Авторський колектив:**

Г. Л. Ватуля, Є. І. Галагуля,  
І. В. Калашніков, Д. Г. Петренко

**Л 125** Лабораторний практикум з опору матеріалів та  
будівельної механіки: Навч. посібник / Г. Л. Ватуля,  
Є. І. Галагуля, І. В. Калашніков та ін. – Харків: УкрДУЗТ,  
2021. – 2-ге вид. – 231 с., рис. 82, табл. 1.

ISBN

Наведено відомості про матеріали, випробувальні машини, системи вимірів. Дано опис 30 лабораторних робіт. У кожній роботі наведено питання до самоперевірки, бланк випробувань. Лабораторні роботи включають вивчення властивостей матеріалів і конструкцій. Також подано шість робіт з будівельної механіки, які присвячені дослідженню напружено-деформованого стану ферми, арки, а також перевірки фундаментальних теорем.

УДК 539.4 (076.5)

ISBN

©Український державний університет  
залізничного транспорту, 2021

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ ПРО МАТЕРІАЛИ, ВИПРОБУВАЛЬНІ МАШИНИ, СИСТЕМИ ВИМІРЮВАНЬ .....	11
1.1. Короткі відомості про матеріали.....	11
1.2. Випробувальні машини, прилади та установки.....	15
1.2.1. Випробувальні машини.....	15
1.2.2. Прилади для визначення твердості матеріалів .....	24
1.2.3. Установки.....	27
1.2.4. Вимірювання переміщень.....	32
1.3. Вимірювання зусиль.....	36
1.4. Вимірювання деформацій.....	40
2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ.....	45
2.1. Випробування сталі на розтягання з визначенням основних механічних характеристик.....	45
2.1.1. Короткі теоретичні відомості.....	45
2.1.2. Послідовність проведення дослідів .....	53
2.2. Визначення модуля пружності сталі при розтяганні.....	54
2.2.1. Короткі теоретичні відомості.....	54
2.2.2. Послідовність проведення дослідів .....	56
2.3. Визначення коефіцієнта поперечної деформації для сталі.....	57
2.3.1. Короткі теоретичні відомості.....	57
2.3.2. Послідовність проведення дослідів .....	59
2.4. Випробування сталі, чавуну і дерева на стискання з визначенням основних механічних характеристик.....	60
2.4.1. Короткі теоретичні відомості.....	60
2.4.2. Лабораторне устаткування та прилади.....	65
2.4.3. Послідовність проведення дослідів .....	65
2.5. Випробування сталі на зріз і дерева на сколювання та перерізування.....	67
2.5.1. Короткі теоретичні відомості.....	67
2.5.2. Послідовність проведення дослідів .....	68
2.6. Випробування зварних з'єднань.....	69
2.6.1. Короткі теоретичні відомості.....	70
2.6.2. Послідовність проведення дослідів .....	71
2.7. Визначення твердості різних матеріалів методом вдавлювання.....	72

2.7.1. Короткі теоретичні відомості.....	72
2.7.2. Послідовність проведення дослідів .....	76
2.8. Випробування на вигин дерев'яних балок – суцільної і на шпонках.....	77
2.8.1. Короткі теоретичні відомості.....	77
2.8.2. Послідовність проведення дослідів .....	80
2.9. Дослідження деформацій і розподілу нормальних напружень у двотавровій балці в зоні чистого згину .....	81
2.9.1. Короткі теоретичні відомості.....	81
2.9.2. Послідовність проведення дослідів .....	83
2.10. Дослідження деформацій і розподілу нормальних напружень у балці прямокутного перерізу при поперечному згині .....	84
2.10.1. Короткі теоретичні відомості.....	84
2.10.2. Послідовність проведення дослідів .....	86
2.11. Визначення прогинів статично невизначної балки.....	87
2.11.1. Короткі теоретичні відомості.....	87
2.11.2. Послідовність проведення дослідів .....	90
2.12. Випробування на кручення круглого циліндричного стержня.....	91
2.12.1. Короткі теоретичні відомості.....	91
2.12.2. Послідовність проведення дослідів .....	93
2.13. Визначення головних напружень при крученні порожнистого стержня круглого поперечного перерізу .....	94
2.13.1. Короткі теоретичні відомості.....	95
2.13.2. Послідовність проведення дослідів .....	96
2.14. Випробування циліндричної пружини на стискання.....	97
2.14.1. Короткі теоретичні відомості.....	97
2.14.2. Послідовність проведення дослідів .....	99
2.15. Визначення прогинів при косому згині.....	99
2.15.1. Короткі теоретичні відомості.....	100
2.15.2. Послідовність проведення дослідів .....	102
2.16. Дослідження розподілу напружень при позацентровому стисканні з одним ексцентриситетом $z_0$ .....	103
2.16.1. Короткі теоретичні відомості.....	103
2.16.2. Послідовність проведення дослідів .....	104
2.17. Дослідження розподілу напружень при позацентровому стисканні з двома ексцентриситетами $y_0$ і $z_0$ .....	105
2.17.1. Короткі теоретичні відомості.....	105

2.17.2. Послідовність проведення дослідів .....	107
2.18. Дослідження деформацій і розподілів напружень при згині з крученням.....	107
2.18.1. Короткі теоретичні відомості.....	107
2.18.2. Послідовність проведення дослідів .....	110
2.19. Дослідження явища втрати стійкості стиснутих стержнів ...	110
2.19.1. Короткі теоретичні відомості.....	110
2.19.2. Послідовність проведення дослідів .....	112
2.20. Дослідження концентрації напружень у штабах.....	113
2.20.1. Короткі теоретичні відомості.....	113
2.20.2. Послідовність проведення дослідів .....	116
2.21. Дослідження ударної в'язкості сталі та інших матеріалів ....	117
2.21.1. Короткі теоретичні відомості.....	117
2.21.2. Послідовність проведення дослідів .....	119
2.22. Визначення положення центра згину тонкостінного стержня незамкнутого профілю.....	120
2.22.1. Короткі теоретичні відомості.....	120
2.22.2. Послідовність проведення дослідів .....	121
2.23. Дослідження розподілу напружень у кривому брусі.....	122
2.23.1. Короткі теоретичні відомості.....	122
2.23.2. Послідовність проведення дослідів .....	124
2.24. Випробування сталі на витривалість .....	125
2.24.1. Короткі теоретичні відомості.....	125
2.24.2. Послідовність проведення дослідів .....	130
2.25. Визначення переміщень просторового ламаного бруса.....	131
2.25.1. Короткі теоретичні відомості.....	131
2.25.2. Послідовність проведення дослідів .....	132
2.26. Перевірка теорем про взаємність робіт і переміщень.....	133
2.26.1. Короткі теоретичні відомості.....	133
2.26.2. Послідовність проведення дослідів .....	136
2.27. Випробування сталевих ферм.....	137
2.27.1. Короткі теоретичні відомості.....	137
2.27.2. Послідовність проведення дослідів .....	140
2.28. Випробування двохарнірної арки .....	141
2.28.1. Короткі теоретичні відомості.....	141
2.28.2. Послідовність проведення дослідів .....	143
2.29. Дослідження дії вібраційного навантаження на шарнірно-обперту балку.....	144

2.29.1. Короткі теоретичні відомості.....	144
2.29.2. Послідовність проведення дослідів .....	146
2.30. Дослідження напружено-деформованого стану сталобетонних колон.....	147
2.30.1. Короткі теоретичні відомості.....	147
2.30.2. Послідовність проведення дослідів .....	149
Бібліографічний список.....	151
Додаток 1. Бланки лабораторних робіт.....	153
Додаток 2. Механічні характеристики деяких матеріалів.....	208
Додаток 3. Визначення чисел твердості.....	209
Додаток 4. Сортамент прокатної сталі.....	212

## ОСНОВНІ БУКВЕНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$\gamma$	– об’ємна маса
C20/25	– клас бетону за міцністю на стискання
$N$	– поздовжня сила, зусилля
$p$	– інтенсивність тиску
$A$	– площа поперечного перерізу
$\sigma$	– нормальне напруження
$F$	– величина навантаження, зосередженої сили
$\Delta F$	– приріст навантаження
$f$	– прогин, показання індикатора
$H$	– величина розпору
$\nu$	– коефіцієнт Пуассона
$E$	– модуль пружності при розтяганні і стисканні
$\varepsilon$	– відносна деформація
$\tau$	– дотичне напруження
$M$	– згинальний момент
$M_{кр}$	– крутний момент у перерізі
$W$	– осьовий момент опору
$W_p$	– полярний момент опору
$l$	– розрахункова довжина зразка, прогін
$\Delta l$	– абсолютна деформація
$V$	– об’єм
$k$	– коефіцієнт збільшення тензометра
$a$	– показання тензометра
$\Delta a$	– приріст показань тензометра
$HB$	– число твердості за Бринелем
$HR$	– число твердості за Роквеллом
$S$	– статичний момент частини площі перерізу
$b$	– ширина балки
$y, z$	– координати точок поперечного перерізу
$Q$	– поперечне зусилля
$G$	– модуль пружності при зсуві
$\lambda$	– осадка пружини, гнучкість стиснутого стержня
$i$	– радіус інерції поперечного перерізу
$\mu$	– коефіцієнт приведеної довжини
$R, r$	– радіуси
$\delta$	– одиничне переміщення

$\Delta$	– вантажне переміщення
$m$	– погонна маса
$g$	– прискорення вільного падіння
$\frac{\partial y}{\partial t}$	– часткові похідні за часом
$\frac{\partial y}{\partial x}$	– часткові похідні за абсцисою

## ЗНАЧЕННЯ СМИСЛОВИХ ІНДЕКСІВ

min	– мінімальний
max	– максимальний
пц	– межа пропорційності
пр	– межа пружності
т	– межа текучості
в	– межа міцності
ш	– шийка
вд	– межа міцності дійсна
ср	– середнє
z, y	– осі поперечного перерізу
кр	– кручення, критичний
н	– номінальний
f	– зовнішнє навантаження



## ВСТУП

Значним внеском в історичний розвиток механіки твердого деформованого тіла, до складу якої входить опір матеріалів і будівельна механіка, стали унікальні витвори великих теоретиків і експериментаторів Г. Галілея, Р. Гука, Б. Сен-Венана, Я. Бернуллі, Т. Юнга, Л. Коші, А. Навьє, Л. Ейлера. До цієї когорти дослідників входять російські й українські вчені С. П. Тимошенко, Ф. С. Ясинський, Д. І. Журавський, В. Л. Кирпичов, О. М. Крилов та ін.

Механіка твердого деформованого тіла в сучасному вигляді має у своїй основі три системи рівнянь – рівняння рівноваги (рух у динамічній задачі), рівняння спільності деформацій і фізичні рівняння. Якщо рівняння спільності деформацій, що мають геометричний характер, можуть бути складені з будь-яким ступенем точності суто аналітично, минаючи експеримент, а рівняння рівноваги, що спираються на загальні для всіх тіл і добре відомі експериментальні факти, не мають потреби в дослідній перевірці, то остання система – система фізичних рівнянь – може бути складена лише на підставі експерименту. Тому міра вірогідності теорії цілком залежить від точності експерименту, покладеного в її основу, і від адекватного відображення результатів цього експерименту в математичному апараті теорії через фізичні рівняння. Зазначеним фактом обумовлено фундаментальне значення для опору матеріалів і будівельної механіки тих експериментальних лабораторних робіт, яким присвячено навчальний посібник.

Структура посібника подана таким чином. У першому розділі наведені відомості про матеріали, випробувальні машини, системи вимірів. У другому розділі описано 30 лабораторних робіт. У додатках розміщені бланки лабораторних робіт, відомості про механічні характеристики деяких матеріалів, сортамент сталі та інші допоміжні дані, необхідні для проведення випробувань. Розмістивши в першому розділі загальні відомості, ми тим націлюємо студента зосередитися на головному – проведенні досліду й аналізі результатів. На кожну лабораторну роботу оформляється протокол (бланк), що міститься в дод.1. У бланку відбита методика експерименту, наведені необхідні рисунки, таблиці та інші відомості. Це сприяє економії часу на оформлення й організацію робіт.

Ознайомлення з посібником можна починати з другого розділу, потім адресно використовувати матеріали першого розділу. Однією з істотних особливостей посібника є те, що в ньому подано лабораторні роботи і з будівельної механіки. Особливо це корисно для студентів, що вивчають курс будівельної механіки після опору матеріалів. Цим досягається єдиний підхід і однакові вимоги до лабораторних робіт, простежується наступність.

Кожна лабораторна робота побудована таким чином: сформульована мета роботи; викладені теоретичні відомості; повідомлена послідовність проведення досліду; подані контрольні запитання. Роботи 1–5, 7, 21, 24 присвячені вивченню властивостей матеріалів: випробування сталі на розтягання з визначенням основних механічних характеристик; визначення модуля пружності сталі при розтягненні; визначення коефіцієнта поперечної деформації для сталі; випробування сталі, чавуну і дерева на стискання із визначенням основних механічних характеристик; випробування сталі на зріз і дерева на сколювання та перерізування; визначення твердості різних матеріалів методом вдавлення; дослідження ударної в'язкості сталі та інших матеріалів; випробування сталі на витривалість.

В інших роботах досліджується робота конструкцій: дерев'яної і сталеві балок; круглого суцільного і порожнистого стержнів; циліндричної пружини; короткого бруса; стержня з вузьким прямокутним перерізом; пластинки з отвором; тонкостінного стержня незамкнутого профілю; кривого бруса; просторового ламаного бруса. Лабораторна робота 7 присвячена дослідженню зварних з'єднань.

З будівельної механіки наведено шість робіт: перевірка теореми про взаємність робіт і переміщень; випробування сталеві ферми; випробування двошарнірної арки; дослідження дії вібраційного навантаження на шарнірно-обперту балку; визначення переміщень у просторовому брусі й статично невизначній балці.

Автори глибоко вдячні рецензентам: д-ру техн. наук, проф. Гриньову В. Б. і д-ру техн. наук, проф. Кожушку В. П., а також інж. Павленко Р. Г. за неоціненну допомогу щодо оформлення посібника.

Навчальний посібник призначено для студентів денної, заочної і дистанційної форм навчання будівельних і механічних спеціальностей, а також для інженерів, науковців і аспірантів.

# 1. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ ПРО МАТЕРІАЛИ, ВИПРОБУВАЛЬНІ МАШИНИ, СИСТЕМИ ВИМІРЮВАНЬ

## 1.1. Короткі відомості про матеріали

До основних матеріалів та їх сполук, з яких виготовляються елементи несучих конструкцій, належать сталь, кольорові метали і їхні сплави, бетон і залізобетон, кам'яні матеріали, деревина, пластмаси та ін. [1, 4, 8, 12, 13, 15].

*Сталь* частіше за інші використовується в конструкціях промислових і громадських будівель, мостів, резервуарів, веж і т. ін. Вона являє собою сплав заліза з вуглецем. За вмістом вуглецю сталі поділяються на низько-вуглецеві (0,09–0,25 %), середньо-вуглецеві (0,25–0,46 %) і високо-вуглецеві (0,46–0,75 %). Сплави з вмістом вуглецю понад 2 % належать до чавунів. Для поліпшення різних фізико-механічних властивостей сталей до їхнього складу додають легуючі елементи – кремній (С), молібден (М), марганець (Г), нікель (Н), хром (Х) та ін. Такі сталі називають легованими. За кількістю легувальних домішок вони підрозділяються на низьколеговані (сума легуючих елементів 1,8–2,5 %), середньолеговані (2,5–8 %) і високолеговані (понад 8 %).

У будівельних конструкціях використовують низьколеговану сталь. Для відповідальних металоконструкцій і арматури залізобетонних конструкцій частіше застосовують леговані сталі. У конструкціях мостів використовують високоякісні низьковуглецеві і низьколеговані сталі. Сталь застосовують при виготовленні листового і прокатного профілю. У сталевому прокаті використовують різні марки вуглецевих і низьколегованих сталей. Хімічний склад і механічні характеристики деяких сталей наведені в дод. 2. Більше в будівельних конструкціях застосовується сталь прокатна кутова рівнополична і нерівнополична, двотаври, швелери й інші профілі. Сортамент на ці види прокату наведений у дод. 3.

*Кольорові метали і сплави* використовуються тоді, коли економічно чи доцільно неможливо застосувати сталі. У будівельних конструкціях частіше використовуються алюмінієві сплави, у які додаються легуючі елементи з магнію, марганцю, кремнію, цинку та ін.; менше застосовуються титанові сплави.

*Залізобетон* складається з бетону і сталевих стержнів, що становлять з бетоном монолітне ціле і працюють з ним спільно. Фізико-механічні властивості бетону залежать від складу суміші, виду в'язучого і заповнювачів, водов'язучого чи водоцементного відношення, способів готування, укладання й обробки бетонної суміші, умов твердіння (природне твердіння, пропарювання, автоклавна обробка), віку бетону й ін. Бетон має значний опір стискальним напруженням і дуже малий опір розтяганням. Міцність бетону на розтягання в 10–15 разів менша від міцності на стискання. З огляду на це бетонні (неармовані) конструкції, призначені для роботи на згин чи розтягання, були б дуже масивними, нерентабельними і практично неприйнятними. Сталь, як буде показано нижче, дуже добре працює і на стискання і на розтягання. Звідси і з'явилася ідея створення залізобетону, у якому стискальні напруження сприймаються бетоном, а розтягувальні – сталевую арматурою.

Для бетонних і залізобетонних конструкцій установлені такі класи бетону за міцністю на стискання С8/10; С12/15; С16/20; С20/25; С30/35; С32/40; С35/45 і т.д. до С50/60. Клас бетону відповідає значенню розрахункового опору  $R$ , МПа, при стисканні кубика з ребром 15 см. У деяких конструкціях вирішальне значення має міцність бетону на розтягання  $R_{bt}$ . Тому при класифікації бетону вводиться також поняття класу за міцністю бетону на розтягання.

У будівництві застосовують як природні, так і штучні *кам'яні матеріали*. За міцністю на стискання кам'яні матеріали поділяють на такі групи: високої міцності (30–100 МПа (природні камені важких порід)); середньої міцності (3,5–25 МПа (штучні камені і легкі пористі природні камені)); низької міцності (0,4–2,5 МПа (вапняки, ґрунтоблоки й ін.)). Кам'яна кладка є неоднорідним тілом, що складається з каменів, шви між якими заповнені розчином. Розчини, використовувані для кам'яної кладки, залежно від виду в'язучого підрозділяються на цементні, вапняні, змішані (цементно-вапняні і цементно-глиняні). За об'ємною масою (у сухому стані) розчини для кладок поділяються на важкі ( $\gamma \geq 1500$  кг/м<sup>3</sup>) і легкі ( $\gamma < 1500$  кг/м<sup>3</sup>).

*Деревина* – найдавніший будівельний матеріал. В основних елементах будівельних конструкцій використовують хвойну

деревину, тому що вона містить менше дефектів, ніж листяна, а смоли, які є в цій деревині, чинять кращий опір зволоженню і загниванню. З хвойної деревини найчастіше застосовується соснова, яка має високу якість. Серед листяних виділяється дубова деревина, що має підвищену міцність і стійкість проти загнивання, але є дорожчою за вартістю. Деревина має складну трубчасто-волокнисту будову, що дає змогу під час росту дереву переносити діючі на нього природні навантаження: вітер, сніг, перепади температур, сили гравітації. Відзначена особливість будови деревини є причиною анізотропії її фізико-механічних властивостей. Макроструктуру деревини можна подати таким чином. У центрі стовбура міститься найслабша його частина – серцевина. Між серцевиною і корою – власне деревина, периферійна частина якої облямована камбіальним кільцем, що складається зі здатних до розподілу клітин. Протягом року за нормальних умов життя з камбію утворюється один річний шар (за кількістю річних шарів можна визначити вік дерева). Від серцевини до кори йдуть серцевинні промені, призначення яких зберігати і розподіляти по товщині стовбура живильні речовини.

Механічні властивості деревини характеризуються високими показниками її міцності при розтяганні, стисканні й зминанні вздовж волокон і при поперечному вигині. Так, межа міцності сосни при розтяганні вздовж волокон дорівнює близько 100 МПа, при поперечному вигині – 75 МПа. Однак у реальних конструкціях не вдається цілком використовувати настільки високу міцність, тому що на механічні властивості деревини і на несучу здатність дерев'яних конструкцій впливають багато факторів. Найбільш істотно впливають дефекти (сучки, тріщини, косошар), час перебування конструкцій під навантаженням, вологість. Через вплив цих факторів розрахункові опори деревини приймаються в кілька разів меншими від меж міцності, отриманих при лабораторних випробуваннях стандартних зразків. Так, розрахунковий опір деревини сосни розтяганню вздовж волокон становить усього 10 МПа, поперечному згині – 13 МПа.

*Пластмаси* – багатокомпонентні матеріали, що складаються з полімерів (зв'язувальних речовин), пластифікаторів, наповнювачів і деяких спеціальних домішок (барвників та ін.).

Полімери є головною складовою частиною будь-якої пластмаси, їх одержують синтетичним шляхом із простих органічних сполук. Сировиною для виробництва полімерів є нафтовий і природний газ, кам'яновугільна смола, відходи деревообробки і сільськогосподарського виробництва.

Пластифікатори, що додаються до складу пластмас, знижують їхню крихкість, підвищують еластичність і морозостійкість. Як пластифікатори застосовують дибутилфталат, трибутилфосфат, трикрезилфосфат та ін. Як наповнювачі використовують скляні волокна, нитки і тканини, стружку із дерева й тирсу, азбестове волокно, тальк. Наповнювачі зменшують витрату основного дорогого полімеру, підвищують міцність і запобігають усадці пластмас при затвердінні.

Безупинне зростання обсягу виробництва і застосування пластмас у будівництві в усьому світі обумовлене наявністю в них ряду переваг: висока міцність при невеликій масі; стійкість щодо більшості хімічно агресивних середовищ; гарні теплозвукоізоляційні якості, прекрасні оптичні властивості; легкість обробки.

Недоліками пластмас є: відносно невеликий модуль пружності; високий коефіцієнт температурного розширення, старіння, горючість деяких з них, повзучість і поки ще висока ціна.

Найбільш поширеними пластмасами, застосовуваними для виготовлення будівельних конструкцій, є: склопластики, термопласти, деревні пластики; повітронепроникні тканини і плівки, піно- і стільникопласти.

Склопластики – це пластмаси, у яких як сполучні застосовуються фенольні, епоксидні, поліефірні й інші смоли та їхні модифікації, а наповнювачами є скляні волокна, нитки або тканини. Термопласти (оргскло або поліметилметакрилат і вініпласт) застосовують у світлопрозорих конструкціях стін і покриттів, у теплицях, парниках, оранжереях. Деревні пластики використовують для обшивань перегородок, підвісних стель та ін. Повітронепроникні тканини і плівки застосовують у пневматичних (надувних) конструкціях. Піно- і стільникопласти використовують у середньому шарі тришарових панелей як тепло- і звукоізолювальні матеріали. Механічні характеристики деяких матеріалів наведені в дод. 4.

## 1.2. Випробувальні машини, прилади та установки

### 1.2.1. Випробувальні машини

Для випробування і дослідження механічних властивостей зразків металів і сплавів [2, 6, 7, 11, 20, 21], напівфабрикатів (дріт, арматура, канати, пасма), зварних з'єднань, деталей і виробів випускається широка номенклатура розривних і універсальних (стискання, розтягання, вигин) машин з механічним і гідравлічним приводами [5, 9, 10, 19]. У сучасних випробувальних машинах застосовують, переважно, двоколонну схему з переміщуваною траверсою, розташованою в середній частині рами. Така схема дає змогу вибирати для проведення випробувань верхню чи нижню зону робочого простору. Звичайний діапазон граничних навантажень не перевищує 100–200 кН. Поряд зі статичними випробуваннями на таких машинах передбачається можливість проведення малоциклічних утомних випробувань із граничною частотою до 1 Гц. Для цього, як правило, застосовують випробувальні машини з гідропульсатором. Машини з гідравлічним збудженням у серійному виконанні випускають до граничних навантажень 1–2 МН. Для великих навантажень машини виготовляють за індивідуальними замовленнями. Деяке уявлення про пристрій пресів і випробувальних машин дають рис. 1.1–1.3.

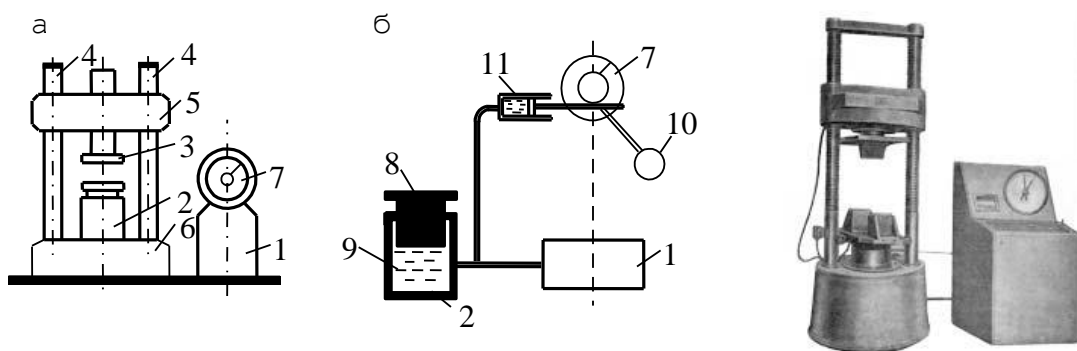


Рис. 1.1. Гідравлічний прес:

*а* – пристрій гідравлічного преса; *б* – схема гідравлічного преса; 1 – насосна станція; 2 – гідроциліндр; 3 – верхня переміщувана опора; 4 – гвинтові опори траверси; 5 – траверса; 6 – база преса; 7 – шкала силівимірювача; 8 – плунжер; 9 – робоча рідина; 10 – маятник силівимірювача; 11 – гідроциліндр силівимірювача

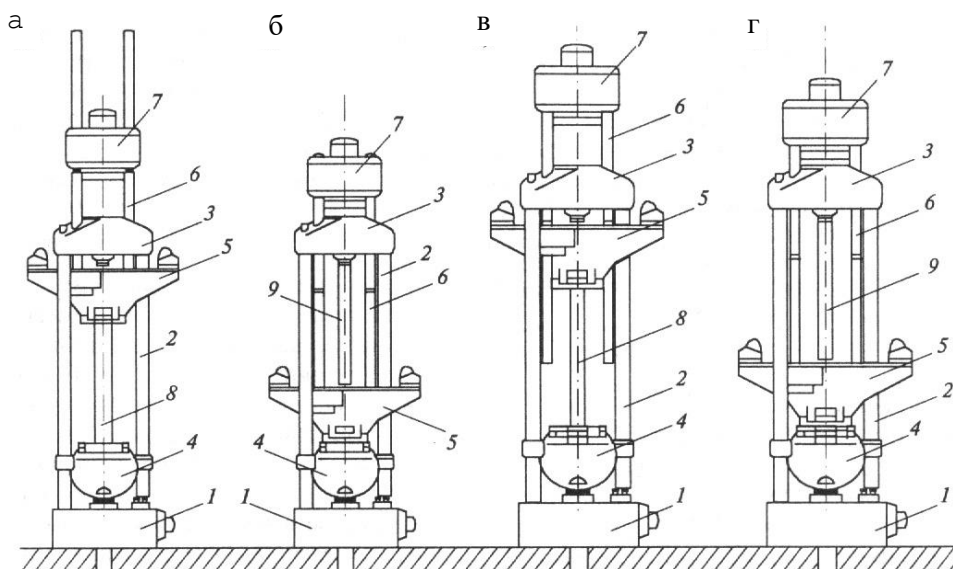


Рис. 1.2. Схеми універсальних гідравлічних випробувальних машин:

- 1 – база машини; 2 – гвинтові колони; 3 – траверса циліндрова;  
 4 – пасивний затискач; 5 – активний затискач;  
 6 – колони реверсивної рами; 7 – траверса реверсивної рами;  
 8 – зона розтягання; 9 – зона стискання

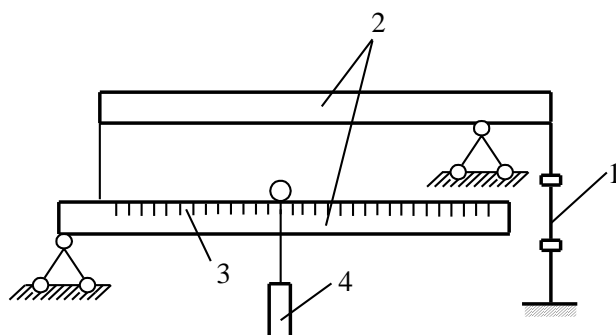


Рис. 1.3. Кінематична схема механічної розривної машини:  
 1 – випробовуваний зразок; 2 – важільна система;  
 3 – шкала; 4 – вантаж

**Машини Р-5** призначена для випробування металевих зразків на розтяг, стиск і вигин. Зразок закріплюється на затискачах 1 і 2 (рис. 1.4). Нижній затискач 1 з'єднаний з траверсою 3 навантажувального механізму. Верхній затискач 2 з'єднаний із силовимірювальним механізмом, що складається з важеля 4 і маятника 5.



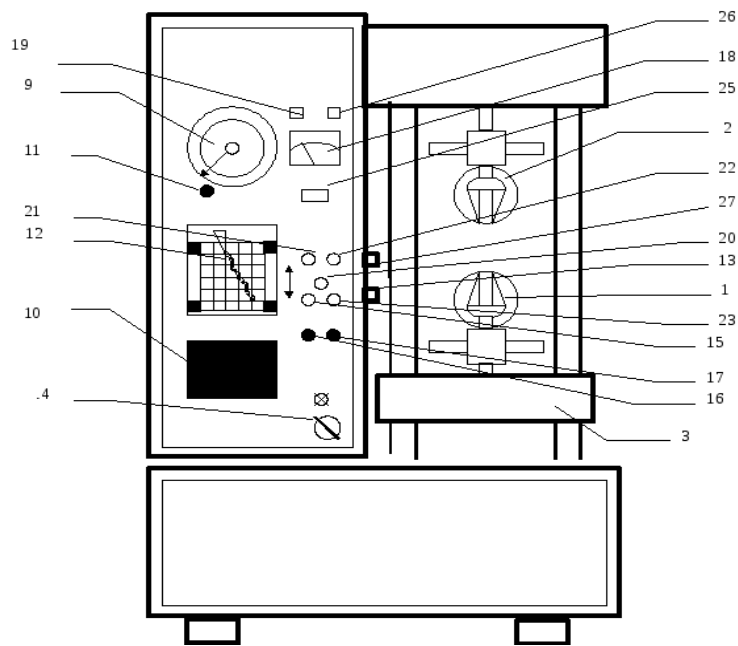


Рис. 1.4. Схема випробувальної машини Р-5

При обертанні електродвигуна 6 траверса починає переміщатися вниз, зважаючи на це зусилля розтягування передається на обидва затискачі, зразок 7 і важелі маятниково-вимірювальної системи 4 і 5. Лівий кінець важеля відхиляється, водночас робоча стрілка 8 переміщується по шкалі силоримірювача 9, указуючи діюче навантаження. При переміщенні робоча стрілка веде за собою контрольну стрілку.

Машина має три шкали навантажень: шкала А – від 0 до 10 кН, шкала Б – від 0 до 25 кН, шкала В – від 0 до 50 кН. Ціна найменшої поділки шкали: 20, 50 і 100 Н відповідно до типу шкали. Зміна діапазону навантажень здійснюється шляхом закріплення на маятнику силоримірювача додаткових вантажів 10. Для установлення на нуль шкала має ручку 11 у нижній частині, обертанням якої нульова відмітка шкали поєднується з робочою стрілкою.

Перо автоматично записує на діаграмному барабані 12 криву навантаження–деформація. Заправка діаграмного паперу здійснюється ручкою 27. Масштаб запису діаграми за навантаженням відповідає 1/320 частини найбільшого значення діапазону вимірюваного навантаження, за деформацією – 10:1, 50:1 і 100:1 щодо ходу активного затискача. Ручка перемикачів масштабів запису деформації виведена з правого боку шафи 13.

Крім того, при проведенні випробувань відлік величини деформації можна здійснити за допомогою пристрою відліку деформації 25 при увімкненому тумблері блока відліку деформації 26.

Панель управління машини показана на рис. 1.4. Увімкнення машини здійснюється мережевим вимикачем «Мережа» 14. Після кожного натискання кнопки «Вниз» 15 приводиться в дію рух активного затискача машини. Швидкість руху активного затискача визначається регулювальними ручками «Грубо» 16 і «Точно» 17 та вимірюється показником швидкості 18. Показник швидкості має дві межі вимірювання: від 0 до 10 мм/хв і від 0 до 100 мм/хв. При зміні швидкості від 0 до 100 мм/хв перемикач показника швидкості 19 ставиться в положення «X1», при швидкостях до 10 мм/хв – «X0.1». Для визначення швидкості руху активного затискача слід помножити показник швидкості на положення вимикача. Наприклад, якщо показник швидкості показує 80 мм/хв, а перемикач стоїть у положенні «X0.1», то швидкість руху активного затискача =  $80 \cdot 0,1 = 8$  мм/хв.

Випробування автоматично припиняється при перевантаженні силовимірювача або при руйнуванні зразка. У процесі випробувань привод можна зупинити натисканням кнопки «Стоп» 20.

Підняття активного затискача здійснюється натиском кнопки «Вгору» 21. Прискорений рух активного затискача вгору і вниз здійснюється кнопками «Прискорено вгору» 22 або «Прискорено вниз» 23, причому перехід на прискорений хід угору (униз) необхідно здійснювати спершу натисканням кнопки «Вгору» («Вниз»), після чого натисканням кнопки «Прискорено вгору» («Прискорено вниз»). Перехід з прискореного руху на звичайний можливий тільки при натисканні відповідної кнопки («Прискорено вниз» – «Вниз», «Прискорено вгору» – «Вгору»).

#### *Підготовка зразків для випробувань*

Перед випробуванням вимірюють поперечний переріз зразка (у циліндрів – початковий діаметр робочої частини  $d_0$ , мм, а у плоских – початкову товщину робочої частини  $a_0$ , мм, і початкову ширину  $b_0$ , мм). Точність виміру циліндричних зразків діаметром 10 мм і менше та плоских зразків товщиною 2 мм і менше – до 0,01 мм. Вимірюють не менше ніж у трьох місцях по

довжині робочої частини (у середині і по краях). Отримані найменші розміри записують у протокол і за ними обчислюють площу поперечного перерізу. Початкову розрахункову довжину зразка вимірюють з точністю до 0,1 мм, яка заноситься в протокол випробувань. Установлена початкова довжина  $l_0$  обмежується неглибокими кернами або іншими мітками.

При випробуваннях конструкцій широко використовуються **гідродомкрати** із зусиллями від 5 до 2500 кН. Навантаження передається на конструкцію або безпосередньо, або через важільну систему. Гідродомкрати приводяться в дію від ручних або електричних насосних станцій і можуть включатися в загальну гідросистему або мати індивідуальний привод. Величину зусилля кН, що розвивається домкратом, контролюють за допомогою манометра, що вимірює тиск у гідросистемі:

$$N = pA , \quad (1.1)$$

де  $N$  – величина зусилля, кН;

$p$  – тиск у гідросистемі, кН/см<sup>2</sup>;

$A$  – площа плунжера домкрата, см<sup>2</sup>.

Для підвищення точності виміру зусилля, що розвивається домкратом, його піддають таруванню (рис. 1.5).

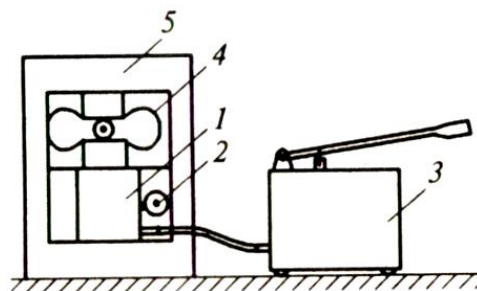


Рис. 1.5. Схема тарування гідродомкрата:

- 1 – гідродомкрат; 2 – манометр; 3 – ручна насосна станція;  
4 – динамометр стискання; 5 – рама

Отриману за цих умов величину зусилля, що відповідає одиниці шкали манометра, заносять у паспорт домкрата. При навантаженні конструкцій можуть використовуватися гідродомкрати і домкрати механічні з малим зусиллям (до 70 кН), наприклад автомобільні. Однак у цьому випадку між домкратом і

конструкцією, що навантажується, повинен розміщатися динамометр для виміру зусилля. В усіх випадках домкрати повинні підлягати періодичній позавідомчій перевірці і мати індивідуальний паспорт, куди заносять дані тарування.

До механічних випробувальних машин також належать **маятниковий копер** (рис. 1.6), що застосовується для визначення величини ударної в'язкості – роботи, потрібної для ударного руйнування зразка сталі, який має надріз спеціальної форми, що характеризує здатність сталі до крихкого руйнування.

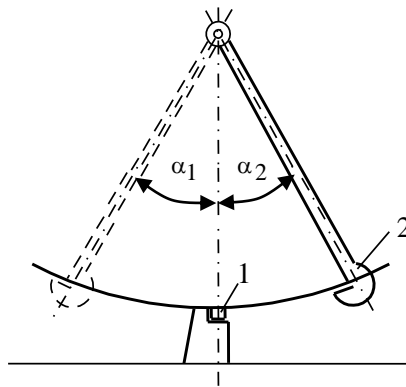


Рис. 1.6. Схема маятникового ударного копра:  
1 – зразок; 2 – ударний маятник

**Випробування на кручення** проводять на спеціальних машинах з вертикальним і горизонтальним розташуванням затискачів. Найбільш поширені машини КМ-50 і ГЗП. Можна проводити випробування і на інших машинах, що мають пристосування для повороту одного із затискачів. Для виміру величини скручувального моменту, машина повинна бути обладнана силовимірювальним пристроєм і пристосуванням для виміру деформацій.

**КМ-50** (рис. 1.7) належать до типу випробувальних машин з механічним навантаженням зразка і важільно-маятниковим силовимірювачем.

Основні вузли КМ-50 – це привод, головка навантаження, затискач і силовимірювач. Механізм привода конструктивно виконаний так: електродвигун 1 через клиноремінну передачу обертає черв'ячну пару, що через зубчасті передачі 21, 22 і 23 обертає ходовий гвинт 24 із установленим на ньому нижнім

затискачем 14. Крім механічного, машина обладнана ручним приводом навантаження, що складається з рукоятки 18 і ланцюгової передачі 15. Навантажувати зразки можна зі швидкостями 1 або 0,3 об/хв, переміщаючи стержень 25 з ковзною шпонкою. При ручному приводі стержень 25 потрібно установити на проміжне кільце, щоб зубчасті передачі 21 і 22 не працювали.

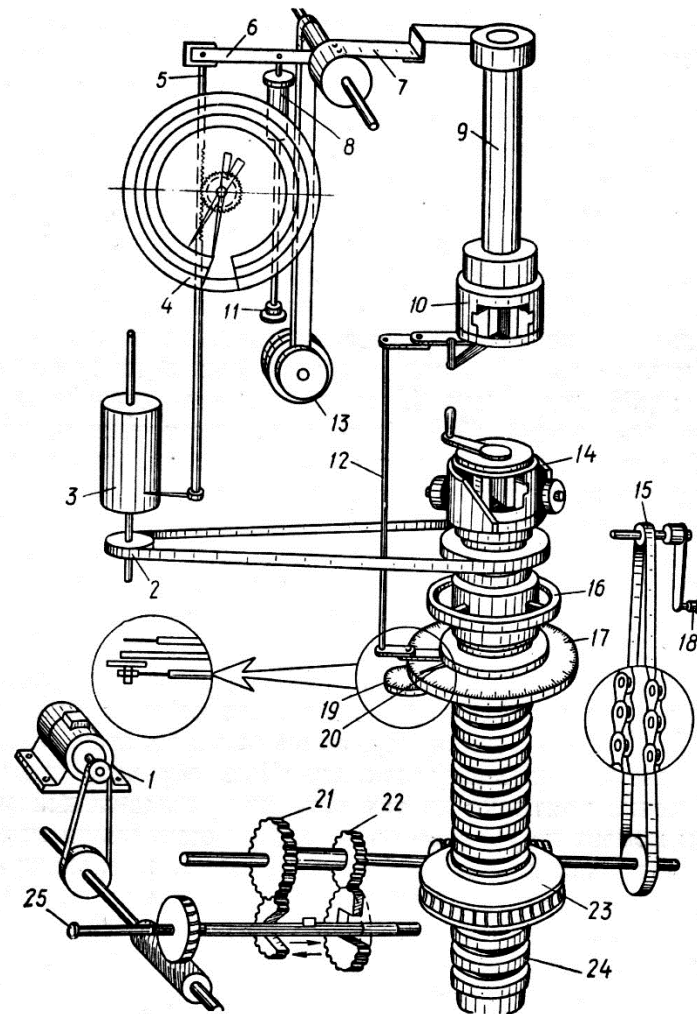


Рис. 1.7. Кінематична схема випробувальної машини КМ-50

Для закріплення зразків різної довжини нижній (активний) затискач можна встановлювати на різній висоті маховиком 16. Кут закручування в межах  $360^\circ$  відраховують по шкалі 17 зі стрілочним покажчиком 20. Для відліку цілих обертів машина має лічильник обертів 19 з межею виміру 10 об. Показання по шкалі кутів закручування відповідають відносному повороту затискачів машини, тому що поправка на поворот верхнього затискача вноситься автоматично коригувальним пристосуванням 12.

Для створення моменту, що врівноважує, призначена головка навантаження 9, у нижній частині якої установлений верхній затискач 10. Момент, що врівноважує, створюється за допомогою сектора, зв'язаного через гнучкий зв'язок 7 з маятником 13 силовимірювального пристрою. Момент, переданий верхньому затискачу через зразок, викликає відхилення маятника доти, поки створюваний маятником момент не зрівноважить його. При відхиленні маятника важіль 6 переміщає зубчасту рейку 5, що обертає шестірню, насаджену на вісь робочої стрілки кругової шкали 4 моментів. Зубчаста рейка зв'язана також з пером діаграмного пристрою. Щоб запобігти різкому падінню маятника після руйнування зразка, у схему включають масляний амортизатор, що виконаний у вигляді циліндра 8 з поршнем, який має зворотний клапан. При падінні маятника внаслідок руйнування зразка зворотний клапан під дією зростаючого тиску піднімається і перекриває отвір у поршні. У цьому разі тиск у циліндрі різко зростає і перешкоджає подальшому швидкому переміщенню поршня. Для регулювання швидкості переміщення поршня верхня і нижня частини циліндра з'єднані мастилопроводом з вентилям 11. Залежно від положення вентиля змінюється швидкість надходження мастила з нижньої частини циліндра у верхню, а отже, і швидкість падіння маятника. Діаграмний апарат виконаний у вигляді циліндра 3 із пружиною для закріплення паперу. Обертання барабана відбувається від ходового гвинта 24 через гнучкий зв'язок 2.

Існують різні конструкції машин для **випробування матеріалів на витривалість**. Найбільшого поширення набули машини, що передають зразку обертальний рух при вигині. Завдяки обертанню у точках робочої частини зразка поперемінно виникають напруження то стискання  $\sigma_{\min}$ , то розтягання  $\sigma_{\max}$ , причому  $|\sigma_{\max}| = |\sigma_{\min}|$ . Як відомо, такий цикл навантаження є найбільш небезпечним для матеріалу і називається симетричним.

Розглянемо машину моделі **УКІ-6000-2** (рис. 1.8), призначену для випробування зразків з металів і їхніх сплавів на витривалість при консольному згині. Кількість зразків, що одночасно випробовуються, два, робочий діапазон навантажень від 5 до 1000 Н, частота зміни циклів випробовуваного навантаження може бути 3000 або 6000 цикл/хв.

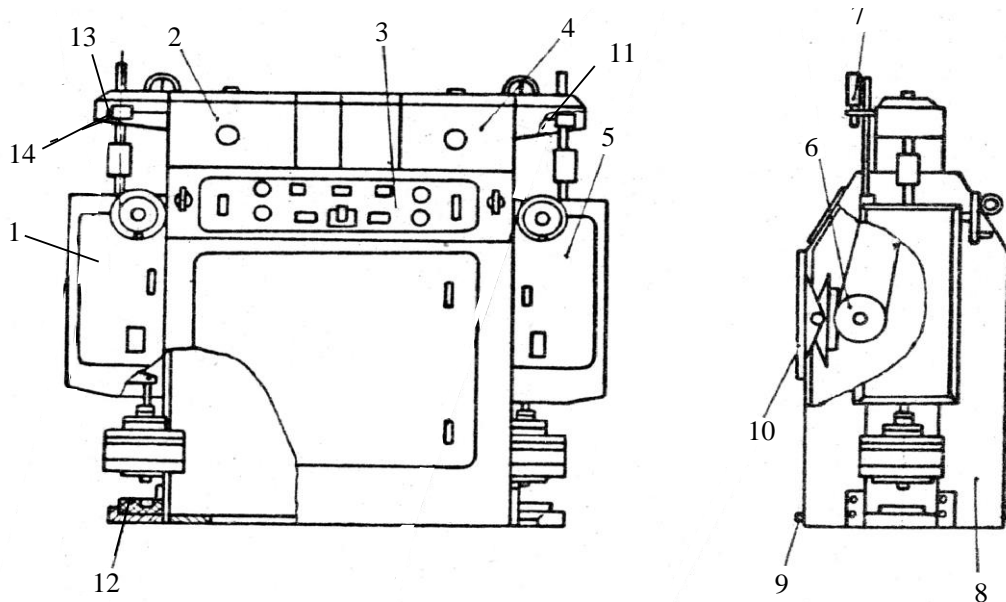


Рис. 1.8. Машина для випробування зразків на втомленість при консольному згині моделі УКІ-6000-2:

1 – система вантажна ліва; 2 – привод механічний; 3 – панель керування; 4 – привод механічний; 5 – система вантажна права; 6 – привод; 7 – штатив; 8 – станина; 9 – болт заземлення; 10 – кришка; 11 – зразок; 12 – амортизатор; 13 – гайка; 14 – стопорний гвинт

Обертання зразка через клиноремінну передачу (рис. 1.9) здійснює привод 15 потужністю 0,6 кВт. Навантаження вільного кінця зразка здійснюється за допомогою обойми 19, тяги 7, важеля 3, підвіски 2 і змінних вантажів 1. Для пом'якшення ударів при руйнуванні зразка між обоймою 19 і тягою 7 установлений демпфер 20. На машині передбачено два варіанти навантаження: безпосередньо вантажами  $G$  до  $F = 200$  Н (без використання підйомної передачі навантаження тут  $F = G$ ) і підйомне від  $F = 200$  Н до  $F = 1000$  Н, що дає змогу в п'ять разів збільшити ефект дії змінних вантажів  $G$ . У цьому випадку  $F = 5 G$ . Для плавного навантаження і зняття навантаження зі зразка застосовується черв'ячна пара 21. За допомогою датчика 5 визначають виконану кількість циклів навантаження зразка, величину його прогину під навантаженням відраховують за індикатором 22. Ціна поділки індикатора 0,01 мм.

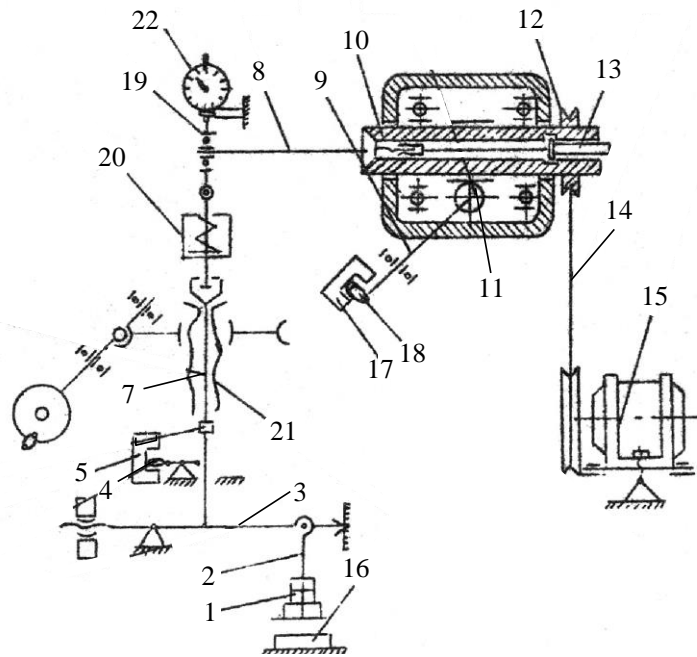


Рис. 1.9. Кінематична схема машини для випробування зразків на втомленість при консольному згині моделі УКІ-6000-2:  
 1 – вантаж; 2 – підвіски; 3 – важіль вантажний; 4 – важіль; 5 – датчик; 6 – упор; 7 – тяга; 8 – зразок; 9 – вал; 10 – шпindelь; 11 – колесо черв'ячне; 12 – шків; 13 – шток; 14 – пас клиновий; 15 – привод; 16 – амортизатор; 17 – датчик; 18 – пелюсток; 19 – обойма; 20 – демпфер; 21 – черв'ячна пара; 22 – індикатор

### 1.2.2. Прилади для визначення твердості матеріалів

У цей час створено багато приладів для визначення твердості, хоча принцип їх роботи однаковий. Для визначення твердості за Бринелем вітчизняною промисловістю випускаються прилади **ТШ-2** і **ТБ-5004**. Для визначення твердості за Віккерсом – **ТП** і за Роквеллом – **ТК**. Широко застосовуються універсальні прилади, що дають змогу вимірювати твердість різних матеріалів усіма трьома методами. Прикладом може бути прилад **УПТ-1**. Перехід у ньому від одного методу до іншого вимагає лише зміни індентора і вантажів. Із закордонних конструкцій універсальними вважаються прилади фірми «Веркштопфрумашiнен» (НДР) **ХП-250** і **ХПО-250** (рис. 1.10). Прилад типу **ХП-250** призначений для визначення твердості металів за Бринелем і Роквеллом відповідно до стандартів ДІН 50351 і ДІН 50103, а прилад **ХПО-250** – для визначення твердості металів за Бринелем і Віккерсом відповідно до стандартів ДІН 50351 і ДІН 50133.



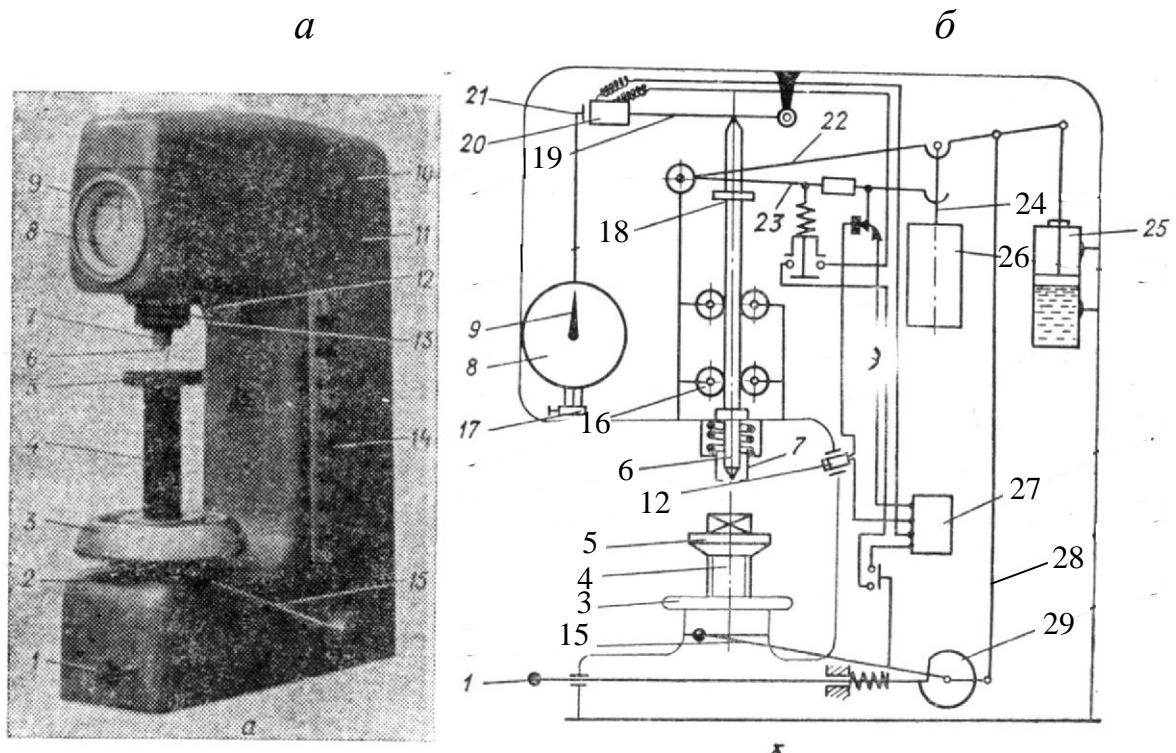


Рис. 1.10. Загальний вигляд (а), кінематична та електрична схеми (б) твердоміра ХП-250

Прилад ХП-250 має такі навантаження: 250; 187,5; 125; 62,5; 31; 25; 15,625 кгс, за Бринелем, і 150; 100 кгс, включно з 10 кгс попереднього навантаження, за Роквеллом.

Прилад має масивну станину 11 (рис. 1.10, а) закритої конструкції. Щоб підняти й опустити встановлювальний гвинт 4 діє штурвал 3. На верхній кінець установлювального гвинта встановлено, укріплений у його отворі своїм шипом, предметний столик 5. Над центром предметного столика у верхній частині станини встановлений натискний штемпель 18 (рис. 1.10, б), що переміщається в напрямних роликах 16. До нижнього кінця натискного штемпеля прикріплений наконечник 6, оточений упорним чохлам 7, що захищає вмонтований у наконечник алмазний конус або кульку від пошкоджень при зіткненні з поверхнею випробовуваної деталі. До зіткнення з наконечником деталь притискається до упорного чохла із силою  $160 \pm 20$  кгс. Упорний чохол 7 легко знімається: до напрямних 16 натискного штемпеля він прикріплюється кріпильним гвинтом 13.

На штемпель через опорну призму і подушку спирається короткий вантажний важіль 23, який у піднятому стані передає на

натискний штемпель 18 і наконечник 6 попереднє навантаження 10 кгс. На верхній кінець натискного штемеля спирається передатний важіль 19. До його вільного кінця приєднаний електромагніт 20, що передає через якір 21 рух натискного штемеля з п'ятикратним збільшенням на індикатор 8. Шкала індикатора з малою стрілкою і великою стрілкою 9 має зовнішній пояс з поділками 0–100 HRC чисел твердості за шкалою С Роквелла і внутрішній пояс з поділками 30–130 HRB за шкалою В. Упорним гвинтом 17 шток індикатора встановлений так, що стрілка розміщена у нульовому положенні. Незначні її відхилення, викликані змінами температури, можна вирівнювати кільцем з накаткою, до якого прикріплена шкала.

Паралельно важелю 23 розташований вантажний важіль 22, що несе на вільному кінці вантажну підвіску 24, яка складається зі штока з опорним диском і вантажами 26. Вантажі різні і у сполученні створюють випробувальні навантаження. До включення вантажі містяться на підвісному пристрої вантажного важеля 22, що з'єднаний із кнопковим пристосуванням. Натискаючи одну з кнопок 14 пристосування, включають відповідне цій кнопці випробувальне навантаження. Після витягування рукоятки 1 виходить із зачеплення з нею засувка храпового механізму 29, звільняючи підпірну штангу 28 важеля 22. Вантажна підвіска, опускаючись, пересаджується з важеля 22 на вантажний важіль 23. Швидкість опускання підвіски залежить від висоти встановлення масляного амортизатора 25, зв'язаного з підпірною штангою 28 і важелем 22. У вихідне положення вантажний важіль 22 з підвіскою 24 піднімають довгою рукояткою 15, відтискуючи нею вниз підпірну штангу 28.

Праворуч від штурвала 3 у станину вмонтований круглий рівень 2 для перевірки встановлення приладу. Нульове положення індикатора 8 встановлюють електромагнітом 20. Він заживлюється й одержує імпульси від електричних приладів на монтажній панелі 27, що розміщена під кришкою 10. Шкала індикатора освітлюється двома лампочками. За корпусом напрямних роликів 16 у станину 11 вмонтована освітлювальна лампа 12, необхідна в роботі.

### 1.2.3. Установки

Установка **СМЗ1Б** призначена для дослідного визначення величин розпору в статично невизначній двошарнірній арці. Установка СМЗ1Б (рис. 1.11) складається з таких основних частин: досліджуваного зразка 1 (арка прямокутного перерізу розміром  $(4 \times 50)$  мм<sup>2</sup> зі сталі марки Ст 3); шарнірно-рухомої 2 і шарнірно-нерухомої 3 опор; литого столу 4; двох колон 5, установлених на регульованих гвинтових ніжках 6; стяжки 7; гирьової підвіски 8; набору вантажів 9 і пристрою для визначення розпору. На лицьовій стороні зразка нанесена шкала з поділками від 0 до  $\pi/8$  для зручності відліку плечей навантаження. Уздовж зразка може переміщатися вручну підвіска 8 з гирьовим підвісом і набором вантажів. Підвіска може бути зафіксована на зразку за допомогою стопорного гвинта в будь-якій точці прогону арки. При навантаженні арки зосередженим навантаженням шарнірно-рухома опора зразка набуває переміщення в горизонтальному напрямку. Величина переміщення вимірюється індикатором 9 годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Переміщуючи противагу 10 по горизонтально розташованому важелі 11, можна створити імітацію шарнірно-нерухомого закріплення. Цей стан характеризується поверненням стрілки індикатора у вихідне положення, тобто на «0».

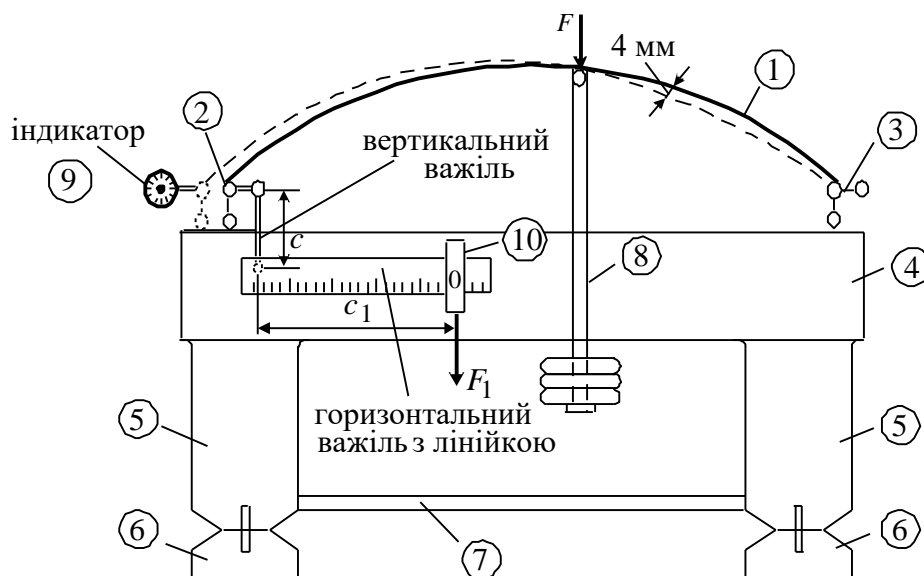


Рис. 1.11. Схема установки СМЗ1Б

Величина розпору визначається за формулою

$$H = F_n \frac{C_1}{C}, \quad (1.2)$$

де  $F_n = 10 H$  – маса противаги;

$C_1$  – плече противаги, відлічене за шкалою горизонтального важеля;

$C = 6,0$  см – довжина вертикального важеля.

Установка **СМ12М** призначена для дослідного визначення положення центра згину тонкостінного стержня несиметричного поперечного перерізу і складається з таких основних частин (рис. 1.12): зразка 5, литого столу 4 зі штативними стояками 7 і утримувачами індикаторів 8, двох колон 3, установлених на регульованих гвинтах-ніжках 1, стяжки 2, гирьового підвісу 9 і набору вантажів 6.

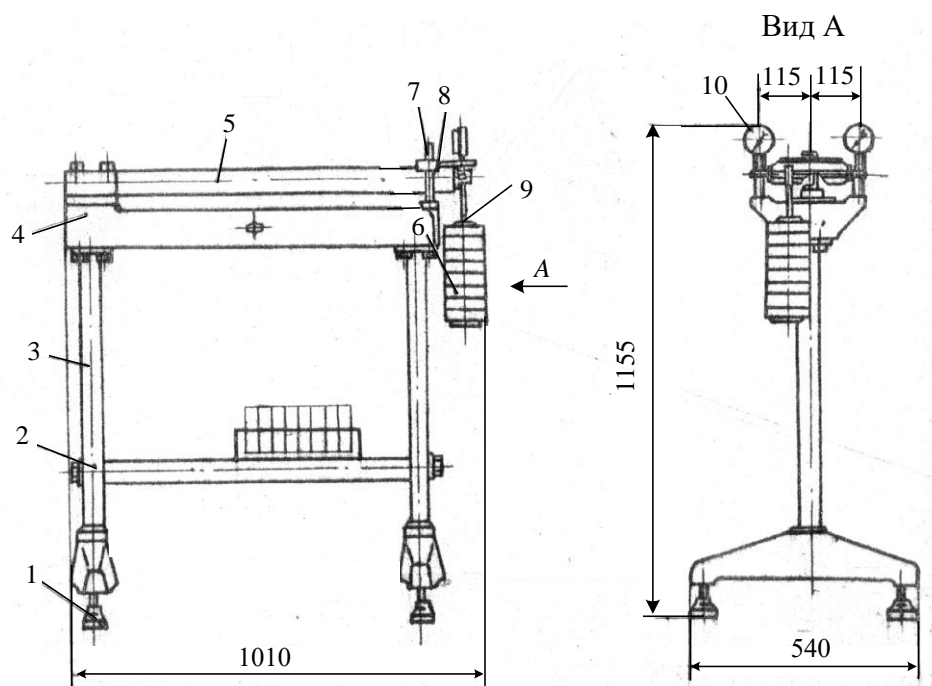


Рис. 1.12. Схема установки СМ12М

Зразок являє собою тонкостінний стержень несиметричного профілю, поперечний переріз якого має вигляд гнутого швелера 5 розміром  $60 \times 30 \times 1,5$  мм, виготовленого зі сталі марки Ст. 3.

Зразок прикріплений до столу установки за допомогою двох болтів.

На правому торці зразка розміщена напрямна рейка, по якій може переміщатися повзунок з гирьовим підвісом. Відлік переміщень повзунка по рейці виконується за шкалою. На кінцях рейки встановлені дві п'яти, в які упираються ніжки індикаторів.

Установка **СМ12М-біс** призначена для дослідного визначення головних напружень у стержні круглого порожнистого перерізу при деформації згину з крученням. Вона складається з таких основних частин (рис. 1.13): литого столу 4, двох колон 3, установлених на регульованих гвинтах ніжках 1, стяжки 2, гирьового підвісу 7 і набору вантажів 6.

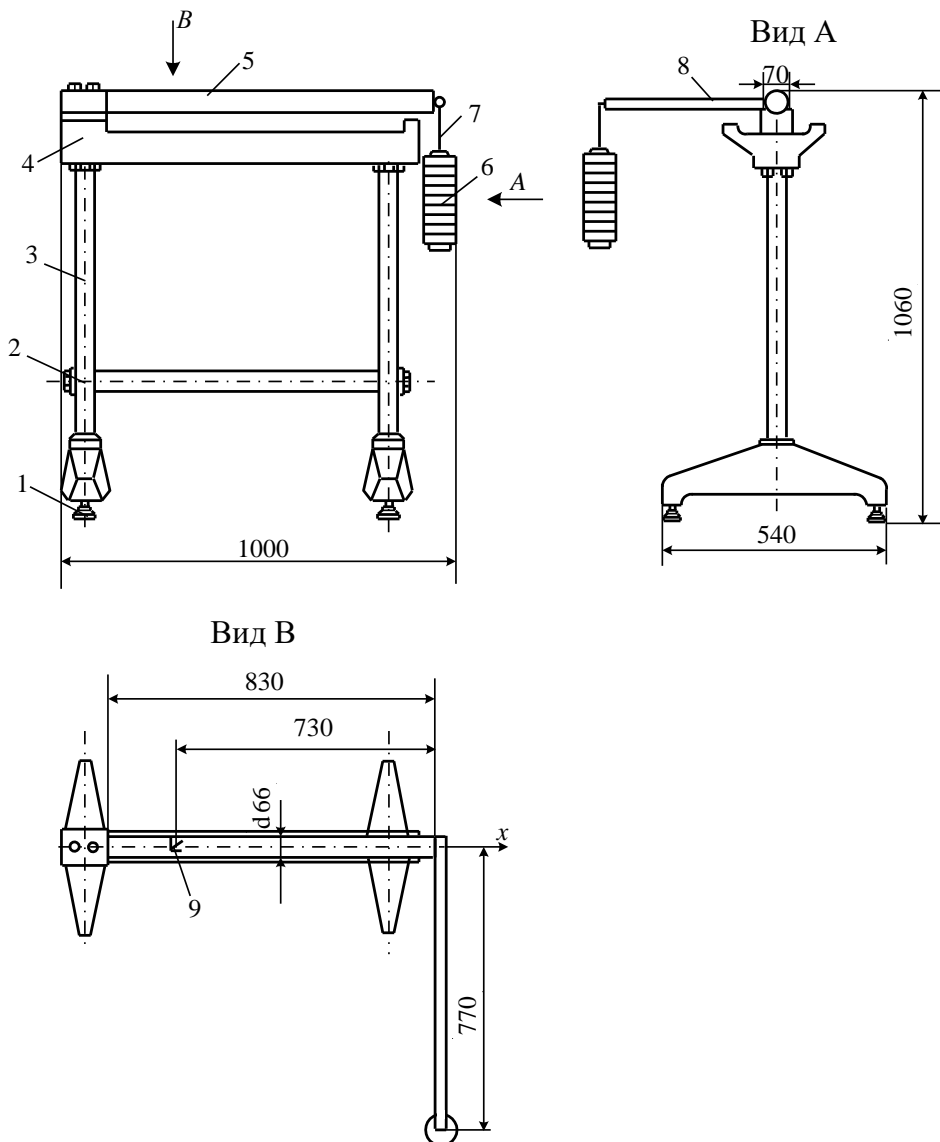


Рис. 1.13. Схема установки СМ12М-біс

Зразок являє собою стержень трубчастого поперечного перерізу 5 із зовнішнім діаметром  $d = 66$  мм із товщиною стінки  $t = 3$  мм, виготовленого з дюралюмінію. Зразок прикріплений до столу установки за допомогою двох болтів. До правого торця зразка прикріплена вантажна трубка 8 з гирьовим підвісом для забезпечення деформації згину з крученням.

Установка **СМ-14М** (рис. 1.14) призначена для випробування порожнистого сталевого стержня круглого поперечного перерізу на кручення в межах пружних деформацій.

Порожнисті вали або труби 5 і 6 жорстко прикріплені до пластини 7. Щоб уникнути впливу деформацій і згинання, між трубами розміщена пластина 8. Верхні кінці важелів 9 і 10 стягнуті гвинтом 11 з динамометром 13 посередині. За допомогою маховика 12 можна збільшувати або зменшувати силу натягу гвинта 11. Сила натягу вимірюється динамометром 13. Якщо сила гвинта 11  $F$ , а довжина важелів  $h$ , то крутний момент буде  $M_{кр} = F \cdot h$ . Він не повинен перевищувати значення, при якому максимальні дотичні напруження (2.36) досягають межі пропорційності матеріалу. З цієї умови визначаємо найбільш припустиме навантаження

$$F_{max} = (W_p \tau_{пц})/h.$$

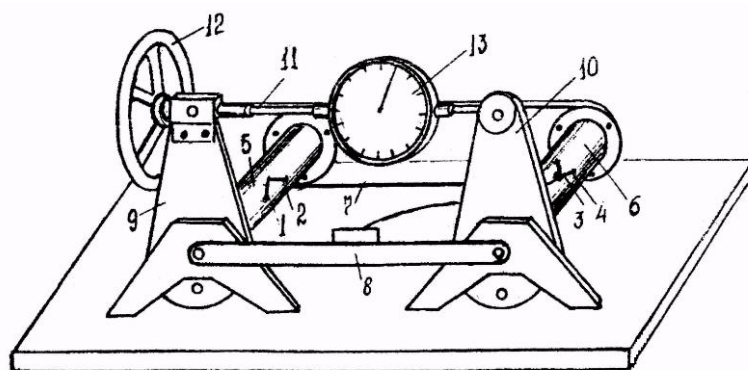


Рис. 1.14. Схема установки СМ-14М

Установка має пристрій для виміру кутів закручування. Для виміру головних деформацій на трубах 5 і 6 наклеєні під кутами  $\pm 45^\circ$  до осі по два тензодатчики 1, 2 і 3, 4 з базою  $\ell = 10$  мм і омичним опором  $R = 100$  Ом. Показання їх реєструють за допомогою тензостанції ВНП-8.

Установка **СМ24Б** (рис. 1.15) призначена для дослідного визначення величин вертикального, горизонтального і кутового переміщень вільного кінця просторового ламаного бруса.

Установка СМ24Б складається з таких основних частин: досліджуваного зразка 8, литого столу 6, двох колон 3, установлених на регульованих гвинтах-ніжках 1, стяжки 2, гирьового підвісу 5, набору вантажів 4, підвіски 9 і двох штативних стояків 10. Досліджуваний зразок являє собою просторову систему з п'яти стержнів, жорстко з'єднаних у вузлах. Кожний зі стержнів системи виконаний із труби У20 ГОСТ 3262 і має зовнішній діаметр  $\varnothing 26$  мм, товщину стінки  $t = 3$  мм. Лівий кінець досліджуваного зразка прикріплений до столу установки. Уздовж стержня зразка може вручну переміщатися підвіска з гирьовим підвісом і набором вантажів. Стержень зразка має шкалу для зручності відліку плечей навантаження. Підвіска може бути прикріплена до зразка за допомогою стопорного гвинта в будь-якій точці шкали.

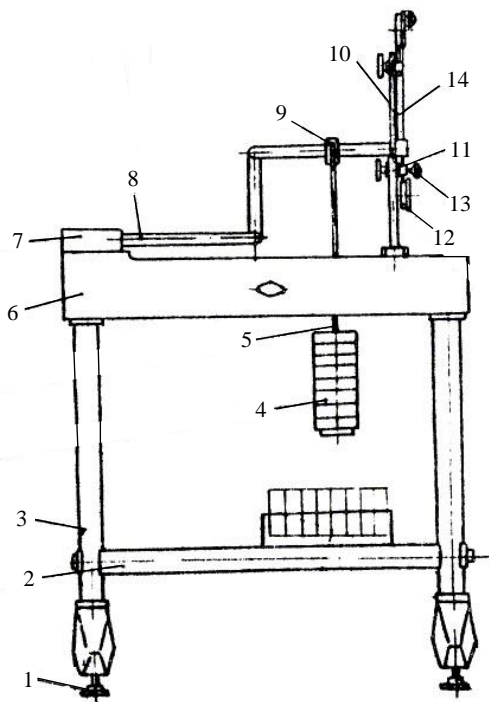


Рис. 1.15. Схема установки СМ24Б:

1 – гвинт-ніжка; 2 – стяжка в зборі; 3 – колона в зборі; 4 – набір вантажів; 5 – підвіс гирьовий; 6 – стіл; 7 – клема; 8 – зразок досліджуваний; 9 – підвіска; 10 – стояк штативний; 11 – клема; 12 – індикатор годинникового типу; 13 – гвинт затискний; 14 – важіль для вимірювання кутів закручування

При навантаженні зразка зосередженим навантаженням вільний кінець його набуває лінійного і кутового переміщення. Вимірювання лінійного і кутового переміщень виконується індикаторами годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм.

Індикатори встановлені в штативних стояках, прикріплених до столу установки за допомогою фланця. Вільний кінець зразка і стержень оснащені п'ятами, у які упираються ніжки індикаторів при вимірюваннях.

#### **1.2.4. Вимірювання переміщень**

Переміщення точок конструкції в процесі випробувань [14–17] вимірюють за допомогою індикаторів (месур) і прогиномірів, а кути повороту – клинометрів. За принципом дії прогиноміри й індикатори випускаються як механічні, так і електричні (датчики переміщень). Індикатори закріплюють на нерухомій опорі (штативі, струбцині) поблизу поверхні випробовуваної конструкції і вони спираються на неї своїм штоком (рис. 1.16). В окремих випадках для забезпечення контакту з контрольованою поверхнею індикатор оснащується додатковою вставкою (рис. 1.17).

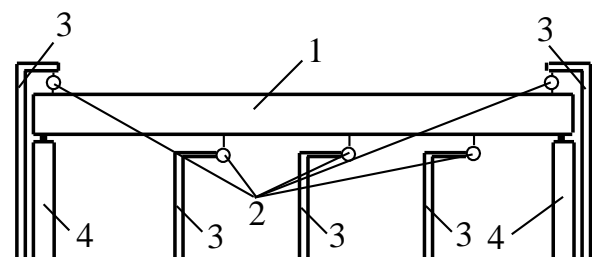


Рис. 1.16. Схема виміру прогинів випробовуваної балки за допомогою індикаторів: 1 – балка; 2 – індикатори; 3 – опори індикаторів; 4 – опори балки

У вітчизняній практиці використовуються три основних типи механічних індикаторів з ціною поділки 0,01; 0,001; 0,002 мм і діапазонами відповідно 10; 1 і 2 мм.

Прогиноміри (рис. 1.18) являють собою прилади, у яких переміщення контрольованих точок об'єкта випробування передаються за допомогою тонкого (0,1 мм) сталевого дроту. Прогиномір може бути встановлений на нерухомій опорі на



деякій відстані від випробовуваної конструкції і з'єднаний дротом з точкою, що підлягає контролю.

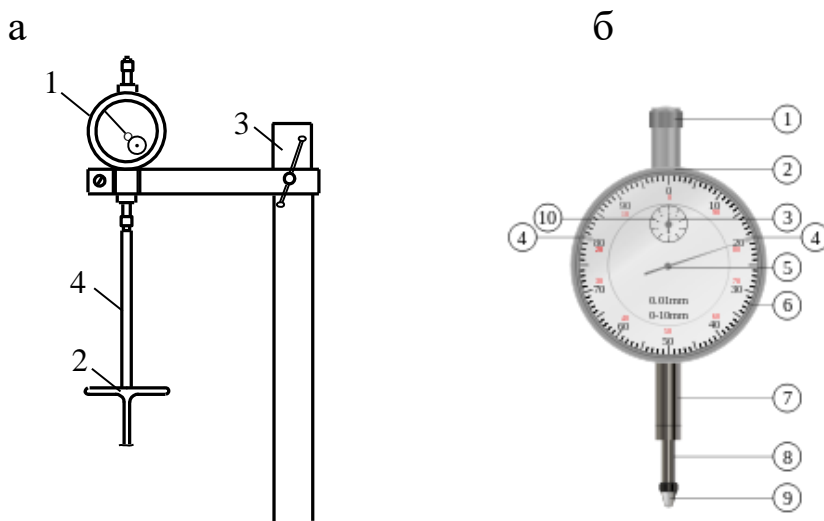


Рис. 1.17. Установка індикатора для виміру з вставкою-штоком:

а – штатив з індикатором:

1 – індикатор; 2 – випробовувана конструкція; 3 – опора індикатора зі струбциною; 4 – вставка-шток;

б – індикатор:

1 – ручка для піднімання й опускання вимірювального стержня; 2 – кільце встановлення початку відліку; 3 – мала стрілка, мм; 4 – уставні вказівки допуску; 5 – велика стрілка, 6 – кругова шкала індикатора; 7 – втулка вимірювального стержня; 8 – вимірювальний стержень; 9 – вимірювальний наконечник; 10 – відлікова (мала) шкала, мм

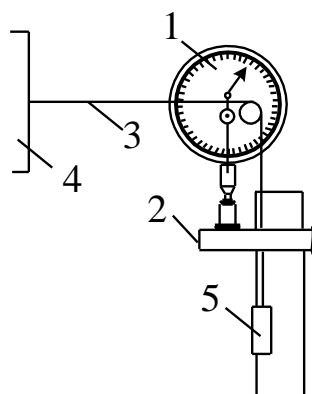


Рис. 1.18. Установка прогиноміра для виміру переміщень:

1 – прогиномір; 2 – опора зі струбциною; 3 – дріт, що передає переміщення; 4 – випробовувана конструкція; 5 – вантаж

Допускається також кріплення прогиноміра на конструкції за умови з'єднання його дротом з нерухомими опорами. Найбільш часто у вітчизняній практиці використовуються прогиноміри Максимова з ціною поділки 0,1 мм і прогиноміри Аістова з ціною поділки 0,01 мм.

**Електричні індикатори** і прогиноміри виготовляються з вико-ристанням тензорезисторів і прецизійних потенціометрів (рис. 1.19, 1.20).

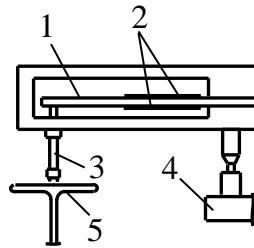


Рис. 1.19. Електроіндикатор з використанням тензорезисторів:  
1 – балочка; 2 – тензорезистори; 3 – шток; 4 – опора зі струбиною; 5 – випробовувана конструкція

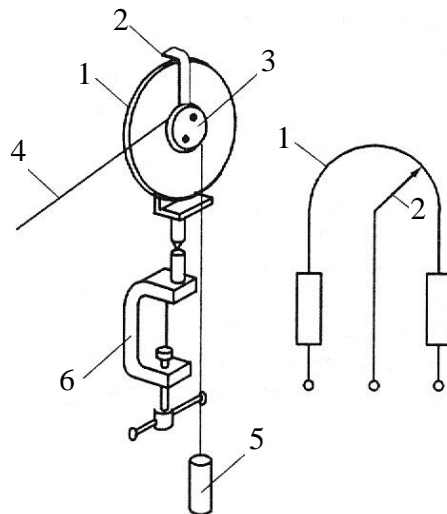


Рис. 1.20. Електропрогиномір реохордного типу:  
1 – реохорд; 2 – повзунок; 3 – шків; 4 – дріт;  
5 – вантаж; 6 – струбина

**Клинометри** застосовуються для виміру збільшення кутів нахилу перерізів випробовуваних конструкцій. Найбільш поширений клинометр Стоппані, у якому для цього

використовується прецизійний рідинний рівень (рис. 1.21). Ціна поділки приладу становить 1 кутову секунду.

Кутові переміщення конструкцій можна також вимірювати за допомогою штанги і двох індикаторів за схемою на рис. 1.22.

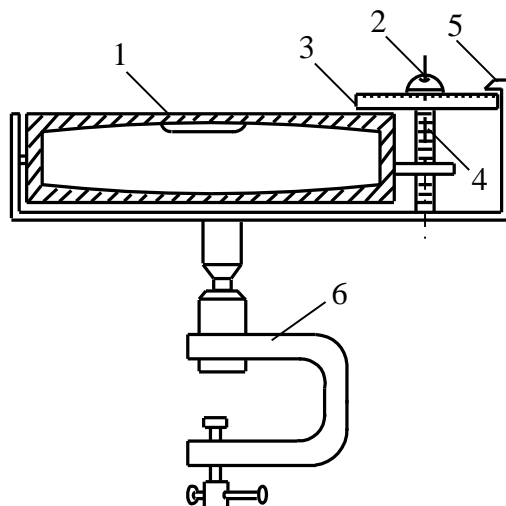


Рис. 1.21. Схема пристрою клинометра Стоппані:  
1 – прецизійний рівень; 2 – кульовий рівень; 3 – лімба;  
4 – мікрометренний гвинт; 5 – ноніус; 6 – струбцина

Для виміру переміщень динамічного походження використовуються як **механічні віброметри** (ВЛ-1, віброграф Гейгера), так і **електричні датчики переміщень**. Найбільш простим у використанні є вібродатчик, що являє собою інерційну масу, закріплену на плоскій пружині, на якій наклеюються два тензистори (рис. 1.23). Власна частота цієї коливальної системи повинна бути приблизно в 10 разів менша від вимірюваної частоти. Вібродатчик попередньо тарується для одержання залежності

$$\Delta J = k \Delta f, \quad (1.3)$$

де  $\Delta J$  – збільшення сили струму у вимірювальній діагоналі моста Уітсона;

$\Delta f$  – амплітуда коливань, вимірюваних вібродатчиком;

$k$  – коефіцієнт пропорційності, який визначається при таруванні. Необхідно брати до уваги, що цей вібродатчик має досить обмежений за частотою й амплітудою діапазон вимірів.

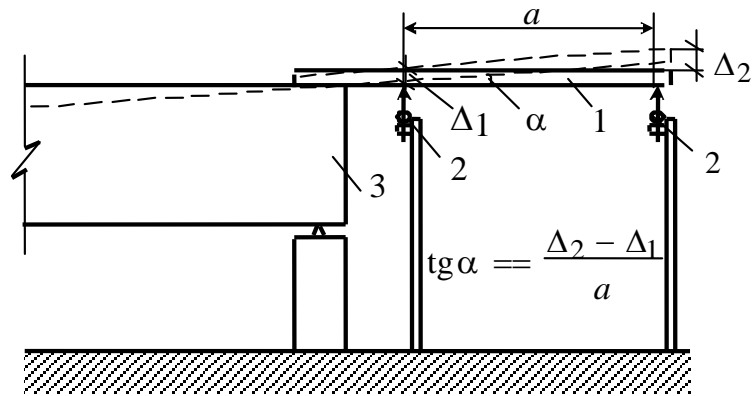


Рис. 1.22. Схема виміру кутів нахилу балки за допомогою рейки та індикаторів: 1 – рейка; 2 – індикатор; 3 – балка

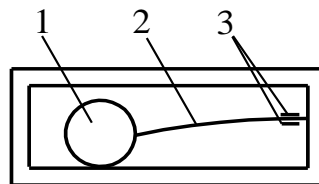


Рис. 1.23. Схема тензометричного вібродатчика:  
1 – плоска пружина; 2 – інертна маса; 3 – тензистори

Динамічні переміщення можливо також вимірювати шляхом відповідної обробки результатів вимірів за датчиками прискорень – акселерометрами.

### 1.3. Вимірювання зусиль

За принципом дії динамометрів, широко використовуваних при вимірі зусиль, розрізняють динамометри механічні (пружинні), гідравлічні (манометричні) і електричні (тензометричні і магнітострикційні). Механічні (пружинні) динамометри підрозділяються на динамометри розтягання і динамометри стискання. У них можуть застосовуватися плоскі, кільцеві і спіральні пружини, деформації яких під навантаженням звичайно вимірюють за допомогою індикаторів. Схеми механічних динамометрів подано на рис. 1.24.

Гідравлічні динамометри являють собою манометричні датчики, як правило, сполучені з гідродомкратами. Електричні динамометри можуть виготовлятися з використанням

тензорезисторів, а також із застосуванням магніострикційних матеріалів. Найбільш поширені схеми електричних динамометрів наведені на рис. 1.25–1.27.

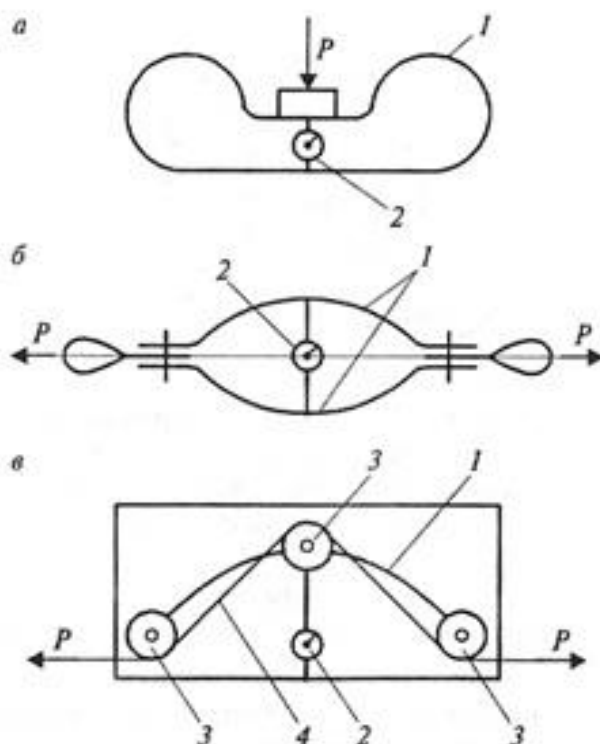


Рис. 1.24. Схеми механічних динамометрів:

- а – динамометр стискання: 1 – пружина; 2 – індикатор;
- б – динамометр розтягання: 1 – пружина; 2 – індикатор;
- в – динамометр для виміру зусилля в тросі: 1 – пружина; 2 – індикатор; 3 – ролики; 4 – трос

Магніострикційні динамометри мають як чутливий елемент кільце з магніострикційного матеріалу (фериту, пермалою та ін.), на якому виконана обмотка (рис. 1.28). Під дією навантаження  $F$  змінюється магнітна проникність матеріалу кільця і, отже, індуктивний опір обмотки.

Як вторинний прилад використовується вимірник індуктивності. Ці динамометри відрзняються дуже малими габаритами, високою чутливістю і твердістю, однак потребують індивідуального тарування внаслідок нестабільності фізичних властивостей фериту.

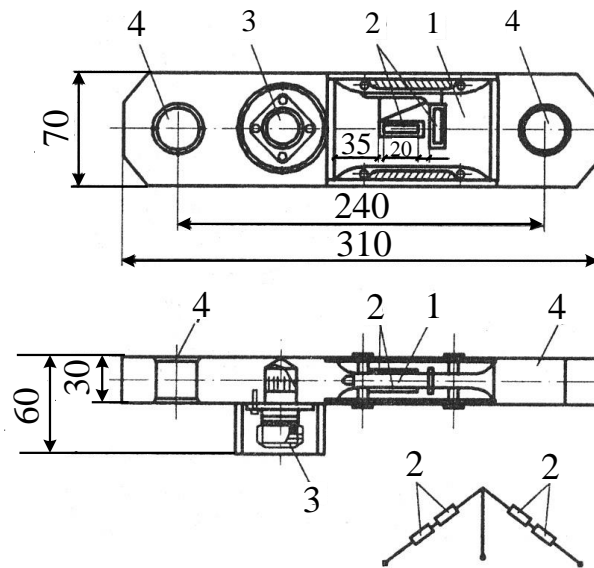


Рис. 1.25. Тензометричний динамометр розтягання:  
 1 – робоча ділянка динамометра; 2 – тензистори;  
 3 – електрорознімання; 4 – кріпильні отвори

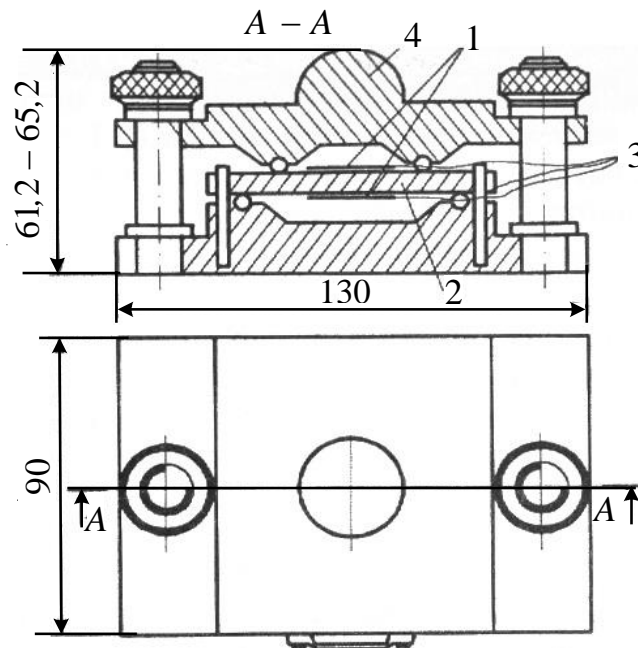


Рис. 1.26. Тензометричний динамометр стискання:  
 1 – тензистори; 2 – балочка; 3 – електроприводи; 4 – опора

Для виміру деформацій конструкцій застосовуються головним чином механічні й електричні тензометри. До найбільш поширених механічних належать важільні тензометри Гуггенбергера типу ТР-1, ТР-2 (рис. 1.29) і тензометри з індикаторами (типу Мане-Рабю і НДІЗБ) (рис. 1.30).

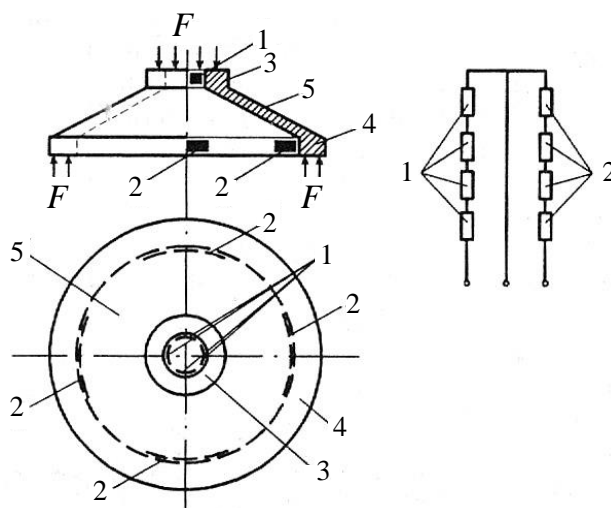


Рис. 1.27. Тензисторна динамометрична муфта:  
 1 – тензистори, що працюють на стискання; 2 – тензистори, що працюють на розтягання; 3 – кільце стискання; 4 – кільце розтягання;  
 5 – конус

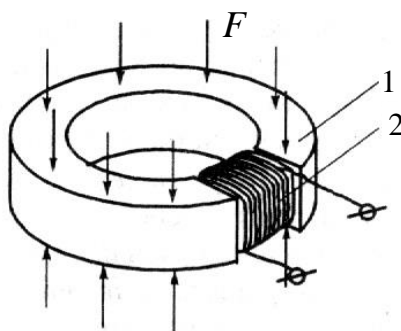


Рис. 1.28. Магнітострикційний динамометр стискання:  
 1 – матеріал; 2 – обмотка

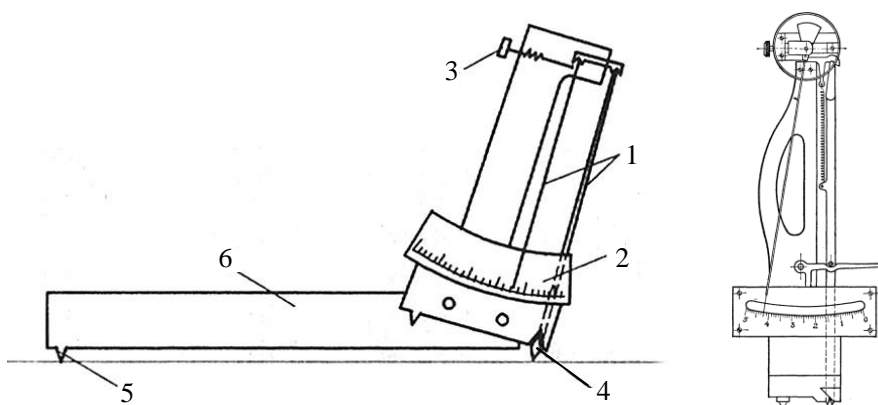


Рис. 1.29. Важільний тензометр Гуггенбергера:  
 1 – важільна система; 2 – шкала; 3 – гвинт установлення нуля;  
 4 – рухома опора; 5 – нерухома опора; 6 – подовжувач бази

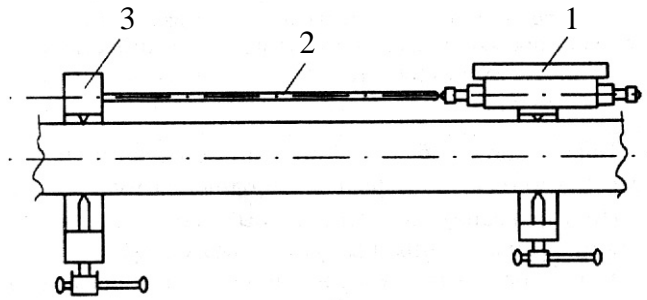


Рис. 1.30. Тензометр на основі індикатора:  
1 – індикатор; 2 – шток; 3 – нерухома опора

#### 1.4. Вимірювання деформацій

Ціна поділки тензометра визначається коефіцієнтом збільшення вимірника і величиною бази. Чим більший коефіцієнт збільшення вимірника і величина бази, тим менша ціна поділки і, отже, вища точність виміру.

При надмірно великій базі вимір деформацій осереднюється на ділянці виміру і штучно згладжуються пікові значення. При занадто великому збільшенні вимірника велике значення мають перешкоди (вплив температури, випадкових струсів тощо). Звичайно параметри тензометра вибирають такими, при яких величина одиниці виміру відповідає  $\varepsilon_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ .

Для тензометра Гуггенбергера це відповідає коефіцієнту збільшення вимірника  $k=1000$  при базі 100 мм, а для тензометра Мане-Рабю і НДІЗБ із використанням індикатора з ціною поділки  $1/100 - k = 100; \ell = 1000$  мм.

Тензометри струноакустичні являють собою групу приладів, робота яких основана на використанні залежності між силою натягу струни і частотою її коливань:

$$f = \frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \quad (1.4)$$

де  $\ell$  – довжина струни;

$\sigma$  – напруження в струні;

$\rho$  – щільність матеріалу струни.



На рис. 1.31 зображена схема пристрою струноакустичного тензометра.

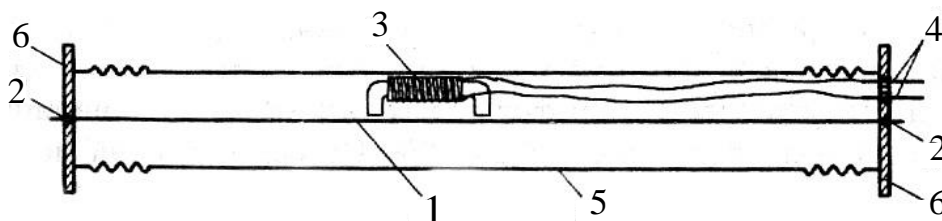


Рис. 1.31. Схема пристрою струноакустичного тензометра:  
1 – струна; 2 – анкерні закріплення струни; 3 – електромагніт;  
4 – електровиводи; 5 – корпус; 6 – анкерні пристрої тензометра

В електромагніт надсилають електричний імпульс, що викликає вільні коливання струни. Коливання струни поблизу полюсів електромагніта збуджують у його обмотці змінний струм, який за частотою збігається з частотою коливань струни. Частоту струму вимірюють за допомогою частотомірів і за тарувальною кривою визначають величину збільшення деформації.

До електричних тензометрів належать прилади, у яких деформація перетворюється в якусь електричну величину, що вимірюється електроприладами: омичний опір, ємність, індуктивність тощо. Найбільшого поширення набули електричні тензометри, що використовують як сприймаючий пристрій тензодатчики опору (тензорезистори).

Тензорезистор являє собою грати з дроту константану, ніхрому або манганіну діаметром 0,02–0,04 мм, приклеєні до підкладки (з паперу або плівки), з вивідними проводами більшого перерізу. Тензодатчик наклеюється на досліджувану деталь і деформується разом з нею. Водночас змінюються довжина і поперечний переріз дроту, що призводить до зміни омичного опору тензодатчика.

Тензометри електричного опору (тензорезистори) конструктивно виконують у вигляді прямого або багатопетльового провідника (дроту, фольги, шару напилення), приклеєного на основу, виготовлену зі спеціального паперу або пластмасової плівки [18]. Принцип їх роботи полягає в тому, що

при розтяганні або стисканні провідника його опір змінюється як унаслідок зміни довжини, так і площі перерізу (рис. 1.32).

Тензорешітка звичайно виготовляється з константану. Дріт має діаметр 10–30 мкм, тензофольга виготовляється товщиною 5–20 мкм.

Напівпровідникові тензорезистори переважно виготовляють з вісмуту шляхом напилювання у вакуумі через маску.

Тензорезистор наклеюють на очищену і знежирену поверхню конструкції спеціальним клеєм. Після твердіння клею виводи тензистора приєднуються до проводів, що зв'язують його з вторинним приладом, а сам тензорезистор, як правило, покривають шаром гідроізоляційної обмазки. При деформації поверхні конструкції остання через шар клею й основу передається на тензорешітку, яка, деформуючись, змінює опір, що фіксується за допомогою реєструвального приладу.

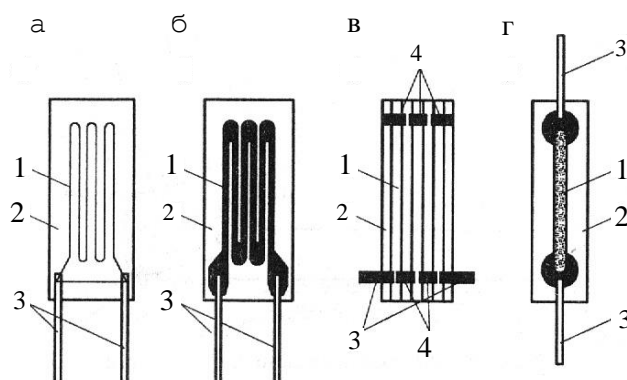


Рис. 1.32. Конструкції тензорезисторів:

- а – дротовий петльовий; б – фольговий петльовий; в – дротовий без поперечної чутливості; г – напівпровідниковий напилюваний;  
1 – тензорешітка; 2 – основа; 3 – виводи; 4 – перемичка

Основною характеристикою тензорезистора є коефіцієнт тензочутливості

$$k_{\delta} = \frac{\Delta R}{\Delta \epsilon}, \quad (1.5)$$

де  $\Delta \epsilon$  – вимірюване збільшення деформації;

$\Delta R$  – збільшення опору, що відповідає вимірюваному збільшенню деформації.

Для дротових і фольгових тензорезисторів значення  $k_T$  лежить у межах 1,8–2,2. Важливою характеристикою тензорезисторів є діапазон вимірів. Для дротових і фольгових тензорезисторів з константовою тензорешіткою він становить  $\varepsilon = (0,2 - 1) \%$ . Не менш важливою метрологічною характеристикою тензорезисторів є також «опір витoku»  $R_y$ , тобто опір ізоляції між деталлю, на яку він наклеєний, і тензорешіткою.

Опір витoku вимірюють після наклеювання тензорезистора і повного твердіння клею. Для цього використовується маятниковий або транзисторний мегоомметр. У жодному разі не можна застосовувати високовольтний мегоомметр, призначений для виміру опору ізоляції потужнострумовевого промислового електроустаткування. Нормальні значення опору витікання не повинні бути нижчими від 18–20 МОм. При плануванні експерименту варто підібрати тензорезистори за опором і базою. Малобазові тензорезистори з базою 5–10 мм застосовуються, як правило, для виміру полів деформацій з великими градієнтами. Однак вони мають звичайно малий опір (що вимагає спеціального реєструвального приладу, з низькою напругою живлення і, отже, зниженою чутливістю) і підвищене значення поперечної чутливості, що вносить похибки в результати виміру. Тензорезистори з великою базою 25–50 мм і більше та опором 50–120 Ом найбільш вживані в практиці експериментальних досліджень. Кількість їх у групі повинна дорівнювати кількості активних, що обслуговуються однією розпаювальною колодкою, плюс компенсаційні – 1–2, плюс контрольні – 1–2. Розкид тензорезисторів за опором усередині групи не повинен перевищувати 0,1 %.

Реєструвальні прилади для виміру за тензорезисторами оснований, як правило, на принципі моста Уйтсона. Зрівноваження моста здійснюється або вручну (прилад ІСД-2), або автоматично, використовуючи переміщення реохорда реверсивним двигуном (прилади АІ-1, АІ-2, ТК-1 і ТК-2), або шляхом електронної крокової компенсації (прилади СІТ-2, СІТ-3). Живлення вимірювального моста може здійснюватися постійним або змінним струмом. У приладах з реохордним зрівноважуванням знімання здійснюється за шкалою реохорда, а в приладах з електронною кроковою компенсацією – в цифровому вигляді на табло (СІТ-2, СІТ-3, ТК-1, ТК-2). У приладових системах СІТ-2 і СІТ-3 передбачена можливість безпосередньої передачі відліків у комп'ютер і обробки їх паралельно з вимірами. Тензометрична

мережа звичайно складається з декількох груп тензорезисторів, наклеєних на поверхню випробовуваної конструкції. Обсяг групи звичайно визначається кількістю тензорезисторів, що підключаються до однієї розпаювальної колодки. З них 12–16 шт., так званих активних, вимірюють безпосередньо деформації конструкції, 1–2 тензорезистори виконують функції схемної термокомпенсації і включаються в друге плече зовнішнього напівмоста. Вони наклеюються на пластинки з того самого матеріалу, що і конструкція, і поміщаються в ті самі температурні умови, що й активні. Зміни опору активних і компенсаційних тензорезисторів, викликані зміною температури, взаємно компенсуються і не впливають на результати вимірів. Приклад тензометричної мережі наведено на рис. 1.33.

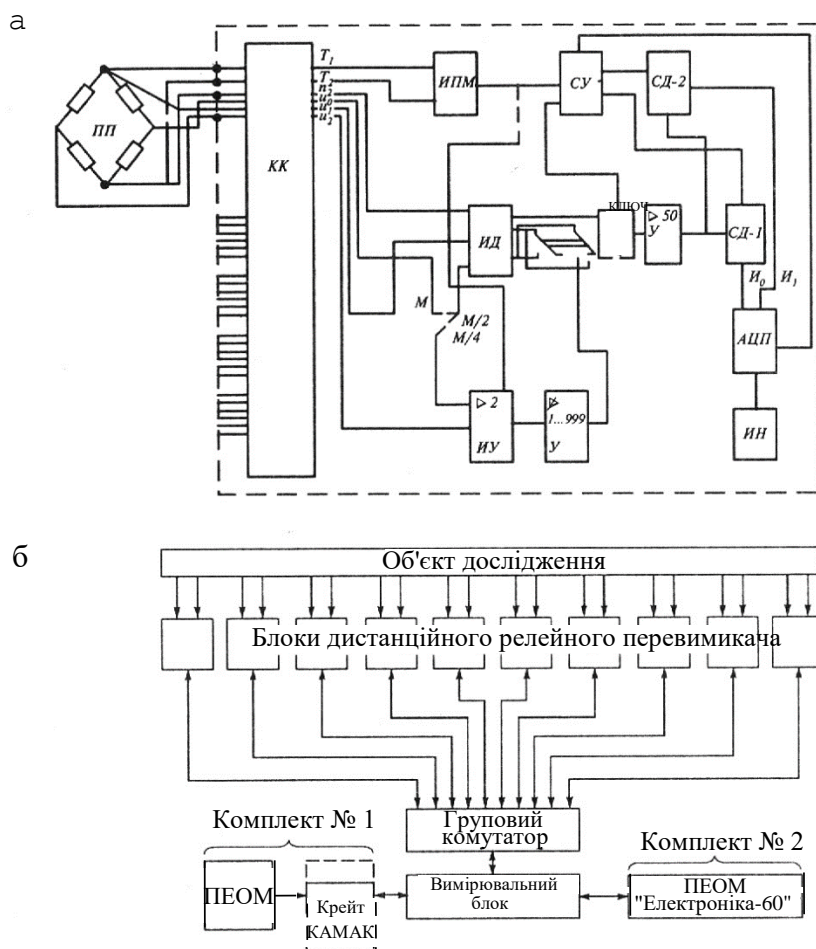


Рис. 1.33. Схеми тензометричних мереж:

а – схема тензомережі з груповою комутацією (функціональна схема ЦТІ-1); ПП – первинні перетворювачі; КК – комутатор каналів; ИПМ – джерело живлення моста; СУ – підсилювач сигналів; ИУ – імпульсний підсилювач; СД-1, СД-2 – демодулятори; б – схема тензомережі з напівмостовою комутацією (структурна схема СІТ-2)

## 2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

### 2.1. Випробування сталі на розтягання з визначенням основних механічних характеристик

*Мета роботи:* ознайомитися з методикою проведення випробувань на розтяг та з випробувальною машиною, на практиці випробувати сталевий зразок, визначити характеристики міцності та пластичності маловуглецевої сталі і засвоїти методику випробувань. На підставі отриманих результатів встановити марку сталі.

#### 2.1.1. Короткі теоретичні відомості

Щоб виконати розрахунок на міцність будь-якої деталі машини чи елемента конструкції, треба насамперед знати механічні властивості матеріалу, з якого вони виготовлені. Ці властивості визначають шляхом спеціальних випробувань матеріалів. Найбільш поширеним є випробування матеріалів на розрив при статичному навантаженні. Їх виконують на стандартних нормальних десятикратних циліндричних зразках, виготовлених з випробовуваного матеріалу (рис. 2.1).

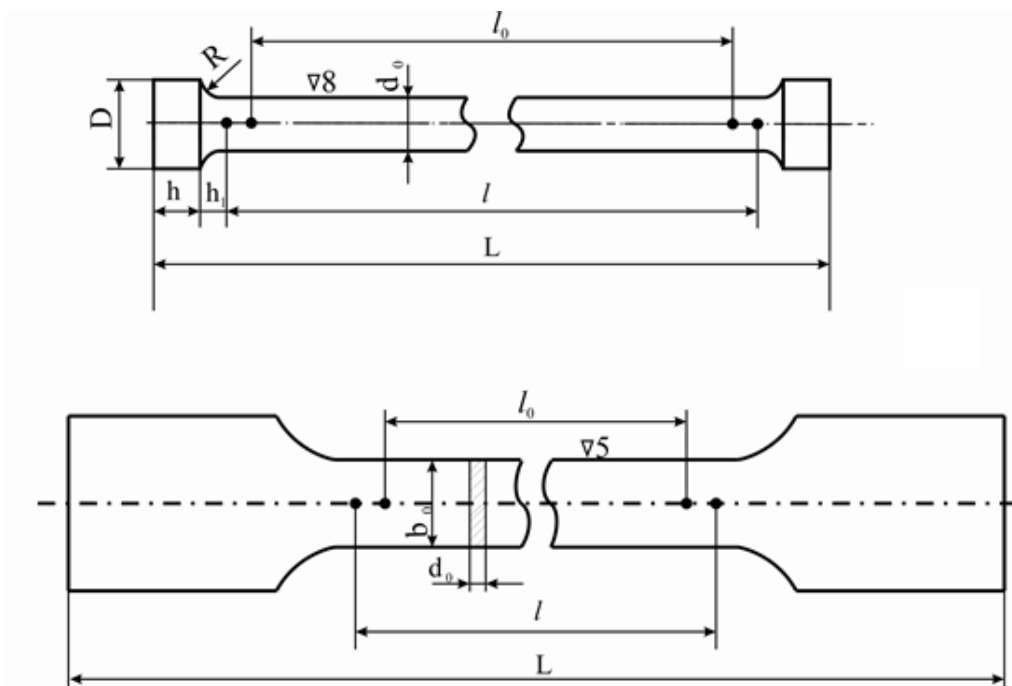


Рис. 2.1. Схема стандартного зразка

Характерним для таких зразків є те, що відношення розрахункової довжини  $l_0$  до діаметра  $d_0$  дорівнює 10, або

$$l_0 = 11,3\sqrt{A_0}, \quad (2.1)$$

де  $A_0$  – площа поперечного перерізу зразка.

*Зразки для випробування.* Зразок повинен бути такої форми, щоб можна було здійснити в межах його робочої частини так званий лінійний спрямований стан. Такій вимозі відповідають нормальні (стандартні) зразки двох видів – круглі і плоскі, розміри і форми яких показані на рис. 2.1.

Як основні зразки застосовуються циліндричні зразки з діаметром  $d_0 = 10$  мм і початковою розрахунковою довжиною  $l_0 = 10d_0$  і  $l_0 = 5d_0$ . Зразки з розрахунковою довжиною  $l_0 = 5d_0$  називаються «короткими», а зразки з  $l_0 = 10d_0$  – «довгими».

Для здійснення розтягування до зразка вздовж його осі прикладаються дві сили, рівні за величиною і протилежно спрямовані. Зразок круглого перерізу діаметром  $d_0 = 10$  мм має середню циліндричну частину довжиною  $l_0 = 11d_0 = 110$  мм, яка з кожного боку переходить у галтель і закінчується циліндричною головкою висотою  $h = 1,25d_0$ . Головки необхідні для захоплення зразка в розривній машині.

Перехід циліндричної частини в галтель робиться для отримання розриву зразка в його розрахунковій частині, оскільки за відсутності галтелі розрив зразка був би неминучий по перерізу в місці примикання середньої частини зразка до головок через концентрацію напружень.

Крім розглянутих зразків з  $d_0 = 10$  мм, допускається застосування пропорційних зразків інших розмірів ( $d_0 = 20$  мм).

У всіх випадках виготовлення пропорційних зразків для отримання порівняльних результатів необхідно дотримуватися між розрахунковою довжиною зразка і діаметром поперечного перерізу такого ж відношення, яке має нормальний зразок, тобто  $l_0/d_0 = 10$ .

Ця вимога впливає із закону подібності, який полягає в тому, що результати випробувань при рівних розмірах нормальних зразків будуть порівнянні тільки при геометричній

подібності як елементів форми зразка, так і розташування точок прикладання діючих на них сил.

Допускається застосування пропорційних зразків, розміри яких у два або більше разів менші від розмірів нормального зразка, а також п'ятикратних зразків. З листового металу, як правило, виготовляють плоскі зразки. Щоб дотримуватись подібності при випробуваннях, співвідношення (2.1) має поширюватися і на плоскі зразки.

Для випробування на розтягання застосовують важільні або гідравлічні розривні машини (див. п. 1.2), що дають змогу в процесі випробувань визначити зусилля  $F$  і відповідну до них абсолютну деформацію зразка  $\Delta\ell$ . Зразок вставляють у затискачі машини і статично навантажують до руйнування. Випробувальна машина автоматично запише за допомогою спеціального діаграмного апарата графік залежності  $F = f(\Delta\ell)$ , який називається діаграмою розтягання. Характер діаграми розтягання залежить від властивостей випробовуваного матеріалу. Типовий вигляд такої діаграми для маловуглецевої сталі зображено на рис. 2.2.

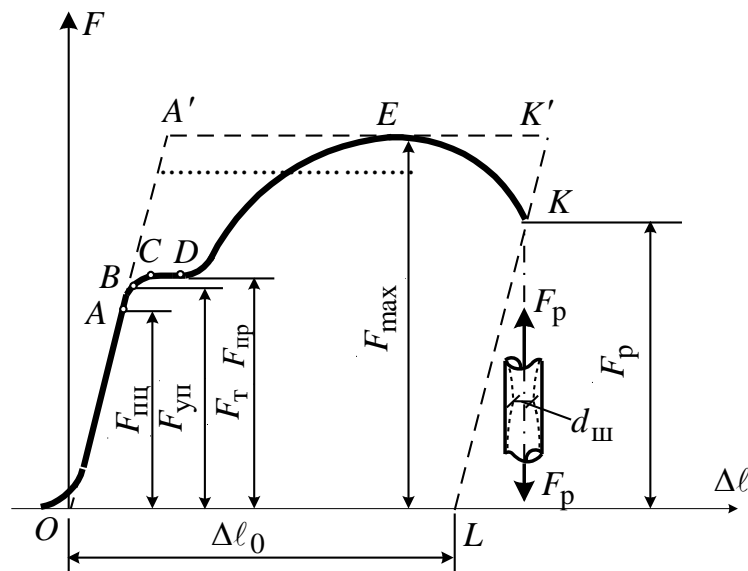


Рис. 2.2. Діаграма  $F - \Delta\ell$

Початкова криволінійна ділянка діаграми є наслідком обтискування головок зразка та усунення щілин між деталями випробувальної машини. Вона не відображає властивостей

випробовуваного матеріалу, тому має бути усунена. Для цього треба прямолінійну ділянку діаграми продовжити до перетину з віссю абсцис. Точку перетину треба вважати за початок координат.

На діаграмі розтягання (рис. 2.2) можна виділити характерні ділянки, які відповідають різним стадіям деформування зразка.

*Ділянка пропорційності OA.* На цій стадії розтягання зразка, тобто якщо  $F < F_{\text{пц}}$ , справедливий закон Гука. Після розвантаження початкова довжина зразка відновлюється, а пружна деформація зникає.

*Ділянка пружності OAB.* Характерним для цієї стадії розтягання є те, що, доки сила  $F < F_{\text{уп}}$ , деформації, спричинені нею, будуть зникати після розвантаження. Процес розвантаження за такої умови зобразиться тією самою лінією, що й навантаження. Треба відмітити, що не для всіх матеріалів ділянка пружності більша за ділянку пропорційності. Точки А і В близькі одна до одної і, як правило, різницею між їх положенням можна нехтувати.

*Ділянка текучості ВСД,* горизонтальна частина якої (СД) називається ділянкою текучості. На цій стадії розтягання подовження зразка зростає при сталому значенні розтягальної сили, яку позначають  $F_{\text{т}}$ . Такий процес деформації називається текучістю матеріалу. Він супроводжується залишковим (пластичним) подовженням, яке не зникає після розвантаження.

Початок пластичної деформації відповідає настанню деякого критичного стану металу, який можна виявити не тільки за залишковими деформаціями, але й за іншими ознаками. За пластичної деформації підвищується температура зразка: у сталі змінюється електропровідність та магнітні властивості. Водночас на полірованій поверхні зразків, особливо плоских, помітне потьмяніння, що є наслідком появи густої сітки ліній. Ці лінії мають назву ліній Людерса–Чернова. Вони нахилені до осі зразка приблизно під кутом  $45^\circ$  і становлять мікроскопічні нерівності, що виникають унаслідок зсувів у тих площинах кристалів, де діють найбільші дотичні напруження. Цим і пояснюється утворення пластичної деформації.

*Ділянка зміцнення ДЕ.* На цій стадії розтягання зразка знову збільшується опір матеріалу деформуванню, що приводить до



зростання зусилля до найбільшого значення  $F_{\max}$  за час випробування. Після цього на ділянці ЕК розтягувальне зусилля зменшується до  $F_p$ , при якому і відбувається розрив зразка. Зменшення зусилля на кінцевій стадії випробування пояснюється тим, що після досягнення зусиллям найбільшого значення деформація зразка відбувається переважно на невеликій довжині, що призводить до місцевого звуження у вигляді шийки (рис. 2.2) і, як наслідок, до зменшення зусилля.

Якщо на ділянці зміцнення при навантаженні  $F < F_{\max}$  розвантажити зразок, то характеристики міцності і пружності матеріалу збільшаться при повторному навантаженні, а пластичності – зменшаться. Це явище називається наклепом. У деяких випадках воно небажане і його намагаються усунути, в інших же випадках, навпаки, наклеп корисний, і його утворюють штучно.

Після розриву зразка пружна частина його загальної деформації зникає, а залишається тільки пластична  $\Delta l_0$ . Тому на діаграмі розтягання (рис. 2.2) лінія  $KL$  паралельна  $OA$ , а  $OL = \Delta l_0$ .

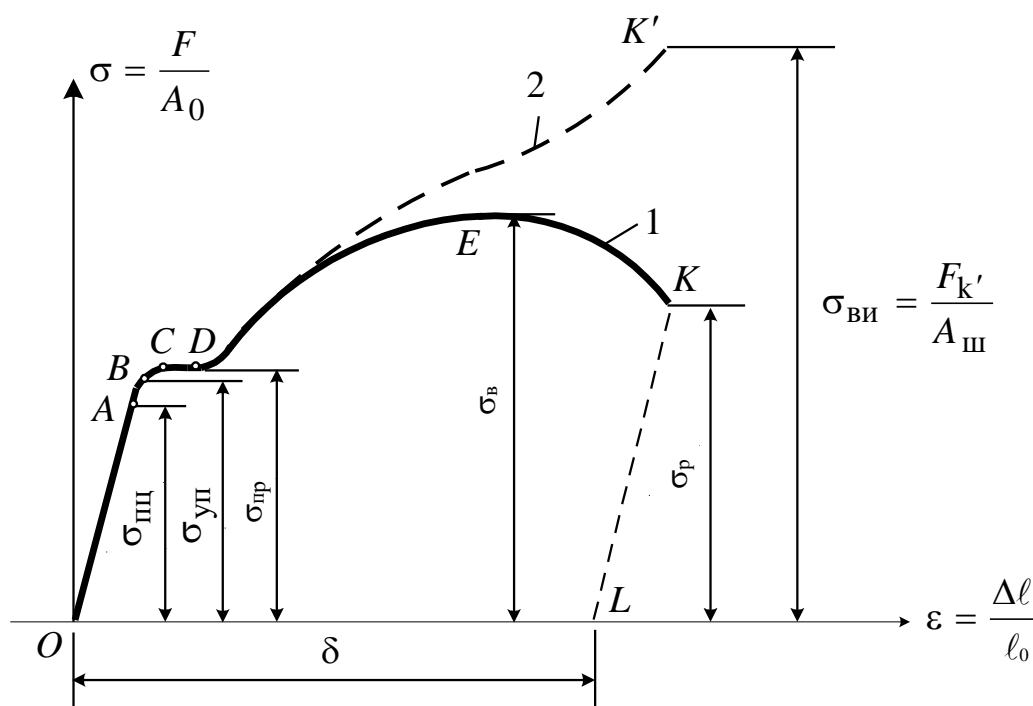


Рис. 2.3. Діаграма умовних напружень (1);  
діаграма дійсних напружень (2)

Діаграма розтягання (рис. 2.2) характеризує не тільки властивості матеріалу, а й розміри випробовуваного зразка. Щоб виключити вплив розмірів зразка, ординати ділять на початкову площу поперечного перерізу  $A_0$ , а абсциси – на початкову розрахункову довжину зразка  $l_0$ . Одержана внаслідок цього діаграма  $\sigma = f(\varepsilon)$  називається діаграмою умовних напружень (рис. 2.3, крива 1).

Оскільки  $A_0 = \text{const}$  і  $l_0 = \text{const}$ , то ця діаграма відрізняється від діаграми розтягання тільки масштабом. Таку назву вона дістала тому, що при її побудові площа поперечного перерізу зразка умовно вважалась сталою в процесі випробування. Насправді площа поперечного перерізу зразка змінюється при випробуванні, тому дійсні напруження (крива 2) будуть відрізнятися від умовних.

Найбільші умовні напруження на характерних ділянках діаграми умовних напружень (рис. 2.3) називаються характеристиками міцності матеріалу.

Найбільше умовне напруження на ділянці пропорційності, після якого порушується закон Гука, називається межею пропорційності. Вона визначається за формулою

$$\sigma_{nc} = F_{nc} / A_0. \quad (2.2)$$

Для ст. 3 межа пропорційності приблизно дорівнює  $\sigma_{nc} = 195\text{--}200$  МПа.

Найбільше умовне напруження на ділянці пружності, після якого починають виникати пластичні деформації, називається межею пружності, що визначається формулою

$$\sigma_{yn} = F_{yn} / A_0. \quad (2.3)$$

Для ст.3  $\sigma_{yn} = 20\text{--}210$  МПа.

Умовне напруження, при якому деформація зразка відбувається у разі постійного розтягувального зусилля, називається межею текучості, що визначається формулою

$$\sigma_m = F_m / A_0. \quad (2.4)$$

Для ст.3  $\sigma_m = 220\text{--}250$  МПа.

Багато матеріалів явно виражену ділянку текучості на діаграмі не мають, тому застосовують термін межа текучості умовна  $\sigma_{02}$ , яка являє собою напруження, при якому остаточне подовження досягає 0,2 % вимірюваної довжини зразка  $\sigma_{02} = \frac{F_{02}}{A_0}$ .

Найбільше умовне напруження за час випробування зразка називається тимчасовим опором – для пластичних матеріалів або межею міцності – для крихких матеріалів.

Тимчасовий опір знаходять за формулою

$$\sigma_e = F_{max} / A_0. \quad (2.5)$$

Для ст.3 тимчасовий опір  $\sigma_e = 370\text{--}470$  МПа.

Умовне напруження в момент розриву зразка, яке можна визначити за формулою  $\sigma_p = F_p / A_0$ , є надто умовним і не характеризує механічні властивості матеріалу.

Відношення навантаження  $F_k$  на момент розриву до площі  $A_{ш}$  в місці розриву називають дійсним опором розриву.

$$\sigma_{ви} = F_k / A_{ш}. \quad (2.6)$$

Дійсне напруження в момент розриву буде значно більшим тому, що площа перерізу в місці розриву зразка (шийки)  $A_{ш}$  значно менша, ніж початкова площа  $A_0$ .

Дійсне напруження в момент розриву (в шийці) у зразку із ст. 3 досягає 900–1000 МПа.

При пружних деформаціях різницею між початковою і дійсними площами поперечного перерізу зразка можна знехтувати. Тому умовне та дійсне напруження до площадки текучості можна вважати однаковими. З урахуванням цього на рис. 2.3 пунктиром побудована діаграма дійсних напружень (2). З неї видно, що дійсні напруження в процесі випробувань зростають аж до руйнування зразка.

Здатність матеріалу пластично деформуватися без руйнування називається пластичністю. Пластичність матеріалу

можна характеризувати відносним залишковим подовженням зразка в момент розриву у відсотках, тобто

$$\delta = (\Delta \ell_0 / \ell_0) 100 \% . \quad (2.7)$$

Залежно від значення всі матеріали умовно поділяють на пластичні, якщо  $\delta > 5 \%$ , та крихкі, якщо  $\delta < 5 \%$ . До пластичних матеріалів належать маловуглецева сталь, мідь, цинк, олово і т. ін. До крихких матеріалів належать чавун, скло, камінь, бетон тощо.

Відносне залишкове звуження площі поперечного перерізу зразка також характеризує пластичні властивості матеріалу. Чим більше відносне звуження після розриву, тим більша пластичність матеріалу. Наприклад, для маловуглецевої сталі марки ст. 3  $\psi = 55 - 65 \%$ .

$$\psi = (A_0 - A_{ш}) 100 \% / A_0 . \quad (2.8)$$

Площа діаграми розтягання (рис. 2.2), як відомо з фізики, визначає витрати роботи на пластичне деформування та руйнування зразка. Її можна визначити за наближеною формулою

$$W = S_{OABCDEKL} = \eta S_{OA'K'L} = \eta F_{\max} \Delta \ell_0 , \quad (2.9)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт заповнення діаграми (для маловуглецевої сталі  $\eta \cong 0,85$ ), або заміряти планіметром (у цьому випадку  $W = Smn$ , де  $m$  і  $n$  – масштабні коефіцієнти відповідно сили і деформації).

Відношення  $W$  до об'єму розрахункової частини зразка, тобто

$$w = W / V_0 , \quad (2.10)$$

називається питомою роботою деформацій.

Вона характеризує як міцність, так і пластичність матеріалу, тобто здатність чинити опір в'язкому руйнуванню. Чим більша питома робота деформацій  $w$ , тим більш здатний матеріал поглинати енергію руйнування і, як наслідок, чинити опір динамічному навантаженню.

### 2.1.2. Послідовність проведення дослідів

1. Виміряти діаметр зразка і позначити рисками його розрахункову довжину.

2. Закріпити зразок у затискачах машини так, щоб не було перекосів і навантаження спрямовувалось уздовж осі зразка.

3. Підготувати до роботи діаграмний апарат, урівноважити траверсу так, щоб при відсутності навантаження зразка стрілки силовимірювача були в нульовому положенні та, обертаючи вручну барабан, накреслити на папері нульову лінію.

4. Увімкнути електродвигун випробувальної машини і плавно з невеликою швидкістю навантажувати зразок до розриву. Переміщення рухомого затискача машини, що спричиняє навантаження, слід здійснювати зі швидкістю до 20 мм/хв, інакше навантаження матиме динамічний характер і результати випробувань будуть неточними.

5. У процесі навантаження зафіксувати значення сил, відповідне межі текучості  $F_T$  і міцності  $F_{max}$ , записати в бланк лабораторної роботи 1 (дод. 1).

6. Після зруйнування зразка вимкнути електродвигун, вивільнити обидві частини зразка із затискачів машини, зняти з барабана папір з діаграмою та замітити по шкалі найбільше навантаження  $F_{max}$  за час випробування.

7. Скласти обидві частини зразка разом і виміряти штангенциркулем відстань між рисками  $l_1$  та його діаметри:  $d_0$  – на відстані від місця розриву і  $d_{ш}$  – у місці розриву і занести в бланк лабораторної роботи 1 (дод. 1).

8. Обробити діаграму розтягання. Насамперед треба накреслити координатні осі. Вісь абсцис збігається з нульовою лінією діаграми, а вісь ординат треба провести з точки перетину продовження початкової прямолінійної ділянки діаграми з нульовою лінією. Потім обчислити масштаб сил та абсолютних подовжень і за масштабом визначити найбільші навантаження на характерних ділянках діаграми:  $F_T$  та  $F_{max}$ .

9. Визначити характеристики міцності та пластичності випробовуваної сталі за формулами (2.2) – (2.8) і питому роботу деформацій за формулою (2.10).

## Контрольні запитання

1. Яка деформація називається пружною, а яка залишковою?
2. Що називається межею пропорційності, текучості та міцності?
3. Що називається абсолютним і відносним подовженням?
4. Як визначається робота, що витрачена на розтягання зразка?
5. Який вигляд має діаграма розтягання зразка з пластичного матеріалу?
6. Перерахуйте характеристики міцності та пластичності матеріалу.
7. Чим відрізняються дійсні напруження від умовних?
8. Як визначається питома робота деформацій і які властивості матеріалу вона характеризує?
9. Яка механічна характеристика матеріалу визначає одночасно його міцність і пластичність?
10. Вкажіть абсолютну пружну та пластичну деформації зразка на діаграмі розтягання.
11. Чому дорівнює на діаграмі розтягання пружна робота деформації?
12. На якій ділянці діаграми розтягання утворюється на зразку шийка?
13. Який фізичний сенс має коефіцієнт заповнення діаграми  $\eta$ ?

## 2.2. Визначення модуля пружності сталі при розтяганні

*Мета роботи:* визначити межі пропорційності  $\sigma_{\text{пц}}$  і модуля пружності  $E$  сталі.

### 2.2.1. Короткі теоретичні відомості

У цій роботі треба насамперед визначити межу пропорційності  $\sigma_{\text{пц}}$  для сталі при розтяганні. Межею пропорційності називається максимальне напруження, до якого застосовується закон Гука, тобто до якого подовження  $\Delta \ell$

пропорційне навантаженню. Межі пропорційності на діаграмі розтягання відповідає точка А і навантаження  $F_{\text{пц}}$  (рис. 2.4). У точці А пряма закінчується і далі переходить у криву. Межа пропорційності визначається за формулою (2.2)

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

де  $A_0$  – площа початкового поперечного перерізу випробовуваного сталевго стержня. Отже, необхідно знайти  $F_{\text{пц}}$ , до якого існує пропорційна залежність між  $F$  і  $\Delta\ell$ . Отже, доведеться змінювати навантаження  $F$  і спостерігати, як у цьому випадку змінюється абсолютне подовження  $\Delta\ell$  зразка.

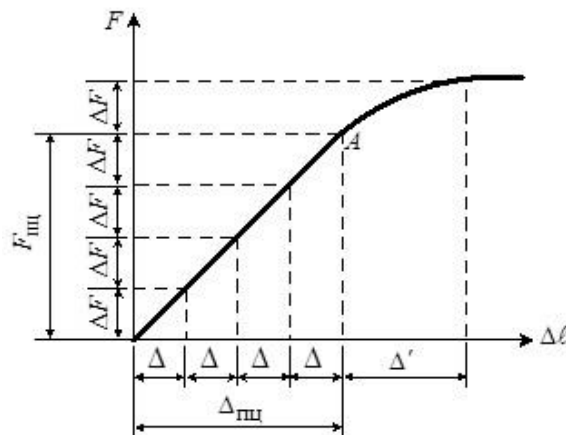


Рис. 2.4. Початкова ділянка діаграми  $F - \Delta\ell$

Зміну навантаження легко знайти спостерігаючи за стрілкою манометра, що переміщається при зміні навантаження. При цьому випробуванні навантаження збільшується рівними ступенями, що позначені через  $\Delta F$  (рис. 2.4). Якщо справедливий закон Гука, то кожному ступеню  $\Delta F$  навантаження має відповідати однакове подовження зразка  $\Delta\ell$ , що надалі позначаємо через  $\Delta$ .

Отже, за законом Гука, до межі пропорційності повинна бути рівність

$$\Delta = \frac{\Delta F \cdot \ell_0}{EA_0}. \quad (2.11)$$

Якщо навантаження перевищить  $F_{\text{шц}}$ , то подовження стержня будуть рости швидше, ніж варто було б за законом Гука, й один ступінь навантаження  $\Delta F$  викликає подовження  $\Delta'$ , що буде більшим від колишнього  $\Delta$ . Необхідно зазначити, що закон Гука не ідеально відображає дійсність, але досить близько підходить до неї, тому зазначені на рис. 2.4 подовження  $\Delta$  незначно відрізняються один від одного.

Технічними умовами треба вважати, що матеріал перестав підлягати закону Гука, якщо

$$\Delta' \geq 1,5\Delta.$$

Отже, за навантаження  $F_{\text{шц}}$ , що відповідає межі пропорційності, приймають те його значення, при збільшенні якого на  $\Delta F$  з'явиться подовження  $\Delta' \geq 1,5\Delta$ .

З формули (2.11) знаходимо

$$E = \frac{\Delta F \ell_0}{\Delta \cdot A_0}, \quad (2.12)$$

$$\Delta = \Delta a_{\text{cp}} \cdot k,$$

де  $\Delta a_{\text{cp}}$  – середнє збільшення показань тензометра;

$k$  – коефіцієнт збільшення тензометра.

Позначимо  $\Delta F / A_0 = \Delta \sigma$  й одержимо остаточно

$$E = \frac{\Delta \sigma \cdot \ell_0}{\Delta a_{\text{cp}} \cdot k}. \quad (2.13)$$

### ***2.2.2. Послідовність проведення досліду***

1. Визначити розміри поперечного перерізу зразка і занести в бланк лабораторної роботи 2 (дод. 1).

2. Установити на зразок підйомний тензометр.

3. Увімкнути випробувальну машину і навантажувати зразок ступенями  $\Delta F$ , записуючи в бланк лабораторної роботи 2 (дод. 1) для кожного ступеня показання тензометра.

4. Обробити результати досліду і визначити середнє збільшення абсолютного подовження зразка.



5. Визначити навантаження, що відповідає межі пропорційності матеріалу  $F_{\text{пц}}$ , приймаючи за неї те значення навантаження, що передуює збільшенню приросту показання тензометра в 1,5 рази.

6. Знайти межу пропорційності матеріалу  $\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}$ .

7. Обчислити модуль пружності  $E$

$$E = \frac{\Delta\sigma \cdot \ell_0}{\Delta a_{\text{сп}} \cdot k}$$

Отримане значення  $\sigma_{\text{пц}}$  і  $E$  варто порівняти з відомими значеннями їх для сталі ст.3.  $\sigma_{\text{пц}} = 200$  МПа,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

### Контрольні запитання

1. Як формулюється закон Гука при розтяганні і стисканні?
2. Що необхідно виміряти, щоб визначити межу пропорційності і модуль пружності?
3. За якою формулою визначається межа пропорційності?
4. За якою формулою визначається модуль пружності?
5. Які розмірності мають межа пропорційності і модуль пружності?
6. Що таке тензометр?
7. Що називається базою тензометра?
8. Який приблизно коефіцієнт збільшення тензометра?

### 2.3. Визначення коефіцієнта поперечної деформації для сталі

*Мета роботи:* визначити коефіцієнт Пуассона і перевірити сталість відношення поперечної деформації до поздовжньої в межах пропорційності.

#### 2.3.1. Короткі теоретичні відомості

При розтяганні або стисканні стержня зовнішніми силами його розміри змінюються як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках. При розтяганні поперечні розміри стержня

зменшуються, а при стисканні – збільшуються. Унаслідок цього поздовжні і поперечні деформації при розтяганні або стисканні стержня завжди мають протилежні знаки.

Якщо до навантаження стержня розміри його в поздовжньому і поперечному напрямках відповідно були рівними  $l_0$  і  $b_0$ , а після навантаження –  $l_1$  і  $b_1$ , то його деформації визначаються формулами:

$\Delta l = l_1 - l_0$  – абсолютна поздовжня деформація;

$\Delta b = b_1 - b_0$  – абсолютна поперечна деформація;

$\varepsilon = \Delta l / l_0$  – відносна поздовжня деформація;

$\varepsilon' = \Delta b / b_0$  – відносна поперечна деформація.

Відносна поперечна деформація для ізотропних матеріалів в усіх поперечних напрямках однакова. Відношення відносної поперечної деформації до відносної поздовжньої при розтяганні або стисканні стержня в межах закону Гука не залежить від величини сили. Воно залежить тільки від властивостей матеріалу. Абсолютне значення цього відношення має назву коефіцієнта поперечної деформації або коефіцієнта Пуассона і позначається літерою  $\nu$ :

$$\nu = |\varepsilon' / \varepsilon|. \quad (2.14)$$

Коефіцієнт Пуассона – безрозмірна величина. Він, як і модуль пружності  $E$ , характеризує пружні властивості матеріалу, тобто здатність деформуватися в поперечному напрямку при розтяганні або стисканні в поздовжньому напрямку. Для всіх ізотропних матеріалів значення коефіцієнта Пуассона лежить у межах від 0 до 0,5. Зокрема для корку він наближається до нуля, для каучуку – до 0,50, для сталей  $\nu = 0,25 - 0,30$ .

Із формули (2.14) випливає, що для визначення коефіцієнта Пуассона достатньо виміряти абсолютну поздовжню та поперечну деформації стержня при дії будь-якої розтягувальної чи стискальної зовнішньої сили в межах пружності.

Для випробування застосовується 5-тонна розривна машина (див. п. 1.2). Використовується сталевий плоский зразок, на який встановлено два важільних тензometri: один – вздовж, другий – поперек зразка (рис. 2.5).

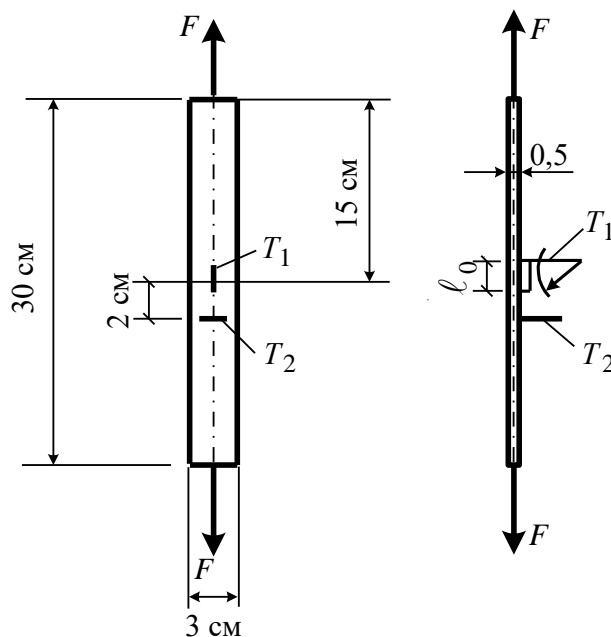


Рис. 2.5. Схема розташування тензометрів на зразку

### 2.3.2. Послідовність проведення дослідів

1. Виміряти розміри поперечного перерізу зразка та занести у вихідні дані (бланк лабораторної роботи 3 (дод. 1)).
2. Установити зразок у затискачі випробувальної 5-тонної розривної машини.
3. Встановити на зразок два важільних тензометри: один – вздовж, другий – поперек зразка.
4. Задавати навантаження окремими кроками і після кожного кроку навантаження записувати показання тензометрів у таблицю.
5. Обробити результати випробувань та обчислити приріст показників поздовжнього та поперечного тензометрів.
6. Обчислити коефіцієнт Пуассона за формулою  $\nu = \left| \Delta a_{\text{cp}} / \Delta b_{\text{cp}} \right|$ . Здобуте значення  $\nu$  слід порівняти з відомим значенням його для різних матеріалів: сталь  $\nu = 0,25 \div 0,33$ , мідь прокатана  $\nu = 0,31 \div 0,34$ , алюміній катаний  $\nu = 0,32 \div 0,36$ .

### Контрольні запитання

1. Як визначається коефіцієнт Пуассона і чому він дорівнює для сталі?

2. Які деформації мають бути більшими – поперечні чи поздовжні?
3. При якому навантаженні можна визначити коефіцієнт Пуассона?
4. У яких межах змінюється коефіцієнт Пуассона для реальних ізотропних матеріалів?
5. При яких деформаціях треба проводити випробування для визначення коефіцієнта Пуассона?
6. Яку розмірність має коефіцієнт Пуассона сталі?
7. Яку базу мають тензometri у цій роботі?
8. Як залежить коефіцієнт  $\nu$  від величини  $i$  і знака навантаження?

## **2.4. Випробування сталі, чавуну і дерева на стискання з визначенням основних механічних характеристик**

*Мета роботи:* вивчити властивості пластичних, крихких та анізотропних матеріалів при стисканні; одержати характеристики міцності крихких матеріалів і засвоїти методику проведення випробувань.

### **2.4.1. Короткі теоретичні відомості**

Відомо, що крихкі матеріали краще чинять опір стисканню, ніж розтяганню. Міцність їх при стисканні в 5–10 разів більша, ніж при розтяганні. Тому їх використовують переважно для виготовлення деталей машин та елементів конструкцій, які зазнають під час роботи стискальних напружень. Для розрахунку таких деталей треба насамперед знати характеристики міцності матеріалу при стисканні. Для цього здебільшого і виконують випробування крихких матеріалів на стискання.

Для пластичних матеріалів модуль пружності, межа пружності та текучості при стисканні приблизно ті самі, що й при розтяганні. При стисканні пластичного матеріалу зруйнувати його неможливо. Унаслідок цього не можна визначити межу міцності та характеристики пластичності пластичного матеріалу із випробувань його на стискання. Тому випробування пластичних матеріалів на стискання, незважаючи на їхню

простоту, проводять рідше, ніж на розтягання. Випробуванню на стискання піддають здебільшого крихкі матеріали.

Для випробувань на стискання із матеріалу виготовляють зразки у вигляді циліндрів невеликої висоти (як правило, від одного до трьох діаметрів) або кубиків (рис. 2.6).

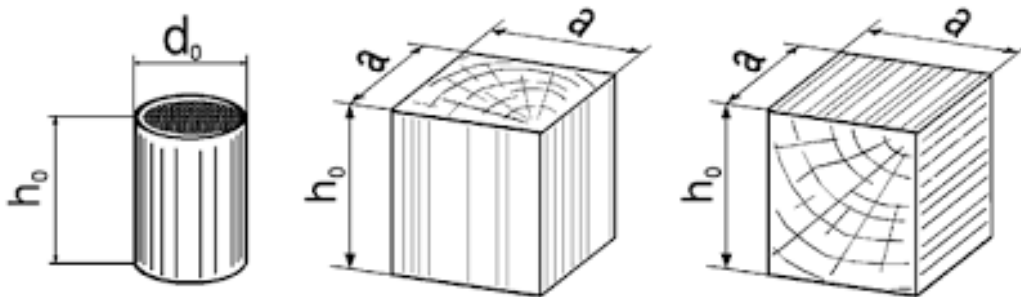


Рис. 2.6. Зовнішній вигляд зразків

При випробуванні металів на стискання частіше використовують циліндричні зразки, оскільки їх легше виготовити. Для дерева, бетону, каменю тощо простіше виготовити зразки кубічної форми, тому їх і використовують при випробуваннях на стискання таких матеріалів.

Під час випробування на стискання між плитами машини і торцями зразка виникає тертя, яке істотно впливає на результати випробування і на характер руйнування. Унаслідок цього зразки із пластичних матеріалів після випробувань набувають бочкоподібної форми. Для зменшення сили впливу тертя не рекомендується використовувати циліндричні зразки з відношенням висоти до діаметра, меншим, ніж одиниця. Високі зразки, у яких це відношення більше від трьох, теж використовувати не слід, оскільки такий зразок може втратити стійкість під час випробувань. Зменшити вплив сил тертя на результати випробувань можна нанесенням на торці зразка шару парафіну або застосування прокладки з високопластичного матеріалу, як-от олово чи свинець.

При випробуванні на стискання зразка із пластичного матеріалу висота його зменшується, а діаметр і площа поперечного перерізу збільшуються, особливо в середній частині, внаслідок впливу сил тертя, що діють на торцях зразка. Через збільшення площі поперечного перерізу зразка в процесі

випробування він здатний сприймати все більше навантаження, не руйнуючись, а перетворюючись на диск. Тільки в деяких випадках (при недостатній пластичності матеріалу) на бічній поверхні зразка з'являються тонкі тріщини, які не приводять, проте, до руйнування. Навантаження при випробуванні постійно зростає, що видно із діаграми стискання пластичного матеріалу, зображеної на рис. 2.7 (крива 1).

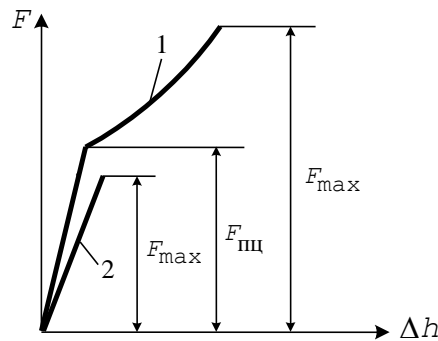


Рис. 2.7. Діаграми  $F - \Delta h$  для сталі (1) і чавуну (2)

На діаграмі (рис. 2.7, крива 1) можна виділити тільки одну ділянку пропорційності та визначити найбільше зусилля на ній  $F_{\text{пц}}$ . Це дає можливість визначити межу пропорційності пластичного матеріалу при стисканні за формулою (2.2)

$$\sigma_{\text{пц}} = F_{\text{пц}} / A_0.$$

Оскільки зруйнувати зразок при стисканні не можна, то навантаження можна довести до максимального зусилля  $F_{\text{max}}$ , яке здатна створити машина. Іноді випробування на стискання припиняють тоді, коли висота зразка зменшується на третину його початкової висоти. Напруження в момент припинення випробування, яке можна визначити за формулою, є занадто умовною величиною, тому не може характеризувати міцність матеріалу.

$$\sigma_{\text{max}} = F_{\text{max}} / A_0,$$

При стисканні циліндричного зразка із крихкого матеріалу висота його також зменшується, і на поверхні під кутом  $45^\circ$  до

осі утворюються тріщини. Зразок руйнується внаслідок зсуву однієї частини зразка відносно другої від дотичних напружень (рис. 2.8).

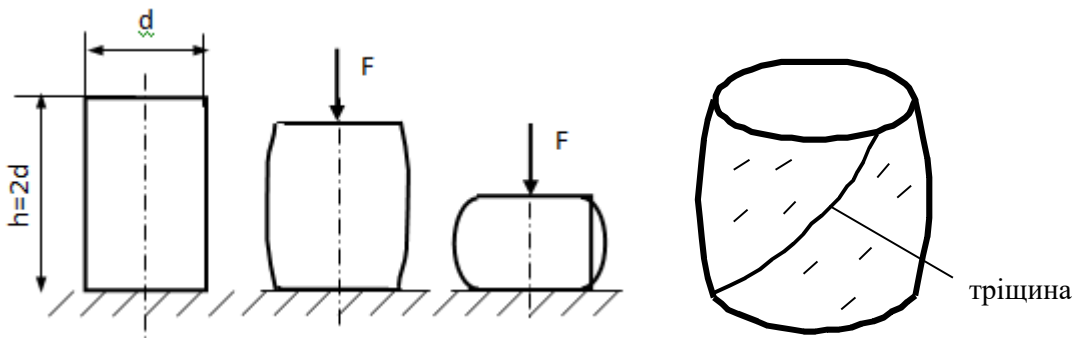


Рис. 2.8. Схема руйнування зразка із пластичного (сталь) та крихкого матеріалу (чавун)

Якщо зменшити сили тертя нанесенням шару парафіну на торці зразка або застосуванням свинцевих прокладок, то руйнування відбудеться інакше (рис. 2.9): зразок дасть тріщини, паралельні напрямку стискальних сил, і зруйнується (таке руйнування характерне для каменю, бетону тощо).

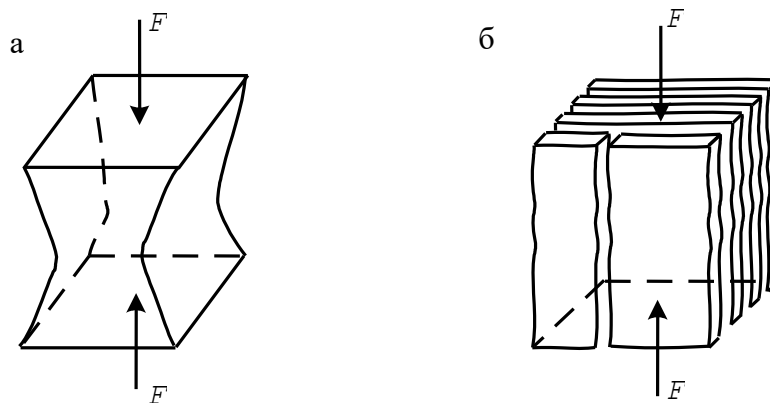


Рис. 2.9. Схеми руйнування зразків із крихких матеріалів:  
а – руйнування зразка кубічної форми із крихкого матеріалу (каменю); б – руйнування зразка із крихкого матеріалу (бетону)

Діаграма стискання буде криволінійною (рис. 2.7, крива 2), а це значить, що для крихких матеріалів не виконується закон Гука, проте за малих навантажень крива мало відрізняється від прямої,

і закон Гука можна застосовувати. З діаграми (рис. 2.7, крива 2) або за шкалою силовимірвального приладу можна визначити найбільше зусилля  $F_{\max}$  за час випробування та обчислити межу міцності матеріалу за формулою

$$\sigma_{\text{шц}} = F_{\max} / A_0.$$

Деревина, що є анізотропним матеріалом, при стисканні і при розтяганні має різну міцність залежно від напрямку стискальної сили відносно напрямку волокон. На рис. 2.10 зображено діаграми стискання двох кубиків із деревини однієї породи. Крива 1 ілюструє стискання кубика вздовж волокон, а крива 2 – поперек волокон.

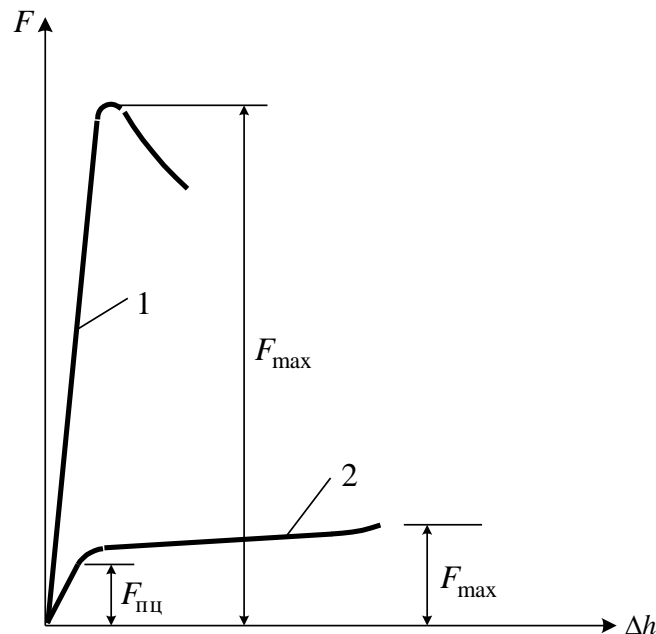


Рис. 2.10. Діаграма  $F - \Delta h$  для деревини:  
1 – уздовж волокон; 2 – поперек волокон

При стисканні вздовж волокон деревина значно міцніша, ніж при стисканні поперек волокон. При стисканні уздовж волокон зразок руйнується внаслідок зсуву однієї частини відносно іншої, а при стисканні поперек волокон деревина має здатність до пресування, і не завжди вдається визначити момент початку руйнування. Це, а також характер діаграм (рис. 2.10), дає можливість зробити висновок, що деревина при стисканні вздовж



волокон поводить себе, як крихкий матеріал, а при стисканні поперек волокон – як пластичний матеріал. Внаслідок цього при випробуванні деревини на стискання поперек волокон можна визначити за діаграмою стискання (рис. 2.10, крива 2) або за шкалою силовимірника навантаження  $F_{\text{щ}}$ , яке відповідає межі пропорційності, і найбільше умовне навантаження  $F_{\text{max}}$ , яке відповідає абсолютній деформації зразка, що становить 1/3 його початкової висоти. Отже, є можливість за формулою (2.2) обчислити межу пропорційності, а за формулою  $\sigma_{\text{max}} = \frac{F_{\text{max}}}{A}$  – найбільше умовне напруження за час випробування.

При випробуванні дерева на стискання вздовж волокон (рис. 2.9, крива 1) можна визначити тільки найбільше навантаження  $F_{\text{max}}$ , при якому зразок зруйнувався.

Це дає можливість за формулою обчислити межу міцності деревини при стисканні її уздовж волокон. Слід зазначити, що при випробуваннях матеріалів на стискання іноді не записують діаграму, оскільки характерні навантаження, особливо  $F_T$ , яке відповідає межі текучості, можна спостерігати за шкалою силовимірника.

#### ***2.4.2. Лабораторне устаткування та прилади***

Випробування матеріалів на стискання виконують на спеціальних важільних або гідравлічних випробувальних машинах (див. п. 1.2).

#### ***2.4.3. Послідовність проведення дослідів***

У лабораторній роботі 4 випробуємо на стискання маловуглецеву сталь, чавун та сосну вздовж і поперек волокон. Перед випробуванням потрібно обміряти штангенциркулем зразки і результати занотувати у бланк лабораторної роботи 4 (дод. 1). Спочатку випробуємо сталевий зразок. Поставимо його на плиту випробувальної машини і будемо поступово статично навантажувати, стежачи за стрілкою силовимірника. За стрілкою силовимірника треба заміряти навантаження  $F_{\text{щ}}$ , яке відповідає межі пропорційності, і продовжувати випробування доти, поки

висота зразка зменшиться на третину порівняно з початковою висотою. Після цього вимкнути електродвигун, вилучити зразок та помітити за шкалою найбільше навантаження за час випробування  $F_{\max}$ .

Випробування інших зразків виконують у такій самій послідовності. Тільки треба не забути при випробуванні чавунного зразка поставити захисну сітку, щоб уникнути поранень уламками зруйнованого зразка.

Під час випробувань усіх зразків потрібно пильно стежити за їх поведінкою та характером руйнування. Ескізи зразків після випробувань і одержані результати занотувати у бланк лабораторної роботи 4. Обробку одержаних результатів здійснюють за схемою, наведеною в бланку вказаної лабораторної роботи.

### **Контрольні запитання**

1. Які матеріали називаються пластичними, крихкими й анізотропними?
2. Який вигляд мають діаграми стискання пластичних і крихких матеріалів?
3. Чому в чавунному зразку на поверхні виникають тріщини під кутом  $45^\circ$  до осі?
4. Як визначається межа пропорційності при стисканні сталевого зразка?
5. Як обчислюють межу міцності при стисканні чавунного зразка?
6. Унаслідок чого сталевий зразок при стисканні набуває бочкоподібної форми?
7. Як можна зменшити вплив сил тертя, які виникають між торцями зразка і плитами випробувальної машини, на результати випробувань?
8. Чому неможливо одержати межу міцності із випробувань пластичного матеріалу на стискання?
9. Як поводить себе дерево при стисканні його вздовж і поперек волокон?
10. Якою є мета випробувань матеріалів на стискання?
11. Унаслідок чого чавунний зразок руйнується на ділянці, яка утворює з віссю кут  $45^\circ$ ?

12. З якою метою випробовують на стискання не менше двох зразків із дерева?

13. Коли дерево міцніше – при стисканні вздовж волокон чи поперек волокон?

## **2.5. Випробування сталі на зріз і дерева на сколювання та перерізування**

*Мета роботи:* вивчити характер руйнування, визначити тимчасовий опір зсуву сталі, дерева вздовж і поперек волокон і порівняти з тимчасовим опором цих матеріалів при розриві.

### **2.5.1. Короткі теоретичні відомості**

Зріз або зсув є простою деформацією, яка виникає при дії поперечних сил. На практиці зсув у чистому вигляді спостерігається дуже рідко. Як звичайно, він супроводжується згинанням. Такої деформації зазнають болти, заклепкові та зварні з'єднання, шпонки, шпильки тощо. При розрахунках на міцність вважають, що дотичні напруження розподіляються по площі поперечного перерізу  $A_{зр}$  рівномірно, тому

$$\tau_v = F / A_{зр}. \quad (2.15)$$

де  $F$  – діюча поперечна сила;

$A_{зр}$  – площа поперечного перерізу зразка.

Межа міцності при зсуві завжди менша, ніж при розриві. Для сталі

$$\tau_v = (0,6 / 0,8) \sigma_v. \quad (2.16)$$

Міцність при зсуві звичайно визначають за схемою подвійного зрізу (рис. 2.11).

Міцність дерева при зсуві, як анізотропного матеріалу, залежить від напрямку прикладення сил. Якщо протилежно напрямлені сили діють на невеликій відстані одна від іншої вздовж волокон, то викликана ними деформація називається сколюванням, поперек волокон – перерізуванням. При

сколюванні та перерізуванні виникають переважно тільки дотичні напруження, які визначаються формулою (2.15).

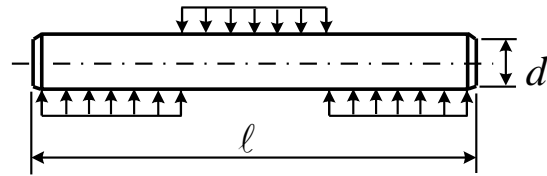


Рис. 2.11. Схема випробувань сталевого зразка на зріз (зсув)

Характер руйнування при сколюванні здебільшого крихкий, тобто воно відбувається без істотних деформацій.

Межа міцності дерева на сколювання вздовж волокон істотно (більш як у чотири рази) менша від межі міцності її при дії сил поперек волокон.

Опір дерева сколюванню під дією сили вздовж волокон визначають на зразках, показаних на рис. 2.12, а, а опір дерева на перерізування – на стандартному зразку (рис. 2.12, б).

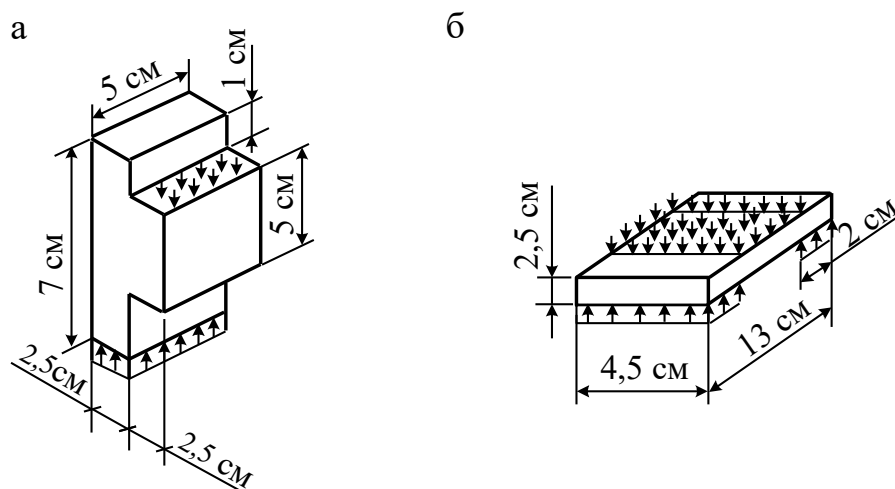


Рис. 2.12. Схеми випробувань дерев'яних зразків на сколювання (а) і перерізування (б)

### 2.5.2. Послідовність проведення дослідів

1. Виміряти розміри зразків, записати у бланк лабораторної роботи 5 (дод. 1).

2. Установити зразки в пристрій, а потім у випробувальну машину.

3. Увімкнути електродвигун і спостерігати за зростанням навантаження до руйнування.

4. Зафіксувати максимальне навантаження  $F_{\max}$ , при якому відбулося руйнування, і записати його у бланк лабораторної роботи 5.

5. Вимкнути електродвигун і вивільнити зруйновані зразки.

6. Обробити одержані результати та занотувати їх у бланк лабораторної роботи.

### **Контрольні запитання**

1. Що називається зсувом?
2. Як визначається межа міцності на зріз?
3. У скількох місцях руйнується зразок при випробуванні його на зріз?
4. Яку характеристику матеріалу визначають при випробуваннях на зріз?
5. Які матеріали називаються неоднорідними?
6. Які матеріали називаються анізотропними?
7. Як визначається межа міцності на сколювання дерев'яного зразка?
8. Як визначається межа міцності на перерізування дерев'яного зразка?
9. У скількох місцях руйнується зразок при випробуванні його на перерізування?
10. Який характер руйнування при зсуві?
11. Яке співвідношення між межею міцності дерева на розрив і зсув?
12. Наведіть приклади роботи на зсув металевих і дерев'яних деталей.

### **2.6. Випробування зварних з'єднань**

*Мета роботи:* визначити міцність зварних з'єднань встик і порівняти міцність зразків, що зварюються, зі зразком з основного металу.

### 2.6.1. Короткі теоретичні відомості

Зварювання являє собою процес молекулярного з'єднання металів, що зварюються, шляхом місцевого нагрівання їх до рідкого (при дуговому зварюванні) і до в'язкого (при контактному зварюванні) станів. Цим вона принципово відрізняється від механічного з'єднання заклепками або болтами\*.

Як показали дослідні випробування, при правильній технології зварювання і належному проектуванні зварні шви не поступаються у міцності заклепувальним при дії як статичних, так і динамічних навантажень. Однак контроль якості виконаного зварювання дуже трудомісткий через те, що основні дефекти зварювання – непровар (коли наплавлений метал не з'єднується з основним) і перевитрата (що призводить до шкідливих структурних змін основного металу) – не можуть бути виявлені при зовнішньому огляді. До того ж ці дефекти залежать значною мірою від кваліфікації зварника. Тому основним і необхідним способом перевірки якості зварювання є систематичне випробування контрольних зразків на міцність відповідно до вимог норм і держстандартів.

Визначення міцності зварних з'єднань виконується на плоских зразках із прямим і косим зварними швами (рис. 2.13). Оскільки напруження, що допускається, для зварного шва нижче, ніж для основного металу, прагнуть до збільшення довжини стикового шва. Для цього застосовують з'єднання встик з косим швом (рис. 2.13). Дослідження, проведені в інституті електрозварювання НАН України, показали, що рівноміцність їх з основним металом завжди забезпечується.

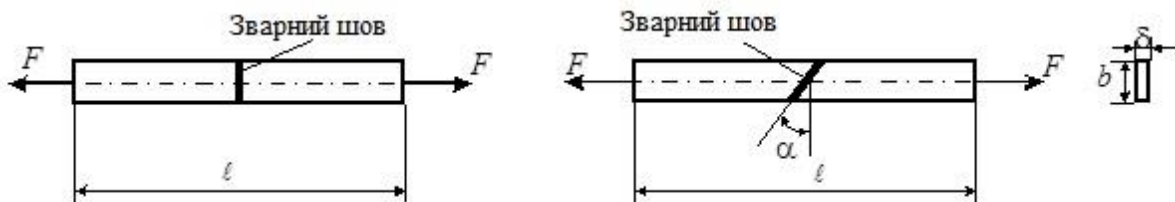


Рис. 2.13. Схеми зразків, що зварюються

\* Електрозварювання винайдене російськими інженерами М. М. Бенардосом (1882 р.) і М. Г. Славяновим (1888 р.) і удосконалене Є. О. Патеном і К. К. Хреновим.

Перевірка міцності виконується за формулами:

- прямий шов

$$\sigma_e = \frac{F}{\ell_{\text{ш}} t} \leq [\sigma_e],$$

- косий шов

$$\sigma_e = \frac{F}{\ell_{\text{ш}} t} \sin \alpha \leq [\sigma_e],$$

$$\tau_e = \frac{F}{\ell_{\text{ш}} t} \cos \alpha \leq [\tau_e],$$

де  $\ell_{\text{ш}} t$  – умовна робоча площа перерізу шва;

$\ell_{\text{ш}}$  – розрахункова довжина шва, рівна  $\ell_{\text{ш}} = b - 10$  мм – для прямого шва і  $\ell_{\phi} = b_{\phi} / \sin \alpha - 10$  мм – для косого шва;  $t = \delta$ .

### **2.6.2. Послідовність проведення дослідів**

1. Ознайомитися з будовою випробувальної машини.
2. Заміряти розміри зразків, довжину і товщину кожного шва, кут нахилу косого шва до осі зразка і занести в бланк лабораторної роботи 6 (дод. 1).
3. Закріпити зразок у затискачах випробувальної машини і ввімкнути електродвигун.
4. Зафіксувати максимальне навантаження, при якому відбулося руйнування.
5. Вимкнути електродвигун і вилучити зразок із затискачів.
6. Зобразити схему розірваних зразків. Указати місце розриву зразка.
7. Дати описову характеристику міцності зразка і шва залежно від місця розриву.
8. Порівняти результати випробувань.

### **Контрольні запитання**

1. Про що свідчить розрив зразка поза швом?
2. Про що свідчить розрив зразка в перерізі, що межує зі швом?

3. Про що свідчить розрив зразка по шву?
4. Які, на ваш погляд, переваги має з'єднання за допомогою косого шва порівняно з прямим?

## **2.7. Визначення твердості різних матеріалів методом вдавлювання**

*Мета роботи:* ознайомитися з методами визначення твердості й одержати практичні навички у визначенні твердості сталі, чавуну і деяких кольорових металів.

### **2.7.1. Короткі теоретичні відомості**

Твердістю називається властивість матеріалу опиратися проникненню в нього іншого твердого тіла. Твердість сталі – дуже важлива якість, яку необхідно визначати як у сирому, так і в загартованому стані металу. За твердістю в сирому стані встановлюється можливість механічної обробки виробу. За твердістю також можна судити про здатність металу чинити опір зовнішнім зусиллям.

Експериментальні дослідження металів показують, що між характеристикою твердості і границею міцності матеріалу є просте і досить постійне співвідношення. Зазначена обставина дає можливість визначення межі міцності сталі з більш простого випробування – шляхом визначення її твердості. Є ряд методів, застосовуваних для визначення твердості:

- 1) метод вдавлювання статично або динамічно прикладеним навантаженням;
- 2) метод пружної віддачі;
- 3) метод дряпання.

Найбільш поширеним методом випробування твердості є перший із зазначених.

При випробуванні твердості шляхом вдавлювання статично прикладеним навантаженням застосовуються прилади Бринеля, Роквелла і Кубасова, те ж динамічно прикладеним навантаженням – прилад Польді. При випробуванні за методом пружної віддачі (пружного відскакування бойка) застосовується прилад Шора.



Визначення твердості за Бринелем полягає в тому, що у випробовуваний зразок вдавлюється визначеною силою  $F$  тверда (загартована) сталева кулька діаметром  $D$  (рис. 2.14).

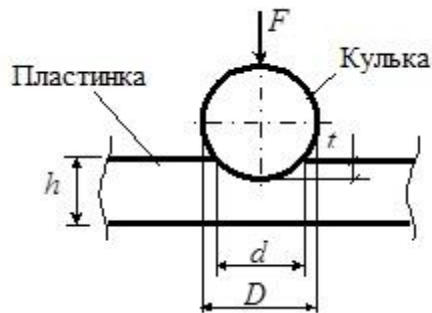


Рис. 2.14. Схема випробувань

Кулька утворить при цьому на поверхні зразка відбиток (лунку) у вигляді сегментної кульової поверхні діаметром  $d$  і глибиною  $t$ .

Мірою або числом твердості за Бринелем називається відношення навантаження  $F$ , кг, що робить вдавлення кульки в зразок, до площі поверхні  $A$ , мм<sup>2</sup>, відбитка, що утворився за такої умови. Уводячи позначення для числа твердості за Бринелем –  $HV$ , кг/мм<sup>2</sup>, будемо мати:

$$HV = \frac{F}{A}.$$

Площа кульової поверхні  $A$  визначається за формулою

$$A = \frac{\pi D^2}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2} \right],$$

де  $D$  – діаметр кульки;

$d$  – діаметр відбитка.

При виконанні лабораторної роботи 7 застосовується кулька  $D = 10$  мм, величина навантаження  $F = 3000$  кг. Для полегшення підрахунків за цими даними складені спеціальні таблиці, за якими величина твердості легко визначається залежно від діаметра відбитка (дод. 3).

За знайденим числом твердості може бути з достатнім ступенем наближення визначена межа міцності металу.

Так, наприклад, для маловуглецевої сталі межа міцності становить приблизно  $1/3$  від числа твердості  $HB$ ,  $\text{кг/мм}^2$ , і звичайно приймається рівною

$$\sigma_B \approx 0,36 HB. \quad (2.17)$$

За приладом Роквелла твердість визначається залежно від глибини проникання сталеві кульки або алмазного наконечника в матеріал зразка.

При виконанні цієї роботи застосовується сталева кулька діаметром 1,69 мм, що вдавлюється спочатку під навантаженням 10 кг, а потім під додатковим навантаженням 90 кг так, що сумарне навантаження становить 100 кг.

Різниця в глибині занурення при навантаженнях 10 і 100 кг і визначає число твердості за Роквеллом; воно знаходиться у визначеному співвідношенні з числом твердості за Бринелем (дод. 3).

Число твердості за Роквеллом може бути підраховане за такою формулою:

$$HR = 130 - 500 t, \quad (2.18)$$

де  $t$  – залишкова глибина проникнення кульки в матеріал зразка від додавання навантаження 90 кг до початкової її величини в 10 кг, мм.

Застосування сталеві кульки малого діаметра забезпечує незначний відбиток на зразках, що не досягається при застосуванні способу Бринеля.

*Визначення твердості за Кубасовим.* М. В. Кубасов запропонував при вдавненні застосовувати наконечник у формі конуса.

Твердість за Кубасовим ( $HK$ ) визначається як відношення навантаження  $F$  до площі основи конусного відбитка, тобто

$$HK = \frac{4F}{\pi d^2}, \quad (2.19)$$

де  $d$  – діаметр відбитка. Форма відбитка вдавнення конуса при будь-якому навантаженні зберігає геометричну подібність, тобто площа відбитка визначається за тією самою формулою при будь-якому навантаженні. У цьому перевага цього методу перед методом Бринеля. Співвідношення між  $HK$  і  $\sigma_B$  більш стійке, ніж між  $HB$  і  $\sigma_B$ . Акад. М.М. Давиденков експериментально отримана в залежність між  $HK$  і  $\sigma_B$ , кг/мм<sup>2</sup>, для більшості конструкційних сталей у формі

$$\sigma_B = [0,32 HK - 16]. \quad (2.20)$$

Здійснити випробування на твердість за Кубасовим можна на будь-якій випробувальній машині, придатній для створення стискальних навантажень і точного виміру їх, а також на пресі Бринеля, тільки замість кульки необхідно застосувати наконечник у формі конуса. Вимір діаметра відбитка при випробуванні за Кубасовим роблять так само, як і при випробуванні за Бринелем.

*Твердість за Пюльді* являє собою найпростіший спосіб визначення твердості за допомогою приладу, сконструйованого у вигляді ударного інструмента. Кульку встановлюють на відшліфовану ділянку випробовуваного зразка так, щоб вісь приладу була перпендикулярна ділянці. Потім ударяють звичайним слюсарним молотком по верхній частині бойка. Водночас одержують два відбитки кульки: один – діаметром  $d_e$  на еталоні, для якого заздалегідь відома твердість  $HE$ , інший – діаметром  $d_o$  – на випробовуваному зразку. Діаметри обох відбитків вимірюють за допомогою спеціального мікроскопа.

Зважаючи на співвідношення площ обох відбитків і відомої твердості еталона, твердість випробовуваного зразка  $HP$  може бути визначена за формулою

$$HP = HE \frac{D - \sqrt{D^2 - d_e^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_o^2}}, \quad (2.21)$$

яка отримана з урахуванням, що твердість еталона і зразка належать до площі відбитків.

Зручність приладу Польші полягає в тому, що він дуже портативний. Визначення твердості за способом Польші ґрунтується на тому припущенні, що відношення статичних твердостей еталона і зразка зберігає величину і для динамічних твердостей, чого насправді не відбувається. Тому спосіб Польші може давати цілком точну оцінку твердості тільки тоді, якщо зразок і еталон виготовлені з однакових чи близьких за твердістю й іншими властивостями металів, у всіх інших випадках результати визначення твердості за цим способом варто розглядати як орієнтовні.

*За Шором* за міру твердості приймається величина пружної віддачі матеріалу при падінні на нього бойка з деякої висоти.

Висота, на яку відскочить боек при падінні на зразок, приймається за міру твердості і вимірюється в одиницях шкали склероскопа Шора, тому є числом твердості за Шором.

#### *Визначення твердості способом дряпання*

З давніх часів при мінералогічних випробуваннях оцінка опору поверхні мінералів дряпанню служила одним з методів їх розпізнавання і класифікації. Твердістю, при визначенні її методом дряпання, називається величина зусилля в грамах, достатня для того, щоб алмазний конус, який перебуває під її навантаженням з кутом заточення біля вершини в  $90^\circ$  і поставлений віссю нормально до поверхні зразка, при русі останньою залишав риску шириною в 10 мкм.

#### **2.7.2. Послідовність проведення дослідів**

1. Ознайомитися з пристроєм преса Бринеля.
2. Підготувати до випробування 12 пластинок зі сталі, чавуну, бронзи, дюралюмінію по три для кожного матеріалу, заміряти їхню товщину. Поверхня зразків повинна бути чистою, рівною, гладкою, без дефектів.
3. Випробовуваний зразок покласти на столик приладу й обертанням диска підняти до упора кульку, закріплену в штампі. Далі ввімкнути мотор і після того, як пройде визначений за правилами випробувань час, мотор автоматично вимикається.
4. За допомогою оптичного мікрометра виміряти діаметри отриманих відбитків і знайти їхнє середнє значення для кожного матеріалу.

5. За таблицями визначити НВ і занести в бланк лабораторної роботи 7 (дод. 1). Провести порівняльну характеристику отриманих результатів.

### **Контрольні запитання**

1. Що покладено в основу випробувань на твердість?
2. Які є способи випробувань на твердість? У чому їх розходження?
3. Яку розмірність має число твердості за Бринелем?
4. За якою формулою визначається тимчасовий опір сталі за числом твердості за Бринелем?
5. Які вимоги ставляться до поверхні зразків при визначенні твердості матеріалів?
6. Для яких матеріалів можна використовувати метод Бринеля для визначення твердості?
7. Якою повинна бути мінімальна товщина випробовуваного зразка?

## **2.8. Випробування на вигин дерев'яних балок – суцільної і на шпонках**

*Мета роботи:* визначити коефіцієнт міцності і коефіцієнт твердості складеної балки стосовно суцільної балки, якщо обидві зазначені балки виготовлені з того самого матеріалу.

### **2.8.1. Короткі теоретичні відомості**

Розглянемо складену балку (рис. 2.15), що складається з двох, не з'єднаних між собою, брусів. Торцеві перерізи цих брусів після їх згину під дією сили  $F$  не будуть розташовані в одній площині, як при згині суцільної балки. Такий поздовжній зсув верхнього бруса по нижньому відбувається тому, що обидва бруси нічим не зв'язані між собою. Кожний із брусів має свій нейтральний шар. Момент опору поперечного перерізу складеної балки дорівнює

$$W_{\text{ск}} = 2W_z = 0,5W_c, \quad (2.22)$$

а момент інерції

$$J_{ск} = 2J_z = 0,25J_c, \quad (2.23)$$

де  $W_c$  і  $J_c$  – відповідно момент опору і момент інерції суцільної балки.

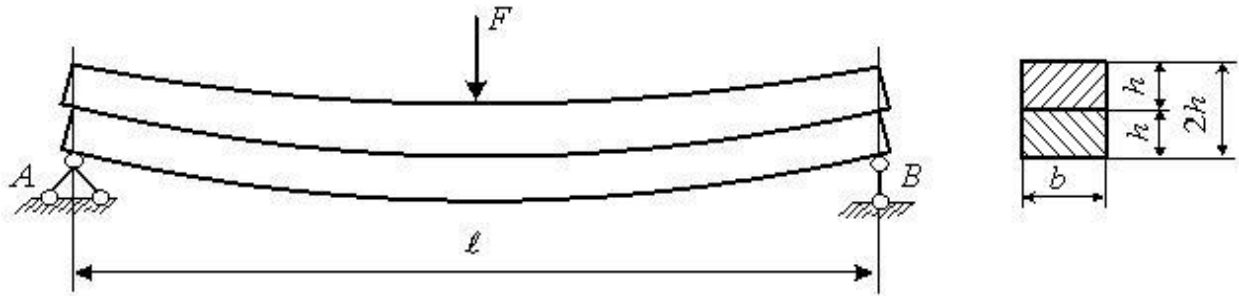


Рис. 2.15. Схема складеної балки

Отже, при згині не зв'язані між собою бруси можуть зсунутися один відносно іншого і їхній момент опору зменшиться на 50 %, а момент інерції – на 75 % порівняно з відповідними геометричними характеристиками суцільної балки, тобто складена балка набагато слабша від суцільної балки, хоча матеріалу для неї потрібно стільки ж, скільки і для суцільної балки. Яким же чином можна поліпшити складену балку? Для цього необхідно виключити поздовжній зсув одного бруса відносно іншого. З'єднаємо бруси шпонками (рис. 2.16).

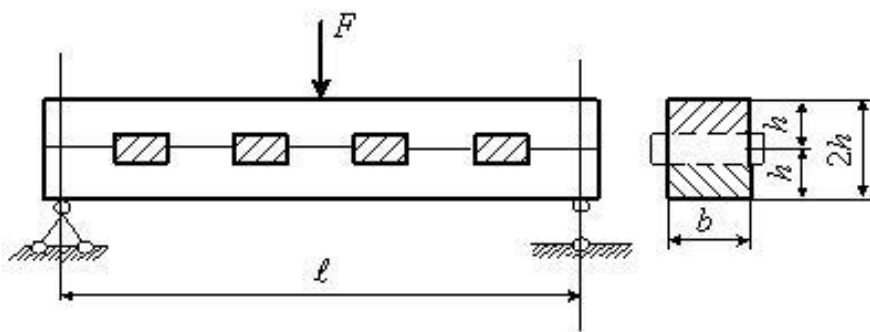


Рис. 2.16. Схема складеної балки на шпонках

Шпонки будуть перешкоджати поздовжньому зсуву і забезпечувати спільну роботу двох брусів. Однак через обм'яття

шпонок і брусів у місцях їх зіткнення, усушки, неточності виготовлення тощо, зсув може відбутися і складена балка виявиться менш міцною і більш деформативною. Установити цей факт можна експериментально. Уведемо представлення про коефіцієнти міцності і твердості складеної балки:

$$k_1 = \frac{\text{міцність складеної балки}}{\text{міцність суцільної балки}},$$

$$k_2 = \frac{\text{жорсткість складеної балки}}{\text{жорсткість суцільної балки}}.$$

Як характеристику міцності приймемо деформацію в крайньому стиснутому волокні посередині довжини балки, а як характеристику твердості – прогин у тому ж перерізі. Деформації  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  знайдемо за допомогою тензометрів (див. п. 1.5), а прогини  $f_1$  і  $f_2$  – індикаторами (див. п. 1.3).

Теоретичне значення деформації і прогину суцільної балки, показаної на рис. 2.17, можна знайти за такими формулами:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} = \frac{3F\ell}{8bh^2 \cdot E}, \quad (2.24)$$

$$f_1 = \frac{F\ell^3}{48EJ} = \frac{F\ell^3}{32bh^3E}, \quad (2.25)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу (сосна) суцільної балки,  $E = 0,1 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2 = 0,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

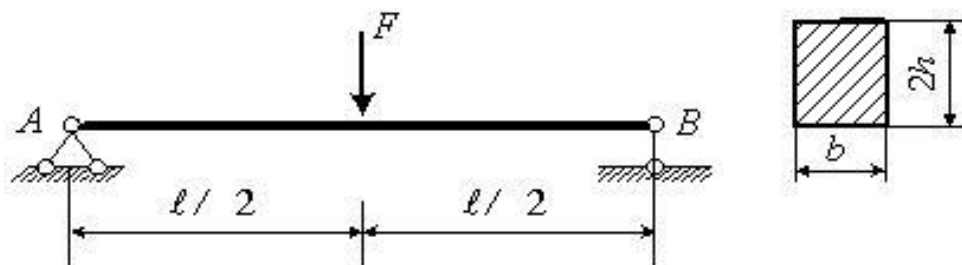


Рис. 2.17. Схема навантаження суцільної балки

### **2.8.2. Послідовність проведення досліду**

1. Ознайомитися з будовою випробувальної машини.
2. Установити складену балку на шпонках на опорні пристрої траверси випробувальної машини.
3. Установити в перерізі, розташованому посередині довжини балки, підйомний тензометр та індикатор.
4. Увімкнути електродвигун і зафіксувати задане навантаження (5 кН).
5. Зняти показання вимірювальних приладів і записати їх у бланк лабораторної роботи 8 (дод. 1). Вимкнути мотор.
6. Провести аналогічні випробування суцільної балки. Якщо такої можливості немає, то визначити за формулами (2.24) деформацію  $\varepsilon_1$  і прогин  $f_1$ , занести ці дані в бланк лабораторної роботи 8 (дод. 1).
7. Знайти коефіцієнти міцності й твердості і проаналізувати отримані дані.

### **Контрольні запитання**

1. Як визначити нормальні напруження в суцільній балці при згині?
2. Як визначити деформації в перерізах суцільної балки при згині?
3. Як знайти прогин суцільної балки, завантаженої зосередженою силою посередині?
4. Розкажіть про будову підйомного тензометра.
5. Розкажіть про будову індикатора.
6. Яку роль виконує шпонка?
7. Як визначити геометричні ( $J, W$ ) характеристики при вигині складеної балки з двох не з'єднаних між собою брусів прямокутного перерізу?
8. У яких випадках, на вашу думку, застосовуються складені балки на шпонках?
9. З яких порід дерева виготовляються шпонки для соснових балок?



## 2.9. Дослідження деформацій і розподілу нормальних напружень у двотавровій балці в зоні чистого згину

*Мета роботи:* визначити експериментально прогин двотаврової балки, деформації в заданому поперечному перерізі і порівняти ці величини з обчисленими теоретично.

### 2.9.1. Короткі теоретичні відомості

Теорія чистого (без поперечної сили) згину балок в опорі матеріалів базується на таких основних гіпотезах: матеріал балки підкоряється закону Гука, причому коефіцієнт Пуассона  $\nu$  однаковий при розтяганні і стисканні; перерізи при деформаціях залишаються плоскими; поздовжні волокна один на одного не тиснуть, тобто під дією нормальних напружень вони зазнають тільки розтягання або стискання. Нормальні напруження  $\sigma$  в будь-якій точці поперечного перерізу балки в зоні чистого згину змінюються по висоті балки, залишаючись постійними по ширині. Вони визначаються за формулою

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{J_z}, \quad (2.26)$$

де  $y$  – відстань від нейтральної осі до тієї точки перерізу, у якій визначають нормальні напруження.

З формули (2.26) видно, що нормальні напруження в перерізі прямо пропорційні координаті  $y$ , згинальному моменту  $M$  і обернено пропорційні  $J_z$ . Незалежно від форми поперечного перерізу балки (прямокутник, двотавр, трикутник та ін.) закон розподілу нормальних напружень однаковий. Максимальні напруження по довжині балки спостерігаються в тому перерізі, де  $M = M_{\max} = F \cdot c$  (рис. 2.18).

Максимальне ж значення нормального напруження в даному перерізі буде в точках, найбільш віддалених від нейтральної лінії (рис. 2.19).

Експериментально прогин досліджуваного перерізу балки визначають індикатором (рис. 2.18, а). Розрахункове значення прогину цього ж перерізу знаходять за формулою

$$f = \frac{F \cdot c}{24EJ} (3\ell^2 - 4c^2). \quad (2.27)$$

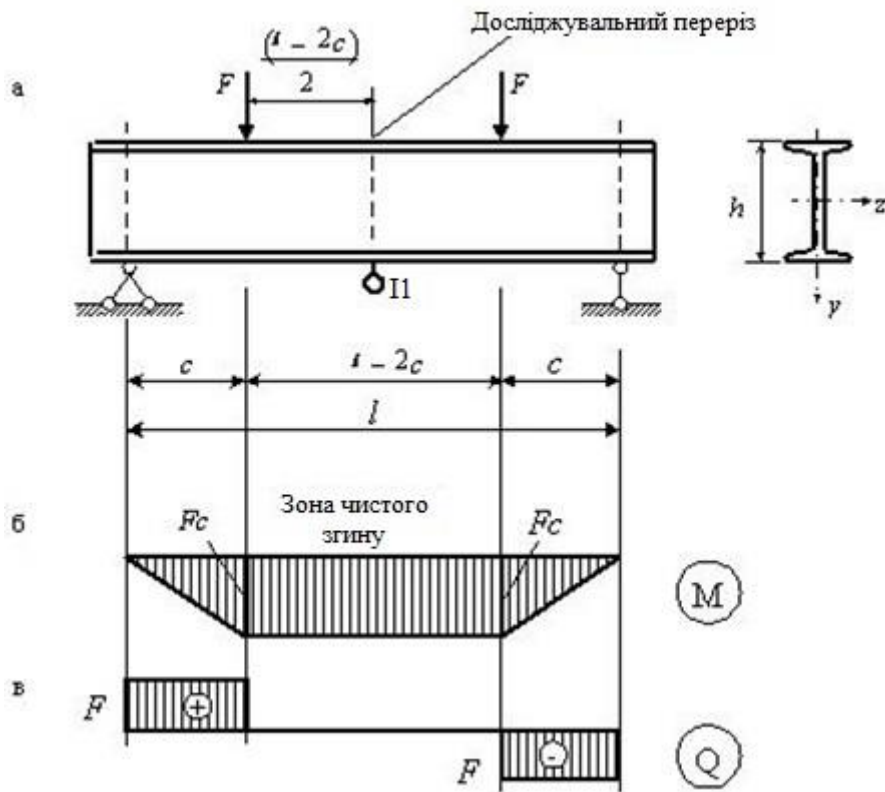


Рис. 2.18. Схема навантаження балки (а), епюра згинальних моментів (б) і поперечних сил (в)

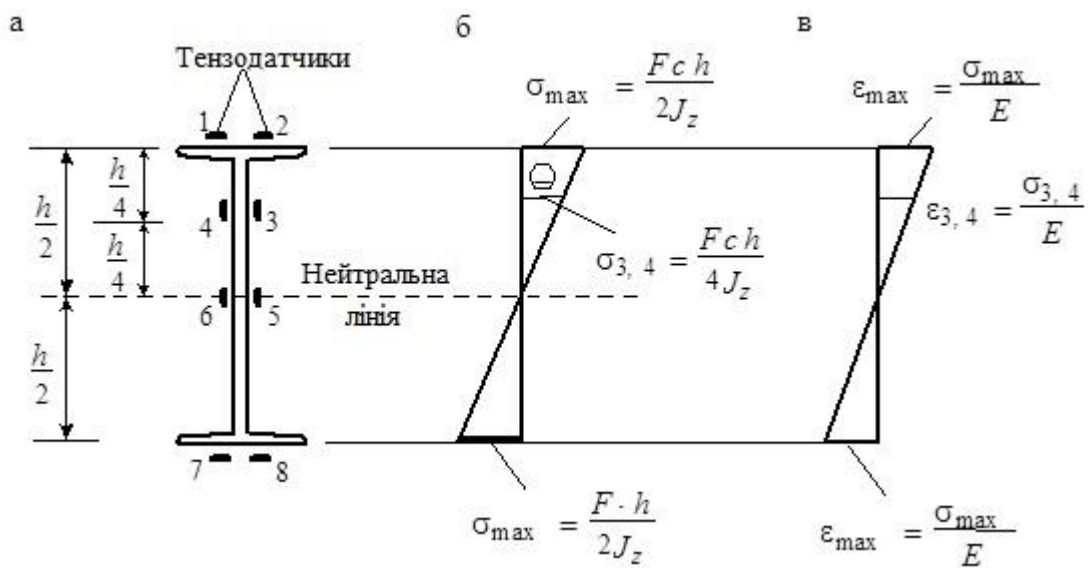


Рис. 2.19. Схема розташування тензодатчиків (а), епюра напружень (б) і деформацій (в) у досліджуваному перерізі балки

### **2.9.2. Послідовність проведення дослідів**

1. Установити досліджувану балку на роликові опори, використовуючи водночас пристосування для випробувань на згин, що входить до складу гідравлічного преса (див. п. 1.2).

2. Механічний індикатор установити на індикаторний стояк. Установити нуль на індикаторі. Шток індикатора повинен торкатися нижньої полиці балки в досліджуваному перерізі.

3. Тензодатчики (тензорезистори) підключити до підсилювача (див. п. 1.5). Увімкнути блок живлення. Через 5 хв установка готова до роботи.

4. Навантажити балку, простежити за показаннями приладів. Два тензодатчики 5 і 6 (рис. 2.19) повинні показувати 0, тому що вони наклеєні на нейтральному волокні. Тензодатчики 1, 2, 7, 8 повинні давати приблизно однакові показання. Розвантажити балку.

5. Провести остаточні випробування. Результати їх записати в бланк лабораторної роботи 9 (дод. 1). Побудувати епюру деформацій по висоті перерізу. Порівняти дослідні і теоретичні дані.

### **Контрольні запитання**

1. Як розподіляються нормальні напруження в перерізі по висоті балки?

2. Що таке згинальний момент, епюра згинальних моментів?

3. Чи змінюються нормальні напруження по ширині балки?

4. Укажіть перерізи на балці, у яких немає нормальних напружень. Чому їх немає?

5. Чому в процесі випробувань не змінюються на підсилювачі показання від деяких тензодатчиків (5, 6)?

6. Яку характеристику матеріалу потрібно знати, щоб визначити прогин?

## 2.10. Дослідження деформацій і розподілу нормальних напружень у балці прямокутного перерізу при поперечному згині

*Мета роботи:* показати можливість застосування для поперечного згину гіпотез і формул, отриманих для чистого згину.

### 2.10.1. Короткі теоретичні відомості

Ми бачили (див. підрозд. 2.9), що при чистому згині в поперечних перерізах бруса виникають тільки нормальні напруження (2.26). У випадку поперечного згину в перерізі бруса виникає не тільки згинальний момент, але й поперечна сила  $Q$ . Отже, у цьому випадку в поперечних перерізах бруса виникають дотичні напруження

$$\tau = \frac{Q \cdot S_z}{J_z \cdot b}, \quad (2.28)$$

де  $S_z$  – статичний момент щодо нейтральної осі  $z$  частини площі перерізу між рівнем  $y$  і краєм балки;

$b$  – ширина балки (рис. 2.20).

Дотичні напруження розподілені по перерізу нерівномірно (рис. 2.21, в). Тому нерівномірно будуть розподілені і кутові зсуви (виникнення дотичних напружень  $\tau$  супроводжується появою кутових деформацій  $\gamma$ ). Це значить, що при поперечному згині на відміну від чистого згину, поперечні перерізи бруса не залишаються плоскими. Однак на величині нормальних напружень (2.26) перекручування площини поперечних перерізів помітно не позначається. Величина похибки має порядок  $h/\ell$ , а, як відомо, у брусі розміри його поперечного перерізу набагато менші від його довжини. Усе дає підставу прийняти гіпотезу плоских перерізів і при поперечному згині.

Іншою особливістю поперечного згину є наявність напружень «натиснення» між шарами. Ці напруження виникають тільки при змінній поперечній силі і мають дуже малу величину (особливі області, до яких прикладаються зосереджені сили, нами не досліджуються). Максимальні дотичні напруження в поперечному перерізі (рис. 2.20, в) належать до максимальних

нормальних напружень приблизно як висота перерізу до довжини бруса, тобто дотичні напруження істотно менші нормальних. З огляду на малість величин  $\tau_{\max}$  розрахунок на міцність при поперечному згині для всіх нетонкостінних балок виконується тільки за нормальними напруженнями. Як і при чистому згині, дотичні напруження до уваги не беруться. Однак варто мати на увазі, що в деяких випадках дотичні напруження можуть істотно вплинути на оцінку міцності бруса. Наприклад, при поперечному згині короткого дерев'яного бруса можливе руйнування не по поперечному перерізу в закладенні, а в результаті сколювання по поздовжній площині, близькій до нейтрального шару, тобто там, де є  $\tau_{\max}$ .

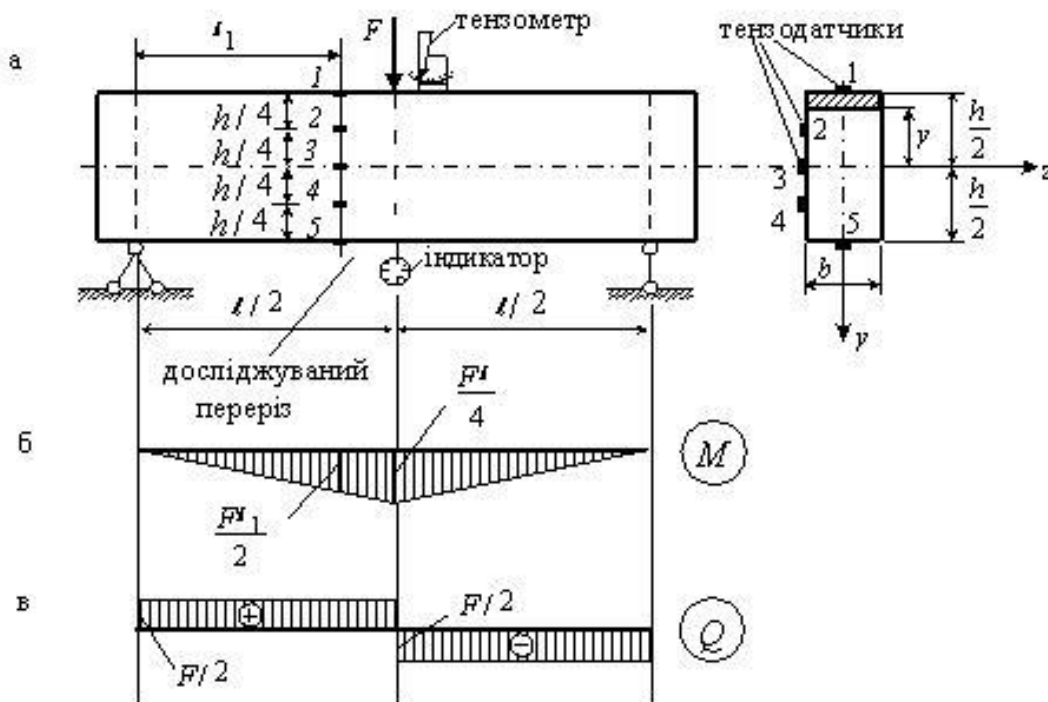


Рис. 2.20. Схема розташування тензодатчиків (а), епюри згинальних моментів (б) і поперечних сил (в)

Прогин досліджуваного перерізу балки визначають експериментально індикатором (рис. 2.19, а). Значення прогину цього перерізу знаходять за формулою

$$f = \frac{F l^3}{48 E J}. \quad (2.29)$$

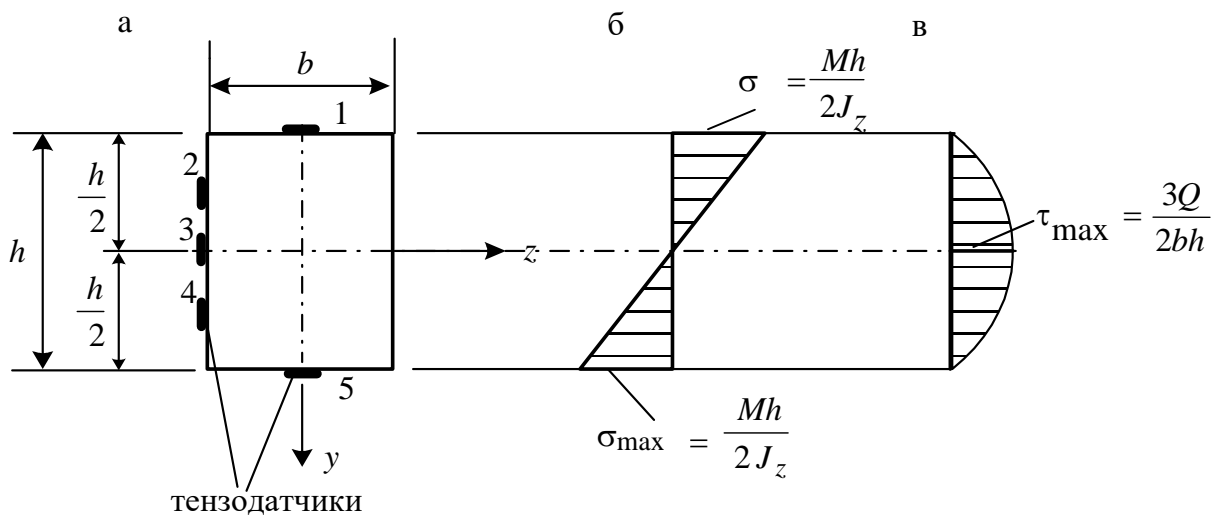


Рис. 2.21. Схема поперечного перерізу (а), епюри нормальних напружень (б) і дотичних напружень (в)

### 2.10.2. Послідовність проведення дослідів

1. Установити досліджувану балку на роликові опори, використовуючи водночас пристосування для випробувань на згин, що входять до складу гідравлічного преса (див. п. 1.2).

2. Установити механічний індикатор (див. п. 1.3). Шток індикатора повинен торкатися нижньої полиці балки в досліджуваному перерізі.

3. Установити підйомний тензометр (див. п. 1.5) у досліджуваному перерізі.

4. Підключити тензодатчики до підсилювача. Увімкнути блок живлення. Через 5 хв установка готова до роботи.

5. Зробити випробувальне навантаження балки.

6. Провести остаточні випробування. Результати записати в бланк лабораторної роботи 10 (дод. 1). Побудувати епюру деформацій по висоті перерізу. Порівняти дослідні і теоретичні дані.

### Контрольні запитання

1. Як розподіляються нормальні напруження по висоті балки?

2. Як розподіляються дотичні напруження по висоті балки?

3. Чи змінюються нормальні і дотичні напруження по ширині балки?

4. Де в поперечному перерізі балки нормальні напруження дорівнюють нулю, а дотичні – досягають максимуму?

5. За якою формулою визначають нормальні напруження в перерізі балки?

6. За якою формулою визначають дотичні напруження в перерізі балки?

7. Яку характеристику матеріалу потрібно знати, щоб визначити прогин?

## 2.11. Визначення прогинів статично невизначної балки

*Мета роботи:* визначити дослідним шляхом величину прогину і порівняти цю величину з теоретичними розрахунками.

### 2.11.1. Короткі теоретичні відомості

Статично невизначною стержневою системою ми називаємо таку систему, у якій при дії довільного навантаження, температури, зсуву опорних чи інших зв'язків не всі поздовжні, поперечні сили і моменти можуть бути знайдені з рівнянь рівноваги твердого тіла або системи твердих тіл. Наявність зайвих зв'язків є необхідною і достатньою ознакою статичної невизначеності. Кількість зайвих зв'язків називається ступенем статичної невизначеності системи. Формула для визначення кількості зайвих зв'язків у плоских балках має вигляд

$$L = C_0 + 2Ш - 3Д, \quad (2.30)$$

де  $C_0$  – кількість опорних зв'язків;

Ш – кількість шарнірів, що з'єднують окремі частини (диски Д) балки.

Визначимо ступінь статичної невизначеності балки, показаної на рис. 2.22.

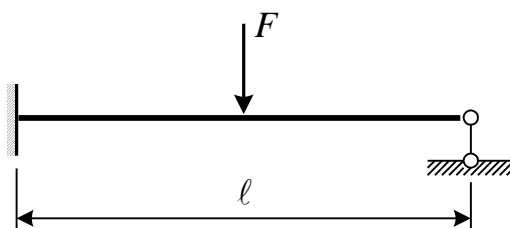


Рис. 2.22. Розрахункова схема статично невизначної балки

Балка складається з одного диска,  $D=1$ . Вона прикріплена до землі за допомогою чотирьох опорних стержнів ( $C_0=4$ ). Оскільки  $D=1$ , то  $\Pi=0$ .

Таким чином:  $L=4-0-3=1$ , тобто балка один раз статично невизначна. Основна система показана на рис. 2.23.

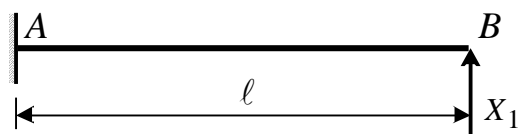


Рис. 2.23. Основна система

Канонічне рівняння методу сил має такий вигляд:

$$X_1 \delta_{11} + \Delta_{1f} = 0, \quad (2.31)$$

де  $\delta_{11} = \int_a^b \frac{M_1^2 dx}{EJ}$ ;  $\Delta_{1f} = \int_a^b \frac{M_1 M_f}{EJ} ds$ .

Для знаходження коефіцієнта  $\delta_{11}$  і вільного члена  $\Delta_{1f}$  в основній системі побудуємо епюри  $M_1$  і  $M_f$  (рис. 2.24).

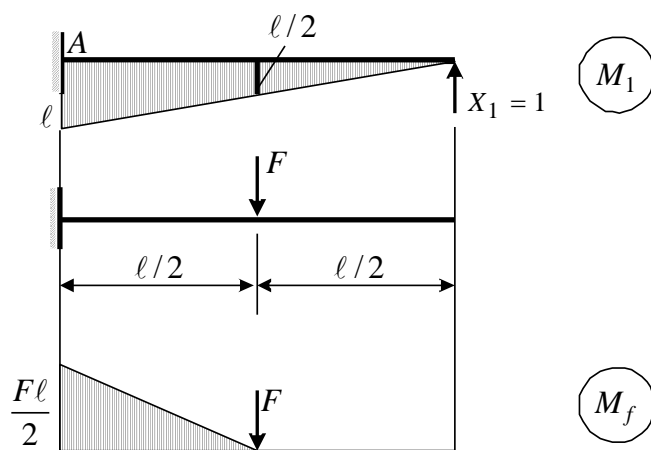


Рис. 2.24. Епюри  $M_1$  і  $M_f$  в основній системі

Для визначення коефіцієнта  $\delta_{11}$  і вільного члена  $\Delta_{1f}$  «перемножимо» епюри за правилом Верещагіна:



$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ} \left( \frac{1}{2} \cdot \ell \cdot \ell \cdot \frac{2}{3} \ell \right) = \frac{\ell^3}{3EJ};$$

$$\Delta_{1f} = -\frac{1}{EJ} \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{F\ell}{2} \cdot \frac{\ell}{2} \left( \frac{2}{3} \ell + \frac{1}{3} \cdot \frac{\ell}{2} \right) \right] = -\frac{5F\ell^3}{48EJ}.$$

З канонічного рівняння (2.31) знайдемо  $X_1$

$$X_1 = \frac{5F}{16}.$$

Побудуємо епюру моментів у заданій статично невизначній системі (рис. 2.25, а)

$$M = M_1 X_1 + M_f.$$

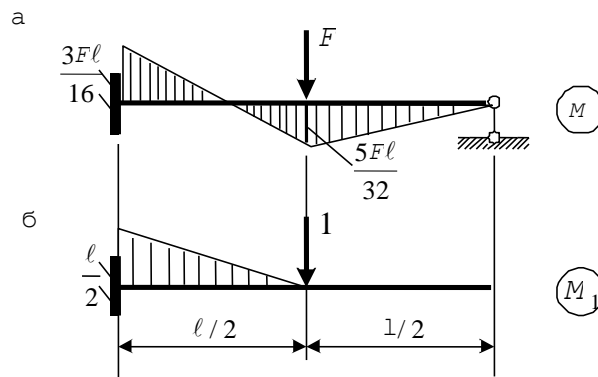


Рис. 2.25. Епюра моментів у заданій статично невизначній системі (а), одинична епюра  $M_1$  (б)

Для того, щоб знайти переміщення, необхідно в основній системі за напрямком шуканого переміщення прикласти одиничну силу і побудувати епюру  $M_1$  (рис. 2.25, б), а потім цю епюру «перемножити» на епюру  $M$ .

Теоретичне значення прогину дорівнює

$$f_{\tau} = \frac{1}{EJ} \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{\ell}{2} \cdot \frac{\ell}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{3F\ell}{16} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\ell}{2} \cdot \frac{\ell}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{5F\ell}{32} \right] = \frac{7F\ell^3}{768EJ}. \quad (2.32)$$

Максимальне нормальне напруження визначається за такою формулою:  $\sigma_{\max} = \frac{3F\ell}{16W_z}$ .

### **2.11.2. Послідовність проведення досліду**

1. Разом з опорними пристроями установити балку на траверсу випробувальної гідравлічної машини.
2. У місцях прикладання зосередженої сили установити розподільну накладку.
3. Установити індикатор і на його шкалі виставити «0».
4. Увімкнути гідравлічну машину і на шкалі силовимірювача зафіксувати «0».
5. Даючи однакові збільшення навантаження (10 кН), зробити два навантаження зразка, що випробовується.
6. Після кожного збільшення навантаження реєструвати на шкалі індикатора збільшення величини переміщень точки прикладання навантаження і заносити його в бланк лабораторної роботи 11 (дод. 1).
7. При навантаженні зразка найбільшим навантаженням зафіксувати величину повного переміщення перерізу  $f_{\text{оп}}$ .
8. За формулою (2.23) обчислити теоретичну величину переміщення. Визначити розбіжність між ними у відсотках (припустима величина розбіжності не повинна перевищувати 5 %).

### **Контрольні запитання**

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Який ступінь статичної невизначеності і як він визначається?
3. Як одержати із заданої балки її основну систему, якщо зробити розрахунок методом сил?
4. Як знайти теоретичне значення прогину в статично невизначній балці?
5. Які причини впливають на розбіжність між дослідною і теоретичною величинами прогину?
6. Як улаштований індикатор?
7. Як забезпечити защемлення кінця балки?

## 2.12. Випробування на кручення круглого циліндричного стержня

*Мета роботи:* визначити межі пропорційності, міцності і модуль зсуву сталі при крученні.

### 2.12.1. Короткі теоретичні відомості

Кручення є простою деформацією, що викликана дією крутних моментів (рис. 2.26). Такої деформації зазнають вали різних машин, гвинтові циліндричні пружини, елементи просторових конструкцій та ін. На кручення випробовують циліндричні зразки за ГОСТ 3565-80. Нормальними називаються зразки діаметром 10 мм і розрахунковою довжиною 100 мм. Нормативний документ дає змогу випробовувати на кручення пропорційні зразки й інших розмірів (діаметром 15–20 мм), якщо це дає змогу випробувальна машина. Форма і розміри голівки зразка залежать від способу кріплення його в затискачах випробувальної машини. Ми використовуємо для випробування зразок діаметром 10 мм (рис. 2.26).

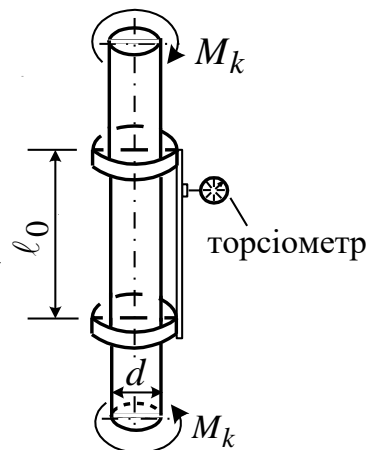


Рис. 2.26. Схема випробувань

При крученні стержня круглого поперечного перерізу кут закручування можна визначити за формулою

$$\varphi = M_{кр} \ell / GJ_{\rho}, \quad (2.33)$$

де  $M_{кр}$  — крутний момент;

$\ell$  – довжина стержня;

$G$  – модуль зсуву матеріалу або модуль пружності другого роду;

$J_\rho$  – полярний момент інерції поперечного перерізу стержня.

Для суцільного перерізу його визначають за залежністю

$$J_\rho = \pi d^4 / 32. \quad (2.34)$$

Добуток  $GJ_\rho$  називається жорсткістю при крученні.

Із формули (2.33) видно, що якщо знайти експериментально крутний момент  $M_{кр}$  і кут закручування  $\varphi$ , то модуль зсуву можна обчислити за формулою

$$G = M_{кр} \ell / \varphi J_\rho. \quad (2.35)$$

Залежність (2.33) виражає закон Гука при крученні. Він справедливий тільки при напруженнях, менших від межі пропорційності при крученні  $\tau_{пц}$ . Тому при проведенні досліду треба стежити, щоб крутний момент не перевищував значення  $M_{пц}$ , що відповідає межі пропорційності  $\tau_{пц}$  (рис. 2.27).

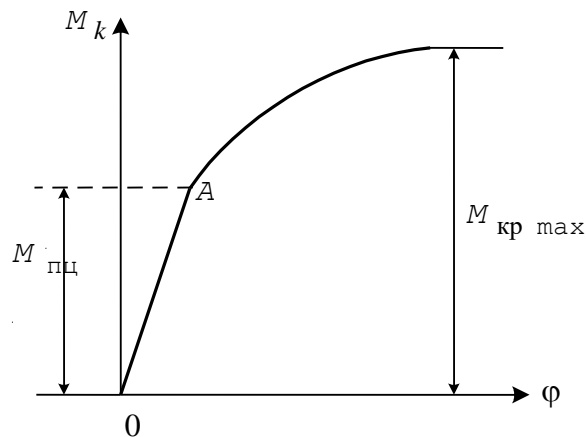


Рис. 2.27. Діаграма кручення

Прямолінійна частина діаграми до точки А відповідає закону Гука. Точка А відповідає пропорційності, яка визначається за формулою

$$\tau_{\text{шц}} = \frac{M_{\text{шц}}}{W_{\rho}}, \quad (2.36)$$

де  $W_{\rho} = \pi d^3/16$  – полярний момент опору поперечного перерізу стержня. Щоб визначити  $\tau_{\text{шц}}$ , необхідно знайти величину крутного моменту  $M_{\text{шц}}$ . Цю величину можна було б визначити із діаграми кручення, яку автоматично креслить випробувальна машина. Однак цей метод був би занадто грубим, оскільки насправді замість прямої ОА виходить крива, хоча вона й дуже близько наближається до прямої, яка відповідає закону Гука; крім того, при мілкому масштабі діаграми важко точно визначити точку А, де пряма переходить у криву. Тому для більш точного визначення  $M_{\text{шц}}$  скористаємось тим же методом, який був використаний для знаходження межі пропорційності сталі при розтяганні (див. п. 2.2), а саме: будемо надавати випробовуваному зразку крутний момент рівними ступенями  $\Delta M_k$  і виміряти приріст кута закручування  $\Delta\varphi$ , який відповідає кожному ступеню  $\Delta M_k$ . Той крутний момент, вище якого приріст кута закручування  $\Delta\varphi$  буде відрізнятись від попереднього  $\Delta\varphi$  більше ніж на 50 %, буде вважатись  $M_{\text{шц}}$ , який відповідає межі пропорційності.

Модуль зсуву  $G$ , модуль поздовжньої пружності  $E$  та коефіцієнт Пуассона  $\nu$  пов'язані між собою таким співвідношенням:

$$G = E/2 (1 + \nu). \quad (2.37)$$

### ***2.12.2. Послідовність проведення дослідів***

1. Виміряти за допомогою штангенциркуля діаметр зразка та записати його в бланк лабораторної роботи 12 (дод. 1).

2. Закріпити зразок у затискачах випробувальної машини (див. п. 1.2).

3. Закріпити торсіометр на зразку для вимірювання кутів закручування і записати в бланк лабораторної роботи базу  $\ell_0 = 50$  мм.

4. Визначити за формулою (2.36) крутний момент  $M_{\text{щ}}$  і ступінь навантаження  $\Delta M = (1/6 - 1/7) M_{\text{щ}}$ , округлюючи його до цілого числа.

5. Дати попереднє навантаження крутним моментам  $\Delta M$  і записати в бланк лабораторної роботи показники торсіометра.

6. Послідовно, збільшуючи крутний момент ступенями  $\Delta M$ , записати відліки за торсіометром.

7. Закінчивши випробування, розвантажити зразок, потім довести його до початкового стану і зробити контрольний відлік за індикатором торсіометра. Він повинен збігатися з початковим, що підтвердить випробування зразка в межах дії закону Гука.

8. Виконати обробку одержаних результатів випробувань за схемою, наведеною в бланку лабораторної роботи 12 (дод. 1).

### **Контрольні запитання**

1. Яку залежність виражає закон Гука при крученні?
2. Як визначити максимальні дотичні напруження при крученні?
3. Як обчислити полярний момент інерції та момент опору суцільного круглого поперечного перерізу?
4. Чому під час експерименту напруження має не перевищувати межу пропорційності?
5. За якою формулою визначають модуль зсуву?
6. Якими приладами вимірюють кути закручування?
7. Як пов'язані між собою модуль пружності  $E$ , модуль зсуву  $G$  та коефіцієнт Пуассона  $\nu$ ?
8. Для чого при проведенні досліду дають попереднє навантаження?
9. Які зразки використовують для випробувань матеріалів на кручення?

### **2.13. Визначення головних напружень при крученні порожнистого стержня круглого поперечного перерізу**

*Мета роботи:* визначити експериментально головні напруження в порожнистому стержні круглого поперечного перерізу і порівняти їх з теоретичними значеннями.

### 2.13.1. Короткі теоретичні відомості

Порожнисті стержні круглих поперечних перерізів розраховують на міцність і твердість за такими ж формулами, що і суцільні. Кут закручування в межах пружних деформацій визначається формулою

$$\varphi = M_{\text{кр}} \ell / GJ_{\rho}, \quad (2.38)$$

де  $M_{\text{кр}}$  – крутний момент;

$\ell$  – довжина стержня;

$G$  – модуль зсуву ;

$J_{\rho}$  – полярний момент інерції поперечного перерізу, який можна знайти для порожнистого круглого стержня, як

$$J_{\rho} = \pi(D^4 - d^4)/32, \quad (2.39)$$

де  $D$  – зовнішній діаметр;

$d$  – внутрішній діаметр перерізу.

Найбільші дотичні напруження діють на зовнішній поверхні стержня. Їх можна визначити за формулою

$$\tau_{\text{max}} = M_{\text{кр}} / W_{\rho}, \quad (2.40)$$

де  $W_{\rho}$  – полярний момент опору поперечного перерізу. Його можна обчислити за виразом

$$W_{\rho} = \pi(D^4 - d^4)/16D. \quad (2.41)$$

При крученні порожнистих стержнів круглих поперечних перерізів матеріал їх зазнає плоского стану з відомим положенням головних площадок, що утворюють з віссю стержня кути  $\pm 45^\circ$ . Тому для визначення головних деформацій на зовнішній поверхні стержня треба використовувати узагальнений закон Гука

$$\varepsilon_1 = (\sigma_1 - \nu\sigma_2)/E; \quad \varepsilon_2 = (\sigma_2 - \nu\sigma_1)/E, \quad (2.42)$$

де  $E$  – модуль поздовжньої пружності;  
 $\nu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу;  
 $\sigma_1$  і  $\sigma_2$  – головні напруження.

З формул (2.42) одержуємо вирази для визначення головних напружень

$$\sigma_1 = (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)E/(1 - \nu^2); \quad \sigma_2 = (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)E/(1 - \nu^2). \quad (2.43)$$

Отже, для визначення головних напружень експериментальним методом досить вимірювати головні деформації  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ .

Формули (2.43) можна спростити, якщо взяти до уваги, що

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon, \quad \text{а} \quad \sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{\max}, \quad (2.44)$$

де  $\tau_{\max}$  – найбільше дотичне напруження, що визначається формулою (2.40).

Обмірювані деформації  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  можуть дещо відрізнятися одна від одної за абсолютною величиною внаслідок похибок експерименту. Тому для зменшення похибки експерименту  $\varepsilon$  треба обчислити за формулою

$$\varepsilon = (|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|)/2. \quad (2.45)$$

З огляду на (2.44) і (2.45) формули (2.43) можна привести до вигляду

$$\sigma_1 = E\varepsilon/(1 + \nu), \quad \sigma_2 = E\varepsilon/(1 + \nu). \quad (2.46)$$

Для перевірки отриманих експериментальних значень головних напружень (2.46) їх варто порівняти з теоретичними значеннями, визначеними за формулою (2.40).

### ***2.13.2. Послідовність проведення дослідів***

1. За 5 хв до початку дослідів увімкнути тензостанцію ВПН-8 в електромережу і приєднати до неї робочі тензодатчики.

2. Виміряти за допомогою штангенциркуля зовнішній  $D$  і внутрішній  $d$  діаметри зразка і записати їх у бланк лабораторної роботи 13 (дод. 1).



3. Визначити за формулою  $F_{\text{шц}} = W_{\rho} \tau_{\text{шц}} / h$  максимально допустиме навантаження  $F$ .  $\tau_{\text{шц}}$  взяти з роботи 2.12.
4. Прикласти початкове навантаження  $0,3 F_{\text{шц}}$ .
5. Дати кінцеве навантаження силою  $F = 0,9 F_{\text{шц}}$  і записати в бланк лабораторної роботи показання всіх датчиків.
6. Закінчивши випробування, розвантажити зразок.
7. Виконати обробку отриманих результатів випробувань за схемою, наведеною в бланку лабораторної роботи 13 (дод. 1).
8. Отримані експериментальні значення головних напружень порівняти з теоретичними, обчисленими за формулою (2.40).

### **Контрольні запитання**

1. Яку установку використовують для виконання цієї лабораторної роботи?
2. Яким методом вимірюють головні деформації?
3. Чому дорівнюють головні напруження при крученні стержнів круглих поперечних перерізів?
4. Як визначити полярний момент інерції й опору порожнистого стержня круглого поперечного перерізу?
5. Як розташовані головні площадки при крученні стержнів круглих поперечних перерізів?
6. Якого напруженого стану зазнає матеріал порожнистого стержня круглого поперечного перерізу при крученні?
7. За якими формулами визначаються головні напруження?
8. За якою формулою визначається максимально допустиме навантаження?
9. Для чого прикладається попереднє навантаження?

## **2.14. Випробування циліндричної пружини на стискання**

*Мета роботи:* визначити експериментально залежність деформації пружини від осьового навантаження; знайти модуль зсуву, зіставити отримане осідання пружини з розрахунковим.

### **2.14.1. Короткі теоретичні відомості**

Часто в різних машинах і конструкціях застосовують гвинтові циліндричні пружини (рис. 2.28) з малим кроком витків

(кут підйому витків  $\alpha < 15^\circ$ ), які піддаються впливу сил, що розтягують або стискають.

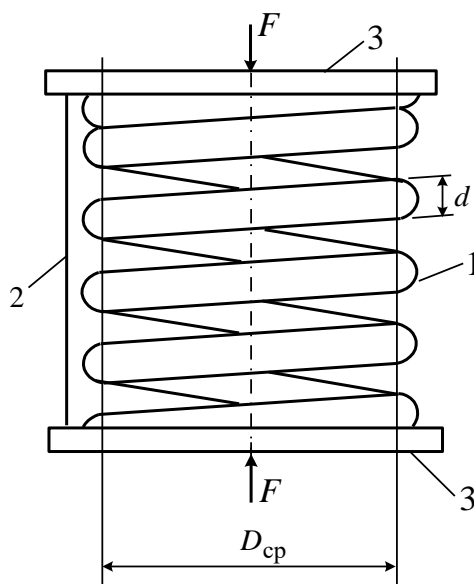


Рис. 2.28. Схема випробувань циліндричної пружини:  
1 – пружина; 2 – вимірювальна лінійка; 3 – опорні плити

При проектуванні таких пружин необхідно обчислювати найбільші напруження (для оцінки міцності) і деформації (для регулювання навантаження). Матеріал пружин під дією сил, що розтягують або стискають, переважнознає кручення. Осідання такої гвинтової циліндричної пружини визначають за формулою

$$\lambda = \frac{8FD_{cp}^3 n}{Gd^4}. \quad (2.47)$$

При виведенні цієї формули враховувалася дія тільки крутного моменту; не бралися до уваги такі фактори, як кривизна стержня пружини, що скручується, нахил витків, наявність поперечної сили й ін. Тому формула приблизна. Результати досліду повинні показати ступінь справедливості прийнятих гіпотез і придатності цієї формули для практичних розрахунків. З наведеної вище формули можна визначити модуль зсуву:

$$G = \frac{8\Delta F_{cp} D_{cp}^3 n}{\Delta\lambda_{cp} d^4}. \quad (2.48)$$

У процесі випробувань східчасто прикладають навантаження і заміряють відповідну їй деформацію пружини. За отриманими даними будують графік у координатах  $F - \lambda$  і визначають модуль зсуву (модуль пружності другого роду). Отриманий графік називають характеристикою пружини.

### ***2.14.2. Послідовність проведення дослідів***

1. Пружину встановити на нижню траверсу випробувального преса і навантажити.

2. Значення навантаження визначити по шкалі, розташованій на пульті керування преса, а величину осідання – по лінійці, розташованій на пружині.

3. Результати випробувань занести в бланк лабораторної роботи 14 (дод. 1), зробити обчислення і порівняти дослідні й теоретичні дані.

### **Контрольні запитання**

1. Які основні характеристики пружини і навіщо їх визначають?

2. Яка залежність осідання пружини від сили, що її викликала?

3. Як залежить осідання пружини від її конструктивних розмірів?

4. Як залежить осідання пружини від пружних властивостей матеріалів?

5. Як зміниться осідання пружини, якщо діаметр дроту зменшити у два рази?

6. Як можна визначити модуль зсуву?

7. Яка різниця між дослідним і розрахунковим значеннями осідання пружини?

8. Які фактори не враховані при виведенні формули для знаходження осідання?

### ***2.15. Визначення прогинів при косому згині***

*Мета роботи:* визначити прогини однопрогонової балки експериментальним методом при косому згині; перевірити принцип незалежності дії сил, на якому базується теорія косоного згину.

### 2.15.1. Короткі теоретичні відомості

Згин балки називається косим або неплоским, якщо навантаження діє в площині, що не збігається з жодною з головних площин поперечного перерізу балки. Наприклад, однопрогонова балка довжиною  $\ell$  прямокутного поперечного перерізу, навантажена силою  $F$ , яка утворює з віссю симетрії  $ou$  кут  $\alpha$  (рис. 2.29), зазнає косоного згину.

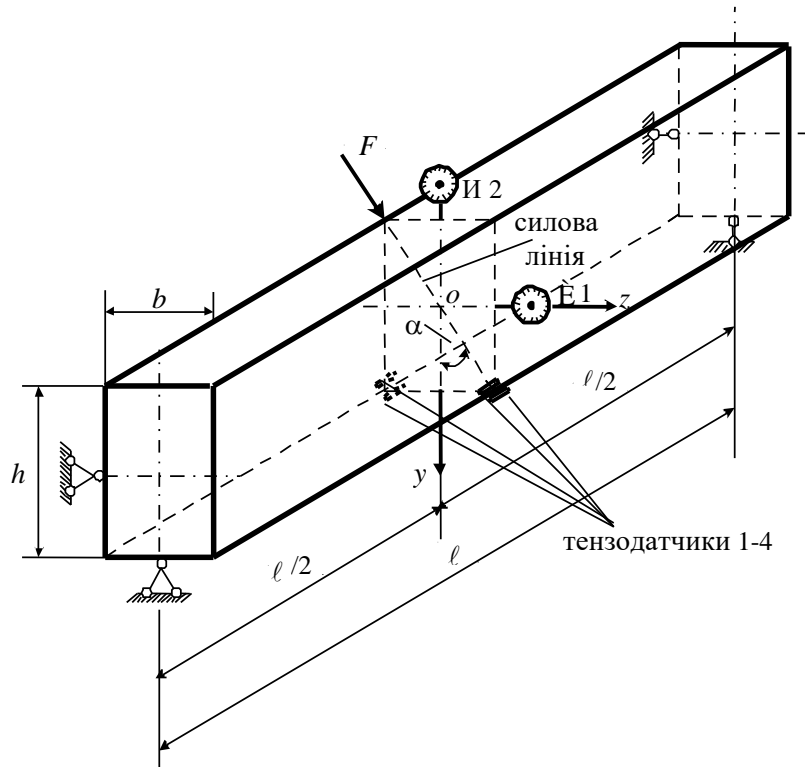


Рис. 2.29. Схема випробувань балки і розміщення вимірювальних приладів

Розкладемо діючу на балку силу  $F$  за напрямками головних центральних осей інерції поперечного перерізу

$$F_y = F \cos \alpha, \quad F_z = F \sin \alpha. \quad (2.49)$$

Тепер на основі принципу незалежності дії сил косий згин можна розглядати, як комбінацію двох прямих згинів. Від дії сил  $F_y$  і  $F_z$  прогин посередині балки за абсолютною величиною визначається, як при плоскому згині, за формулами:

$$f_y = F_y \ell^3 / 48 E J_z = F \ell^3 \cos \alpha / 48 E J_z; \quad (2.50)$$

$$f_z = F_z \ell^3 / 48 E J_y = F \ell^3 \sin \alpha / 48 E J_y, \quad (2.51)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу балки, а  $J_z$  і  $J_y$  – осьові моменти інерції поперечного перерізу, що визначають за формулами:

$$J_z = b h^3 / 12; \quad J_y = h b^3 / 12. \quad (2.52)$$

Повний прогин обчислюють як геометричну суму прогинів  $f_y$  і  $f_z$ :

$$f = \sqrt{f_y^2 + f_z^2}. \quad (2.53)$$

Він становить з віссю  $Oy$  кут  $\varphi$ , тангенс якого знаходять за виразом

$$\operatorname{tg} \varphi = f_z / f_y. \quad (2.54)$$

З діючою на балку силою  $F$  повний прогин  $f$  становить кут  $\beta$ , що визначається за формулою

$$\beta = \varphi - \alpha. \quad (2.55)$$

Принцип незалежності дії сил відповідає дійсності тільки в тих випадках, якщо деформації малі і розміщені в межах пружності. Тому діюче навантаження не повинно викликати напружень, більших за межу пропорційності матеріалу балки, тобто

$$\sigma_{\max} = \frac{F \ell}{4} (\cos \alpha + k \sin \alpha) / W_z \leq \sigma_{\text{пц}}, \quad (2.56)$$

де  $k = h/b$ ,  $W_z$  – момент опору поперечного перерізу балки, що знаходять за формулою

$$W_z = bh^2 / 6. \quad (2.57)$$

З нерівності (2.56) можна визначити максимальне навантаження на балку при проведенні випробування

$$F_{\text{мц}} = 4\sigma_{\text{мц}} bh^2 / 6\ell (\cos \alpha + k \sin \alpha). \quad (2.58)$$

### **2.15.2. Послідовність проведення дослідів**

1. Виміряти за допомогою штангенциркуля розміри поперечного перерізу балки  $h$  і  $b$  з точністю до 0,01 мм, а за допомогою лінійки – довжину балки  $l$  з точністю до 1 мм. Результати вимірів записати в бланк лабораторної роботи 15 (дод. 1).

2. Установити у вертикальному і горизонтальному положеннях індикатори I1 і I2 так, щоб їхні ніжки перетинали вісь балки.

3. Обчислити за формулою (2.58) найбільше допустиме навантаження  $F_{\text{мц}}$ .

4. Підключити тензодатчики до підсилювача. Увімкнути блок живлення. Через 3 хв установка готова до роботи.

5. Навантажити балку попереднім навантаженням  $F_1 = (0,1 - 0,2) F_{\text{мц}}$  і записати в бланк лабораторної роботи показання вертикального і горизонтального індикаторів.

6. Не знімаючи попереднього навантаження, навантажити балку кінцевим навантаженням  $F_2 = (0,8 - 0,9) F_{\text{мц}}$  і записати в бланк лабораторної роботи показання вертикального і горизонтального індикаторів.

7. Розвантажити балку і виконати обробку отриманих результатів за схемою, наведеною в бланку лабораторної роботи.

8. Отримані експериментальні значення повного прогину і кута  $\beta$  порівняти з теоретичними значеннями, обчисленими за формулами (2.53) і (2.55). Визначити поздовжні деформації і порівняти з їх теоретичним значенням. Побудувати епюру нормальних напружень. Показати силову площину, нейтральну лінію і площину прогинів.

## Контрольні запитання

1. Який згин називається косим?
2. Чи можливий косий згин для балок із круглими і квадратними поперечними перерізами?
3. За якими формулами визначають напруження в контурних точках у балках прямокутних поперечних перерізів при косому згині?
4. За допомогою яких приладів вимірюють переміщення в цій лабораторній роботі?
5. У чому полягає суть принципу незалежності дії сил?
6. Як впливає на міцність балки косий згин?
7. Як впливає на твердість балки косий згин?

### 2.16. Дослідження розподілу напружень при позацентровому стисканні з одним ексцентриситетом $z_0$

*Мета роботи:* визначити деформації у поперечному перерізі позацентрово стиснутого бруса. Порівняти дослідні і теоретичні дані.

#### 2.16.1. Короткі теоретичні відомості

Нехай на брус діє сила  $F$ , що паралельна подовжній осі, точка її прикладання розміщена на головній осі  $z$ , відстань до центра ваги перерізу становить  $z_0$  (рис. 2.30, а). Приведемо цю силу до центра ваги перерізу «О» (рис. 2.28, б). Нормальні напруження в довільному перерізі  $x$  визначимо, користуючись принципом незалежності дії сил, окремо від кожного силового фактора  $F$ ,  $M_y = Fz_0$ .

$$\sigma = \frac{F}{A} \left( 1 + \frac{z}{a} \right), \quad (2.59)$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу;

$a = i_y^2 / z_0$ ;  $i$  – радіус інерції перерізу,  $i_y^2 = J_y / A$ ,  $J_y$  – момент інерції щодо осі  $y$ .

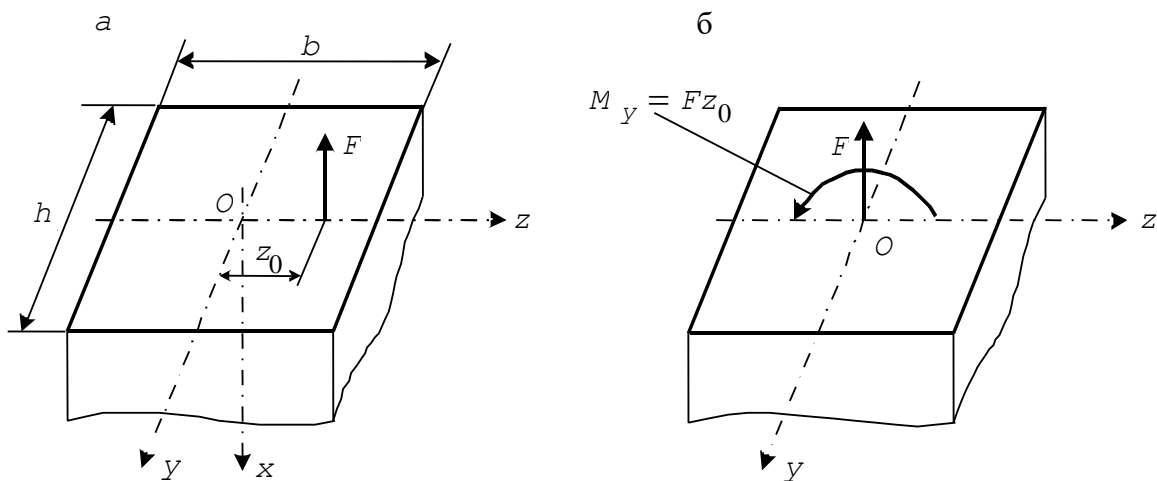


Рис. 2.30. Схеми впливів на брус

Щоб знайти положення нейтральної лінії, тобто геометричне місце точок з нормальними напруженнями, рівними нулю, необхідно праву частину рівняння (2.59) прирівняти до нуля. Тоді одержимо рівняння прямої, що відтинає відрізок  $a$  на осі  $z$ :

$$a = -\frac{i_y^2}{z_0}. \quad (2.60)$$

Положення нульової лінії залежить від розмірів і форми перерізу і від координати точки прикладання сили, але зовсім не залежить від величини сили. Якщо нульова лінія перетинає контур поперечного перерізу, то вона поділяє його на дві частини з різними знаками напружень. Якщо не перетинає – напруження у всіх точках поперечного перерізу будуть одного знака.

### 2.16.2. Послідовність проведення дослідів

1. Установити зразок на плиту гідравлічного преса.
2. За допомогою опорних пристроїв установити задане значення ексцентриситету  $z_0$ .
3. Установити тензometri на бічних гранях, перпендикулярних до осі  $z$ .
4. Увімкнути гідравлічний прес і установити на силовимірювальній шкалі нульове положення навантаження.
5. Установити стрілки тензометрів у положення «0» (Т2) і (Т1).



6. Після кожного збільшення навантаження реєструвати на шкалах тензометрів збільшення величин переміщень і заносити їх у бланк лабораторної роботи 16 (дод. 1).

7. При навантаженні зразка найбільшим навантаженням зафіксувати величини повного переміщення.

8. Обчислити дослідні і теоретичні величини напружень. Визначити похибку у відсотках.

### **Контрольні запитання**

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Сформулюйте принцип незалежності дії сил.
3. Як визначається радіус інерції перерізу?
4. Як визначаються моменти інерції прямокутного перерізу щодо головних центральних осей?
5. Дайте визначення нейтральної лінії.
6. Від яких факторів залежить положення нейтральної лінії?
7. Поясніть пристрій тензометра.
8. З яких простих деформацій складається позацентрове стискання?

## **2.17. Дослідження розподілу напружень при позацентровому стисканні з двома ексцентриситетами $y_0$ і $z_0$**

*Мета роботи:* визначити деформацію у перерізі позацентрово стиснутого бруса. Порівняти дослідні і теоретичні дані.

### **2.17.1. Короткі теоретичні відомості**

Нехай на брус діє сила  $F$ , що паралельна подовжній осі, точка її прикладання не лежить на жодній з головних осей перерізу  $z$  і  $y$  (рис. 2.31, а).

Приведемо цю силу до центра ваги перерізу «О» (рис. 2.31, б). Нормальні напруження в довільному перерізі  $x$  визначимо, користуючись принципом незалежності дії сил, окремо від кожного силового фактора  $F$ ,  $M_y = Fz_0$ ,  $M_z = Fy_0$ .

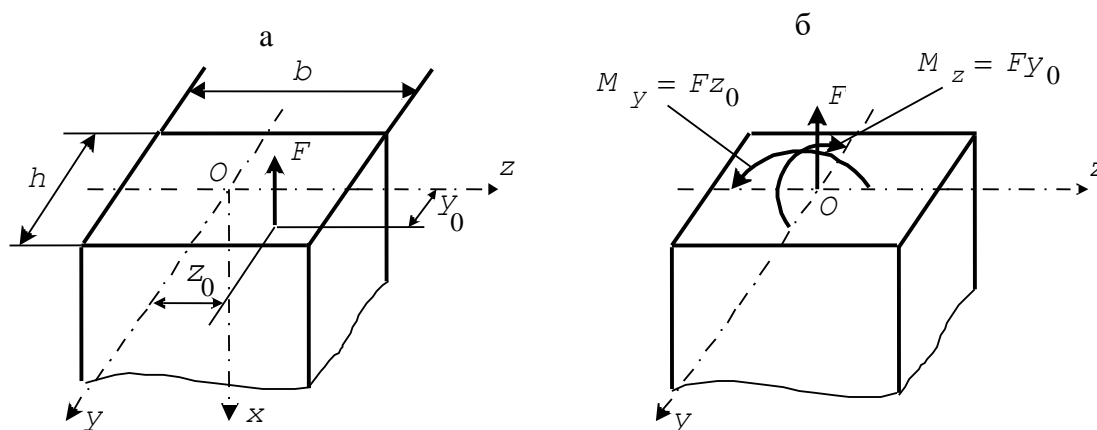


Рис. 2.31. Схеми впливів на брус

$$\sigma = \frac{F}{A} \left( 1 + \frac{z}{a} + \frac{y}{d} \right), \quad (2.61)$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу;  $a = i_y^2 / z_0$ ;  $d = i_z^2 / y_0$ ;  $i_y$  і  $i_z$  – радіуси інерції перерізу,  $i_y^2 = J_y / A$ ,  $i_z^2 = J_z / A$ ;  $J_y$ ,  $J_z$  – моменти інерції щодо осі  $y$  і  $z$ .

Щоб знайти положення нейтральної лінії, тобто геометричне місце точок з нормальними напруженнями, рівними нулю, необхідно праву частину рівняння (2.61) прирівняти до нуля. Тоді одержимо рівняння прямої, що відтинає відрізки  $a$  і  $d$  на головних центральних осях:

$$a = -\frac{i_y^2}{z_0}, \quad d = -\frac{i_z^2}{y_0}, \quad (2.62)$$

де  $a$  – відрізок, який нульова лінія відтинає на осі  $z$ ;

$d$  – відрізок, який нульова лінія відтинає на осі  $y$ .

Положення нульової лінії залежить від розмірів і форми перерізу і від координати точки прикладання сили, але зовсім не залежить від величини сили. Якщо нульова лінія перетинає контур поперечного перерізу, то вона поділяє його на дві частин з різними знаками напружень. Якщо не перетинає – напруження у всіх точках поперечного перерізу будуть одного знака.

### **2.17.2. Послідовність проведення досліду**

1. Установити зразок на плиту гідравлічного преса.
2. За допомогою опорних пристроїв установити задані ексцентриситети.
3. Увімкнути ВВП-8 і перевірити чутливість тензодатчиків.
4. Увімкнути гідравлічний прес і установити на силовимірювальній шкалі нульове положення навантаження.
5. Дати збільшення навантаження. Зафіксувати показання тензодатчиків. Визначити деформації в точках 1, 2, 3, 4 і занести в бланк лабораторної роботи 17 (дод. 1).
6. Зробити теоретичні розрахунки. Знайти напруження  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ,  $\sigma_4$ , а потім деформації  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ ,  $\varepsilon_4$ .
7. Порівняти результати теоретичних і дослідних даних. Оцінити похибку у відсотках.

### **Контрольні запитання**

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. На основі якого принципу отримані сумарні напруження в перерізі позацентрово стиснутого бруса.
3. Як визначаються радіуси інерції перерізу?
4. Як визначаються моменти інерції щодо головних центральних осей перерізу у вигляді прямокутника?
5. Дайте визначення нейтральної осі.
6. Від яких факторів залежить положення нейтральної лінії?
7. Поясніть пристрій тензодатчика.

### **2.18. Дослідження деформацій і розподілів напружень при згині з крученням**

*Мета роботи:* у досліджуваному перерізі визначити головні напруження, кут нахилу головних площадок і порівняти з теоретичними значеннями.

#### **2.18.1. Короткі теоретичні відомості**

Розглянемо стержень, що має круглий поперечний переріз діаметром  $D$ . Стержень затиснений з однієї сторони (переріз В) і

вільний на другій стороні (переріз А) (рис. 2.32, а). Стержень навантажений на вільному кінці силою  $F$  і крутним моментом  $M_{кр}$ . Як показують побудовані епюри  $M$  і  $M_{кр}$ , небезпечним перерізом буде переріз В (у затисненні).

Розріжемо стержень у цьому перерізі і скористаємося способом додавання дії сил для обчислення напружень від дії згинального і крутного моментів.

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (2.63)$$

$$\tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{W_{\rho}} = \frac{M_{кр}}{2W},$$

де  $W$  – момент опору, рівний  $W = \frac{\pi D^3}{32}$ .

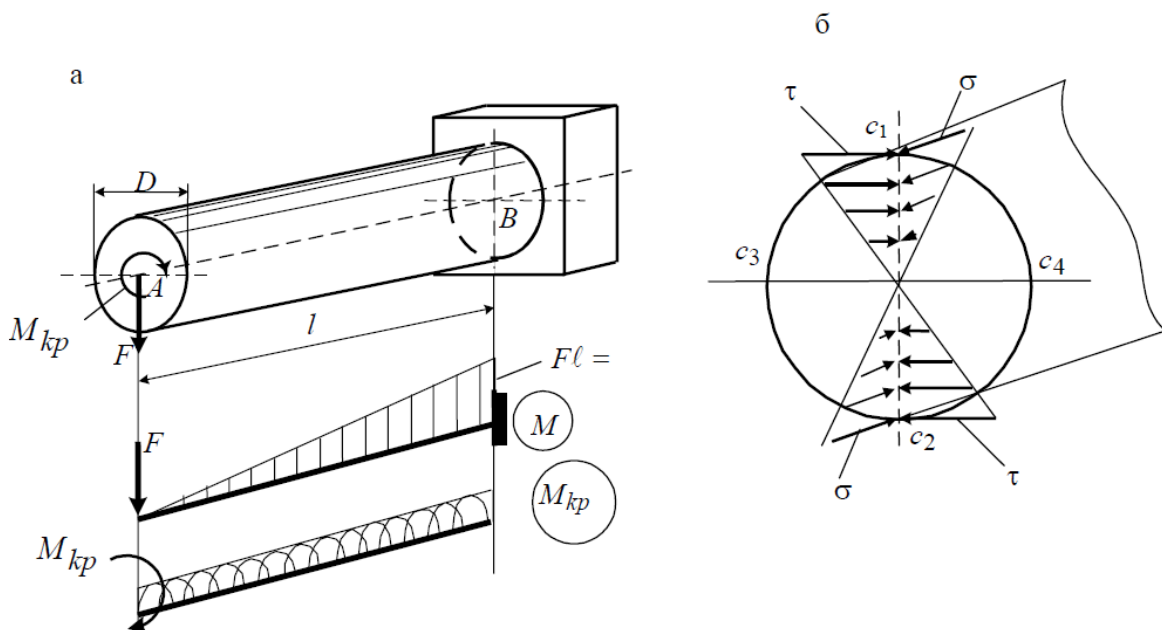


Рис. 2.32. Схема консольного стержня, що зазнає згину із крученням

У точках  $C_1$  і  $C_2$  контуру будуть діяти найбільші нормальні і найбільші дотичні напруження (рис. 2.32, б). До найбільших дотичних напружень від кручення в точках  $C_3$  і  $C_4$  (рис. 2.32, б)

додаються дотичні напруження від згину. Однак ці напруження будуть невеликі. Результати розрахунків показують, що напружений стан буде небезпечнішим у точках  $C_1$  і  $C_2$ . Виділений елемент матеріалу в цих точках зазнає плоского напруженого стану. Як відомо, для перевірки міцності матеріалу в цьому випадку необхідно знайти головні напруження  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau_{кр}^2} \quad (2.64)$$

і положення головних площадок

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{кр}}{\sigma}. \quad (2.65)$$

Для здійснення дослідного визначення двох головних напружень і положення головної площадки в точці  $C_1$  наклеєна розетка з трьох датчиків омічного опору під кутами до осі стержня  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 45^\circ$  і  $\alpha_3 = 90^\circ$ . Знаючи відносні подовження  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_{45}$  і  $\varepsilon_{90}$ , обмірювані за допомогою датчиків, можна перейти до визначення головних напружень  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  і головних площадок

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2),$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1),$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{90} - \varepsilon_{45})^2},$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}.$$

### **2.18.2. Послідовність проведення досліду**

1. Ознайомитися з дослідною установкою. Зробити необхідні виміри і занести їх у бланк лабораторної роботи 18 (дод. 1).
2. Підключити тензодатчики до підсилювача. Через 3 хв установка готова до випробувань.
3. Зробити спробне навантаження. Перевірити роботу вимірювальної апаратури.
4. Зробити випробування. Записати результати випробування у бланк лабораторної роботи .
5. Зробити обчислення і порівняти експериментальні дані з їх теоретичними значеннями.

### **Контрольні запитання**

1. Сформулюйте принцип незалежності дії сил (спосіб додавання дії сил) і умову його застосування.
2. Які внутрішні силові фактори виникають при поперечному згині і як вони визначаються?
3. Який внутрішній силовий фактор виникає при крученні?
4. Які напруження викликає згинальний момент і як вони визначаються?
5. Які напруження викликає крутний момент і як записати формулу для їхнього визначення?
6. Як визначаються головні напруження і які умови їх виникнення?
7. Як знайти положення головних площадок?

## **2.19. Дослідження явища втрати стійкості стиснутих стержнів**

*Мета роботи:* перевірити формулу Ейлера для визначення критичної сили довгого стиснутого стержня при різних випадках закріплення його кінців.

### **2.19.1. Короткі теоретичні відомості**

Відомо, що втрата стійкості стиснутого стержня відбувається при досягненні стиснутою силою критичного

значення  $F_{kp}$  (рис. 2.33). Опір стиснутого стержня втраті стійкості визначається його гнучкістю, яку обчислюють за формулою

$$\lambda = \mu \ell / i_{\min}, \quad (2.66)$$

де  $\ell$  – довжина стержня;

$\mu$  – коефіцієнт приведеної довжини, що залежить від способу закріплення кінців стержня (табл. 2.1);

$i_{\min}$  – мінімальний радіус інерції поперечного перерізу, що обчислюють за формулою

$$i_{\min} = \sqrt{J_{\min} / A}. \quad (2.67)$$

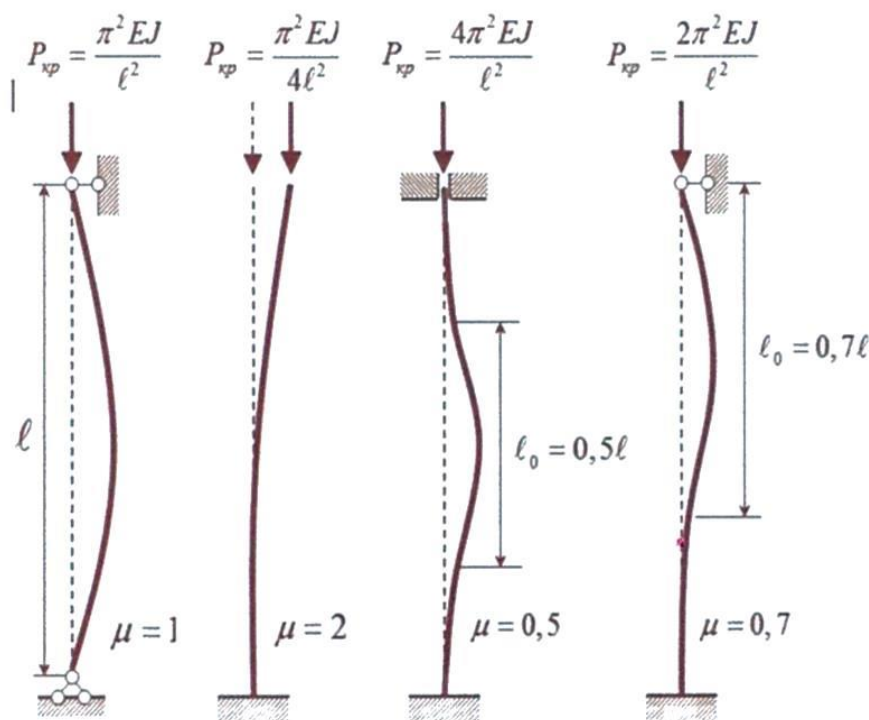


Рис. 2.33. Схеми закріплення стержнів

Таблиця 2.1

Значення коефіцієнтів  $\mu$

Спосіб закріплення кінців	Затиснуті	Один затиснутий, а другий – шарнірний	Шарнірно-закріплені	Один затиснутий, а другий – вільний
Коефіцієнт приведеної довжини	0,5	0,7	1	2

У формулі (2.67)  $J_{\min}$  – мінімальний момент інерції, а  $A$  – площа поперечного перерізу без урахування ослаблень.

Гнучкість, при якій критичне напруження в стержні дорівнює межі пропорційності матеріалу  $\sigma_{\text{пц}}$ , називається граничною. Вона визначається за формулою

$$\lambda_{\text{гр}} = \sqrt{\pi^2 E / \sigma_{\text{пц}}}, \quad (2.68)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу стержня.

Для маловуглецевої сталі гранична гнучкість  $\lambda_{\text{гр}} \approx 100$ .

Залежно від величини гнучкості, критична сила для стиснутого стержня визначається за формулами Ейлера, або Ясинського. Наприклад, для маловуглецевої сталі:

а) якщо  $\lambda \geq \lambda_{\text{гр}} = 100$  ( $\sigma_{\text{кр}} \leq \sigma_{\text{пц}}$ ), то застосовують формулу Ейлера

$$F_{\text{кр}} = \pi^2 E J_{\min} / (\mu \ell)^2; \quad (2.69)$$

б) якщо  $40 \leq \lambda_{\text{гр}} < 100$  ( $\sigma_{\text{пц}} \leq \sigma_{\text{кр}} \leq \sigma_{\text{т}}$ ), то застосовують формулу Ясинського

$$F_{\text{кр}} = A(a - b\lambda), \quad (2.70)$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу стержня без урахування ослаблень;

$a$  і  $b$  – емпіричні коефіцієнти (для маловуглецевої сталі  $a = 310$  МПа,  $b = 1,14$  МПа).

### **2.19.2. Послідовність проведення дослідів**

1. Виміряти довжину і розміри поперечного перерізу кожного зразка. Результати вимірів записати в бланк лабораторної роботи 19 (дод. 1).

2. Установити і закріпити зразок у затискачах випробувальної машини.

3. Статично навантажити зразок, водночас необхідно стежити за стержнем: якщо навантаження не досягло критичного



значення, то при розвантаженні він знову буде у початковому положенні.

4. Зафіксувати величину критичного навантаження  $F_{кр}$  (стержень набув нової вигнутої форми рівноваги) і записати її в бланк лабораторної роботи.

5. Розвантажити зразок.

Для довгого стержня дослід повторюють не менше трьох разів. Середнє значення критичної сили з трьох вимірів приймають за її експериментальне значення. Результати випробувань заносять у бланк лабораторної роботи 19 (дод. 1).

### **Контрольні запитання**

1. У чому полягає втрата стійкості стиснутого стержня?
2. Як теоретично визначається критична сила?
3. У яких межах гнучкостей справедлива формула Ейлера?
4. Як експериментально визначається критична сила?
5. Що називається гнучкістю стержня?
6. У яких межах змінюється коефіцієнт приведеної довжини стержня і від чого він залежить?
7. У яких випадках застосовують формулу Ясинського для визначення критичної сили?
8. У якій площині відбувається втрата стійкості стиснутого стержня?
9. Чому не вигідно використовувати високоміцні матеріали для виготовлення довгих стиснутих стержнів?

## **2.20. Дослідження концентрації напружень у штабах**

*Мета роботи:* досліджувати розподіл напружень у перерізі штаби, ослабленої круглим отвором; визначити теоретичний коефіцієнт концентрації напружень.

### **2.20.1. Короткі теоретичні відомості**

Практика показує, що зміна площі поперечного перерізу стержня, викликана наявністю канавок, викружок, тріщин, надрізів тощо, призводить до нерівномірного розподілу

(концентрації) напружень. Фактори, що є причиною концентрації напружень, називають концентраторами напружень. Максимального значення напруження досягають у безпосередній близькості від концентратора напружень і обмежуються дуже невеликою частиною площі поперечного перерізу, тобто мають місцевий характер. Тому напруження біля місць концентрації називається місцевим.

Кількісною характеристикою концентрації напружень є коефіцієнт концентрації, що дорівнює відношенню найбільшого місцевого напруження  $\sigma_{\max}$  до номінального  $\sigma_H$ :

$$\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_H. \quad (2.71)$$

В окремих випадках точно можна визначити коефіцієнт концентрації напружень методами теорії пружності, яка базується на припущенні про однорідність, ізотропність і повну пружність матеріалу. У більш складних випадках, якщо має рішення теорії пружності, коефіцієнт визначають експериментальним шляхом. Якщо деформування відбувається в межах закону Гука, то при проведенні експерименту вимірюють деформації кожним з відомих способів (див. п. 1), а потім обчислюють напруження і коефіцієнт концентрації напружень за формулою (2.71). Теоретичне рішення задачі про розтягування штаби з круглим отвором одержав Кірш. Графік розподілу розтягувальних напружень в ослабленому поперечному перерізі штаби показано на рис. 2.34.

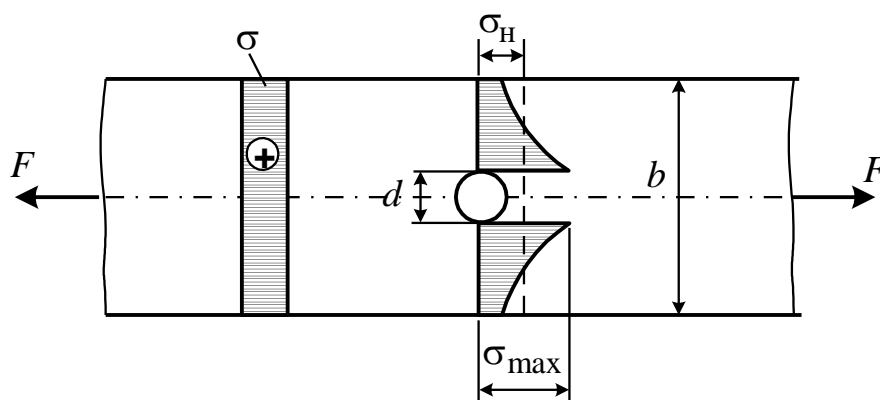


Рис. 2.34. Графік розподілу розтягувальних напружень в ослабленому круглим отвором поперечному перерізі штаби

Місцеві напруження залежать від виду і розмірів концентратора напружень. Наприклад, чим менший радіус отвору штаби (рис. 2.34), тим більше максимальні напруження відрізняються від номінальних. У випадку дуже маленького радіуса отвору ( $b/d = \infty$ ) біля країв його найбільше напруження дорівнює трьом номінальним ( $\alpha = 3$ ).

Номінальне напруження визначається як середнє напруження в ослабленому перерізі штаби

$$\sigma_n = F / A_{\min}, \quad (2.72)$$

де  $A_{\min} = h(b-d)$  – площа в ослабленому перерізі, яка називається площею нетто.

Іноді під номінальним напруженням розуміють напруження, обчислене з урахуванням площі  $A_0$  суцільного поперечного перерізу без урахування його зменшення за рахунок отвору. Якщо у штабі дуже маленький отвір, то номінальні напруження, обчислені з урахуванням  $A_{\min}$  і  $A_0$ , будуть практично однакові. В інших випадках напруження можуть істотно відрізнятися. Тому, використовуючи поняття номінальних напружень, треба сказати, на базі якого поперечного перерізу вони визначені.

Надрізи з гострими вхідними кутами дають ще більші коефіцієнти концентрації напружень біля вершин кутів. Для деяких поширених концентраторів напружень у штабі прямокутного поперечного перерізу значення коефіцієнтів концентрації напружень наводяться в підручниках і довідниках з опору матеріалів.

Концентрацію напружень доводиться враховувати при конструюванні і розрахунку на міцність деталей машин. Слід по можливості уникати глибоких виточень, викружок тощо, щоб зменшити їх вплив на міцність деталей. Треба також більш старанно обробляти поверхні деталей, особливо виготовлених з високоміцних загартованих сталей. Навіть незначні сліди від шліфувального круга можуть знизити межу міцності твердо-загартованої сталі при розтяганні на 10–20 %.

На міцність пластичних і крихких матеріалів концентрація напружень впливає по-різному. Важливе значення за такої умови

має також характер навантаження. Якщо матеріал пластичний (діаграма напружень має яскраво виражену площадку текучості) і навантаження статичне, то при його збільшенні зростання найбільших місцевих напружень припиняється, як тільки вони досягнуть межі текучості. В іншій частині поперечного перерізу напруження будуть ще зростати до межі текучості, водночас зона пластичності біля концентратора буде поступово збільшуватися. Отже, пластичність матеріалу сприяє вирівнюванню напружень. Тому вважають, що при статичному навантаженні такі матеріали малочутливі до концентрації напружень.

При ударних і повторно-змінних навантаженнях, якщо деформації і напруження швидко змінюються з часом, напруження не встигають вирівнюватися і шкідливий вплив концентрації напружень зберігається. Тому при таких навантаженнях розрахунок на міцність виконується з урахуванням концентрації напружень.

Для однорідних крихких матеріалів нерівномірність розподілу напружень унаслідок концентрації зберігається аж до руйнування, навіть при статичних навантаженнях. Тому для крихких матеріалів концентрація напружень шкідлива, при дії як статичних, так і динамічних навантажень. Особливо чутлива до концентраторів загартована сталь, і тим більша, чим вища її міцність. Отже, для крихкого матеріалу в розрахунках на міцність при статичному навантаженні можна користуватися коефіцієнтами концентрації напружень.

### ***2.20.2. Послідовність проведення дослідів***

1. За 5 хвилин до початку дослідів увімкнути в мережу ВПН-8 і включити прилад.
2. Вимірювати штангенциркулем розміри штаби  $b$  і  $h$ , діаметр отвору  $d$  і записати в бланк лабораторної роботи 20 (дод. 1).
3. Закріпити зразок у затискачах машини так, щоб не було перекосів і навантаження спрямовувалось вздовж осі зразка.
4. Підключити всі тензодатчики до підсилювача.
5. Зробити попереднє навантаження, перевірити роботу тензодатчиків і записати їхні показання в бланк лабораторної роботи.

6. Прикласти остаточне навантаження, показання тензодатчиків занести в бланк лабораторної роботи, виконати необхідні обчислення.

7. Визначити коефіцієнт концентрації. Зобразити графік розподілу напружень.

### **Контрольні запитання**

1. Що називається концентрацією напружень?
2. Як визначити коефіцієнт концентрації напружень?
3. Як можна зменшити концентрацію напружень?
4. Чи впливає форма отвору на концентрацію напружень і як?
5. Залежить чи ні коефіцієнт концентрації напружень від виду навантаження?
6. Для яких матеріалів і при яких навантаженнях концентрація напружень шкідлива з погляду їхньої міцності?
7. Чому напруження в місці розташування концентратора називається місцевим?
8. Які величини вимірюють безпосередньо при виконанні випробувань у цій роботі?
9. Як виконується тарування вимірювального приладу в цій роботі?
10. Яка випробувальна машина використовується для розтягування зразка в цій роботі?

## **2.21. Дослідження ударної в'язкості сталі та інших матеріалів**

*Мета роботи:* визначити ударну в'язкість сталі; вивчити пристрої і принцип дії маятникового копра; ознайомитися з методикою проведення динамічних випробувань матеріалів.

### **2.21.1. Короткі теоретичні відомості**

Робота машин і механізмів часто супроводжується ударними навантаженнями. Оскільки механічні характеристики матеріалу залежать від швидкості прикладання навантаження, то за результатами статичних випробувань оцінити здатність його

чинити опір ударному навантаженню не можна. Навіть дуже пластичні матеріали при швидкості деформування 4–7 м/с руйнуються, як крихкі. Для того, щоб оцінити здатність матеріалу чинити опір таким навантаженням і зберігати свої пластичні властивості (в'язкість), використовують динамічні методи випробувань. Особливо важливі ці випробування для високоміцних сталей, дуже чутливих до концентрації напружень.

Найбільш поширеними з динамічних випробувань матеріалів є випробування зразків з надрізом на ударну в'язкість. Умови випробувань на ударну в'язкість зразків з надрізом при нормальній температурі регламентовані ГОСТ 9454-78. Надріз потрібний для того, щоб зробити умови роботи матеріалу зразка близькими до умов роботи його в деталях машин, що завжди мають різні концентратори напружень. Біля дна надрізу при ударі виникає внаслідок концентрації напружень об'ємний напружений стан з головними розтягуючими напруженнями, при яких утруднюються пластичні деформації, що приводять до крихкого руйнування матеріалу (рис. 2.35).

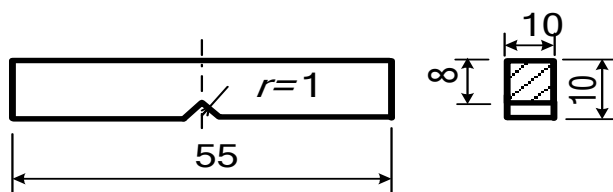


Рис. 2.35. Схема сталевго зразка для досліджень ударної в'язкості

При проведенні випробування визначають енергію, витрачену на руйнування зразка при ударі. Відношення цієї енергії до площі поперечного перерізу  $A$  в місці надрізу являє собою ударну в'язкість матеріалу, Дж/мм<sup>2</sup>:

$$a = W / A. \quad (2.73)$$

Ударна в'язкість – це складна комплексна характеристика, що визначає здатність матеріалу чинити опір динамічним навантаженням. Вона залежить від властивостей матеріалу,

розмірів зразка, глибини і форми надрізу й умов випробування. Тому для одержання порівняльних результатів випробувань матеріалів на ударну в'язкість їх треба виконувати в строгій відповідності до ГОСТ 9454-78. Чим більша ударна в'язкість матеріалу, тим краще він чинить опір динамічним навантаженням. Наприклад, держстандарт на котельну і мостову сталь вимагає, щоб ударна в'язкість першої була не менше ніж  $(6-8) \times 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>, а другої –  $(8-10) \times 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>.

### ***2.21.2. Послідовність проведення досліду***

1. Виміряти розміри зразка штангенциркулем і записати їх у бланк лабораторної роботи 21 (дод. 1).
2. Поставити зразок симетрично на опори так, щоб маятник ударився посередині ослабленого перерізу з боку, протилежного надрізу.
3. Підняти маятник копра в початкове верхнє положення; притиснути лінійку 1 вимірювального пристрою до пальця і перемістити візуальне кільце в крайнє нижнє положення.
4. Звільнити маятник.
5. Визначити за шкалою вимірювального пристрою величину енергії  $W$ , що витрачена на руйнування зразка, кгм.
6. Виконати обробку отриманих результатів за схемою, наведеною в бланку лабораторної роботи 21 (дод. 1).

### **Контрольні запитання**

1. У яких випадках застосовують динамічні випробування?
2. Що називається ударною в'язкістю?
3. З якою метою роблять надрізи на зразках?
4. Як визначають енергію, витрачену на руйнування зразка, у цій лабораторній роботі?
5. Яку розмірність має ударна в'язкість?
6. Яку здатність матеріалу характеризує ударна в'язкість?
7. Від чого залежить ударна в'язкість?

## 2.22. Визначення положення центра згину тонкостінного стержня незамкнутого профілю

*Мета роботи:* експериментально переконатися в тому, що балки несиметричних поперечних перерізів зазнають згину із крученням; визначити положення центра згину теоретичним і експериментальним методами.

### 2.22.1. Короткі теоретичні відомості

Відомо, що балки несиметричних поперечних перерізів зазнають згину із крученням, якщо навантаження діє в площині, що збігається з головною центральною віссю інерції  $oz$  і віссю балки (рис. 2.36).

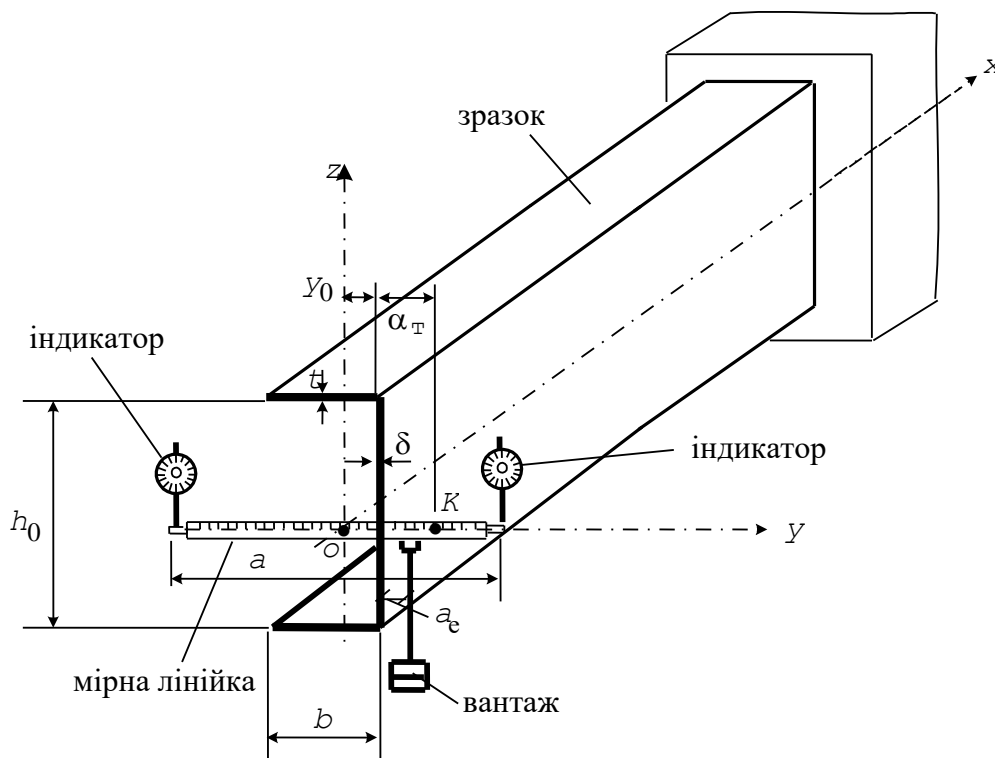


Рис. 2.36. Схема випробувань і розміщення вимірювальних приладів

Для того, щоб уникнути кручення, що значно знижує міцність і твердість балки, зовнішнє навантаження повинне проходити через центр згину. Центром згину називається точка  $K$ , розташована на осі  $oy$  (рис. 2.36), при проходженні поперечної



сили через яку стержень буде зазнавати тільки деформації згину, не зазнаючи при цьому кручення. Положення центра згину для балок гнутих швелерних профілів з постійною товщиною стінки  $\delta$  і полиць  $t$  обчислюють за формулою

$$\alpha_{\tau} = \frac{3b^2t}{6bt + h_0\delta}, \quad (2.74)$$

де  $b$ ,  $t$  – ширина і товщина полиць;  $\delta$  – товщина стінки,  $h_0$  – висота швелера.

Для експериментального визначення положення центра згину консольної балки несиметричного профілю в цій лабораторній роботі використовують спеціальну установку типу СМ12М (див. п. 1.5).

Для забезпечення надійної роботи треба при виконанні експерименту стежити за тим, щоб навантаження не перевищувало величину, яка зазначена в технічному паспорті. При виконанні експерименту необхідно спочатку установити повзун на рейку, а потім навантажувати балку. Виміри в цій лабораторній роботі здійснюють за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки шкали 0,01 мм.

### ***2.22.2. Послідовність проведення дослідів***

1. Виміряти за допомогою штангенциркуля розміри поперечного перерізу балки з точністю до 0,01 мм і записати їх у бланк лабораторної роботи 22 (дод. 1).

2. Установити повзун у центрі ваги перерізу (на відмітку шкали «10»).

3. Установити стрілки обох індикаторів на «0».

4. Навантажити балку силою 15 Н і взяти відліки по шкалі індикаторів. Якщо показання індикаторів будуть різними, то це підтвердить те, що балка зазнає згину із крученням.

5. Зміщаючи повзун по рейці, домогтися того, щоб показання індикаторів були однакові по величині і знаку. Це буде свідчити про те, що навантаження проходить через центр згину. Визначити по рейці з поділками положення центра згину.

6. Для контролю – збільшити навантаження ще на 15 Н і простежити за тим, щоб показання індикаторів були однакові. Найбільше навантаження не повинне перевершувати 45 Н.

7. Розвантажити балку.

8. Дослід треба повторити не менше трьох разів. За дійсне положення центра згину приймають середнє арифметичне з трьох дослідів. Його порівнюють з теоретичним значенням положення центра згину. Результати кожного виміру записують у бланк лабораторної роботи 22 (дод. 1).

### **Контрольні запитання**

1. Що називається центром згину?
2. У яких випадках при згині балок не виникає кручення?
3. Як впливає кручення на міцність і твердість балок несиметричних тонкостінних поперечних перерізів?
4. За якою формулою визначають положення центра згину?
5. Як експериментально визначається положення центра згину?
6. Де розташований центр згину в балках симетричних тонкостінних профілів?
7. Що є критерієм того, що навантаження проходить через центр згину?

## **2.23. Дослідження розподілу напружень у кривому брусі**

*Мета роботи:* вивчити розподіл напружень по висоті поперечного перерізу кривого бруса методом електротензометрування; перевірити теоретичні формули для визначення напружень і переміщень у кривому брусі.

### **2.23.1. Короткі теоретичні відомості**

Плоским кривим брусом називається брус, віссю якого є плоска крива лінія, а відношення висоти поперечного перерізу  $h$  до радіуса кривизни  $R_0$  більше, ніж  $1/5$ . До них належать ланки ланцюгів, вушка, гаки, арки, склепіння, станини піднімальних кранів і ін. (рис. 2.37).

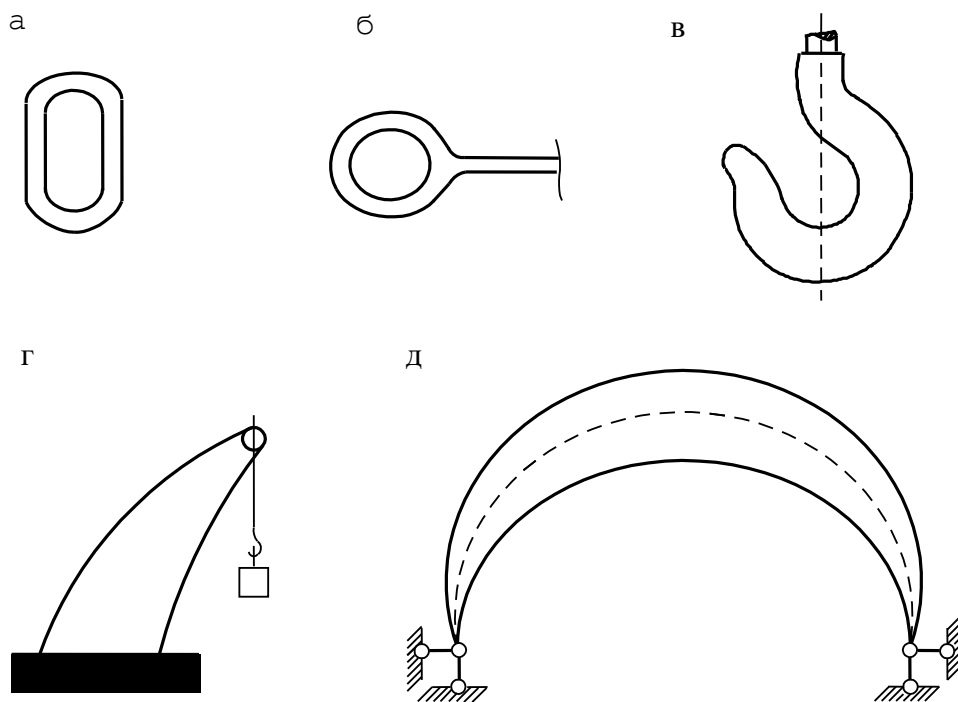


Рис. 2.37. Схеми кривих брусів

Відомо, що напруження в довільній точці поперечного перерізу кривого бруса визначається за формулою

$$\sigma = N/A + M \cdot z/S_y r, \quad (2.75)$$

де  $N$  – поздовжня сила;

$M$  – згинальний момент;

$z$  – відстань від нейтральної лінії до точки, у якій визначається напруження;

$r$  – радіус кривизни нейтрального шару;

$S_y$  – статичний момент площі  $A = b \cdot h$  поперечного перерізу стержня щодо нейтральної лінії. Ці величини визначають за формулами:

$$r = h / \ln(R_1 / R_2), \quad S_y = A \cdot z_0. \quad (2.76)$$

У небезпечному перерізі кривого бруса (рис. 2.37) діють зусилля:  $N = F \cdot i$  і  $M = -FR_0$ . Під час випробувань максимальні напруження, що діють на внутрішній поверхні стержня, не повинні перевищувати межу пропорційності  $\sigma_{\text{мп}}$ . Вертикальне переміщення перерізу бруса може бути визначене за формулою

$$\Delta = \frac{2FR_0^3}{EJ_y} \left( \frac{\pi}{4} + 1 \right) + \frac{FR_0}{EA} \left( \frac{3}{2}\pi + 2 \right). \quad (2.77)$$

Розрахункова схема пристрою показана на рис. 2.38. Вимір деформацій проводиться за допомогою ВПП-8.

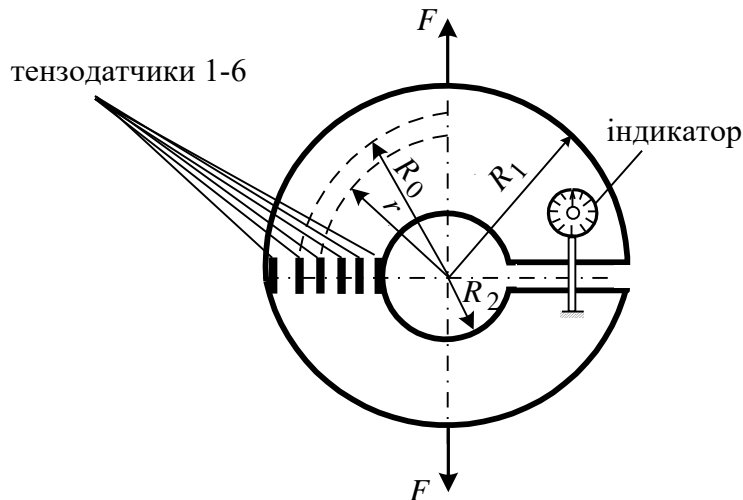


Рис. 2.38. Розрахункова схема кривого бруса

### 2.23.2. Послідовність проведення дослідів

1. Заміряти зразок і записати результати в бланк лабораторної роботи 23 (дод. 1).
2. За 3 хв до початку випробувань увімкнути ВПП-8 в електромережу і закріпити зразок у затискачах гідравлічної машини.
3. Вибрати крок навантаження  $\Delta F$ .
4. Обчислити теоретичним методом за формулою (2.75) напруження в окремих точках (1, 2, 3, 4, 5) поперечного перерізу кривого стержня.
5. Навантажити зразок попереднім навантаженням і вважати його за початкове. Показання ВПП-8 по всіх датчиках записати в бланк лабораторної роботи 23 (дод. 1).
6. Збільшити навантаження на один крок і показання ВПП-8 записати в бланк лабораторної роботи. Те ж повторити для кожного кроку навантаження.
7. Розвантажити зразок і вимкнути ВПП-8.

8. Обробити отримані експериментальні результати за схемою, наведеною в бланку лабораторної роботи 23 (дод. 1).

### **Контрольні запитання**

1. Що називається плоским кривим брусом?
2. За якою формулою визначають напруження в кривому брусі при чистому згині?
3. За якою формулою визначають напруження при розтяганні зі згином?
4. Де проходить нейтральна вісь у поперечному перерізі кривого бруса при чистому згині?
5. За якою формулою можна обчислити радіус кривизни нейтрального шару для кривого бруса прямокутного поперечного перерізу?
6. У яких точках діють найбільші напруження в кривому брусі при чистому згині?
7. Які типи поперечних перерізів є найбільш раціональними для кривих брусів?
8. Як обчислити припустиме навантаження для кривого бруса?
9. Як експериментально визначають напруження?

## **2.24. Випробування сталі на витривалість**

*Мета роботи:* визначити межу витривалості сталі при симетричному циклі зміни згинальних напружень; вивчити пристрій і принцип дії машин, що використовуються для випробувань матеріалів на витривалість.

### **2.24.1. Короткі теоретичні відомості**

Зміна напружень у деталях машин і елементах конструкцій з часом може бути випадковою або закономірною, тобто циклічною. Для деталей машин і елементів конструкцій характерна циклічна зміна напружень за часом, що задається найчастіше функцією

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_a \sin \omega t. \quad (2.78)$$

Графік функції показаний на рис. 2.39.

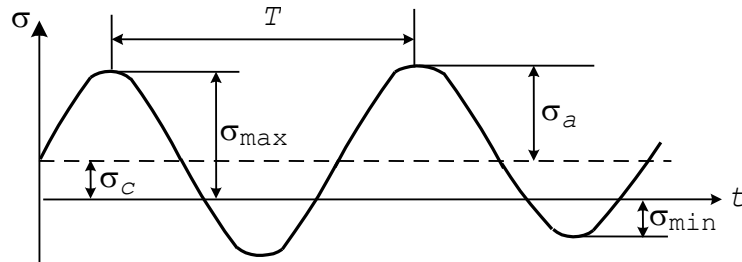


Рис. 2.39. Графік функції  $\sigma = \sigma_c + \sigma_a \sin \omega t$

Проміжок часу, через який напруження в цій точці набуває того самого значення, називається періодом. Сукупність усіх напружень за один період називається циклом напружень.

$\sigma_{\max}$  і  $\sigma_{\min}$  – максимальне і мінімальне напруження циклу;

$\sigma_c$  і  $\sigma_a$  – середнє напруження та амплітуда циклу.

З графіка на рис. 2.39 видно, що

$$\sigma_{\max} = \sigma_c + \sigma_a; \quad \sigma_{\min} = \sigma_c - \sigma_a; \quad (2.79)$$

$$\sigma_c = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2; \quad \sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2. \quad (2.80)$$

Відношення мінімального напруження циклу до максимального називається коефіцієнтом асиметрії циклу

$$r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}. \quad (2.81)$$

Коефіцієнт асиметрії циклу змінюється в межах від  $-\infty$  до  $\infty$  і є однією з головних характеристик циклу. Цикли, що мають однакові характеристики  $r$ , називаються подібними. Якщо найбільші і найменші напруження однакові і протилежні за знаком ( $r = -1$ ), то цикл називається симетричним.

Процес руйнування матеріалу при дії повторно-змінних напружень називається утомленістю, а здатність його чинити опір таким напруженням – витривалістю.

Практика показує, що при дії повторно-змінних напружень деталі машин руйнуються при  $\sigma_{\max} < \sigma_B$ , а іноді навіть при  $\sigma_{\max} < \sigma_T$ . Тому розрахунки деталей машин на міцність при дії постійних напружень не гарантують міцність їх при дії повторно-змінних напружень такої ж величини. Звідси випливає, що вивчення питань утомленості матеріалів в опорі матеріалів має дуже велике значення.

У цей час вважають, що причиною руйнування матеріалів при дії повторно-змінних напружень є концентрація напружень. У місці розташування концентратора напружень часто напруження перевищують межу текучості матеріалу (див. п. 2.20) навіть при невеликих середніх напруженнях. Тому в таких місцях при дії повторно-змінних напружень слабшають кристалічні ґрати матеріалу, утрачається зв'язок, що призводить до утворення мікротріщин. З часом ці мікротріщини збільшуються. Як тільки вони досягнуть такої величини, при якій переріз тіла помітно послабляється, відбувається миттєвий злам. Поверхня зламу має дві різні зони. Одна з них гладка, притерта, утворена внаслідок поступового розвитку тріщин; друга – грубозерниста, яка утворилася при остаточному зламі перерізу деталі, ослабленому під час розвитку тріщини. У крихких матеріалів вона має крупнокристалічну будову, а у в'язких – волокнисту.

Кількість циклів до появи першої тріщини і до повного руйнування буде тим більша, чим менше напруження. Досліди показують, що для чорних матеріалів (сталь, чавун тощо) існує таке найбільше максимальне напруження циклу, при якому мікротріщини не розвиваються, і матеріал здатний витримати будь-яку кількість циклів змін напружень. Це напруження називається границею витривалості (утомленості) матеріалу.

Межа витривалості  $\sigma_r$  залежить від властивості матеріалу, виду деформації, коефіцієнта асиметрії циклу, концентрації напружень, чистоти обробки поверхні деталі і геометричних розмірів її. Найменше значення межі витривалості має матеріал при симетричному циклі ( $r = -1$ ), тому його позначають через  $\sigma_{-1}$ . Визначити межу витривалості матеріалу можна тільки експериментально внаслідок випробувань його на витривалість. Найбільш поширеним випробуванням матеріалів на витривалість

є випробування при чистому або поперечному згині і симетричному циклі зміни навантажень.

Досліди показують, що, якщо зразок з чорних металів витримав  $10^7$  циклів навантажень і не зруйнувався, то він не зруйнується і при будь-якій кількості циклів. Це число циклів  $10^7$  називається базовим.

Для кольорових металів (мідь, алюміній і його сплави) не існує дійсне базове число циклів, а отже, не існує і дійсна межа витривалості. Для них приймають за умовне базове число циклів  $10^8$ . Отже, під границею витривалості матеріалу розуміють найбільше максимальне напруження циклу, при якому зразок витримує, не руйнуючись, базове число циклів.

Для одного випробування того чи іншого матеріалу на витривалість треба виготовити партію однакових циліндричних зразків діаметром 7–10 мм у кількості 6–12 шт. з добре обробленою поверхнею. Перший зразок випробовують при максимальному напруженні циклу  $\sigma_{\max} = 0,8 \sigma_a$  і визначають кількість циклів  $N_1$ , що він витримав до руйнування. Кожен наступний зразок випробовують при поступово зменшених напруженнях. Для них кількість циклів до руйнування буде збільшуватися. Випробування закінчуються тоді, коли останній зразок витримає базову кількість.

За результатами випробувань будують графік залежності  $\sigma_{\max} = f(N)$ , що називається кривою утомленості або кривою Веллера (рис. 2.40).

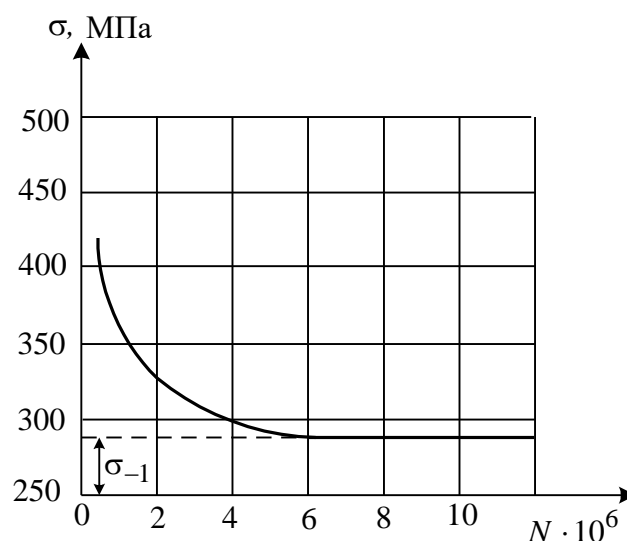


Рис. 2.40. Крива утомленості (Веллера)



Крива утомленості асимптотично наближається до горизонтальної прямої, яка відтинає на осі ординат напруження  $\sigma_{-1}$ , що є границею витривалості матеріалу.

Для випробувань матеріалів на витривалість характерний великий розкид результатів експерименту. Тому, щоб одержати надійні результати, треба випробувати не одну партію, а декілька (не менше 100 шт.) і обробити їх методами математичної статистики. Унаслідок цього випробування матеріалів на витривалість дуже трудомісткі і тривалі.

Для швидкого одержання результатів іноді використовують прискорений метод випробувань на витривалість. При застосуванні цього методу межа витривалості матеріалу може бути отримана при випробуванні одного зразка, якщо при збільшенні напруження вимірювати температуру і деформацію зразка, крутний момент і енергію. Прискорений метод випробування матеріалів на витривалість дає менш надійні результати, тому застосовується на практиці рідше. Установлення границь витривалості за заданою кількістю циклів завантаження належить, як було відзначено вище, до тривалого випробування (декілька діб), що неприйнятно для лабораторної роботи, тому застосовуємо прискорений метод. Сутність цього методу полягає в такому: шляхом поступового завантаження зразка здійснюється збільшення напружень. Індикатором фіксується прогин  $f$ . Будується графік зміни прогинів від навантаження. Як показують досліди, при досягненні напруження, близького до межі витривалості, крива  $f - F$  має точку перегину. Це і є основою прискореного методу випробувань.

Наведемо емпіричні формули межі витривалості для того, щоб порівняти отримані в лабораторній роботі дані:

$$\text{для сталей: } \sigma_{-1} \approx (0,4 - 0,5) \sigma_B;$$

$$\text{для кольорових металів: } \sigma_{-1} \approx (0,25 - 0,5) \sigma_B.$$

Випробування матеріалів на витривалість при різних простих деформаціях і коефіцієнтах асиметрії циклу зміни напружень виконують на універсальній утомленій машині невеликої потужності типу УММ-01 (див. п. 1).

### ***2.24.2. Послідовність проведення досліду***

*Установлення межі витривалості за заданою кількістю циклів*

1. Виміряти зразок. Результати вимірів записати в бланк лабораторної роботи 24 (дод. 1).
2. Визначити навантаження, при яких максимальні напруження циклу становлять 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4 від  $\sigma_B$  і записати їх у бланк лабораторної роботи 24 (дод. 1).
3. Вставити перший зразок у порожні вали, затиснути його кінці в цангових затискачах і установити відповідне навантаження на підвіску.
4. Записати показання лічильника та увімкнути електродвигун.
5. Після руйнування зразка визначити за лічильником кількість циклів, що він витримав, і записати в бланк лабораторної роботи.
6. Звільнити кінці зруйнованого першого зразка, установити другий і випробувати його в тій самій послідовності при відповідному навантаженні і так до досягнення бази випробувань.
7. Записати результати випробувань усіх зразків у бланк лабораторної роботи. Побудувати криву витривалості і визначити межу витривалості сталі.

*Установлення межі витривалості прискореним методом*

1. Зразок виміряти і закріпити в затискачах машини.
2. Установити індикатор.
3. Завантажити зразок ступенями. При кожному ступені дають зразку обертатися протягом 2–3 хв, після чого фіксують відліки по індикатору.
4. Випробування закінчується при настанні швидкого наростання показань індикатора.

### **Контрольні запитання**

1. Що називається утомленістю матеріалу?
2. Що називається витривалістю матеріалу?
3. Що називається границею витривалості?
4. Як визначається межа витривалості матеріалу?

5. Чим пояснюється наявність двох зон у місці руйнування при дії повторно-змінних напружень?
6. Що називається циклом зміни напружень?
7. Який цикл називається симетричним?
8. Що називається коефіцієнтом асиметрії циклу?
9. Які цикли називаються подібними?
10. Які фактори впливають на межу витривалості матеріалу?
11. Що є причиною руйнування матеріалу при дії повторно-змінних напружень?
12. Чому чавун не чутливий до концентрації напружень?
13. При якому циклі межа витривалості матеріалу найменша?
14. Скільки зразків треба випробувати, щоб одержати надійне значення межі витривалості матеріалу?
15. У чому сутність прискореного методу визначення межі витривалості?

## **2.25. Визначення переміщень просторового ламаного бруса**

*Мета роботи:* визначити величину вертикального переміщення вільного кінця просторового ламаного бруса під дією зосередженої сили.

### ***2.25.1. Короткі теоретичні відомості***

У будь-якому поперечному перерізі просторової стержневої системи в загальному випадку виникає шість внутрішніх зусиль: згинальні моменти  $M_z$ ,  $M_y$  щодо головних осей  $z$  і  $y$  поперечного перерізу, крутний момент  $M_{кр}$  щодо поздовжньої осі  $x$  бруса, поздовжня сила  $N_x$  і поперечні сили  $Q_z$  і  $Q_y$ , паралельні осям  $z$  і  $y$ . Тому формула переміщень для просторової стержневої системи містить шість членів, кожний з яких ураховує вплив одного внутрішнього зусилля. При цьому впливом поздовжніх і поперечних сил звичайно нехтують. Тоді переміщення можна визначити за формулою Мора

$$\Delta_{kf} = \sum_0^l \int \frac{M_f M_k}{EJ} dx + \sum_0^l \int \frac{M_{kp} M_{kp}}{GJ_p} dx$$

або за формулою Верещагіна А. М.

$$\Delta_{kf} = \sum \frac{\omega_{mf} y_k}{EJ} + \sum \frac{\omega_{mkp} y_{kp}}{GJ_p},$$

де  $\omega_{mf}$  і  $\omega_{mkp}$  – відповідно площі епюр згинальних і крутних моментів, побудовані від дії зовнішнього навантаження;

$y_k$  і  $y_{kp}$  – відповідно ординати епюр  $\bar{M}_k$  і  $\bar{M}_{kp}$ , від одиничної узагальненої сили під центрами ваги площ  $\omega_{mf}$  і  $\omega_{mkp}$ .

### **2.25.2. Послідовність проведення дослідів**

1. Скласти розрахункову схему ламаного бруса, вказати вихідні дані і записати в бланк лабораторної роботи 25 (дод. 1).

2. Підготувати установку СМ24Б (п.1.1) для виконання дослідів, виставивши її в строго горизонтальному положенні шляхом регулювання гвинтів-ніжок.

3. Установити стрілки індикаторів на «0».

4. Визначити величину ступеня навантаження  $\Delta F$ , зробити три навантаження. Найбільша величина навантаження не повинна перевищувати 120 Н.

5. Після кожного виміру навантаження реєструвати збільшення величин переміщень за шкалами індикаторів.

6. Після закінчення випробування зразок розвантажити.

7. Виконати обробку отриманих результатів і обчислити середнє значення величин переміщень.

8. Зробити теоретичний розрахунок величин переміщень вільного кінця зразка.

9. Отримані експериментальні значення переміщень порівняти з теоретичними значеннями.

### **Контрольні запитання**

1. Яку установку використовують для виконання цієї лабораторної роботи?

2. За допомогою яких приладів вимірюють переміщення в цій лабораторній роботі?
3. Які внутрішні зусилля виникають в отриманих перерізах просторової стержневої системи?
4. Поняття основної і допоміжної систем.
5. За якими формулами визначають переміщення?

## 2.26. Перевірка теорем про взаємність робіт і переміщень

*Мета роботи:* дослідним шляхом перевірити теореми про взаємність робіт і переміщень.

### 2.26.1. Короткі теоретичні відомості

При визначенні переміщень пружних систем ми використовували принцип можливих переміщень і пов'язане з ним поняття можливої роботи, не торкаючись багатьох важливих властивостей цих систем. Тепер розглянемо ці властивості. Уявимо, що лінійно-пружна система послідовно навантажується спочатку силою  $F_1$  (рис. 2.41, а), а потім силою  $F_2$  (рис. 2.41, б).

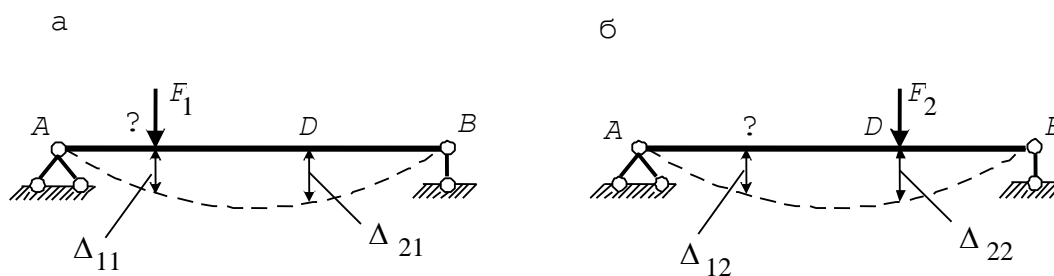


Рис. 2.41. До доказу теореми про взаємність робіт

Роботу цих сил подамо у вигляді суми

$$A = A_{11} + A_{12} + A_{22}, \quad (2.82)$$

де  $A_{11}$  – робота сили  $F_1$  на переміщенні, викликаному цією силою;

$A_{12}$  – робота сили  $F_1$  на переміщенні, викликаному силою  $F_2$ ;

$A_{22}$  – робота сили  $F_2$  на переміщенні, викликаному цією ж силою. Якщо тепер подати навантаження в зворотній послідовності – спочатку силою  $F_2$ , а потім силою  $F_1$ , то цю ж роботу  $A$  можна записати у вигляді

$$A = A_{22} + A_{21} + A_{11}. \quad (2.83)$$

З принципу суперпозиції для переміщень випливає, що  $A_{22}$  і  $A_{11}$  не залежать від послідовності прикладання навантажень  $F_1$  і  $F_2$ .

Порівнюючи вирази (2.83) і (2.84), можна зробити висновок, що

$$A_{12} = A_{21}, \quad (2.84)$$

або

$$F_1 \Delta_{12} = F_2 \Delta_{21},$$

тобто робота сили  $F_1$  на переміщенні, викликаному силою  $F_2$ , дорівнює роботі сили  $F_2$  на переміщенні, викликаному силою  $F_1$ . Це твердження називається теоремою про взаємність робіт або теоремою Бетті.

### Теорема про взаємність переміщень

З теореми про взаємність робіт випливає ряд більш додаткових теорем. Перша з них – теорема про взаємність переміщень.

Допустимо, що в обох станах система (рис. 2.42) навантажена силами  $F_1 = 1$  (рис. 2.42, а) і  $F_2 = 1$  (рис. 2.42, б).

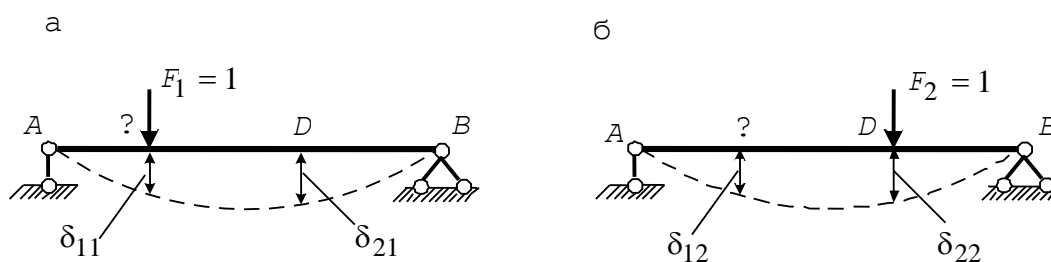


Рис. 2.42. До виведення теореми про взаємність переміщень

При дії сили  $F_1$  балка набула переміщення  $\delta_{11}$  (переміщення точки прикладання сили  $F_1$  по її напрямку) і  $\delta_{21}$  (переміщення точки прикладання сили  $F_2 = 1$ ).

Під дією сили  $F_2 = 1$  переміщення рівні  $\delta_{12}$  і  $\delta_{22}$  (див. рис. 2.42, б).

На підставі теореми про взаємність робіт (2.84) маємо

$$\delta_{12} = \delta_{21} . \quad (2.85)$$

Переміщення по 1-му напрямку від 2-ї одиничної сили дорівнює переміщенню по 2-му напрямку від 1-ї одиничної сили (теорема Максвелла).

Для визначення переміщень у шарнірно обпертій балці від зосередженої сили  $F$ , розташованої в будь-якій точці прольоту, застосуємо метод безпосереднього інтегрування диференціального рівняння вигнутої осі балки  $EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = -M$  (рис. 2.43).

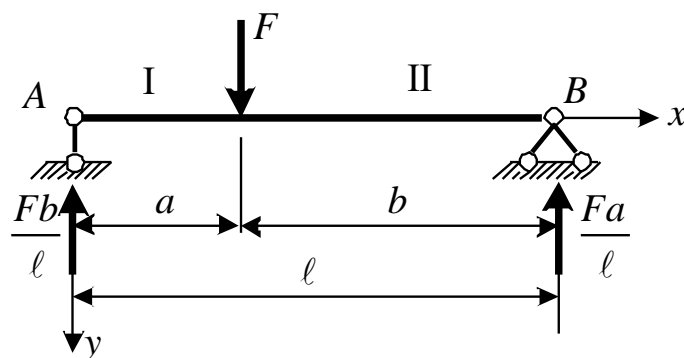


Рис. 2.43. Розрахункова схема балки

Випишемо остаточні вирази для прогинів

$$EJy_1 = \frac{Fb}{6l} \left[ (\ell^2 - b^2)x - x^3 \right], \quad 0 \leq x \leq a. \quad (2.86)$$

$$EJy_2 = \frac{Fb}{6l} \left[ (\ell^2 - b^2)x - x^3 \right] + \frac{F}{6} (x - a)^3, \quad a \leq x \leq \ell. \quad (2.87)$$

## 2.26.2. Послідовність проведення досліду

### *Перевірка теореми про взаємність робіт*

1. Установити балку разом з опорними пристроями на траверсу випробувальної гідравлічної машини.
2. У місцях прикладання зосереджених сил установити на балку розподільні накладки.
3. Установити індикатори під місцями прикладання зосереджених сил  $F_1$  і  $F_2$ .
4. Зафіксувати початкові відліки «0» на шкалі силовимірювача і на шкалі індикатора І1.
5. Прикласти зосереджену силу  $F_2$ . Дати збільшення навантаження 10 кН. Зафіксувати показання індикатора І1. Розвантажити балку.
6. Зафіксувати початкові відліки «0» на шкалі силовимірювача і на шкалі індикатора І2.
7. Прикласти зосереджену силу  $F_1$ . Дати збільшення навантаження 20 кН. Зафіксувати показання індикатора І2.
8. Визначити роботи:  $A_{12} = F_1 \cdot \Delta_{12}$  і  $A_{21} = F_2 \cdot \Delta_{21}$  та порівняти результати.

### *Перевірка теореми про взаємність переміщень*

1. Прийняти зосереджені сили  $F_1$  і  $F_2$  однаковими:  $F_1 = F_2 = 10$  кН.
2. Прикласти по черзі сили  $F_1$  і  $F_2$  та зафіксувати показання індикаторів. Визначити переміщення  $\delta_{12}$  і  $\delta_{21}$  та порівняти їх між собою.

### **Контрольні запитання**

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Дайте формулювання теореми про взаємність робіт і її математичний опис.
3. Дайте формулювання теореми про взаємність переміщень і її математичний опис.
4. Поясніть принцип роботи індикатора.
5. Які ви знаєте способи теоретичного визначення переміщень у балці?



## 2.27. Випробування сталеві ферми

*Мета роботи:* визначити дослідним шляхом деформації стержнів ферми і переміщення її вузлів; порівняти дослідні і теоретичні дані.

### 2.27.1. Короткі теоретичні відомості

Фермою будемо називати геометрично незмінну систему, складену зі стержнів, шарнірно зв'язаних між собою кінцями. При вузловій передачі навантаження кожен стержень ферми зазнає поздовжніх зусиль, тобто осьового розтягання або стискання. Коли стержень працює винятково на поздовжні сили, матеріал може бути використаний більш вигідно і витрата його зменшується. Цим досягається двояка економія, тому що, зменшуючи власну вагу конструкції, ми заощаджуємо на матеріалі не тільки безпосередньо, але й побічно, завдяки зменшенню постійного навантаження. Якщо ферма геометрично незмінна і не має зайвих зв'язків, то вона статично визначна, тобто всі зусилля можуть бути визначені з рівнянь статички.

Одним з найпростіших способів одержання рівнянь статички, що містять мінімальну кількість невідомих, є проведення таких розрізів, з яких кожний відтинає від ферми по одному вузлу (рис. 2.44, б). Кількість невідомих у вузлі не повинна бути більше двох.

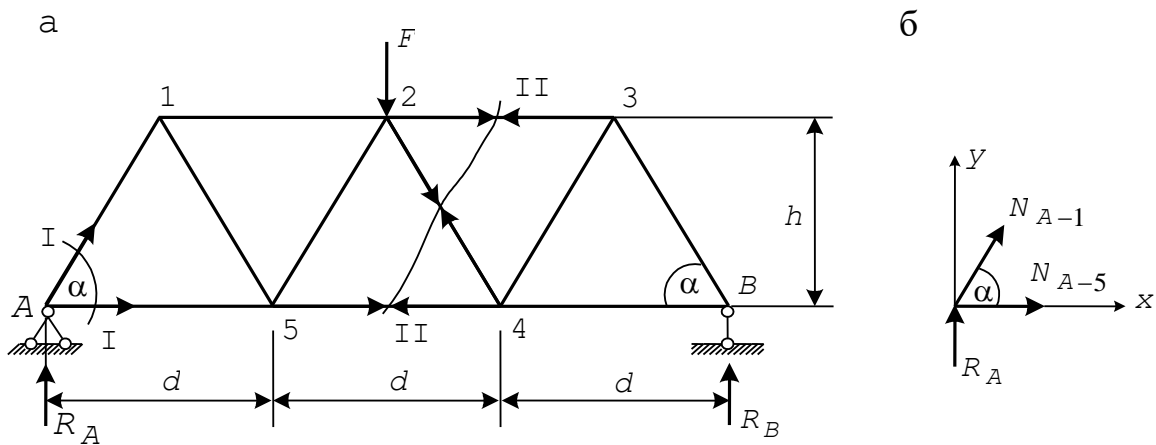


Рис. 2.44. Розрахункова схема ферми

Складемо рівняння рівноваги.

$$\sum Y = 0 \quad R_A + N_{A-1} \sin \alpha = 0, \quad N_{A-1} = -R_A / \sin \alpha.$$

$$\sum X = 0 \quad N_{A-5} + N_{A-1} \cos \alpha = 0, \quad N_{A-6} = R_A / \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.88)$$

Виділяючи за допомогою таких розрізів усі вузли ферми, одержимо саме таку кількість рівнянь, яка необхідна для визначення зусиль у всіх стержнях ферми. Розглянутий спосіб має недолік, який полягає в тому, що помилка, допущена при визначенні зусиль в одному стержні, накопичується в міру визначення зусиль в інших стержнях.

Розглянемо інший спосіб визначення зусиль, вільний від відзначеного недоліку, а саме спосіб перерізів. Розсічемо ферму перерізом II на дві частини. Стержні, що потрапили в переріз, замінимо зусиллями. Спрямуємо зусилля до перерізу (від вузлів). Визначаємо точки попарного взаємного перетинання зусиль  $N_{2-3}$ ,  $N_{2-4}$ ,  $N_{5-4}$ . Ці точки «4», «2». Складемо два рівняння статички у формі рівняння моментів щодо цих точок

$$\sum M_4 = 0 \quad R_B d + N_{2-3} h = 0, \quad N_{2-3} = -R_B \frac{d}{h}.$$

$$\sum M_2 = 0 \quad R_A \frac{3}{2} d - N_{5-4} h = 0, \quad N_{5-4} = R_A \frac{3d}{2h}.$$

Знайдемо зусилля в стержні  $N_{2-4}$ . Два з трьох пересічених перерізом II-II стержнів паралельні один одному – перетинаються в нескінченності. Складемо рівняння у формі проєкцій на вертикальну вісь

$$\sum_y^{\text{пр}} = 0 \quad R_B + N_{2-4} \sin \alpha = 0, \quad N_{2-4} = -R_B / \sin \alpha. \quad (2.89)$$

За результатами розрахунків побудуємо епюру поздовжніх сил у стержнях ферми від дії зовнішнього навантаження (рис. 2.45).

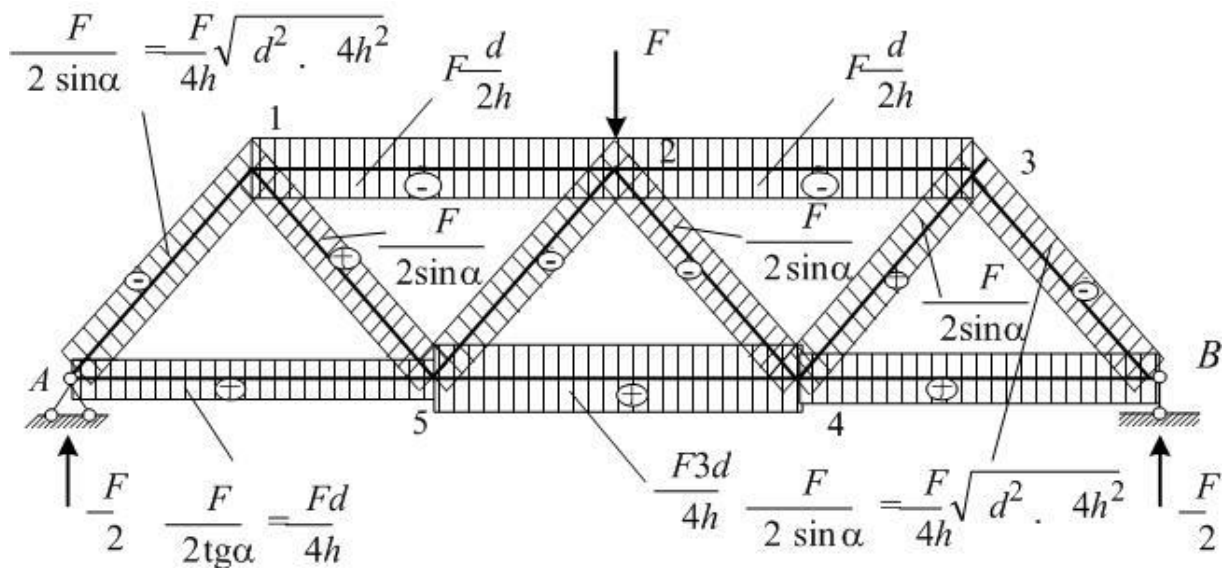


Рис. 2.45. Епюра поздовжніх зусиль у стержнях ферми від сили  $F$

При визначенні переміщень у фермі, елементи якої працюють на центральне розтягання і стискання, скористаємося такою формулою Мора, записаною у вигляді:

$$\Delta_{k f} = \sum_{i=1}^n \frac{N_{k,i} N_{f,i} \ell_i}{E_i A_i}, \quad (2.90)$$

де  $N_{f,i}$  – зусилля в кожному стержні ферми від зовнішнього навантаження (див. рис. 2.44);

$N_{k,i}$  – зусилля в кожному стержні ферми від одиничного навантаження, прикладеного по напрямку шуканого переміщення в  $k$ -ому вузлі,

$E_i A_i$  – жорсткість стержня при розтяганні або стисканні;

$n$  – кількість стержнів ферми.

Прикладаємо у вузли «5» і «4» (рис. 2.44) одиничні сили і визначаємо зусилля в кожному стержні ферми. Процедуру визначення зусиль опускаємо, отримані результати показуємо на рис. 2.46. Ми приклали дві одиничні сили через прагнення одержати симетричну щодо вертикальної осі епюру; оскільки переміщення вузлів «4» і «5» однакові (через симетрію навантаження (рис. 2.46)), то отриманий результат зменшимо у два рази.

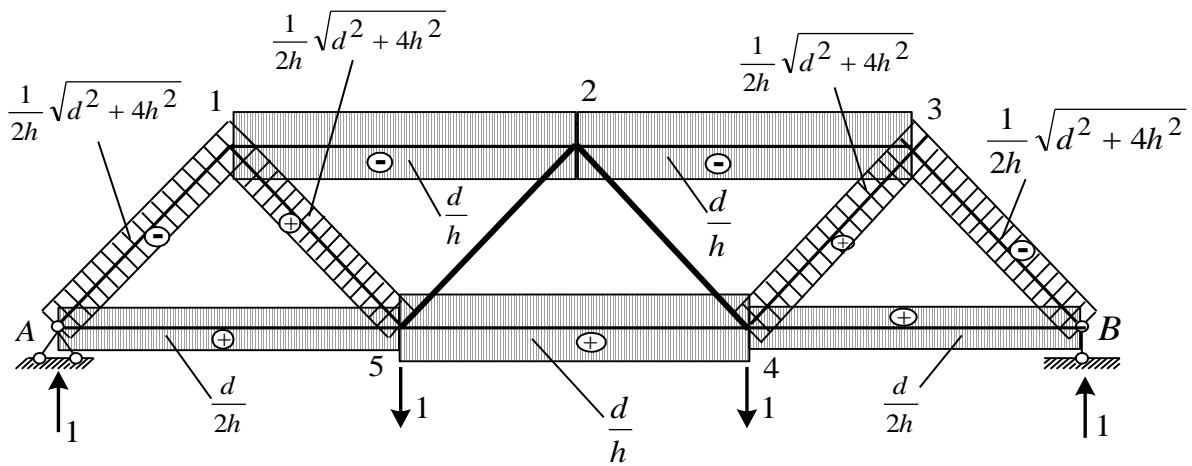


Рис. 2.46. Епюра поздовжніх зусиль у стержнях ферми від одиничних сил

Підставивши у формулу (2.77) значення поздовжніх сил (рис. 2.45, 2.46) після перетворень, одержимо

$$\Delta_{kf} = \frac{F}{h^2 EA} \left[ \frac{1}{4} (d^2 + 4h^2)^{3/2} + 2d^3 \right]. \quad (2.91)$$

### 2.27.2. Послідовність проведення досліду

1. Разом з опорними пристроями установити ферму на траверсу випробувальної гідравлічної машини.

2. У місці прикладання зосередженої сили  $F$  (вузол 2) установити розподільну накладку.

3. Увімкнути автоматичний вимірник деформацій (ВНП-8) і перевірити тензодатчики.

4. Установити індикатори І1 і І2.

5. Установити початкове навантаження на силовимірювальній шкалі в положення «0». Зафіксувати початкові відліки на всіх вимірювальних приладах і занести їх у бланк лабораторної роботи 27 (дод. 1).

6. Дати збільшення навантаження 50 кН. Зафіксувати показання всіх приладів і занести їх у бланк лабораторної роботи 27 (дод. 1).

7. Користуючись формулою закону Гука  $\sigma = \varepsilon E$ , визначити напруження в стержнях 2–3; 3–4; 2–4; 5–4. Визначити теоретичні

значення напружень (рис. 2.45). Порівняти результати й обчислити похибки.

8. За формулою (2.91) обчислити теоретичне значення прогину вузлів «4» і «5» ферми. Порівняти з дослідними даними. Оцінити похибку у відсотках.

### **Контрольні запитання**

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Дайте визначення ферми.
3. Які способи визначення зусиль у стержнях ферм ви знаєте? У чому їхня суть?
4. Запишіть формулу закону Гука при розтяганні і стисканні.
5. Як визначити переміщення вузлів ферм?
6. Розповісти про пристрій тензодатчика.
7. Які ви знаєте прилади для визначення переміщень?
8. Яка принципова схема ВПП-8?

### **2.28. Випробування двохарнірної арки**

*Мета роботи:* визначити дослідним шляхом величину розпору і порівняти цю величину з теоретичним значенням.

#### **2.28.1. Короткі теоретичні відомості**

Двошарнірна арка являє собою геометрично незмінну статично невизначну систему ( $L=1$ ), яка має вигляд кривого бруса, що спирається на дві шарнірно-нерухомі опори. Припустимо, що арка навантажена зосередженою силою  $F$  й обкреслена по дузі окружності (рис. 2.47)

$$y = R(\cos \varphi - \cos \alpha),$$

$$x = R(\sin \alpha - \sin \varphi), \quad (2.92)$$

$$ds = R d\varphi.$$

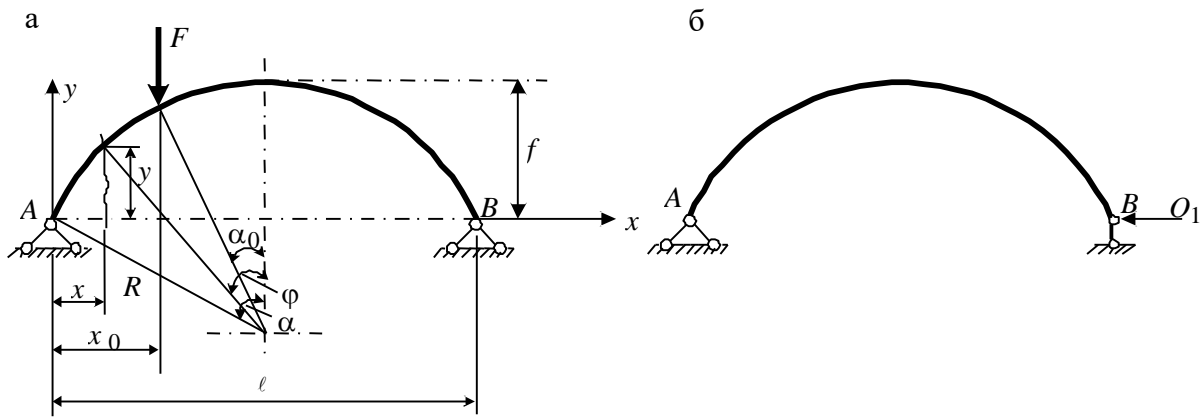


Рис. 2.47. Схема двошарнірної арки (а), основна система (б)

Розрахунок арки зробимо методом сил. Основна система показана на рис. 2.47, б. Канонічне рівняння цього методу має такий вигляд:

$$X_1 \delta_{11} + \Delta_{1f} = 0. \quad (2.93)$$

Для визначення коефіцієнта  $\delta_{11}$  і вільного члена  $\Delta_{1f}$  скористаємося формулою Мора. Водночас будемо враховувати тільки згинальний момент:

$$\delta_{11} = \int_A^B y^2 \frac{ds}{EJ}, \quad (2.94)$$

$$\Delta_{1f} = \int_A^B y M_x^0 \frac{ds}{EJ}. \quad (2.95)$$

У формулі (2.95)  $M_x^0$  – балковий згинальний момент: на ділянці від точки  $A$  до сили  $F$  ( $0 \leq x \leq x_0$ )

$$M_x^0 = \frac{F(\ell - x_0)}{\ell} x; \quad (2.96)$$

на ділянці від точки прикладання сили до точки  $B$  ( $x_0 \leq x \leq \ell$ )

$$M_x^0 = Fx_0 \left( 1 - \frac{x}{\ell} \right). \quad (2.97)$$

Якщо підставити в (2.94), (2.95) залежності (2.92), (2.96), (2.97) і проінтегрувати, одержимо:

$$\delta_{11} = \frac{R^2}{EJ} (\alpha - 3 \sin \alpha \cdot \cos \alpha + 2\alpha \cos^2 \alpha); \quad (2.98)$$

$$\Delta_{1f} = -\frac{FR^3}{EJ} - \left[ \frac{1}{2} (\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi_0) - \cos \alpha (\alpha \sin \alpha - \varphi_0 \sin \varphi_0) - \right. \\ \left. - \cos \alpha (\cos \alpha - \cos \varphi_0) \right]. \quad (2.99)$$

Теоретична величина розпору в арці, знайдена з рівняння (2.93), дорівнює

$$H = X_1 = F \frac{0,5 (\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi_0) - \cos \alpha (\sin \alpha - \varphi_0 \sin \varphi_0)}{\alpha - 3 \sin \alpha \cos \alpha + 2\alpha \cos^2 \alpha} - \\ - \frac{\cos \alpha (\cos \alpha - \cos \varphi_0)}{\alpha - 3 \sin \alpha \cos \alpha + 2\alpha \cos^2 \alpha}. \quad (2.100)$$

Якщо зосереджена сила розташована посередині прольоту арки ( $\varphi_0 = 0$ ), то розпір дорівнює

$$H = X_1 = F \frac{0,5 \sin^2 \alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha - \cos \alpha (\cos \alpha - 1)}{\alpha - 3 \sin \alpha \cos \alpha + 2\alpha \cos^2 \alpha}. \quad (2.101)$$

### **2.28.2. Послідовність проведення дослідів**

Дослід виконується на установці СМ31Б (див. п. 1.5).

Відповідно до заданої абсциси точки прикладання зовнішнього навантаження підготувати установку до проведення випробувань.

За допомогою штангенциркуля виміряти розміри поперечного перерізу випробовуваного зразка.

Установити протипагу проти нульового розподілу шкали важеля.

Установити стрілку індикатора на «0».

Даючи однакові збільшення навантаження (10 Н), навантажити чотири рази зразок, що випробовується.

Після кожного збільшення навантаження реєструвати за шкалою індикатора збільшення величини переміщень шарнірно-рухомої опори і заносити в бланк лабораторної роботи 28 (дод. 1).

При навантаженні зразка найбільшим навантаженням зафіксувати величину повного переміщення опори  $\Delta_{1f}$ .

Змістити противагу в положення  $C_1$ , при якому стрілка індикатора повернеться на нульову поділку.

Обчислити дослідні і теоретичні величини розпору. Визначити похибку між ними, % (допустима величина похибки не повинна перевищувати 5–7 %).

### **Контрольні запитання**

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Що називається розпором?
3. Яка ступінь статичної невизначеності двошарнірної арки?
4. Чи залежить розпір від погонної жорсткості перерізу?
5. Який причини впливають на похибку між дослідною і теоретичною величинами розпору?
6. З якої умови визначається величина розпору?
7. Як улаштований індикатор?

## **2.29. Дослідження дії вібраційного навантаження на шарнірно-обперту балку**

*Мета роботи:* дослідним шляхом визначити величину відношення динамічного прогину до статичного. Порівняти теоретичні й експериментальні дані.

### **2.29.1. Короткі теоретичні відомості**

Брус з розподіленою масою являє собою систему з нескінченною кількістю ступенів свободи. Його положення в будь-який момент часу визначається пружною лінією, що при динамічних навантаженнях описується функцією двох змінних: координати перерізу  $x$  і часу  $t$ , тобто



$$y = f(x, t). \quad (2.102)$$

Диференціальне рівняння поперечного переріза бруса з постійною жорсткістю  $EJ = \text{const}$  і рівномірно розподіленою масою  $m$  має такий вигляд:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -q(x, t), \quad (2.103)$$

де  $EJ$  – згинальна жорсткість балки,  $m = \frac{G}{g}$  – погонна маса балки,  $G$  – вага балки,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $q(x, t) = q(x) \sin \theta t$ ,

Загальний розв'язок диференціального рівняння (2.103) при  $q(x) = \text{const}$  буде мати наступний вигляд:

$$y_x = y_0 A_{sx} + \frac{y'_0}{s} B_{sx} - \frac{M_0}{s^2 EJ} C_{sx} - \frac{Q_0}{s^3 EJ} D_{sx} - \frac{q}{s^4 EJ} (A_{sx} - 1), \quad (2.104)$$

$$y'_x = s y_0 D_{sx} + y'_0 A_{sx} - \frac{M_0}{s EJ} B_{sx} - \frac{Q_0}{s^2 EJ} C_{sx} - \frac{q}{s^3 EJ} D_{sx}, \quad (2.105)$$

$$M_x = -s^2 EJ y_0 C_{sx} - s EJ y'_0 D_{sx} + M_0 A_{sx} + \frac{Q_0}{s} B_{sx} + \frac{q}{s^2} C_{sx}, \quad (2.106)$$

$$Q_x = -s^3 EJ y_0 B_{sx} - s^2 EJ y'_0 C_{sx} + s M_0 D_{sx} + Q_0 A_{sx} + \frac{q}{s} B_{sx}. \quad (2.107)$$

У рівняннях (2.104) – (2.107)  $y_0$ ,  $y'_0$ ,  $M_0$ ,  $Q_0$  – початкові параметри;  $A_{sx}$ ,  $B_{sx}$ ,  $C_{sx}$ ,  $D_{sx}$  – функції Кривої. Для шарнірно-обпертої балки, навантаженої зосередженою силою, що змінюється за гармонічним законом (рис. 2.48), вертикальне переміщення (прогин) під силою визначається за таким рівнянням:

$$y_a = \frac{y'_0}{s} B_{sa} - \frac{Q_0}{s^3 EJ} D_{sa}, \quad (2.108)$$

де

$$y'_0 = \frac{F}{s^2 EJ} \frac{B_{sa} D_{sl} - D_{sa} B_{sl}}{B_{sl}^2 - D_{sl}^2}, \quad (2.109)$$

$$Q_0 = F \frac{B_{sa} B_{sl} - D_{sa} D_{sl}}{B_{sl}^2 - D_{sl}^2}, \quad (2.110)$$

$$S = \sqrt[4]{\frac{m\theta^2}{EJ}}. \quad (2.111)$$

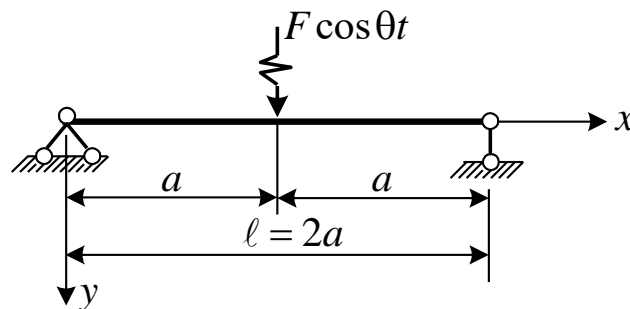


Рис. 2.48. Схема навантаження балки

### 2.29.2. Послідовність проведення дослідів

1. Установити балку разом з опорними пристроями на траверсу випробувальної гідравлічної машини (див. п.1).
2. У місці прикладання зосередженої сили установити на балку розподільну накладку.
3. До наклеєного в нижній зоні тензодатчика підключити осцилограф (див. п.1).
4. Увімкнути пульсатор і прикласти до балки динамічне навантаження із заданою частотою.
5. Зафіксувати показання осциллографа і занести в бланк лабораторної роботи 29 (дод. 1).
6. Визначити статичний прогин балки в місці прикладання сили.
7. Порівняти динамічний прогин зі статичним і визначити величину відношення.

## Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Як визначаються початкові параметри  $y_0$ ,  $y'_0$ ,  $M_0$ ,  $Q_0$ ?
3. Як визначаються функції Крилова  $A_{sx}$ ,  $B_{sx}$ ,  $C_{sx}$ ,  $D_{sx}$ ?
4. Як визначається прогин при статичній дії навантаження?
5. Як визначається переміщення балки при динамічній дії навантаження?
6. Що називається динамічним коефіцієнтом?

## 2.30. Дослідження напружено-деформованого стану сталобетонних колон

*Мета роботи:* експериментально-теоретично дослідити напружено-деформований стан коротких сталобетонних колон різного поперечного перерізу із замкнутою обіймою при статичному короткочасному навантаженні.

### 2.30.1. Короткі теоретичні відомості

Сучасні тенденції в галузі будівництва, а саме вдосконалення будівельних конструкцій, характерні пошуком нових видів поєднання сталі й бетону, які забезпечують їх раціональну спільну роботу, і спрямовані на забезпечення економії матеріалів, енерго- і трудовитрат.

Використання сталобетонних елементів різного перерізу (рис. 2.49) в конструкціях із зовнішнім листовим армуванням є економічно доцільним. Сталева обійма, замінюючи стрижневу арматуру, сприймає зусилля у всіх напрямках і під будь-яким кутом. Бетон в умовах всебічного обтиску витримує напруження, що значно перевищують його призмову міцність.

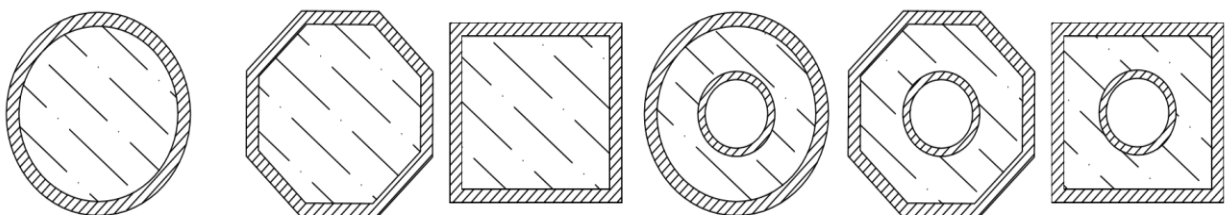


Рис. 2.49. Види поперечних перерізів сталобетонних елементів

Для більш детального вивчення розвитку поздовжніх і поперечних деформацій у бетонному ядрі, механізму руйнування бетону, а також урахування ефекту обтиску внаслідок роботи сталеві оболонки всередині зразків встановлюється тривимірна розетка глибинного датчика. Глибинний датчик розміщується в обоймі під час бетонування (рис. 2.50).

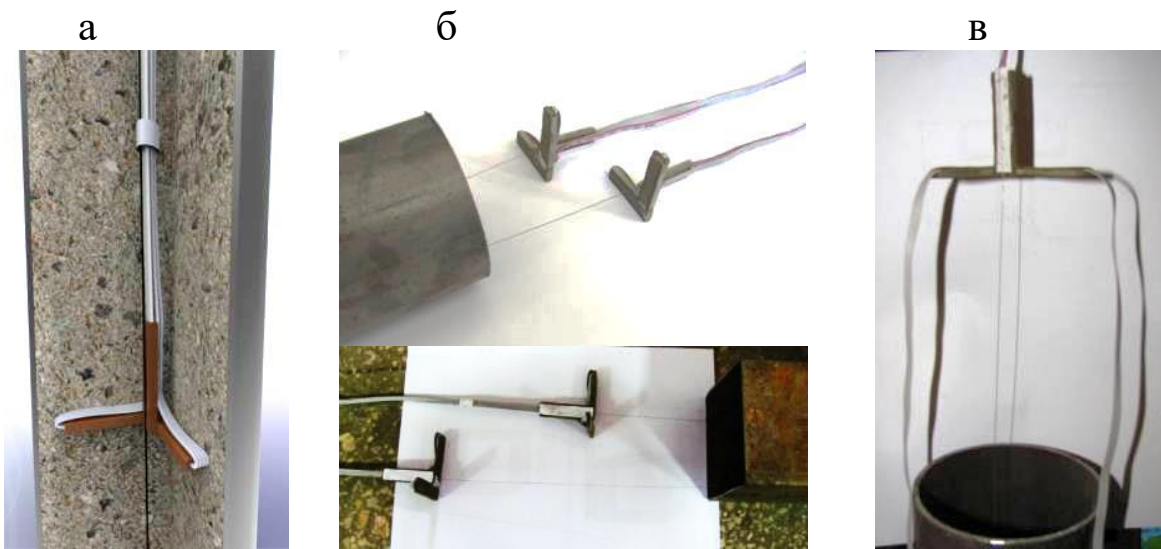


Рис. 2.50. Модель глибинного датчика всередині сталобетонної колони (а) та процес устанавлення глибинного датчика (б), (в)

Для виготовлення бетонного ядра використовується дрібнозернистий бетон з водоцементним відношенням 0,61. При приготуванні бетонної суміші застосовується портландцемент марки М 400 Балаклійського цементного заводу ВАТ «Балцем», пісок Безлюдівського піщаного кар'єру і щебінь фракції 5–20 мм. Перед приготуванням бетонної суміші щебінь ретельно очищується від пилюватих частинок. Склад бетону для сталобетонних колон: проектний клас бетону – С16/20; В/Ц = 0,61; вода = 190 кг; цемент (М 400) = 311 кг; пісок (сіяний) = 662 кг; щебінь (5–20) = 1209 кг.

Короткі сталобетонні колони випробовуються на гідравлічному пресі ИП-2000 в лабораторії кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту.

Роботу стиснутого сталобетонного елемента можна розділити на стадії:

- пружна – лінійна залежність деформацій від навантаження;
- пружно-пластична – поява ліній тикучості і мікротріщин у бетоні;
- пластична – різке наростання деформація;
- руйнування – сталь у стадії текучості втрачає місцеву стійкість (відділяється від ядра) або відбувається загальна втрата стійкості.

### ***2.30.2. Послідовність проведення досліду***

1. Виміряти за допомогою штангенциркуля розміри поперечного перерізу колони  $h$  і  $b$ ,  $d$  з точністю до 0,01 мм, а за допомогою лінійки – довжину колони з точністю до 1 мм. Результати вимірів записати в бланк лабораторної роботи 30 (дод. 1).

2. Підключити тензодатчики до підсилювача. Увімкнути блок живлення. Через 3 хв установка готова до роботи.

3. Випробування проводяться на гідравлічному пресі у вертикальній орієнтації. Ножові шарніри забезпечують шарнірне спирання стиснутих елементів. Вертикальність зразків перевіряється спочатку за геометричною віссю за допомогою будівельного рівня. Потім центрування здійснюється за геометричними осями нижньої плити преса, і, нарешті, за фізичною віссю елемента. Для цього 2 – 3 рази зразок завантажують до рівня 20 % від очікуваної величини руйнівного навантаження і перевіряють показання тензорезисторів.

4. Осьове навантаження прикладається на бетон та обойму одночасно (рис. 2.51). У процесі випробування вимірюються поздовжні і поперечні деформації. Показання тензодатчиків знімаються за допомогою тензометричної станції ВВП-8. Навантаження прикладають по 10 кН в інтервалі від 0 до руйнування.

5. При досягненні кожного ступеня навантаження з усіх приладів знімаються відліки. Відліки знімаються двічі: одразу після прикладання навантаження і після витримки під навантаженням.

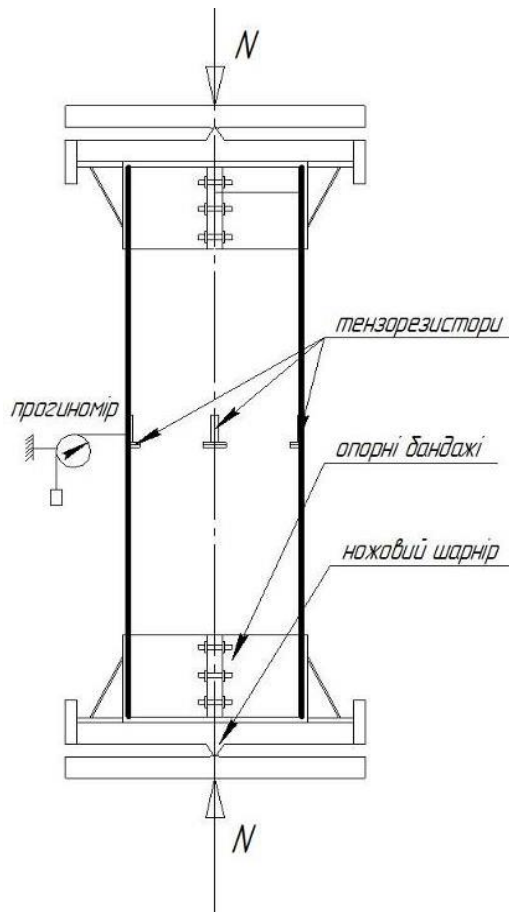


Рис 2.51. Принципова схема випробувань на центральний стиск коротких зразків

6. Усі зразки доводяться до руйнування.
7. За отриманими експериментальними значеннями поздовжніх та поперечних деформацій побудувати графіки залежностей відносних деформацій від навантаження.

### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. У чому полягає різниця між сталобетонним та залізобетонним елементом?
3. На які стадії поділяється робота стиснутого сталобетонного елемента?
4. На які стадії поділяється робота стиснутого залізобетонного елемента?
5. Яким чином прикладається навантаження на сталобетонну колону?

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов. Москва: Гостехиздат, 1957. 536 с.
2. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. Киев: Наук. думка, 1986. 264 с.
3. Чихладзе Э. Д. Сопротивление материалов. Харьков: УкрГАЗТ, 2002. 362 с.
4. Опір матеріалів з основами теорії пружності і пластичності. Ч. 1: Загальні основи / за ред. В. Г. Піскунова. Київ: Вища шк., 1994. 204 с.
5. Цурпал И. А., Барабан Н. П., Швайко В. М. Сопротивление материалов: Лабораторные работы. Киев: Вища шк., 1983. 245 с.
6. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 1: Малые деформации. Москва: Наука, 1984. 600 с.
7. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2: Конечные деформации. Москва: Наука, 1984. 432 с.
8. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. Москва: Наука, 1975. 575 с.
9. Беляев Н. М. Лабораторные работы по сопротивлению материалов. Москва: Гостехтеориздат, 1956. 286 с.
10. Афанасьев А. М., Марьин В. А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. Москва: Наука, 1975. 288 с.
11. Долидзе Д. Е. Испытание конструкций и сооружений. Москва: Высшая школа, 1975. 252 с.
12. Чихладзе Э. Д. Строительная механика. Харьков: УкрГАЗТ, 2004. 305 с.
13. Чихладзе Э. Д., Веревичева М. А. Сопротивление материалов. Харьков: ХНАДУ, 2005. 523 с.
14. Поліщук Ю. К. Метрологія та метрологічне забезпечення виробництва: навч. посіб. Київ: КМУЦА, 1996. 104 с.
15. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов. Москва: Наука, 1986. 560 с.

16. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Ленинград: Энергия, 1978. 262 с.

17. Держспоживстандарт України. Каталог нормативних документів, 2004. Київ: РВВ ДП «Укр НД НЦ», 2004. 640 с.

18. Новицкий П. В. Электрические измерения неэлектрических величин. Ленинград: Энергия, 1975. 376 с.

19. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України від 15 червня 2004 р. № 1765-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#text>.

20. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В. Т. Трощенко, А. А. Лебедев, В. А. Стрижало и др. Киев: Логос, 2000. 571 с.

21. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. Москва: Машиностроение, 1985. 472 с.



Бланки лабораторних робіт

Кафедра \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1**

*Випробування сталі на розтягання з визначенням основних механічних характеристик*

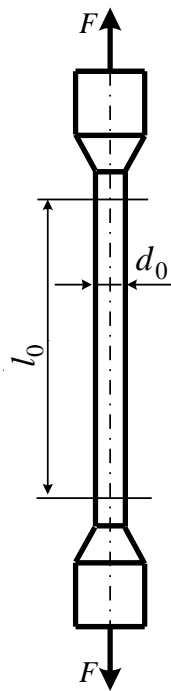
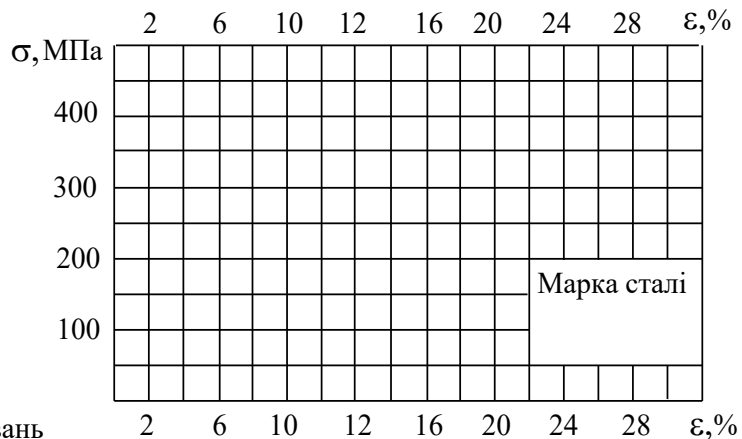


Схема випробувань

**Вихідні дані**

$l_0$	$d_0$	$A_0 = \pi d_0^2 / 4$
см	см	см <sup>2</sup>

**Діаграма розтягання сталі**



**Результати випробувань**

NN nn	Найменування величин	Найменування матеріалів		
		Сталь		
1	Навантаження, яке відповідає межі текучості $F_T$ , (кН)			
2	Межа текучості $\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}$ , (МПа)			
3	Максимальне навантаження $F_{max}$ , (кН)			

## Продовження дод. 1

Результати випробувань (продовження)				
NN nn	Найменування величин	Найменування матеріалів		
		Сталь		
4	Межа міцності $\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0}$ , МПа			
5	Розрахункова довжина зразка після розриву $\ell$ , см			
6	Відносне залишкове видовження (пластичність) $\delta = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100 = \frac{\Delta \ell}{\ell} \cdot 100\%$			
7	Діаметр поперечного перерізу шийки $d_{ш}$ , см			
8	Площа поперечного перерізу шийки $A_{ш} = \frac{\pi d_{ш}^2}{4}$ , см <sup>2</sup>			
9	Відносне залишкове звуження $\psi = \frac{A_0 - A_{ш}}{A_0} \cdot 100\%$			
10	Площа діаграми розтягання $S$ , см <sup>2</sup> , визначена планіметром			
11	Робота, затрачена на розрив зразка* $W = S \cdot m \cdot n$ , Дж			
12	Питома робота $w = \frac{W}{A_0 \ell_0}$ , Дж/см <sup>2</sup>			
13	Коефіцієнт повноти діаграми $\eta = \frac{W}{F_{\max} \Delta \ell_0}$			
<p>* Примітка: Масштабні коефіцієнти <b>n</b> і <b>m</b> сили і деформації визначаються із діаграми розтягання зразка.</p> <p>Робота виконана _____ Робота зарахована _____</p> <p style="text-align: center;">Дата _____</p>				

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2**  
**Визначення модуля пружності сталі при розтяганні**

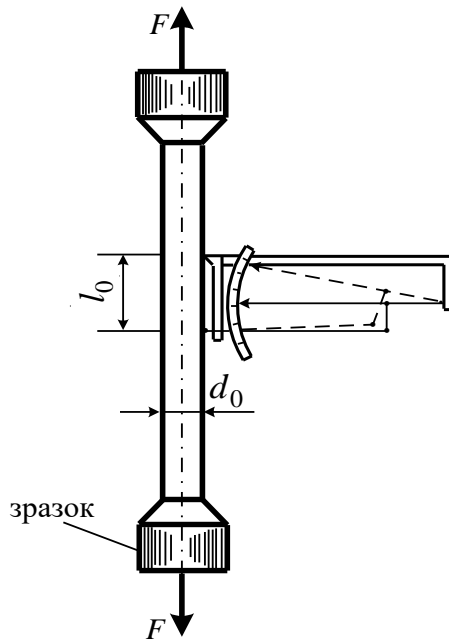


Схема установки тензометра на випробувальному зразку

**Вихідні дані**

$d_0 =$
$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} =$
База тензометра $l_0 = 2$ см
Коефіцієнт збільшення тензометра $k = 10^{-3}$

**Результати випробувань**

Навантаження $F$ , кН	Показання тензометра $a$ , см	Приріст показань $\Delta a$ , см	Середній приріст $\Delta a_{cp}$ , см	$\Delta \sigma = \frac{\Delta F}{A_0}$ МПа	$E = \frac{\Delta \sigma \cdot l_0}{\Delta a_{cp} k}$ МПа	$F_{шц}$ кН	$\sigma_{шц} = \frac{F_{шц}}{A_0}$ МПа
<b>Сталь</b>							



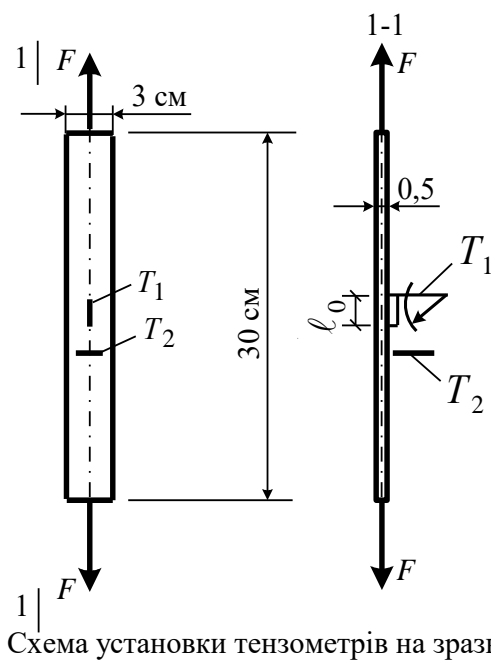
Кафедра \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

#### Визначення коефіцієнта поперечної деформації для сталі



#### Вихідні дані

Розміри зразків $\ell = 30$ см; $h = 3$ см; $\delta = 0,5$ см
База тензометрів $\ell_0 = 2$ см
Коефіцієнт збільшення тензометра $k = 10^{-3}$

#### Результати випробувань

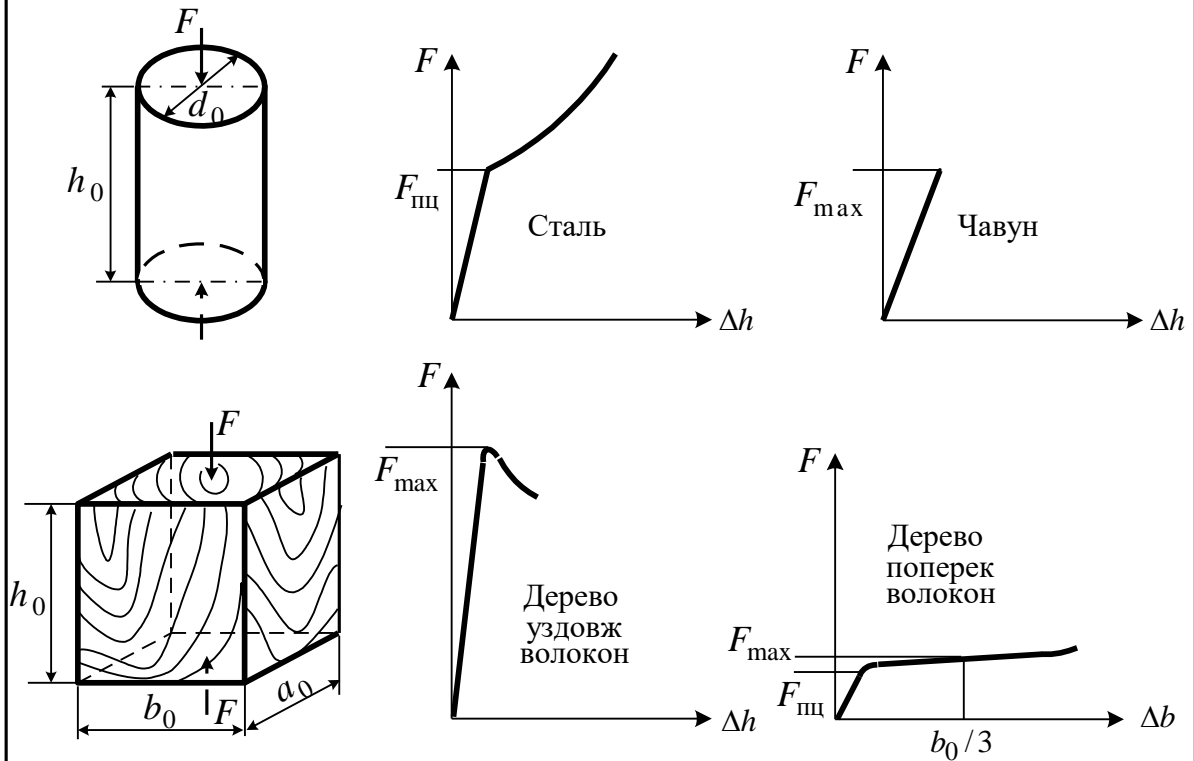
Навантаження $F$ , кН	Поздовжні переміщення: тензометр T1			Поздовжні переміщення: тензометр T2			Коефіцієнт Пуассона $\nu = \frac{\Delta a_{cp}}{\Delta b_{cp}}$
	Показання тензометра $b$ , см	Приріст показань $\Delta b$ , см	Середній приріст $\Delta b_{cp}$ , см	Показання тензометра $a$ , см	Приріст показань $\Delta a$ , см	Середній приріст $\Delta a_{cp}$ , см	



Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4**

*Випробування сталі, чавуну і дерева на стискання з визначенням основних механічних характеристик*



Схеми зразків і діаграм стискання

**Вихідні дані**

№№ зразків	Матеріал	Геометричні характеристики зразків						
		$d_0, \text{ см}$	$h_0, \text{ см}$	$A = \frac{\pi d_0^2}{4}, \text{ см}^2$	$a_0, \text{ см}$	$b_0, \text{ см}$	$A = a_0 b_0, \text{ см}^2$	$A = a_0 h_0, \text{ см}^2$
1	Сталь							
2								
3	Чавун							
4	Дерево уздовж волокон							
5	Дерево поперек волокон							

Коефіцієнт збільшення тензومتра  $k = 10^{-3}$ ; база тензومتра  $l_0 = 2 \text{ см}$

## Продовження дод. 1

Визначення межі пропорційності і модуля пружності сталі при стисканні							
Навантаження $F$ , кН	Показання тензومتра			$\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{A_1}$	$E = \frac{\Delta\sigma \cdot \ell_0}{\Delta a_{cp} \cdot k}$ МПа	$F_{пц}$ кН	$\sigma_{пц} = \frac{F_{пц}}{A_1}$ МПа
	$a$	$\Delta a$	$\Delta a_{cp}$				
Результати випробувань зразків							
Найменування величин	М а т е р і а л						
	Сталь	Чавун	Дерево уздовж волокон	Дерево поперек волокон			
Навантаження, кН	$F_{пц} =$ $F_{max} =$	$F_{max} =$	$F_{max} =$	$F_{пц} =$ $F_{max} =$			
Міцність	$\sigma_{пц} =$ $\sigma_{max} =$	$\sigma_{max} =$	$\sigma_{max} =$	$\sigma_{пц} =$ $\sigma_{max} =$			
Коефіцієнт анізотропії $k = \frac{\sigma_{max} \text{ (уздовж волокон)}}{\sigma_{max} \text{ (поперек волокон)}}$							
Ескізи зразків після руйнування							
Сталь	Чавун	Дерево уздовж волокон	Дерево поперек волокон				
Робота виконана _____ Робота зарахована _____ Дата _____							



Кафедра \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

#### Випробування сталі на зріз і дерева на сколювання та перерізування

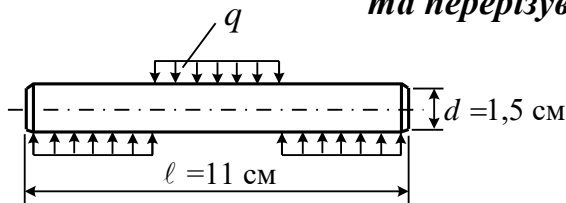


Схема випробувань сталевих зразка на зріз

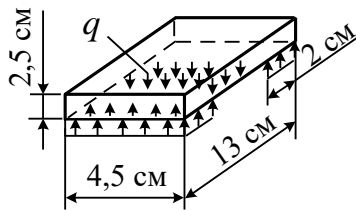


Схема випробувань дерев'яного зразка на перерізування

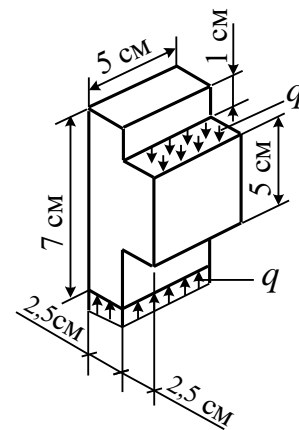


Схема випробувань дерев'яного зразка на сколювання

#### Вихідні дані

Сталевий зразок	$A_{cp} = 2 \frac{\pi d^2}{4} =$
Дерев'яний зразок на сколювання	$A_{cp} =$
Дерев'яний зразок на перерізування	$A_{cp} =$

#### Результати випробувань

NN пп	Найменування величин	Зразки		
		Сталевий на зріз	Дерев'яний на сколювання	Дерев'яний на перерізування
1	Руйнуюче навантаження $F_{max}$ , (кН)			
2	Межа міцності $\tau_B = \frac{F_{max}}{A_{cp}}$ , (МПа)			

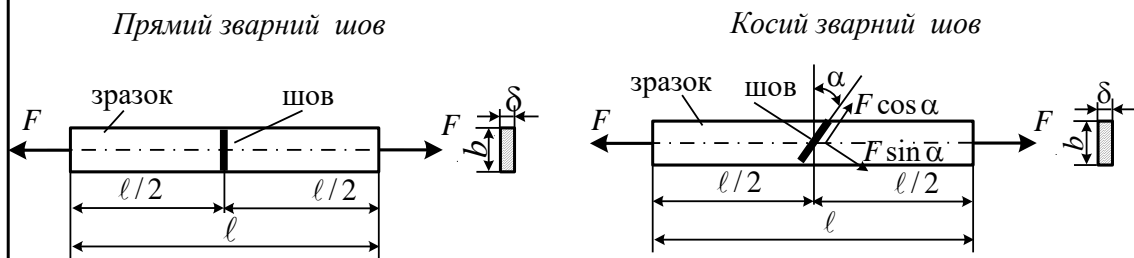
Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### Випробування зварних з'єднань



Схеми зразків

#### Вихідні дані

Розміри зразків:  $l =$  ;  $b =$  ;  $\delta =$  ;  $\alpha =$   
 Розрахункові довжини швів: прямого -  $b_{ш} =$  ; косого -  $b_{ш} =$  ;  
 Розрахункові напруження (електроди Э42 та Э42А):  $R_p = 180$  МПа;  $R_{cp} = 130$  МПа

#### Результати випробувань

Найменування величини	Прямий шов, номери зразків	Косий шов, номери зразків	Зразок із основного металу, номери зразків
Граничне зусилля $F_{max}$ розриву зразка	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3

#### Ескізи зразків після розриву

Зразок з прямим швом	Зразок з косим швом	Зразок із основного металу

**Результати співставлення дослідних і розрахункових даних  
(середнє значення)**

$$\frac{F_{\text{max, п.ш.}}}{F_{\text{max, ц}}} =$$

$$\frac{F_{\text{max, к. ш.}}}{F_{\text{max, ц}}} =$$

Робота виконана \_\_\_\_\_      Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7**  
**Визначення твердості різних матеріалів методом**  
**вдавлювання**

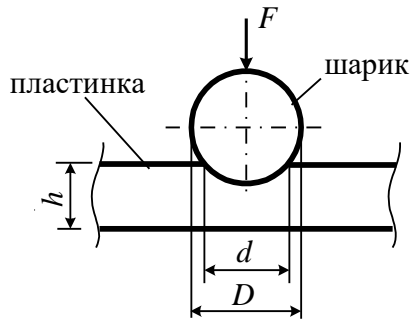


Схема випробувань

Розрахункові формули

$$HB = \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{\pi D}{2} \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

**Результати випробувань**

Матеріал пластинки	Товщина випробуваної пластинки $h$ , мм	Діаметр шарика $D$ , мм	Навантаження $F$ , кгс	Витримка під навантаженням, сек	Номер випробувань	Діаметр відпечатка $d$ , мм	Середнє значення $d_{cp}$ , мм	Площа відпечатка $A$ , мм <sup>2</sup>	Число твердості НВ $\frac{кгс}{мм^2}$
Сталь	18	10	3000	10	1				
					2				
					3				
Чавун ВЧ40-10	50	10	3000	10	1				
					2				
					3				
Бронза БРОФ 10-1	9,6	10	1000	30	1				
					2				
					3				
Дуралюмін Д1	8,5	10	250	60	1				
					2				
					3				

Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

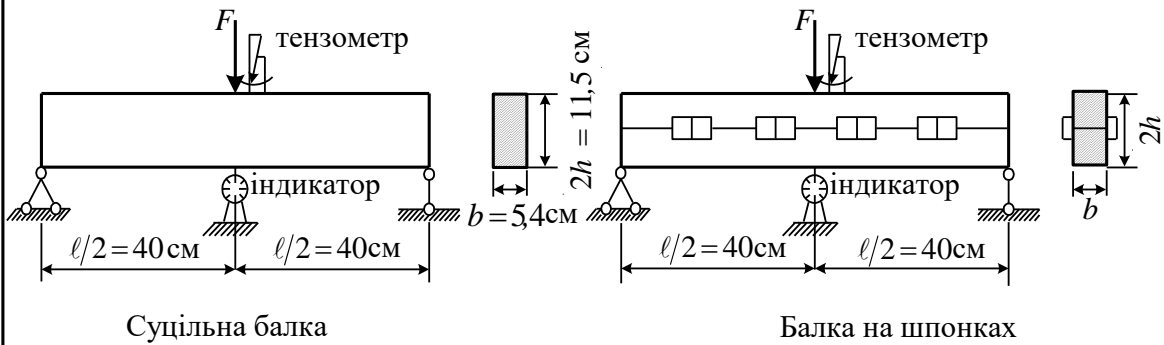
Кафедра \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

### Випробування на згин дерев'яних балок - суцільної та на шпонках



#### Вихідні дані

База тензометра $\ell_0 = 2$ см
Коефіцієнт збільшення тензометра $k = 10^{-3}$
Ціна поділки індикатора 1/100 мм
Навантаження $F = 5$ кН

#### Результати випробувань

Навантаження $F$ , кН	Тензометри					
	Суцільна балка			Балка на шпонках		
	Показання тензометра $a_1$ , (см)	Приріст показань $\Delta a_1$ , (см)	$\varepsilon_1 = \frac{\Delta a_1}{\ell_0} k$	Показання тензометра $a_2$ , (см)	Приріст показань $\Delta a_2$ , (см)	$\varepsilon_2 = \frac{\Delta a_2}{\ell_0} k$
0						
5						

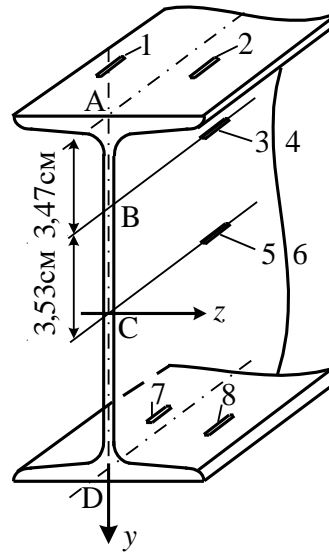
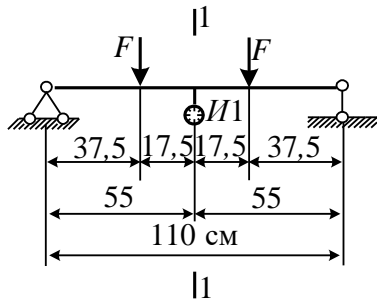
## Продовження дод. 1

Результати випробувань						
Навантаження F, кН	Індикатори					
	Суцільна балка			Балка на шпонках		
	Показання індикатора $m_1$	Приріст показань $\Delta m_1$	Прогин $f_1 = 100\Delta m_1$ (мм)	Показання тензометра $m_2$	Приріст показань $\Delta m_2$	Прогин $f_2 = 100\Delta m_2$ (мм)
0						
5						
Порівняння дослідних даних						
Дослідні величини	Суцільна балка	Балка на шпонках	Коефіцієнт			
			міцності $k_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$	жорсткості $k_2 = \frac{f_2}{f_1}$		
$\varepsilon$	$\varepsilon_1 =$	$\varepsilon_2 =$				
$f$	$f_1 =$	$f_2 =$				
<p>Робота виконана _____ Робота зарахована _____</p> <p style="text-align: center;">Дата _____</p>						

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

*Дослідження деформацій і розподіл нормальних напружень у двотавровій балці в зоні чистого згину*



**Вихідні дані**

Балка виконана із І №14
$J_z = 572 \text{ см}^4$ ; $W_z = 81,7 \text{ см}^3$
$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ; $F = 25 \text{ кН}$
Коефіцієнт збільшення АИДа $k_1 = 1 \cdot 10^{-5}$
Ціна поділки індикатора 1/100 мм

Схема розміщення тензодатчиків в перерізі 1-1

**Результати випробувань**

Навантаження F, кН	Тензодатчики				Середній приріст $\Delta a_{\text{ср}} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2}{2}$	$\varepsilon_A = \Delta a_{\text{ср}} k_1$
	№ 1		№ 2			
	Показання АИД $a_1$ , (см)	Приріст показань $\Delta a_1$ , (см)	Показання АИД $a_2$ , (см)	Приріст показань $\Delta a_2$ , (см)		
0						

## Продовження дод. 1

Результати випробувань														
Навантаження, кН	Тензодатчики					$\varepsilon_B = \Delta a_{cp} k_1$								
	№ 3		№ 4		Середній приріст $\Delta a_{cp} = \frac{\Delta a_3 + \Delta a_4}{2}$									
	Показання АИДа $a_3$	Приріст показань $\Delta a_3$	Показання АИДа $a_4$	Приріст показань $\Delta a_4$										
0														
Результати випробувань														
Навантаження, кН	Тензодатчики					$\varepsilon_C = \Delta a_{cp} k_1$								
	№ 5		№ 6		Середній приріст $\Delta a_{cp} = \frac{\Delta a_5 + \Delta a_6}{2}$									
	Показання АИДа $a_5$	Приріст показань $\Delta a_5$	Показання АИДа $a_6$	Приріст показань $\Delta a_6$										
0														
Результати випробувань														
Навантаження, кН	Тензодатчики					$\varepsilon_D = \Delta a_{cp} k_1$								
	№ 7		№ 8		Середній приріст $\Delta a_{cp} = \frac{\Delta a_7 + \Delta a_8}{2}$									
	Показання АИДа $a_7$	Приріст показань $\Delta a_7$	Показання АИДа $a_8$	Приріст показань $\Delta a_8$										
0														
Результати випробувань			Розподіл деформацій по висоті перерізу											
Навантаження, кН	Індикатор $I_1$		Прогин балки $f$ , мм											
	Показання	Приріст показань												
0														
Порівняння дослідних і теоретичних даних														
$\varepsilon_A$			$\varepsilon_B$			$\varepsilon_C$			$\varepsilon_D$			$f$		
Теор.	Дослід.	Помилка %	Теор.	Дослід.	Помилка %	Теор.	Дослід.	Помилка %	Теор.	Дослід.	Помилка %	Теор.	Дослід.	Помилка %
Робота виконана _____							Робота зарахована _____							
Дата _____														



Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10**

*Дослідження деформацій і розподіл нормальних напружень у балці прямокутного перерізу при поперечному згині*

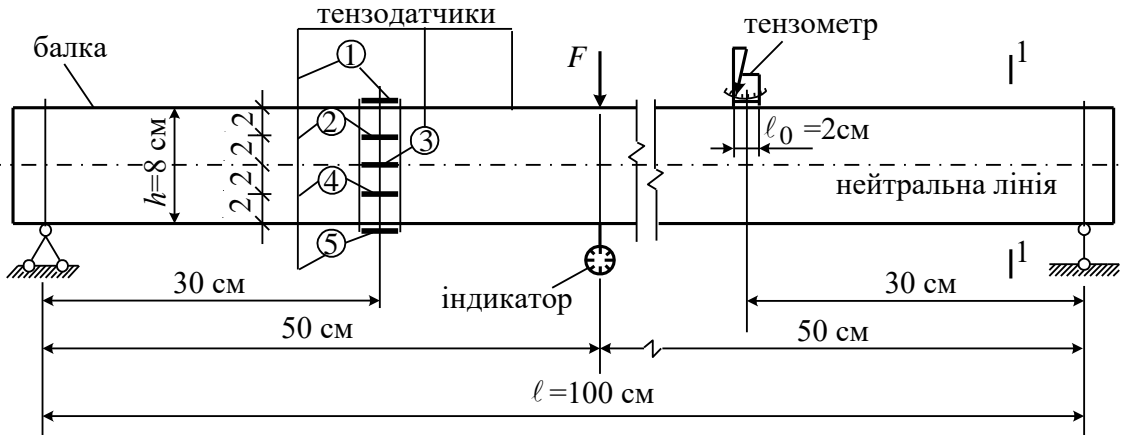
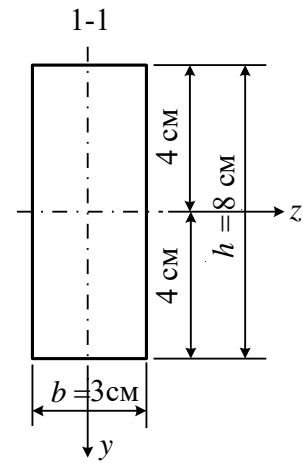


Схема випробувань і розміщення вимірювальних приладів

**Вихідні дані**

$J_z = 128 \text{ см}^4; W_z = 32 \text{ см}^3$
$S_z = 24 \text{ см}^3; F = 15 \text{ кН}; E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коефіцієнт збільшення АИДа $k_1 = 1 \cdot 10^{-5}$
База тензومتра $\ell_0 = 2 \text{ см}$
Коефіцієнт збільшення тензومتра $k = 10^{-3}$
Ціна поділки індикатора $1/100 \text{ мм}$



**Результати випробувань**

Навантаження $F, \text{ кН}$	Тензодатчики								
	1			2			3		
	Показання АИДа $a_1$	Приріст показань $\Delta a_1$	$\varepsilon_1 = \Delta a_1 k_1$	Показання АИДа $a_2$	Приріст показань $\Delta a_2$	$\varepsilon_2 = \Delta a_2 k_1$	Показання АИДа $a_3$	Приріст показань $\Delta a_3$	$\varepsilon_3 = \Delta a_3 k_1$

## Продовження дод. 1

Результати випробувань						
Навантаження $F$ , кН	Тензодатчики					
	4			5		
	Показання АИДа $a_4$	Приріст показань $\Delta a_4$	$\varepsilon_4 = \Delta a_4 k_1$	Показання АИДа $a_5$	Приріст показань $\Delta a_5$	$\varepsilon_5 = \Delta a_5 k_1$
0						
Результати випробувань						
Навантаження $F$ , кН	Тензометр			Індикатор		
	Показання тензометра $a$ , см	Приріст показань $\Delta a$ , см	$\varepsilon_1 = \frac{\Delta a}{\ell_0} k$	Показання індикатора $a$ , мм	Приріст показань $\Delta a$ , мм	Прогин балки $f$ , мм
0						
Порівняння дослідних і теоретичних даних				Розподіл деформацій по висоті перерізу		
Найменування величин	Теорія	Дослід	Похибка, %			
$\varepsilon_1$ тензодатчик						
$\varepsilon_1$ тензометр						
$\varepsilon_2$						
$\varepsilon_3$						
$\varepsilon_4$						
$\varepsilon_5$						
$f$ , мм						
Робота виконана _____				Робота зарахована _____		
Дата _____						

Кафедра \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

### Визначення прогинів статично невизначної балки



#### Вихідні дані

Характеристики перерізу	$J_z = 128 \text{ см}^4$ ; $W_z = 32 \text{ см}^3$
Модуль пружності	$E = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ;
Величина навантаження	$F = 20 \text{ кН}$ ;
Ціна поділки індикатора	1/100 мм

#### Результати випробувань і з'ясування дослідних і теоретичних даних

Навантаження $F$ , кН	Показання індикатора $a$ , (мм)	Приріст показань $\Delta a$ , (мм)	Дослідне значення прогину $f_{оп}$ , (см)	Теоретичне значення прогину $f_T$ , (см)	Похибка %
0					
10					
20					

Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

### Випробування на кручення круглого циліндричного стержня

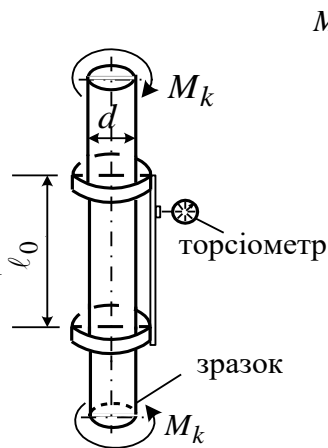
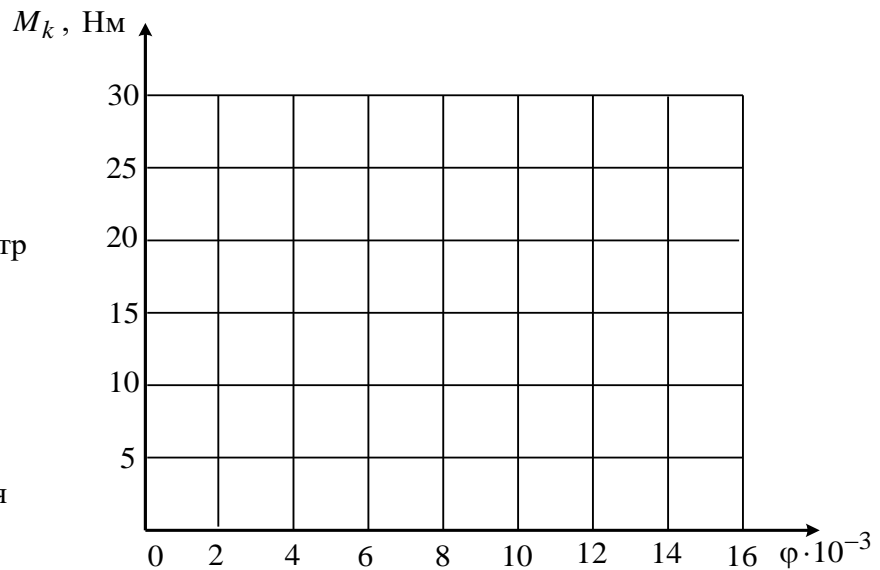


Схема випробування



Діаграма залежності кута закручування від крутного моменту

#### Вихідні дані

Діаметр зразка  $d = 1$  см

Полярний момент інерції  $J_p = \frac{\pi d^4}{32} =$

Розрахункова довжина (база торсіометра)  $l_0 = 5$  см

Модуль пружності  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа

Коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,28$

Розрахункове значення модуля зсуву  $G = \frac{E}{2(1+\nu)} =$

Коефіцієнт збільшення торсіометра  $k_2 = 1/3400$

Розрахункове значення дотичного напруження  $\tau_{\max} = \frac{M_k}{W_p} =$



Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13**  
**Визначення головних напружень при крученні порожнистого стержня круглого поперечного перерізу**

**Вихідні дані**

1. Випробувальна установка - СМ14М.
2. Вимірювальний прилад - СПТ-3.
3. Матеріал зразка - сталь.
4. Модуль пружності матеріалу зразка  $E =$
5. Коефіцієнт Пуассона матеріалу зразка  $\nu =$
6. Межа пропорційності матеріалу зразка  $\tau_{\text{пц}} =$
7. Зовнішній діаметр зразка  $D =$
8. Внутрішній діаметр зразка  $d =$
9. Довжина важелів  $h =$
10. База тензодатчиків  $\ell_0 =$
11. Тарувальний коефіцієнт  $k_0 =$
12. Полярний момент опору перерізу  $W_p = \pi(D^4 - d^4) / 16D =$
13. Максимально допустиме навантаження  $F = W_p \tau_{\text{пц}} / h =$

**Результати досліджень**

№ п/п	Навантаження $F$ , кН	Приріст навантаження $\Delta F$ , кН	Покази тензодатчиків			
			$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
1						
2						
Різниця показів $\Delta A$						

**Результати випробувань**

1. Середня відносна головна деформація на ступінь навантаження  

$$\Delta F = \varepsilon_{\text{сер}} = k_0 \sum |\Delta A_i| / 4\ell_0 =$$
2. Головні напруження  $\sigma_1 = -\sigma_2 = E\varepsilon_{\text{сер}} / (1 + \mu) =$
3. Теоретичні значення головних напружень  $\sigma_1 = \sigma_2 = \tau_{\text{max}} = \Delta F h / W_p =$

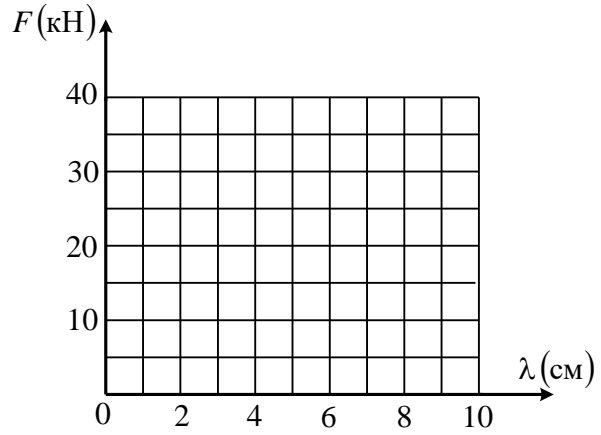
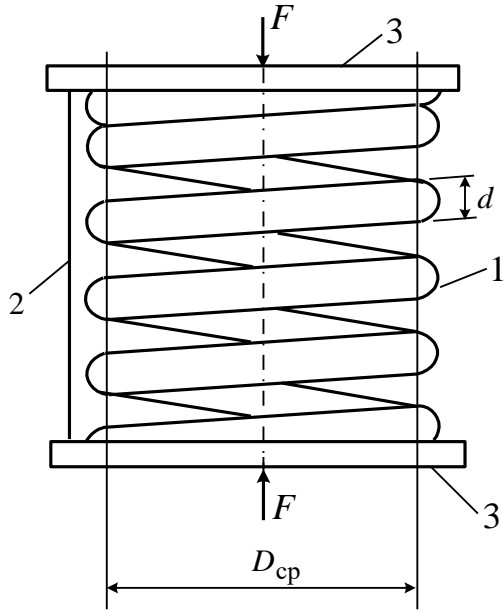
Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14**

*Випробування циліндричної пружини на стискання*



Характеристика пружини

Схема випробувань:  
 1 - пружина, 2 - мірна лінійка,  
 3 - опорні плити

**Вихідні дані**

Середній діаметр пружини  $D_{cp} = 17 \text{ см}$

Діаметр витка  $d = 3 \text{ см}$

Число робочих витків  $n = 3$

Модуль пружності  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,28$

Розрахункове значення модуля зсуву (МПа)  $G_p = \frac{E}{2(1 + \nu)} =$

Розрахункове значення найбільшого дотичного напруження (МПа)

$$\tau_{max} = \frac{8FD_{cp}}{\pi d^3} \left( 1 + \frac{d}{2D_{cp}} \right) =$$

## Продовження дод. 1

Результати випробувань і порівняння дослідних і теоретичних даних						
Навантаження F, кН	Осадка пружини $\lambda$ , мм	Приріст $\Delta\lambda$ , мм	Середній приріст $\Delta\lambda_{cp}$ , мм	Модуль зсуву $G_{on} = \frac{8 \Delta F D_{cp}^3 n}{\Delta \lambda_{cp} d^4}$ МПа	Похибка $\frac{G_{op} - G_p}{G_{op}} 100$ %	Робота $W = \frac{1}{2} F \lambda$
0						
5						
10						
15						
20						
25						
30						
35						
40						

Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_



Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15**  
*Визначення прогинів при косому згині*

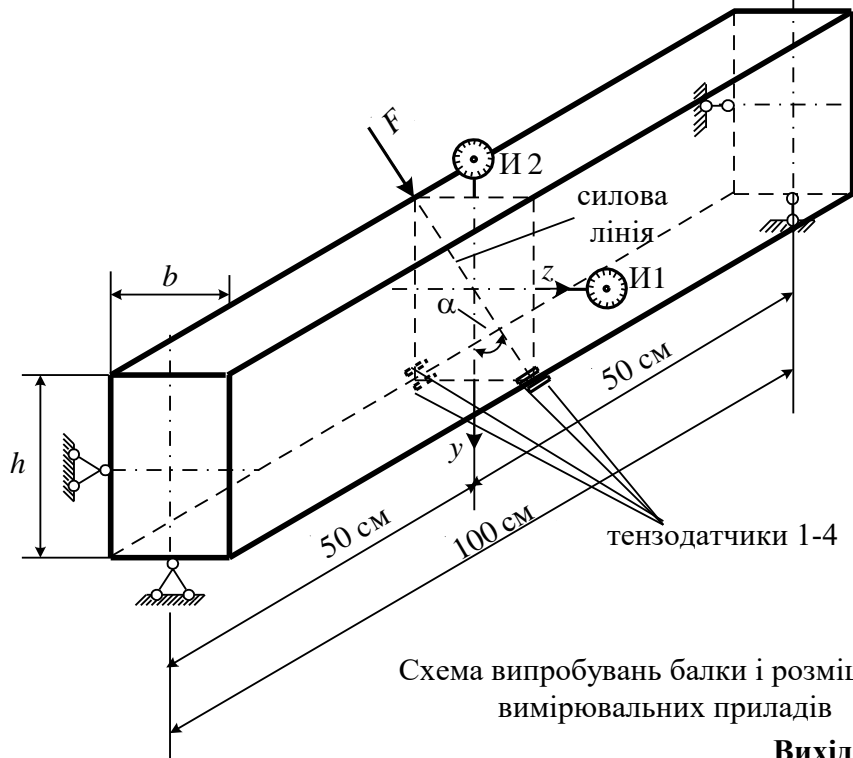


Схема випробувань балки і розміщення вимірювальних приладів

**Вихідні дані**

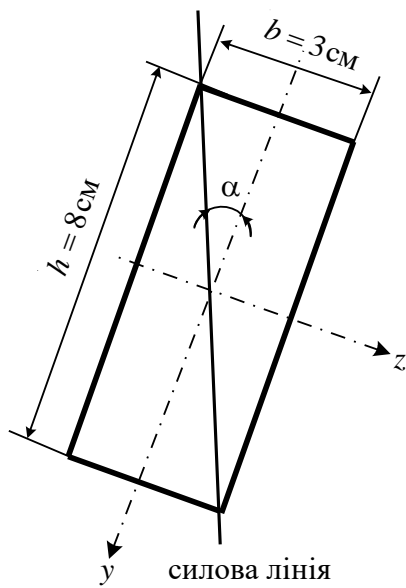


Схема поперечного перерізу балки

$J_z = \frac{bh^3}{12} =$
$W_z = \frac{bh^2}{6} =$
$J_y = \frac{hb^3}{12} =$
$W_y = \frac{hb^2}{6} =$
$E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа
$EJ_z =$
$EJ_y =$
$\alpha = 20,56^0$
Коефіцієнт збільшення АИДа $k_1 = 1 \cdot 10^{-5}$
Ціна поділки індикатора 1/100 мм
Навантаження $F = 10$ кН

## Продовження дод. 1

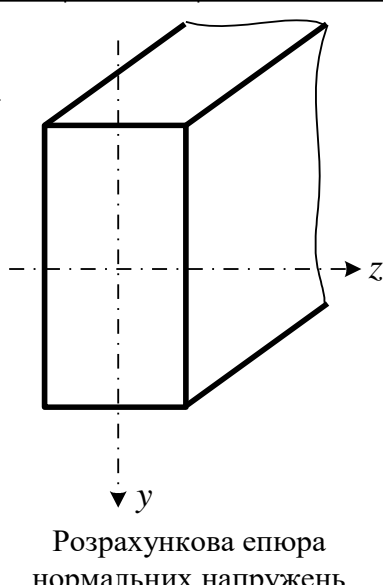
Результати випробувань												
Навантаження F, кН	Тензодатчики № 1, 2						Тензодатчики № 3, 4					
	№ 1		№ 2		Середній приріст $\Delta a_{cp} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2}{2}$	$\varepsilon_{1,2} = \Delta a_{cp} \cdot k_1$	№ 3		№ 4		Середній приріст $\Delta a_{cp} = \frac{\Delta a_3 + \Delta a_4}{2}$	$\varepsilon_{3,4} = \Delta a_{cp} \cdot k_1$
	показання АИДа $a_1$	приріст $\Delta a_1$	показання АИДа $a_2$	приріст $\Delta a_2$			показання АИДа $a_3$	приріст $\Delta a_3$	показання АИДа $a_4$	приріст $\Delta a_4$		
0												
10												

Результати випробувань							
Навантаження F, кН	Індикатор И1			Індикатор И2			$f = \sqrt{f_y^2 + f_z^2}$
	показання індикатора $a_1, (мм)$	приріст показань $\Delta a_1, (мм)$	$f_z, (мм)$	показання індикатора $a_2, (мм)$	приріст показань $\Delta a_2, (мм)$	$f_y, (мм)$	
0							
10							

Порівняння дослідних і теоретичних даних			
Найменування величин	Дослідне значення	Теоретичне значення	% розходження
$\varepsilon_{1,2}$			
$\varepsilon_{1,2}$			
$f_z$ (мм)			
$f_y$ (мм)			
$f$ (мм)			
$\beta$ (град)			



Робота виконана \_\_\_\_\_      Робота зарахована \_\_\_\_\_  
 Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16**

*Дослідження розподілу напружень при позацентровому стисканні з одним ексцентриситетом  $z_0$*

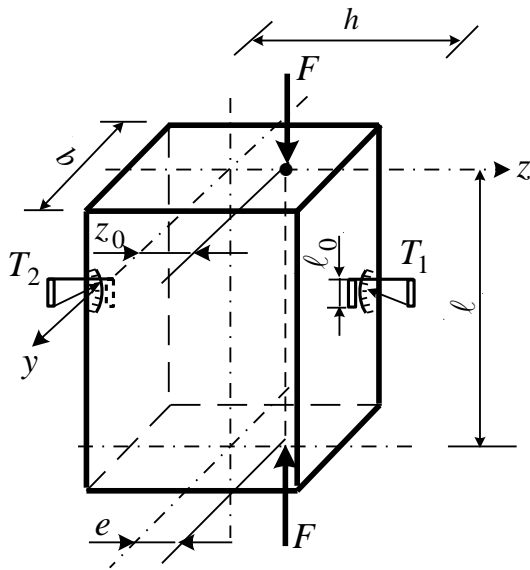


Схема випробувань зразка

**Вихідні дані**

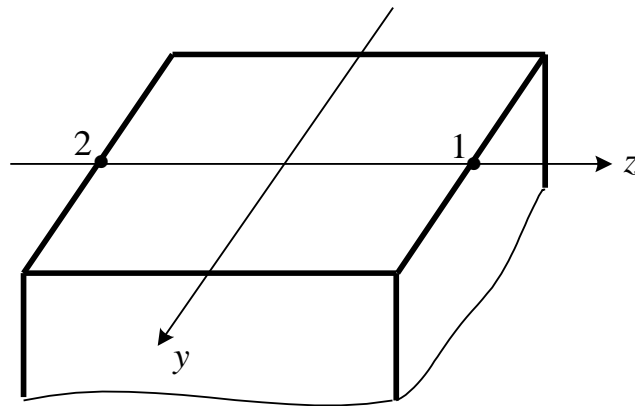
Довжина зразка $l =$
Висота поперечного перерізу $h =$
Ширина поперечного перерізу $b =$
Площа поперечного перерізу $A =$
Ексцентриситет $z_0 =$
Модуль пружності $E =$
База тензометрів $l_0 = 2 \text{ см}$
Коефіцієнт збільшення тензометрів $k = 10^{-3}$

**Результати випробувань**

Навантаження $F, \text{ кН}$	Тензометр T1			Тензометр T2			$\varepsilon_1 = \frac{\Delta a_{1\text{cp}} \cdot k}{l_0}$	$\varepsilon_2 = \frac{\Delta a_{2\text{cp}} \cdot k}{l_0}$
	показання $a_1$	приріст $\Delta a_1$	середній приріст $\Delta a_{1\text{cp}}$	показання $a_2$	приріст $\Delta a_2$	середній приріст $\Delta a_{2\text{cp}}$		

## Продовження дод. 1

Порівняння дослідних і теоретичних даних			
Найменування величин	Дослідне значення	Теоретичне значення	Похибка %
Нормальні напруження в точці 1	$\sigma_1 = \varepsilon_1 \cdot E =$	$\sigma_1 = -\frac{F}{A} \left( 1 + \frac{6z_0}{b} \right) =$	
Нормальні напруження в точці 2	$\sigma_2 = \varepsilon_2 \cdot E =$	$\sigma_2 = -\frac{F}{A} \left( 1 - \frac{6z_0}{b} \right) =$	



Епюри нормальних напружень в перерізі бруса

Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 17**

*Дослідження розподілу напружень при косому позакентровому стисканні з двома ексцентриситетами  $y_0$  і  $z_0$*

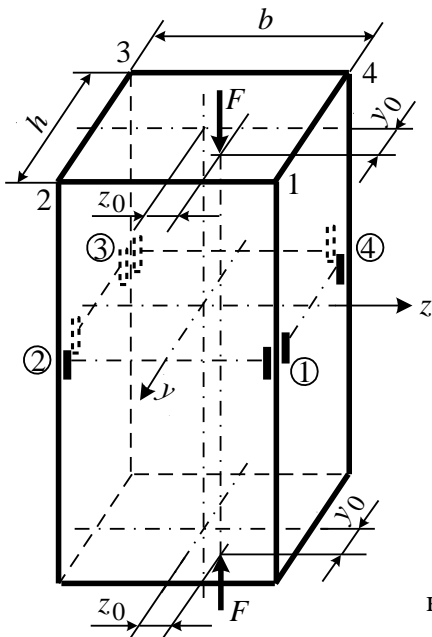
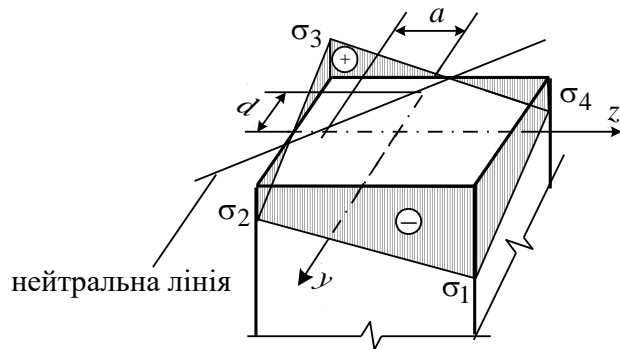


Схема випробувань

**Вихідні дані**

$h$ , см	$b$ , см	$y_0$ , см	$z_0$ , см	$F$ , кН	$E$ , МПа
10,01	14,5	2	4	300	$2,1 \cdot 10^5$

Коефіцієнт збільшення АИДа  $k_1 = 1 \cdot 10^5$



Епюра напружень

**Результати розрахунків**

$A = bh$ см <sup>2</sup>	$J_z = \frac{bh^3}{12}$ см <sup>4</sup>	$J_y = \frac{ab^3}{12}$ см <sup>4</sup>	$i_z^2 = \frac{J_z}{A}$ см <sup>2</sup>	$i_y^2 = \frac{J_y}{A}$ см <sup>2</sup>	$a = \frac{J_y^2}{z_0}$ см	$d = \frac{J_z^2}{y_0}$ см	$\sigma_1 = -\frac{F}{A} \left( 1 + \frac{6y_0}{h} + \frac{6z_0}{b} \right)$ МПа
$\sigma_2 = -\frac{F}{A} \left( 1 - \frac{6z_0}{b} + \frac{6y_0}{h} \right)$ МПа	$\sigma_3 = -\frac{F}{A} \left( 1 - \frac{6z_0}{b} - \frac{6y_0}{h} \right)$ МПа	$\sigma_4 = -\frac{F}{A} \left( 1 + \frac{6z_0}{b} - \frac{6y_0}{h} \right)$ МПа	$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 k_1}{E}$	$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 k_1}{E}$	$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3 k_1}{E}$	$\varepsilon_4 = \frac{\sigma_4 k_1}{E}$	

## Продовження дод. 1

Результати випробувань											
Навантаження, кН	Показання АІДа	Приріст показань $\Delta_i$	Показання АІДа	Приріст показань $\Delta_{i+1}$	Середній приріст $\Delta_{i_{cp}}$	$\varepsilon_j = \Delta_{i_{cp}} k_1$					
Тензодатчики (1).1 і (1).2											
0						$\varepsilon_1$					
300											
Тензодатчики (2).3 і (2).4											
0						$\varepsilon_2$					
300											
Тензодатчики (3).5 і (3).6											
0						$\varepsilon_3$					
300											
Тензодатчики (4).7 і (4).8											
0						$\varepsilon_4$					
300											
<b>Порівняння дослідних і теоретичних даних</b>											
$\varepsilon_1$			$\varepsilon_2$			$\varepsilon_3$			$\varepsilon_4$		
Дослід	Теорія	Похибка %	Дослід	Теорія	Похибка %	Дослід	Теорія	Похибка %	Дослід	Теорія	Похибка %
<p>Робота виконана _____ Робота зарахована _____</p> <p style="margin-left: 200px;">Дата _____</p>											

Кафедра \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 18

*Дослідження деформацій і розподілів напружень при згині з крученням*

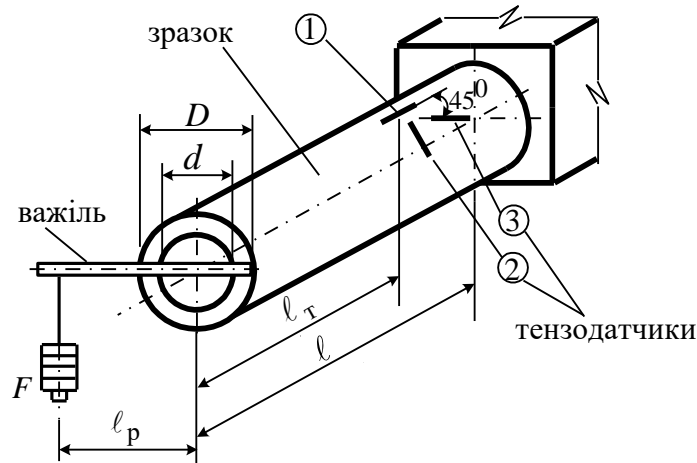


Схема випробувань стержня

### Вихідні дані

Довжина зразка $l =$
Відстань від кінця зразка до перерізу наклейки тензодатчика $l_T =$
Довжина важеля $l_p =$
Зовнішній діаметр перерізу $D =$
Внутрішній діаметр перерізу $d =$
Осьовий момент опору $W = \frac{\pi D^3}{32} \left( 1 - \frac{d^4}{D^4} \right) =$
Полярний момент опору $W_p = 2W =$
Модуль пружності матеріалу стержня $E =$
Коефіцієнт збільшення АИДа $k_1 = 1 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуассона $\nu =$



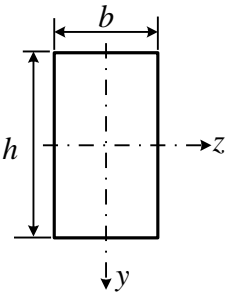


Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 19**

*Дослідження явища втрати стійкості стиснутих стержнів*

**Вихідні дані**

 <p>Схема поперечного перерізу зразка</p>	Розрахункова схема				
	Позначення	I	II	III	IV
1. Ширина поперечного перерізу зразка, см	$b$				
2. Висота поперечного перерізу зразка, см	$h$				
3. Довжина зразка, см	$\ell$				
4. Площа поперечного перерізу зразка, см <sup>2</sup> $A = bh$	$A$				
5. Найменший осьовий момент інерції перерізу, см <sup>4</sup>	$J_{min}$				
6. Найменший радіус інерції перерізу, см $i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{A}}$	$i_{min}$				
7. Коефіцієнт приведення довжини	$\mu$				
8. Гнучкість стержня $\lambda = \frac{\mu \cdot \ell}{i_{min}}$	$\lambda$				
9. Модуль пружності матеріала при розтяганні, МПа	$E$				

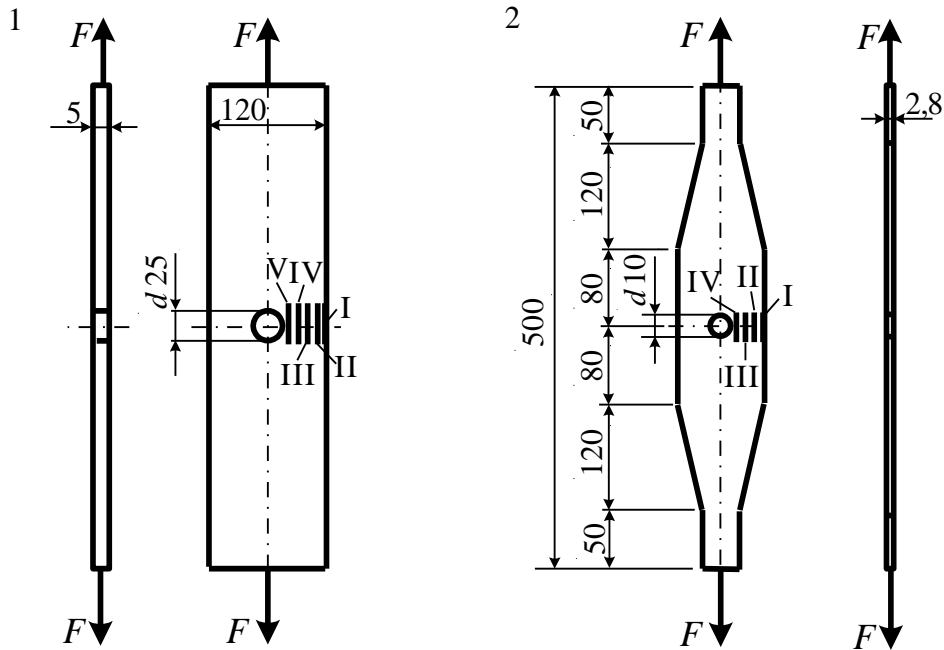
## Продовження дод. 1

Результати теоретичних і дослідних значень критичного навантаження				
Найменування величини	Розрахункова схема			
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
1. Критичне навантаження, визначене за формулою Л. Ейлера, кН $F_{kp} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{(\mu\ell)^2}$				
2. Критичне напруження, МПа $\sigma_{kp} = \frac{F_{kp}}{A}$				
3. Критичне навантаження, визначене із досліда $F_{on}$ , кН				
4. Відносна погрішність, % $\Delta = \frac{F_{kp} - F_{on}}{F_{kp}} \cdot 100$				
<p>Робота виконана _____      Робота зарахована _____</p> <p style="text-align: center;">Дата _____</p>				

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 20**

*Дослідження концентрації напружень у штабах*



Схеми пластин і розміщення тензодатчиків

**Вихідні дані**

Пластина №1	Пластина №2
$\frac{b}{r} =$ ; $\frac{d}{b} =$ ;	$\frac{b}{r} =$ ; $\frac{d}{b} =$
$\sigma_H = \frac{F}{A_0} =$	$\sigma_H = \frac{F}{A_0} =$
Модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа	Модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа
Коефіцієнт збільшення АИДа $k_1 = 1 \cdot 10^{-5}$	Коефіцієнт збільшення АИДа $k_1 = 1 \cdot 10^{-5}$
Значення коефіцієнтів концентрації	
Пластина №1	Пластина №2
$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_H}$	$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_H}$

## Продовження дод. 1

Результати випробувань пластини № 1															
№№ тенз.	T1		T2		T3		T4		T5		ΔT <sub>1cp</sub>	ΔT <sub>2cp</sub>	ΔT <sub>3cp</sub>	ΔT <sub>4cp</sub>	ΔT <sub>5cp</sub>
Навант. кН.	Показ. АИДа	ΔT1	Показ. АИДа	ΔT2	Показ. АИДа	ΔT3	Показ. АИДа	ΔT4	Показ. АИДа	ΔT5					
1															
10															
20															
30															
Результати випробувань пластини № 2															
№№ тенз.	T1		T2		T3		T4		ΔT <sub>1cp</sub>	ΔT <sub>2cp</sub>	ΔT <sub>3cp</sub>	ΔT <sub>4cp</sub>			
Навант. кН.	Показ. АИДа	ΔT1	Показ. АИДа	ΔT2	Показ. АИДа	ΔT3	Показ. АИДа	ΔT4							
1															
10															
20															
30															
Визначення напружень															
Пластина № 1							Пластина № 2								
$\sigma_I = E \cdot \Delta T_{1cp} \cdot k_1 =$							$\sigma_I = E \cdot \Delta T_{1cp} \cdot k_1 =$								
$\sigma_{II} = E \cdot \Delta T_{2cp} \cdot k_1 =$							$\sigma_{II} = E \cdot \Delta T_{2cp} \cdot k_1 =$								
$\sigma_{III} = E \cdot \Delta T_{3cp} \cdot k_1 =$							$\sigma_{III} = E \cdot \Delta T_{3cp} \cdot k_1 =$								
$\sigma_{IV} = E \cdot \Delta T_{4cp} \cdot k_1 =$							$\sigma_{IV} = E \cdot \Delta T_{4cp} \cdot k_1 =$								
$\sigma_V = E \cdot \Delta T_{5cp} \cdot k_1 =$															
Епюри нормальних напружень															
Робота виконана _____ Робота зарахована _____ Дата _____															

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 21

*Дослідження ударної в'язкості сталі та інших матеріалів*

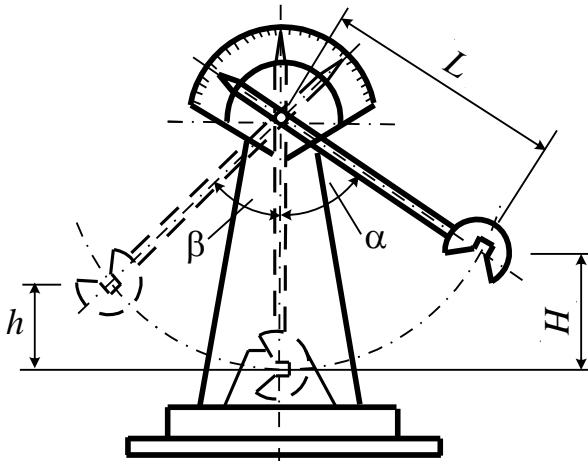
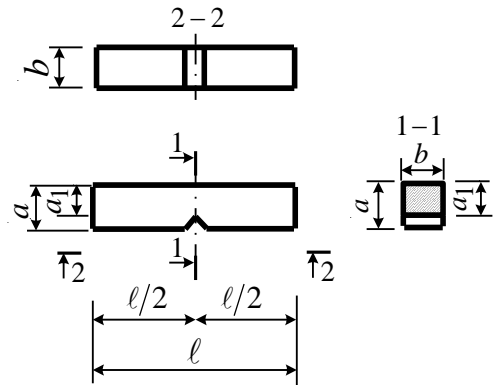


Схема маятнікового копра

**Вихідні дані**

Найменування величин	Значення
$a$ , см	
$a_1$ , см	
$b$ , см	
$l$ , см	
$l_a$ , см	
$A = a_1 \cdot b$ , см <sup>2</sup>	
Вага маятника $Q$ , кг	
Довжина маятника $L$ , см	
$\beta$ , $\cos\beta$	
$\alpha$ , $\cos\alpha$	
$h = L(1 - \cos\beta)$	
$H = L(1 - \cos\alpha)$	



Зразок для випробувань

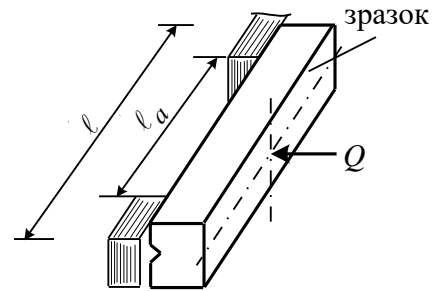


Схема прикладання ударного навантаження до зразка

**Результати випробувань**

Найменування величин	Матеріали		
	Сталь		
$K = Q(H - h)$ , Дж			
$KC = \frac{K}{A}$ , Дж/см <sup>2</sup>			

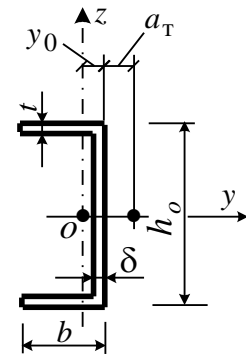
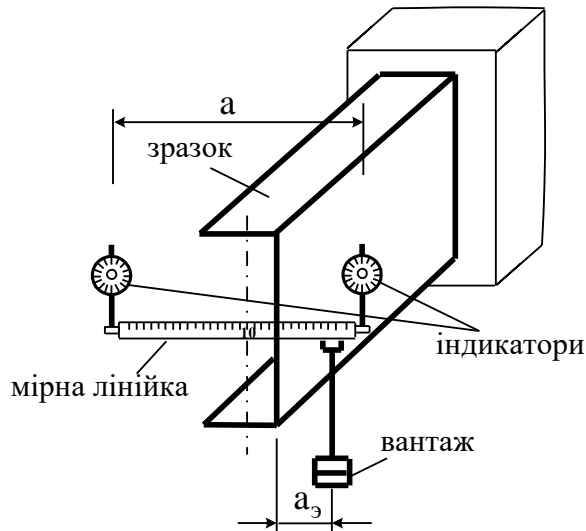
Робота зарахована \_\_\_\_\_

Робота виконана \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 22**  
*Визначення положення центра згину тонкостінного  
 стержня незамкнутого профілю*



Поперечний переріз балки

Схема випробувань і розміщення  
 вимірювальних приладів

**Вихідні дані**

№№ пп	Найменування величин	Формули і позначення	Числове значення
1	Висота перерізу балки	$h_0$	60 мм
2	Ширина полки	$b$	30 мм
3	Товщина полки	$t$	1,5 мм
4	Товщина стінки	$\delta$	1,5 мм
5	Координата центра ваги	$y_0$	8 мм
6	Теоретичне положення центра згинання	$a_T = \frac{3b^2t}{6bt + h_0\delta}$	11,2 мм
7	Відстань між індикаторами	$a$	мм
8	Ціна поділки індикатора	$n$	1/100 мм

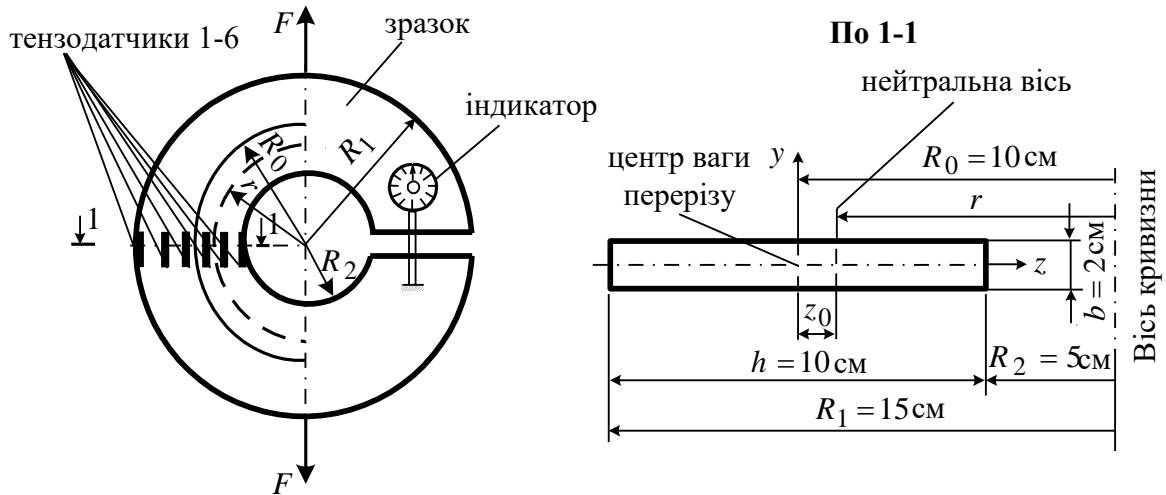
## Продовження дод. 1

Експериментальна перевірка положення центра згину						
Величина вантажу, Н	Положення вантажу	Показання індикатора				Кут закручування зразка $\frac{\Delta a_1 - \Delta a_2}{100 \cdot a}$
		$a_1$ , мм	$\Delta a_1$ , мм	$a_2$ , мм	$\Delta a_2$ , мм	
0	В центрі ваги перерізу $y_1 = 0$					
15	$y_1 = 0$					
	$y_2 =$					
	$y_3 =$					
	$y_4 =$					
	$y_5 =$					
	В центрі згину $y_{ц.и} =$					
30	$y_{ц.и} =$					
Порівняння теоретичних і дослідних даних						
№№ пп	Найменування величин	Формули і позначення		Чисельне значення		
1	Теоретичне положення центра згину	$a_T$		11,2 мм		
2	Експериментальне положення центра згину	$a_{\text{э}} = y_{ц.и} - y_0$		мм		
3	Процент похибки	$\frac{a_T - a_{\text{э}}}{a_T} \cdot 100$		%		
Робота виконана _____ Робота зарахована _____ Дата _____						

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 23

### Дослідження розподілу напружень у кривому брусі



Схематичне креслення кривого бруса

#### Вихідні дані

Найменування величин	Формули і позначення	Числове значення
1. Площа поперечного перерізу	$A = b \cdot h$	20 см
2. Радіус кривизни нейтрального шару	$r = \frac{h}{\ln \frac{R_1}{R_2}}$	9,1 см
3. Відстань від центра ваги перерізу до нейтральної осі	$z_0 = R_0 - r$	0,9 см
4. Статичний момент площі поперечного перерізу відносно нейтральної осі	$S_y = A \cdot z_0$	18 см <sup>3</sup>
5. Осьовий момент інерції перерізу	$J_y$	см <sup>4</sup>
6. Коефіцієнт збільшення АИД	$k_2$	$1 \cdot 10^{-5}$
7. Ціна поділки індикатора	$n$	0,01
8. Поздовжня сила в небезпечному перерізі	$N = \Delta F$	кН
9. Згинальний момент в небезпечному перерізі	$M = \Delta F \cdot R_0$	кНм



## Продовження дод. 1

Результати випробувань														
Навантаження, кН	Відлік по АИД												Відлік по індикатору	
	$a_1$	$\Delta a_1$	$a_2$	$\Delta a_2$	$a_3$	$\Delta a_3$	$a_4$	$\Delta a_4$	$a_5$	$\Delta a_5$	$a_6$	$\Delta a_6$	$c$	$\Delta c$
$F_1 = 10$														
$F_2 = 40$														
Результати випробувань														
Навантаження, кН	Напруження в точках $\Delta\sigma_i = \Delta a_i \cdot k_2 \cdot E$ , МПа							Переміщення, мм						
	$\Delta\sigma_1$	$\Delta\sigma_2$	$\Delta\sigma_3$	$\Delta\sigma_4$	$\Delta\sigma_5$	$\Delta\sigma_6$								
$\Delta F = 30$														
Результати теоретичного значення нормальних напружень і переміщень														
Найменування величин					Номери точок									
					1	2	3	4	5	6				
1. Радіус кривизни шару, на якому знаходиться точка, $\rho$					15	13	11	9	7	5				
2. Відстань від нейтральної осі до точки, $z$ , см					-5,9	-3,9	-1,9	0,1	2,1	4,1				
3. Нормальні напруження від поздовжньої сили $\Delta\sigma_N = \frac{N}{A}$ , МПа														
4. Нормальні напруження від згинального моменту $\Delta\sigma_M = \frac{M \cdot z}{S_y \cdot \rho}$ , МПа														
5. Сумарні нормальні напруження в точці $\Delta\sigma = \Delta\sigma_N + \Delta\sigma_M$ , МПа														
6. Переміщення $\Delta = \frac{2\Delta F \cdot R_0^3}{EJ_y} \left( \frac{\pi}{4} + 1 \right) + \frac{\Delta F R_0}{EA} \left( \frac{3}{2} \pi + 2 \right)$														
Порівняння теоретичних і експериментальних результатів														
Найменування	Напруження в точках, МПа						Переміщення мм							
	1	2	3	4	5	6								
1. Експериментальні														
2. Теоретичні														
3. Похибка, %														
Епіюра нормальних напружень в перерізі бруса														
Робота виконана _____ Робота захищена _____ Дата _____														

Кафедра \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 24

### Випробування сталі на витривалість

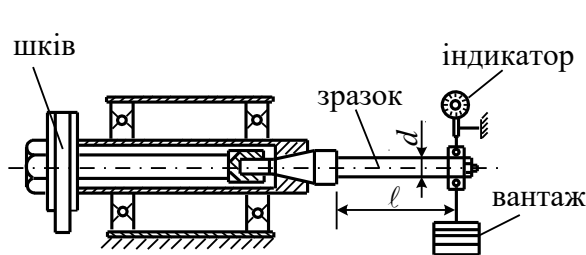
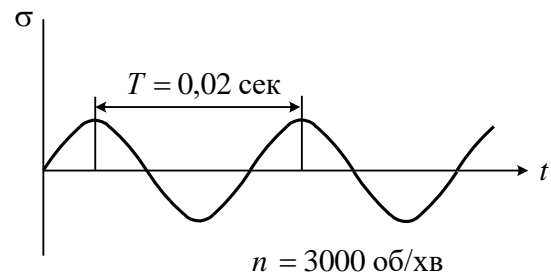


Схема випробувань



Графік зміни напружень

### Вихідні дані

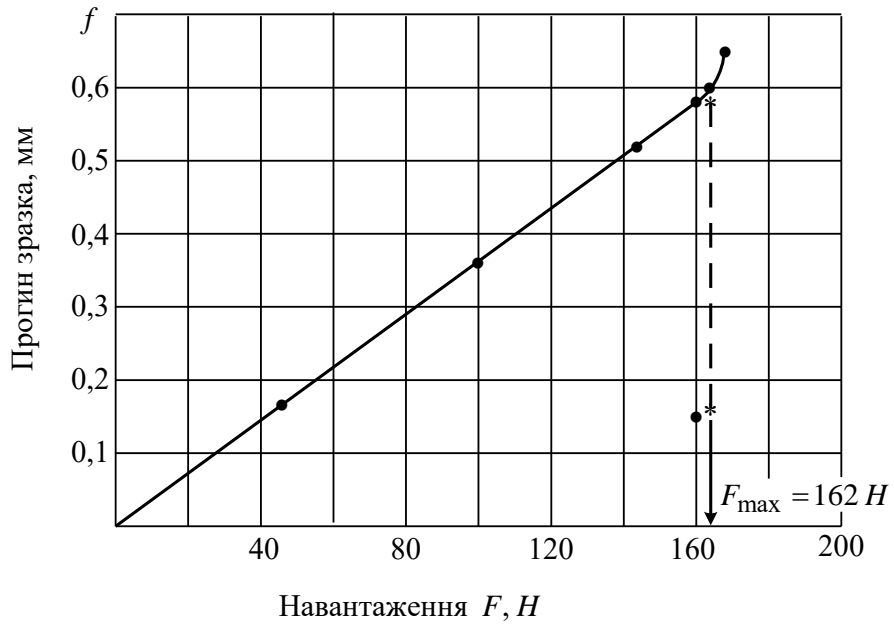
Розрахункова довжина зразка $l$ , мм	Діаметр зразка $d$ , мм	Осьовий момент опору $W_x = \frac{\pi d^3}{32}$ , см <sup>3</sup>	Навантаження $F_{\max}$ , яке відповідає межі витривалості, Н	Межа витривалості $\sigma_{-1} = \frac{F_{\max} \cdot l}{W_x}$ , МПа

### Результати спостережень

№№ ступінів навантаження	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Навантаження $F$ , Н										
Прогин зразка $f$ , мм										
Відношення $\frac{\Delta f}{\Delta F} \cdot 10^2, \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$										

# Продовження дод. 1

Графік залежності  $f \sim F$  і  $\frac{\Delta f}{\Delta F} \sim F$



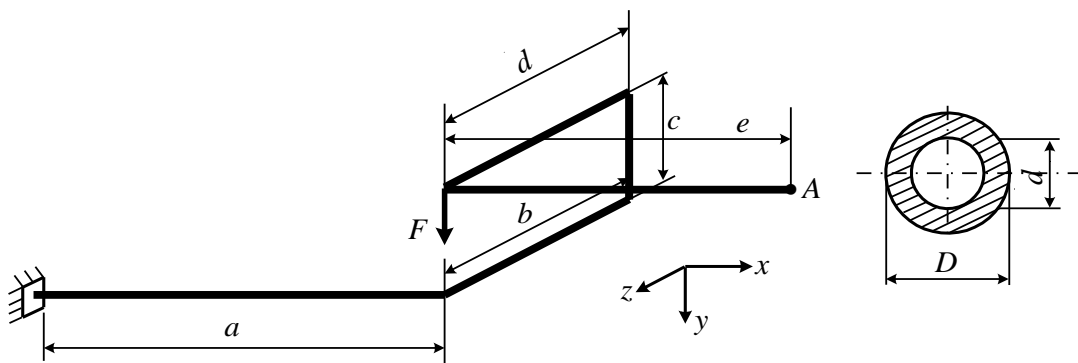
Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 25

### Визначення переміщень просторового ламаного бруса



Розрахункова схема для визначення вертикального переміщення точки А

#### Вихідні дані

$$a = 32,5 \text{ см}$$

$$b = d = 20 \text{ см}$$

$$c = 15 \text{ см}$$

$$e = 32,5 \text{ см}$$

Матеріал бруса Ст.20

Модуль пружності  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Брус має трубчатий переріз.

Зовнішній діаметр  $D = 26 \text{ мм}$

Внутрішній діаметр  $d = 20 \text{ мм}$

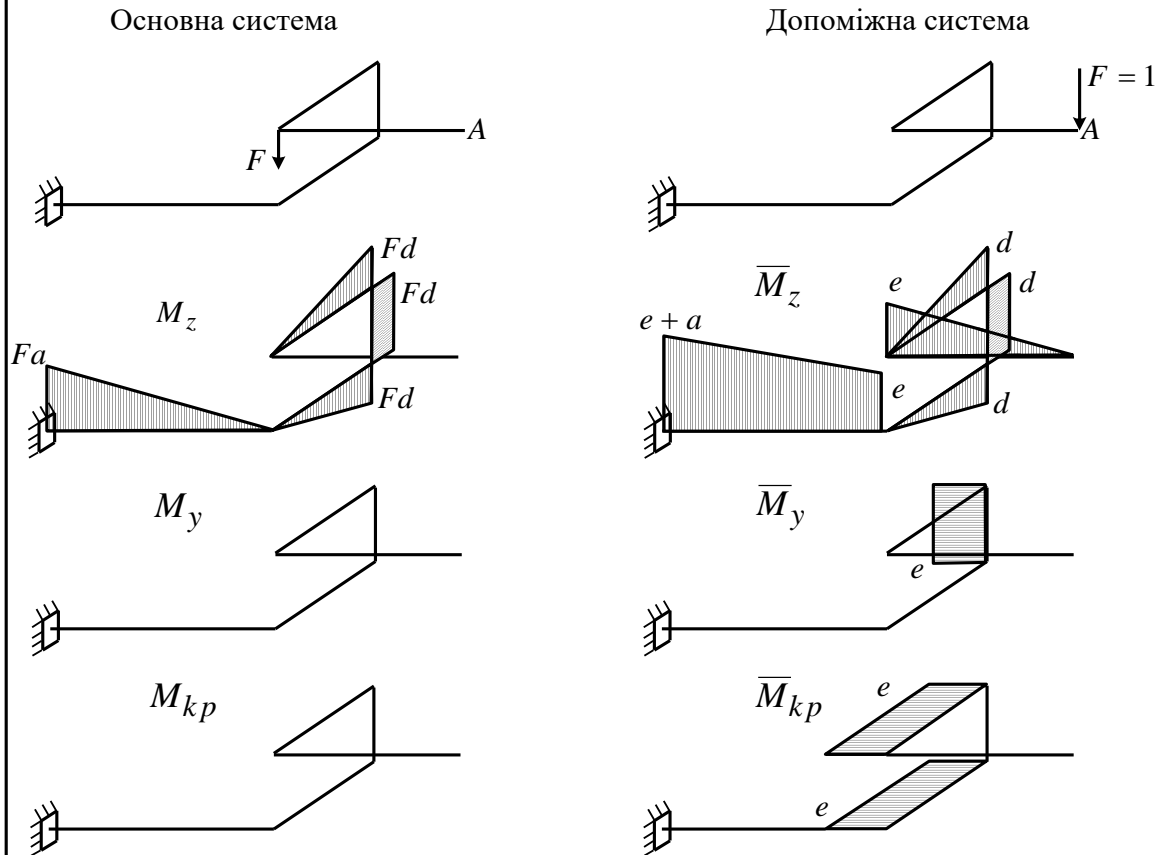
Ціна поділки індикатора годинникового типу  $c = 0,01 \text{ мм}$

Осьовий момент інерції  $J = \frac{\pi D}{64} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right] =$  см

Жорсткість при згині  $EJ =$

# Продовження дод. 1

## Епюри згинальних і крутних моментів в основній і допоміжній системах



Розрахункове значення прогину в точці А від дії сили  $\Delta F = 30 \text{ Н}$

$$y_{AF} = \frac{1}{EJ} \left[ \frac{1}{2} Fa \cdot a \left( e + \frac{2}{3} a \right) + \frac{1}{2} Fd \cdot d \frac{2}{3d} \cdot 2 + Fd \cdot c \cdot d \right] =$$

### Результати експеримента та їх обробка

Навантаження на брус		Показання індикатора		Величина прогину
$F, \text{ Н}$	$\Delta F, \text{ Н}$	$n_i$	$\Delta n_i$	$y_{Ai} = C \cdot \Delta n_i, \text{ мм}$
30				
60				
90				
120				

Середнє значення в точці  $y_{A_{cp}} = \frac{\sum y_{Ai}}{3} =$  мм

Похибка визначення переміщення  $\delta = \frac{y_A - \Delta y_{A_{cp}}}{y_A} 100\% =$

Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

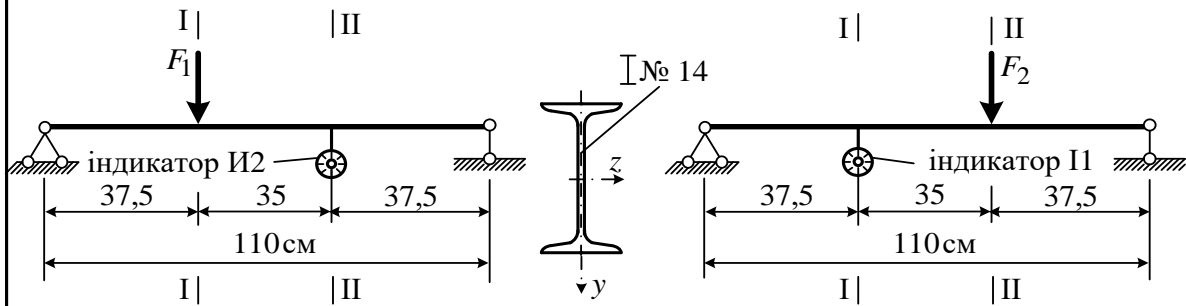
Кафедра \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 26

### Перевірка теореми про взаємність робіт і переміщень



Схеми випробувань і поперечний переріз балки

#### Вихідні дані

Характеристики перерізу	$J_z = 572 \text{ см}^4$ ; $A = 17,4 \text{ см}^2$ ; $\mu = 2,8$
Модуль пружності	$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ; $G = E / 2(1 + \nu)$ ; $\nu = 0,3$
Величини навантажень	$F_1 = 20 \text{ кН}$ ; $F_2 = 10 \text{ кН}$
Ціна поділки індикатора	1/100 мм

#### Результати випробувань

Навантаження $F_1$ , кН	Показання індикатора II1 $a$ , (мм)	Приріст показань $\Delta a$ , (мм)	Переміщення $\Delta_{21}$ , мм	Навантаження $F_2$ , кН	Показання індикатора II2 $a$ , (мм)	Приріст показань $\Delta a$ , (мм)	Переміщення $\Delta_{12}$ , мм
0				0			
20				10			

#### Порівняння дослідних і теоретичних даних

Найменування теорем	Теорія	Дослід	Похибка, %
$F_1 \Delta_{12} = F_2 \Delta_{21}$			
$\delta_{12} = \delta_{21}$			

Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 27**  
**Випробування сталеві ферми**

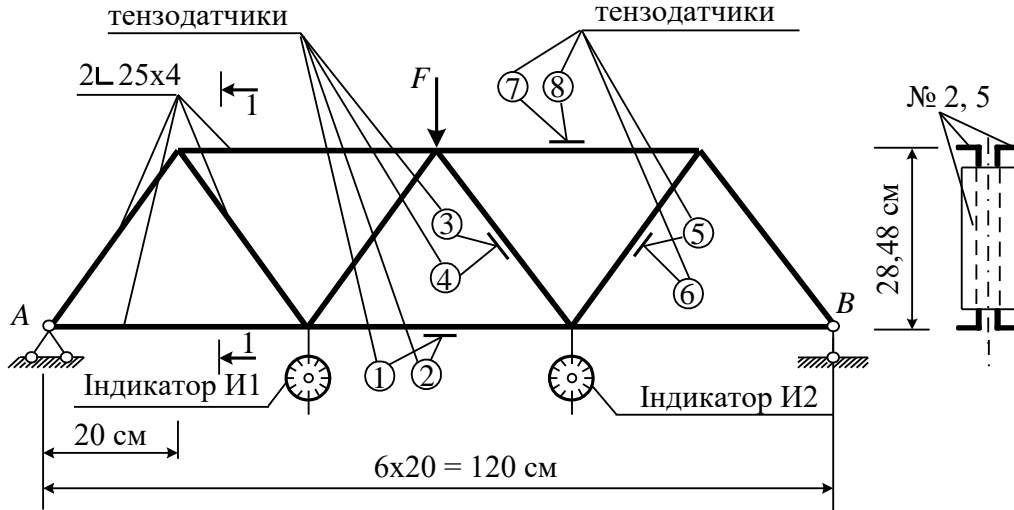


Схема випробувань і розміщення вимірювальних приладів

**Вихідні дані**

Характеристики переізів:  $z_0$ ,  $x$ ,  $A = 3,72 \text{ см}^2$ ;  $J_x = 2,06 \text{ см}^4$ ;  $z_0 = 0,76 \text{ см}$   
 Модуль пружності матеріала ферми  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .  
 Довжини розкосів  $\ell_p = 34,80 \text{ см}$ .  
 Кут нахилу розкосів  $\alpha = 54,9^\circ$ ;  $\cos \alpha = 0,575$ ;  $\sin \alpha = 0,818$ .  
 Коефіцієнт збільшення АИДа  $k_1 = 1 \cdot 10^5$ .  
 Ціна поділки індикаторів  $1/100 \text{ мм}$ .  
 Величина навантаження  $F = 50 \text{ кН}$ .

**Порівняння дослідних і теоретичних даних**

$\sigma_{1,2}, \text{ МПа}$			$\sigma_{3,4}, \text{ МПа}$			$\sigma_{5,6}, \text{ МПа}$			$\sigma_{7,8}, \text{ МПа}$			$f, \text{ см}$		
Теорія	Дослід	Похибка, %	Теорія	Дослід	Похибка, %	Теорія	Дослід	Похибка, %	Теорія	Дослід	Похибка, %	Теорія	Дослід	Похибка, %
			$\frac{F}{2A \sin \alpha} = \frac{F \sqrt{d^2 + 4h^2}}{4hA}$			$\frac{F}{2A \sin \alpha} = \frac{F \sqrt{d^2 + 4h^2}}{4hA}$			$dF / -2hA =$			$\frac{F}{2h^2 EA} \left[ \frac{1}{4} (d^2 + 4h^2)^{3/2} + 2d^3 \right]$		

## Продовження дод. 1

Результати випробувань							
Навантаження F, кН	Т1		Т2		$\Delta a_{\text{ср}} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2}{2}$	$\varepsilon_{1,2} = \Delta a_{\text{ср}} k_1$	$\sigma_{1,2} = \varepsilon_{1,2} \cdot E$
	Показання АИДа $a_1$	Приріст $\Delta a_1$	Показання АИДа $a_2$	Приріст $\Delta a_2$			
0							
50							
Результати випробувань							
Навантаження F, кН	Т3		Т4		$\Delta a_{\text{ср}} = \frac{\Delta a_3 + \Delta a_4}{2}$	$\varepsilon_{3,4} = \Delta a_{\text{ср}} k_1$	$\sigma_{3,4} = \varepsilon_{1,2} \cdot E$
	Показання АИДа $a_3$	Приріст $\Delta a_3$	Показання АИДа $a_4$	Приріст $\Delta a_4$			
0							
50							
Результати випробувань							
Навантаження F, кН	Т5		Т6		$\Delta a_{\text{ср}} = \frac{\Delta a_5 + \Delta a_6}{2}$	$\varepsilon_{5,6} = \Delta a_{\text{ср}} k_1$	$\sigma_{5,6} = \varepsilon_{5,6} \cdot E$
	Показання АИДа $a_5$	Приріст $\Delta a_5$	Показання АИДа $a_6$	Приріст $\Delta a_6$			
0							
50							
Результати випробувань							
Навантаження F, кН	Т7		Т8		$\Delta a_{\text{ср}} = \frac{\Delta a_7 + \Delta a_8}{2}$	$\varepsilon_{7,8} = \Delta a_{\text{ср}} k_1$	$\sigma_{7,8} = \varepsilon_{7,8} \cdot E$
	Показання АИДа $a_7$	Приріст $\Delta a_7$	Показання АИДа $a_8$	Приріст $\Delta a_8$			
0							
50							
Результати випробувань							
Навантаження F, кН	И1		И2		$\Delta a_{\text{ср}} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2}{2}$	Прогин ферми $f$ , см	
	Показання індикатора $a_1$	Приріст $\Delta a_1$	Показання індикатора $a_2$	Приріст $\Delta a_2$			
0							
50							
Робота виконана _____ Робота зарахована _____ Дата _____							



Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 28

### Випробування двошарнірної арки

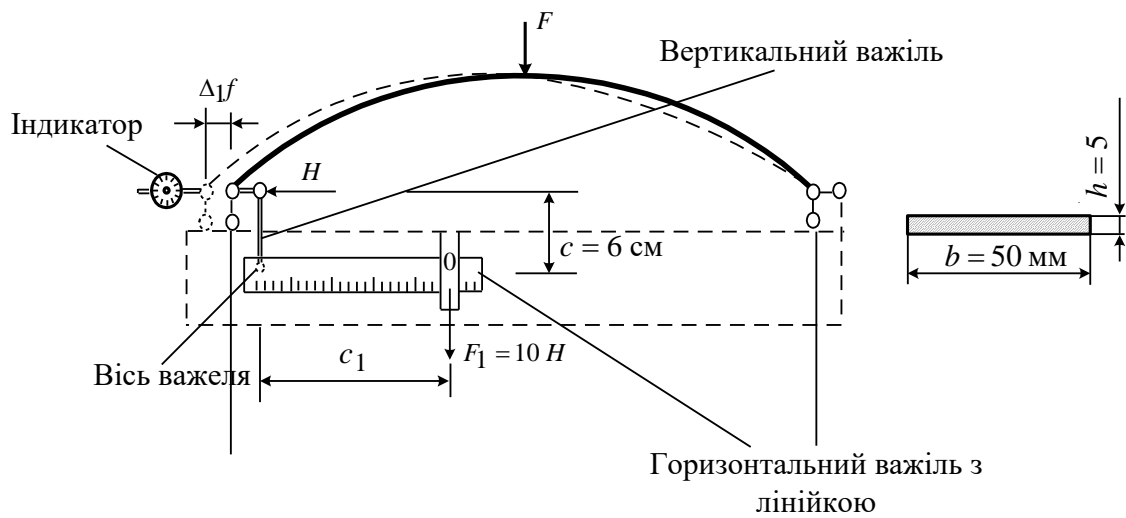


Схема випробування арки

#### Вихідні дані

$$x = R(\sin \alpha - \sin \varphi)$$

$$y = R(\cos \varphi - \cos \alpha)$$

$$R = 550 \text{ мм}; \quad \alpha = 0,75 \text{ рад}; \quad \cos \alpha = \quad ; \quad \sin \alpha =$$

## Продовження дод. 1

<b>Результати випробувань</b>					
Номери ступенів навантаження	Навантаження, Н	Показання індикатора		Положення протизваги С <sub>1</sub>	Примітка
		Відлік	Приріст		
0	0				
1	10				
2	20				
3	30				
4	40				

**Результати випробувань**

$c_1 =$	$H = F \frac{c_1}{c} =$
---------	-------------------------

**Зіставлення дослідних і теоретичних даних**

$X_1 = F \frac{0,5 \sin^2 \alpha - \sin \alpha \cos \alpha - \cos \alpha (\cos \alpha - 1)}{\alpha - 3 \sin \cos \alpha + 2 \alpha \cos^2 \alpha} \quad (H)$	$H = F \frac{C_1}{C} \quad (H)$	Похибка $\frac{X_1 - H}{H} \cdot 100\%$
--	---------------------------------	--

Робота виконана \_\_\_\_\_ Робота зарахована \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 29**

*Дослідження дії вібраційного навантаження на шарнірно оперту балку*

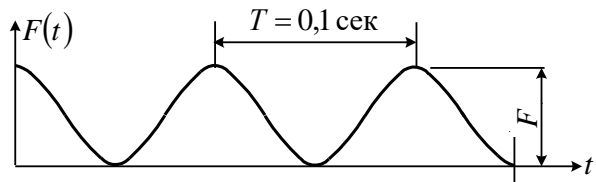
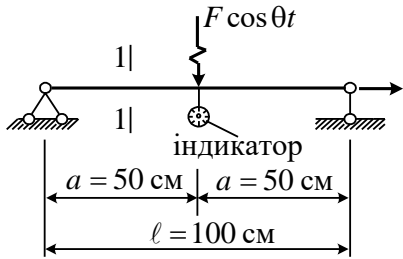
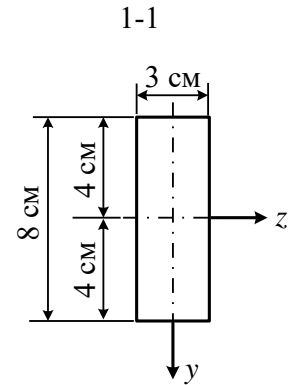
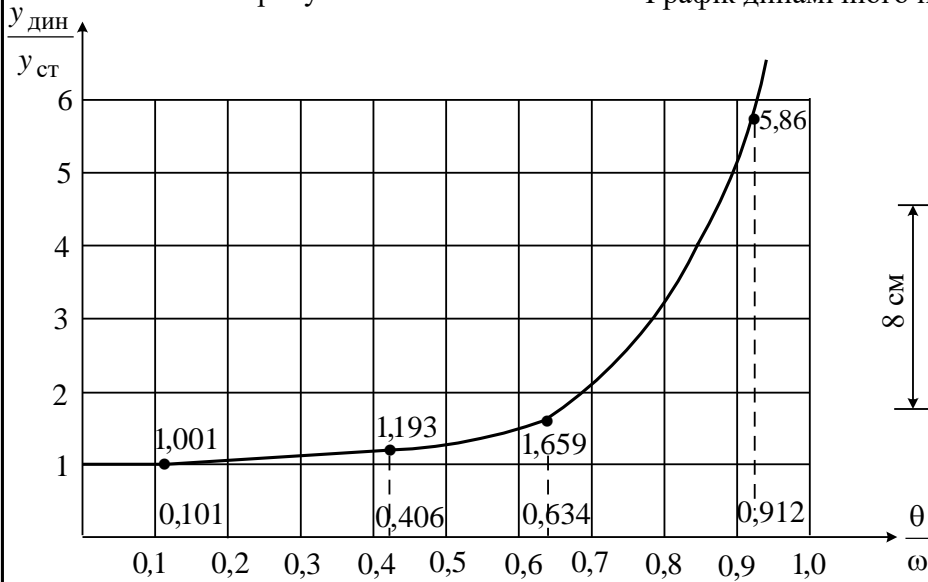


Схема випробування

Графік динамічного навантаження



Графік залежності

**Вихідні дані**

Геометричні характеристики: $J_z =$ _____ ; $W_z =$ _____
Модуль пружності сталі $E = 2 \cdot 10^5$ МПа
Статичне навантаження $F = 20$ кН
Статичний прогин $y_{ст} = \frac{F l^3}{48 E J} =$ _____
Маса одиниці довжини балки $m =$ _____
Частота вільних коливань $\omega = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} =$ _____

Кафедра \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_  
 Студент \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 30**

**Дослідження напружено-деформованого стану сталобетонних колон**

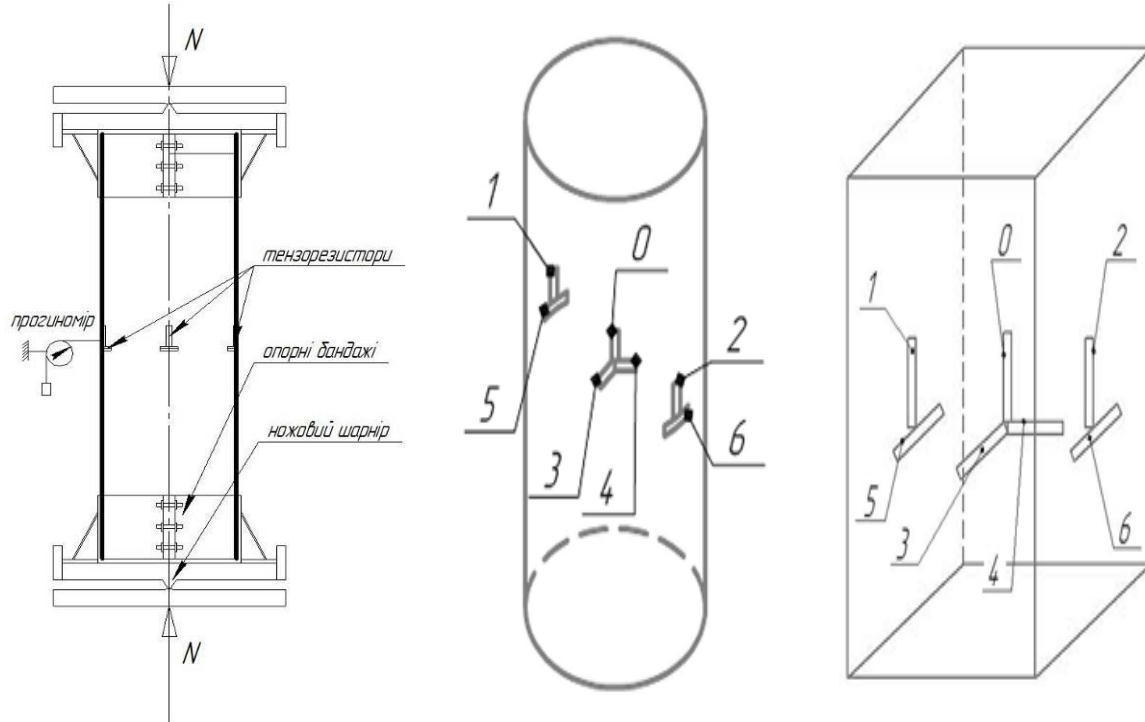


Схема розташування тензорезисторів  
 Коефіцієнт ВНП-8  $1 \cdot 10^{-6}$

**Вихідні данні**

Фізико-механічні характеристики	Сталобетонні колони круглого поперечного перерізу	Сталобетонні колони квадратного поперечного перерізу
$d, \text{ см}$		
$b, \text{ см}$		
$t, \text{ см}$		
$L, \text{ см}$		
$A_s, \text{ см}^2$		
$\sigma_y, \text{ МПа}$		
$E_s, \text{ МПа}$		
$A_c, \text{ см}^2$		
$f_{ck,prism}, \text{ МПа}$		
$E_c, \text{ МПа}$		
$L/b$		

**Продовження дод. 1**

<b>Результати випробувань сталобетонних колон круглого поперечного перерізу</b>													
<b>Показання поздовжніх тензодатчиків</b>													
F, кН	Показання ВПП-8			Приріст показань			Сумарний приріст показань						
	0	1	2	0	1	2	0	1	2				
0													
5													
5													
10													
10													
15													
15													
20													
20													
25													
25													
30													
30													
<b>Показання поперечних тензодатчиків</b>													
F, кН	Показання ВПП-8				Приріст показань				Сумарний приріст показань				
	3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6	
0													
5													
5													
10													
10													
15													
15													
20													
20													
25													
25													
30													
30													

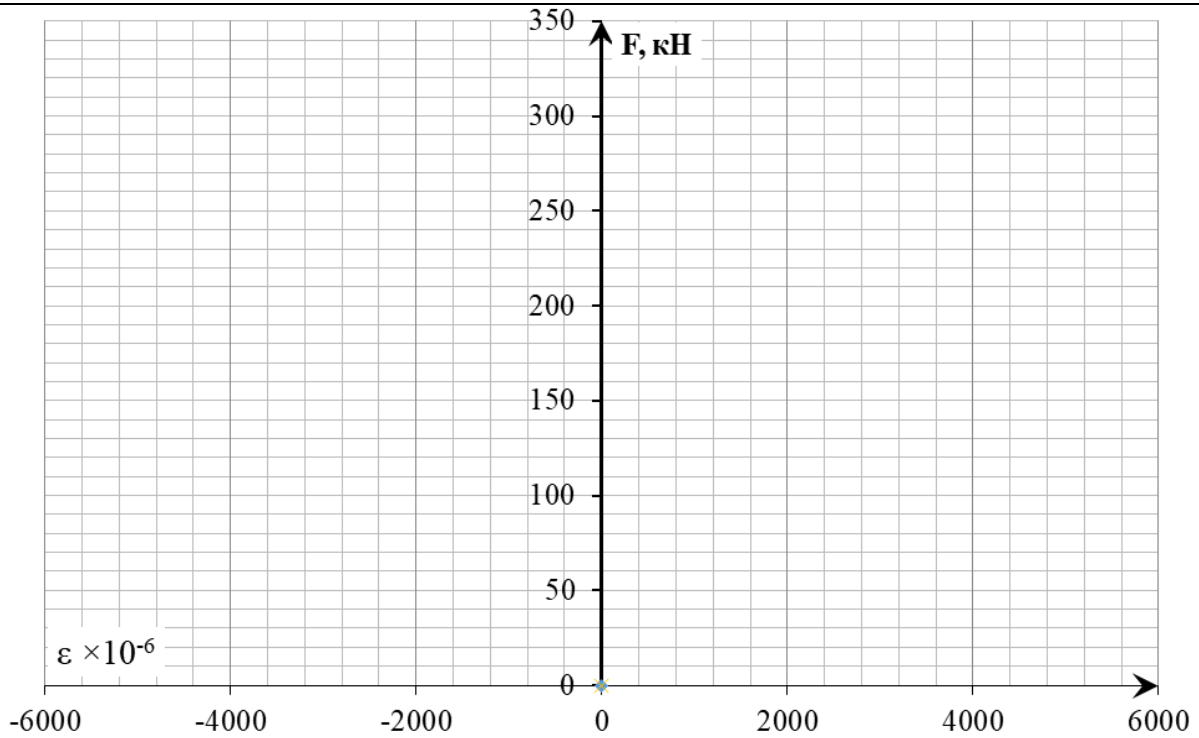
**Продовження дод. 1**

<b>Результати випробувань сталобетонних колон квадратного поперечного перерізу</b>													
<b>Показання поздовжніх тензодатчиків</b>													
F, кН	Показання ВПП-8			Приріст показань			Сумарний приріст показань						
	0	1	2	0	1	2	0	1	2				
0													
5													
5													
10													
10													
15													
15													
20													
20													
25													
25													
30													
30													
<b>Показання поперечних тензодатчиків</b>													
F, кН	Показання ВПП-8				Приріст показань				Сумарний приріст показань				
	3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6	
0													
5													
5													
10													
10													
15													
15													
20													
20													
25													
25													
30													
30													

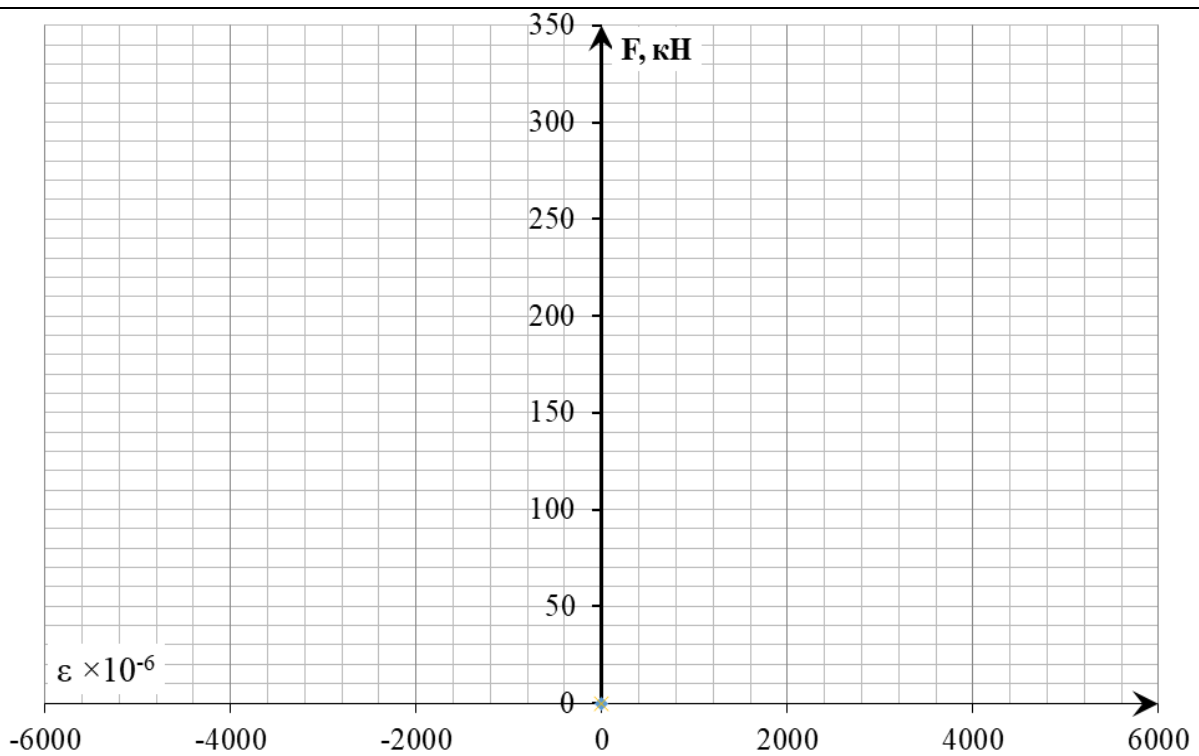
## Продовження дод. 1

Графіки залежності відносних поздовжніх та поперечних деформацій від навантаження

Сталобетонні колони круглого поперечного пеперізу



Сталобетонні колони квадратного поперечного пеперізу



## МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕЯКИХ МАТЕРІАЛІВ

Матеріал	Марка	Межа міцності МПа, при		Твердість за Бринелем НВ	Ударна в'язкість КС, кДж/м <sup>2</sup>	Примітка
		стисканні	розтяганні			
Сталь вуглецева звичайної якості гарячекатана	Ст. 2		340–420	140		$\sigma = 0,35 \text{ НВ}$ кг/мм <sup>2</sup> для катаних сталей
	Ст. 3		380–470			
	Ст. 4		420–520			
	Ст. 5		500–620			
Сталь вуглецева якісна конструкційна	30		480	179	300–400	Нормалізована гарячекатана
	35		520	187	250–300	
	40		570	217	260–300	
	45		600	241	200–300	
	50		630	241	250–300	
Сталь хромиста	40Х		1000	217	600	Загартування при 850 °С, відпуск при 500 °С
	50Х		1100	229	400	
Сталь хромо-нікелева	40ХН		1000	207	700	Загартування при 820 °С, відпуск при 500 °С
	50ХН		1100	207	500	
Модифікований чавун	СЧ21	750	210	171–241	90	$\sigma = (\text{НВ} - 40) / 6$ чавун – сірий
	СЧ24	850	240	190–220	90	
	СЧ28	1000	280	170–240	100	
Ковкий чавун	КЧ30-3		200	160	80	
	КЧ33-8		210	160	130	
	КЧ35-10		220	150	140	
Латунь, мідь, бронза			200–600	31,8–130		$\sigma = 0,5 \text{ НВ}$ після випалу $\sigma = 0,41 \text{ НВ}$ після наклепу
Алюміній			180–500	8–35		$\sigma = 0,37 \text{ НВ}$ після наклепу $\sigma = 0,4 \text{ НВ}$ після випалу
Дюралюміній холоднокатаний			180–500	8–35		$\sigma_B =$ $= (0,36 - 0,37) \text{ НВ}$



## ВИЗНАЧЕННЯ ЧИСЕЛ ТВЕРДОСТІ

Таблиця Д.3.1

Визначення числа твердості за Бринелем. Діаметр кульки 10 мм;  
величина навантаження 3000 кг

Діаметр лунки, мм	Число твердості, кг/мм <sup>2</sup>	Діаметр лунки, мм	Число твердості, кг/мм <sup>2</sup>	Діаметр лунки, мм	Число твердості, кг/мм <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6
2,00	945	3,52	298	4,42	185
2,10	857	3,54	295	4,44	183
2,20	780	3,56	291	4,46	181
2,30	713	3,58	288	4,48	180
2,40	653	3,60	284	4,50	179
2,44	632	3,62	281	4,52	177
2,48	611	3,64	278	4,54	175
2,52	592	3,66	275	4,56	174
2,56	573	3,68	272	4,58	172
2,60	553	3,70	268	4,60	170
2,64	538	3,72	266	4,62	169
2,68	522	3,74	263	4,64	167
2,72	507	3,76	260	4,66	166
2,76	492	3,78	258	4,68	164
2,80	478	3,80	255	4,70	163
2,84	464	3,82	253	4,72	161
2,88	451	3,84	250	4,74	160
2,92	438	3,86	247	4,76	159
2,96	426	3,88	244	4,78	157
3,00	414	3,90	242	4,80	156
3,02	409	3,92	240	4,82	154
3,04	404	3,94	237	4,84	153
3,06	398	3,96	234	4,86	152
3,08	393	3,98	232	4,90	149
3,10	388	4,00	229	5,00	143
3,12	383	4,02	226	5,10	137
3,14	378	4,04	224	5,20	131
3,16	373	4,06	221	5,30	126

Продовження табл. Д.3.1

1	2	3	4	5	6
3,18	368	4,08	219	5,40	121
3,20	363	4,10	217	5,50	116
3,22	358	4,12	215	5,60	112
3,24	354	4,14	213	5,70	107
3,26	350	4,16	211	5,80	103
3,28	345	4,18	209	5,90	99
3,30	341	4,20	207	6,00	95
3,32	337	4,22	204	6,10	92
3,34	333	4,24	202	6,20	89
3,36	329	4,26	200	6,30	86
3,38	325	4,28	198	6,40	82
3,40	321	4,30	197	6,50	80
3,42	317	4,32	195	6,60	77
3,44	313	4,34	193	6,70	74
3,46	310	4,36	191	6,80	71
3,48	306	4,38	189	6,90	69
3,50	302	4,40	187	7,00	67

Таблиця Д.3.2

Порівняння чисел твердості за Бринелем, Роквеллом та Шором

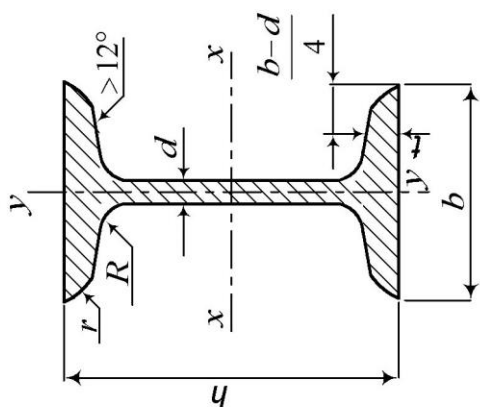
Число твердості за Бринелем	Число твердості за Роквеллом		Число твердості за Шором	Число твердості за Бринелем	Число твердості за Роквеллом		Число твердості за Шором
	шкала С	шкала В			шкала С	шкала В	
1	2	3	4	5	6	7	8
634	62	—	90	184	—	90	26
620	61	—	88	180	—	89	25
606	60	—	86	177	—	88	25
592	59	—	84	173	—	87	25
578	58	—	83	169	—	86	24
564	57	—	81	165	—	85	23
551	56	—	79	162	—	84	23
538	55	—	77	159	—	83	22
526	54	—	75	156	—	82	22
514	53	—	73	153	—	81	22

## Продовження табл. Д.3.2

1	2	3	4	5	6	7	8
502	52	–	71	150	–	80	21
490	51	–	70	147	–	79	21
478	50	–	68	144	–	78	20
467	49	–	67	141	–	77	20
455	48	–	65	138	–	76	19
445	47	–	63	135	–	74	19
435	46	–	62	133	–	73	19
425	45	–	60	131	–	72	18
415	44	–	59	129	–	72	18
404	43	–	57	127	–	71	18
384	42	–	55	125	–	70	18
374	41	–	54	123	–	69	17
364	40	–	52	121	–	68	17
354	39	–	50	119	–	67	17
344	38	–	49	117	–	66	16
334	37	–	48	115	–	65	16
325	36	–	46	113	–	64	16
317	35	–	45	111	–	63	16
308	34	–	44	110	–	62	15
299	33	–	43	108	–	61	15
291	32	–	42	106	–	59	15
283	31	–	40	105	–	58	15
275	30	–	39	103	–	57	14
268	29	–	38	102	–	56	14
261	28	–	37	100	–	55	14
255	27	–	36	98	–	54	14
249	26	–	35	97	–	53	14
243	25	–	35	96	–	52	13
237	24	100	34	94	–	51	13
231	23	99	33	92	–	49	13
225	22	98	32	90	–	48	13
219	21	97	31	88	–	47	12
214	20	96	30	86	–	45	12
209	19	95	30	84	–	43	12
204	–	94	29	82	–	42	11
198	–	93	28	80	–	40	11
193	–	92	27	78	–	38	11
189	–	91	27	76	–	36	11

**СОРТАМЕНТ ПРОКАТНОЇ СТАЛІ**

**Сортамент гарячекатаних двотаврів за ДСТУ 8768:2018  
(з ухилом внутрішніх граней полиць 6–12 %)**



Позначення

$h$  – висота балки;  
 $b$  – ширина полиці;  
 $d$  – товщина стінки;  
 $t$  – середня товщина полиці;

$J$  – момент інерції;  
 $W$  – момент опору;  
 $i$  – радіус інерції;  
 $S$  – статичний момент півперерізу.

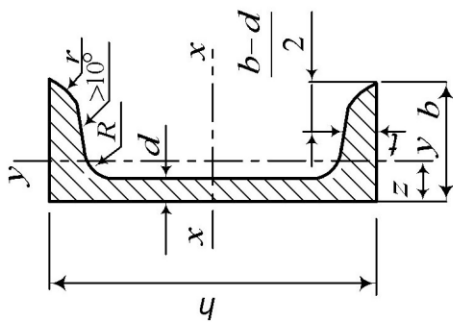
Таблиця Д.4.1

Номер профілю	Розміри, мм				Площа перерізу, $\text{см}^2$	$x-x$				$y-y$		Маса $I$ М, кг	
	$h$	$b$	$d$	$t$		$J_{x_1}$ $\text{см}^4$	$W_{x_1}$ $\text{см}^3$	$i_{x_1}$ $\text{см}$	$S_{x_1}$ $\text{см}^3$	$J_{y_1}$ $\text{см}^4$	$W_{y_1}$ $\text{см}^3$		$i_{y_1}$ $\text{см}$
10	100	55	4,5	7,2	12,0	198	39,7	4,06	23,0	17,9	6,49	1,22	9,46
12	120	64	4,8	7,3	14,7	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38	11,5
14	140	73	4,9	7,5	17,4	572	81,7	5,73	46,8	41,9	11,5	1,55	13,7
16	160	81	5,0	7,8	20,2	873	109	6,57	62,3	58,6	14,5	1,70	15,9
18	180	90	5,1	8,1	23,4	1290	143	7,42	81,4	82,6	18,4	1,88	18,4

Продовження табл. Д.4.1

Номер профілю	Розміри, мм				Площа перерізу, $\text{см}^2$	$X-x$				$y-y$			Маса $I$ , кг
	$h$	$b$	$d$	$t$		$J_x, \text{см}^4$	$W_x, \text{см}^3$	$i_x, \text{см}$	$S_x, \text{см}^3$	$J_y, \text{см}^4$	$W_y, \text{см}^3$	$i_y, \text{см}$	
20	200	100	5,2	8,4	26,8	1840	184	8,28	104	115	23,1	2,07	21,0
22	220	110	5,4	8,7	30,6	2550	232	9,13	131	157	28,6	2,27	24,0
24	240	115	5,6	9,5	34,8	3460	289	9,97	163	198	34,5	2,37	27,3
27	270	125	6,0	9,8	40,2	5010	371	11,2	210	260	41,5	2,54	31,5
30	300	135	6,5	10,2	46,5	7080	472	12,3	268	337	49,9	2,69	36,5
33	330	140	7,0	11,2	53,8	9840	597	13,5	339	419	59,9	2,79	42,2
36	360	145	7,5	12,3	61,9	13380	743	14,7	423	516	71,1	2,89	48,6
40	400	155	8,3	13,0	72,6	19062	953	16,2	545	667	86,1	3,03	57,0
45	450	160	9	14,2	84,7	27696	1231	18,1	708	808	101	3,09	66,5
50	500	170	10	15,2	100	39727	1589	19,9	919	1043	123	3,23	78,5
55	550	180	11	16,5	118	55962	2035	21,8	1181	1356	151	3,39	92,6
60	600	190	12	17,8	138	76806	2560	23,6	1491	1725	182	3,54	108

Сортамент гарячекатаних швелерів за ДСТУ 3436-96



Позначення

$h$  – висота швелера;  
 $b$  – ширина полиці;  
 $d$  – товщина стінки;  
 $t$  – середня товщина полиці;  
 $S$  – статичний момент півперерізу.

$J$  – момент інерції;  
 $W$  – момент опору;  
 $i$  – радіус інерції;

$z_0$  – відстань від осі  $y$  до зовнішньої грані стінки;

Таблиця Д.4.2

Номер профілю	Розміри, мм			Площа перерізу, $cm^2$	$x - x$				$y - y$			Маса $l$ м, кг
	$h$	$b$	$d$		$J_x, cm^4$	$W_x, cm^3$	$i_x, cm$	$S_x, cm^3$	$J_y, cm^4$	$W_y, cm^3$	$i_y, cm$	
5	5	32	4,4	22,8	9,1	1,92	5,59	5,61	2,75	0,954	1,16	4,84
6,5	65	36	4,4	48,6	15,0	2,54	9,0	8,7	3,68	1,08	1,24	5,90
8	80	40	4,5	89,4	22,4	3,16	13,3	12,8	4,75	1,19	1,31	7,05
10	100	46	4,5	174	34,8	3,99	20,4	20,4	6,46	1,37	1,44	8,59
12	120	52	4,8	304	50,6	4,78	29,6	31,2	8,52	1,53	1,54	10,4
14	140	58	4,9	491	70,2	5,60	40,8	45,4	11,0	1,70	1,67	12,3

Продовження табл. Д.4.2

Номер профілю	Розміри, мм				Площа перерізу, $\text{см}^2$	x-x				y-y			Маса 1 м, кг	
	h	b	d	t		$J_x$ , $\text{см}^4$	$W_x$ , $\text{см}^3$	$i_x$ , см	$S_x$ , $\text{см}^3$	$J_y$ , $\text{см}^4$	$W_y$ , $\text{см}^3$	$i_y$ , см		$z_0$ , см
16	160	64	5,0	8,4	18,1	747	93,4	6,42	54,1	63,3	13,8	1,87	1,80	14,2
16a	160	68	5,0	9,0	19,5	823	103	6,49	59,4	78,8	16,4	2,01	2,00	15,3
18	180	70	5,1	8,7	20,7	1090	121	7,24	69,8	86	17,0	2,04	1,94	16,3
18a	180	74	5,1	9,3	22,2	1190	132	7,32	76,1	105	20,0	2,18	2,13	17,4
20	200	76	5,2	9,0	23,4	1520	152	8,07	87,8	113	20,5	2,20	2,07	18,4
22	220	82	5,4	9,5	26,7	2110	192	8,89	110	151	25,1	2,37	2,21	21,0
24	240	90	5,6	10,0	30,6	2900	242	9,73	139	208	31,6	2,60	2,42	24,0
27	270	95	6,0	10,5	35,2	4160	308	10,9	178	262	37,3	2,73	2,47	27,7
30	300	100	6,5	11,0	40,5	5810	387	12,0	224	327	43,6	2,84	2,52	31,8
33	330	105	7,0	11,7	46,5	7980	484	13,1	281	410	51,8	2,97	2,59	36,5
36	360	110	7,5	12,6	53,4	10820	601	14,2	350	513	61,7	3,10	2,68	41,9
40	400	115	8,0	13,5	61,5	15220	761	15,7	444	642	73,4	3,23	2,75	48,3

Сортамент гарячекатаних нерівнополичних кутників за ДСТУ 8769:2018\*

Позначення

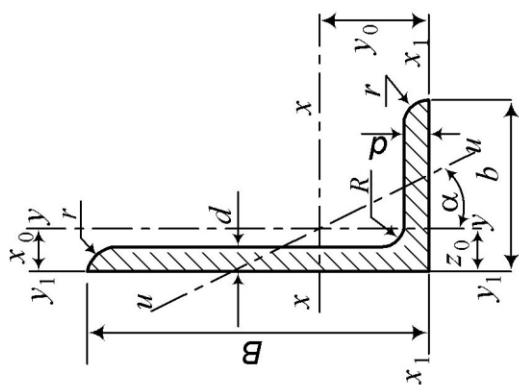
$B$  – ширина більшої полиці;

$b$  – ширина меншої полиці;

$d$  – товщина стінки;

$J$  – момент інерції;  $i$  – радіус інерції;

$x_0, y_0$  – відстань від центра ваги до зовнішніх граней полиць.



Таблиця Д.4.3

Номер профілю	Розміри, мм		Площа, $\text{см}^2$	$J_{x_3}$ , $\text{см}^4$	$i_{x_3}$ , $\text{см}$	$J_{y_3}$ , $\text{см}^4$	$i_{y_3}$ , $\text{см}$	$J_{u \text{ min}}$ , $\text{см}^4$	$i_{u \text{ min}}$ , $\text{см}^4$	Кут нахилу осі $u$ $\text{tg } \alpha$	$J_{xy}$ , $\text{см}^4$	$x_0$ , $\text{см}$	$y_0$ , $\text{см}$	Маса $1 \text{ м}$ , $\text{кг}$
	$B$	$b$												
2,5/1,6	25	16	1,16	0,7	0,78	0,22	0,44	0,13	0,3	0,392	0,22	0,42	0,86	0,91
3,2/2	32	20	1,49	1,52	1,01	0,46	0,55	0,28	0,43	0,382	0,47	0,49	1,08	1,17
			1,94	1,93	1,00	0,57	0,54	0,35	0,43	0,374	0,59	0,53	1,12	1,52
4/2,5	40	25	1,89	3,06	1,27	0,93	0,7	0,56	0,54	0,385	0,96	0,59	1,32	1,48
			2,47	3,93	1,26	1,18	0,69	0,71	0,54	0,381	1,22	0,63	1,37	1,94
			3,03	4,73	1,25	1,41	0,68	0,86	0,53	0,374	1,44	0,66	1,41	2,37
4,5/2,8	45	28	2,14	4,41	1,48	1,32	0,79	0,79	0,61	0,382	1,38	0,64	1,47	1,68
			2,8	5,68	1,42	1,69	0,78	1,02	0,6	0,379	1,77	0,68	1,51	2,2
5/3,2	50	32	2,42	6,18	1,6	1,99	0,91	1,18	0,7	0,403	2,01	0,72	1,6	1,9



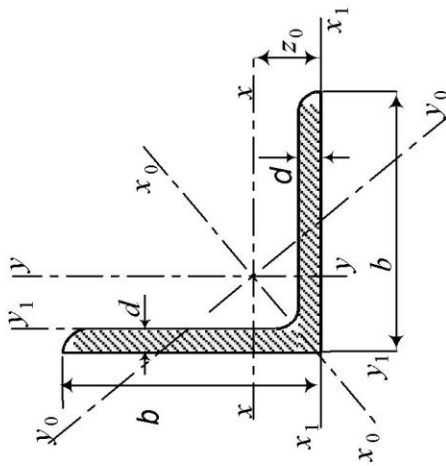
Продовження табл. Д.4.3

Номер профілю	Розміри, мм			Площа перерізу, $\text{см}^2$	$J_x$ , $\text{см}^4$	$i_x$ , см	$J_y$ , $\text{см}^4$	$i_y$ , см	$J_{u \min}$ , $\text{см}^4$	$i_{u \min}$ , $\text{см}^4$	Кут нахилу осі $u$ $\text{tg } \alpha$	$J_{xy}$ , $\text{см}^4$	$x_0$ , см	$y_0$ , см	Маса $1 \text{ м}$ , кг
	$B$	$b$	$d$												
5,6/3,6	56	36	4	3,58	11,4	1,78	3,7	1,02	2,19	0,78	0,406	3,74	0,84	1,82	2,81
			5	4,41	13,8	1,77	4,48	1,01	2,66	0,78	0,404	4,5	0,88	1,86	3,46
6,3/4	63	40	4	4,04	16,3	2,01	5,16	1,13	3,07	0,87	0,397	5,25	0,91	2,03	3,17
			5	4,98	19,9	2,00	6,26	1,12	3,72	0,86	0,396	6,41	0,95	2,08	3,91
			6	5,90	23,3	1,99	7,28	1,11	4,36	0,86	0,393	7,44	0,99	2,12	4,63
			8	7,68	29,6	1,96	9,15	1,09	5,58	0,85	0,386	9,27	1,07	2,20	6,03
7/4,5	70	45	5	5,59	27,8	2,23	9,05	1,27	5,34	0,98	0,406	9,12	1,05	2,28	4,39
7,5/5	75	50	6	7,25	40,9	2,38	14,6	1,42	8,48	1,08	0,435	14,1	1,21	2,44	5,69
			8	9,47	52,4	2,35	18,5	1,40	10,9	1,07	0,430	17,8	1,29	2,52	7,43
8/5	80	50	5	6,36	41,6	2,56	12,7	1,41	7,58	1,09	0,387	13,2	1,13	2,60	4,99
			6	7,55	49,0	2,55	14,8	1,40	8,88	1,08	0,386	15,5	1,17	2,65	5,92
9/5,6	90	56	5,5	7,86	65,3	2,88	19,7	1,58	11,8	1,22	0,384	20,54	1,26	2,92	6,17
			6	8,54	70,6	2,88	21,2	1,58	12,7	1,22	0,384	22,23	1,28	2,95	6,70
			8	11,18	90,9	2,85	27,1	1,56	16,3	1,21	0,380	28,33	1,36	3,04	8,77
10/6,3	100	63	6	9,59	98,3	3,20	30,6	1,79	18,2	1,38	0,393	31,5	1,42	3,23	7,53
			7	11,1	113	3,19	35,0	1,78	20,8	1,37	0,392	36,1	1,46	3,28	8,70
			8	12,6	127	3,18	39,2	1,77	23,4	1,36	0,391	40,5	1,50	3,32	9,87
			10	15,5	154	3,15	47,1	1,75	28,3	1,35	0,387	48,6	1,58	3,40	12,1
11/7	110	70	6,5	11,4	142	3,53	45,6	2,00	26,9	1,53	0,402	46,8	1,58	3,55	8,98
			8	13,9	172	3,51	54,6	1,98	32,3	1,52	0,400	55,9	1,64	3,61	10,9

Закінчення табл. Д.4.3

Номер профілю	Розміри, мм			Площа перерізу, $\text{см}^2$	$J_x, \text{см}^4$	$i_x, \text{см}$	$J_y, \text{см}^4$	$i_y, \text{см}$	$J_u \text{ min}, \text{см}^4$	$i_u \text{ min}, \text{см}^4$	Кут нахилу осі $u$ $\text{tg } \alpha$	$J_{xy}, \text{см}^4$	$x_0, \text{см}$	$y_0, \text{см}$	Маса $1 \text{ м}, \text{кг}$
	$B$	$b$	$d$												
12,5/8	125	80	7	14,1	227	4,01	73,7	2,29	43,4	1,76	0,407	74,7	1,80	4,01	11,0
			8	16,0	256	4,00	83	2,28	48,8	1,75	0,406	84,1	1,84	4,05	12,5
			10	19,7	312	3,98	100	2,26	59,3	1,74	0,404	102	1,92	4,14	15,5
			12	23,4	365	3,95	117	2,24	69,5	1,72	0,400	118	2,00	4,22	18,3
14/9	140	90	8	18,0	364	4,49	120	2,58	70,3	1,98	0,411	121	2,03	4,49	14,1
			10	22,2	444	4,47	146	2,56	85,5	1,96	0,409	147	2,12	4,58	17,5
16/10	160	100	9	22,9	606	5,15	186	2,85	110	2,20	0,391	194	2,23	5,19	18,0
			10	25,3	667	5,13	204	2,84	121	2,19	0,390	213	2,28	5,23	19,8
			12	30,0	784	5,11	239	2,82	142	2,18	0,388	249	2,36	5,32	23,6
			14	34,7	897	5,08	272	2,80	162	2,16	0,385	282	2,43	5,40	27,3
18/11	180	110	10	28,3	952	5,80	276	3,12	165	2,42	0,375	295	2,44	5,88	22,2
			12	33,7	1123	5,77	324	3,10	194	2,40	0,374	348	2,52	5,97	26,4
20/12,5	200	125	11	34,9	1449	6,45	446	3,58	264	2,75	0,392	465	2,79	6,50	27,4
			12	37,9	1568	6,43	482	3,57	285	2,74	0,392	503	2,83	6,54	29,7
			14	43,9	1801	6,41	551	3,54	327	2,73	0,390	575	2,91	6,62	34,4
			16	49,8	2026	6,38	617	3,52	367	2,72	0,388	643	2,99	6,71	39,1

Сортамент гарячекатаних рівнополічних кутників за ДСТУ 2251:2018



Позначення

- $b$  – ширина полиці;  $d$  – товщина стінки;  
 $J$  – момент інерції;  $i$  – радіус інерції;  
 $z_0$  – відстань від центра ваги до зовнішніх граней полиць.

Таблиця Д.4.4

Номер про-філю	$b$	$d$	Площа перерізу, $\text{см}^2$	Довідкові величини для осей										Маса 1 м довжини профілю, кг
				$x - x$		$x_0 - x_0$		$y_0 - y_0$		$J_{xy}, \text{см}^4$	$z_0, \text{см}$			
				$J_{x_0} \text{ max}, \text{см}^4$	$i_{x_0} \text{ max}, \text{см}$	$J_{y_0} \text{ min}, \text{см}^4$	$i_{y_0} \text{ min}, \text{см}$							
2	20	3	1,13	0,40	0,59	0,63	0,75	0,17	0,39	0,23	0,60	0,89		
		4	1,46	0,50	0,58	0,78	0,73	0,22	0,38	0,28	0,64	1,15		
2,5	25	3	1,43	0,81	0,75	1,29	0,95	0,34	0,49	0,47	0,73	1,12		
		4	1,86	1,03	0,74	1,62	0,93	0,44	0,48	0,59	0,76	1,46		
2,8	28	3	1,62	1,16	0,85	1,84	1,07	0,48	0,55	0,68	0,80	1,27		
3	30	3	1,74	1,45	0,91	2,30	1,15	0,60	0,59	0,85	0,85	1,36		
		4	2,27	1,84	0,90	2,92	1,13	0,77	0,58	1,08	0,89	1,78		
3,2	32	3	1,86	1,77	0,97	2,80	1,23	0,74	0,63	1,03	0,89	1,46		
		4	2,43	2,26	0,96	3,58	1,21	0,94	0,62	1,32	0,94	1,91		

Продовження табл. Д.4.4

Номер профілю	b	d	Площа перерізу, $\text{см}^2$	Довідкові величини для осей										Маса 1 м довжини профілю, кг
				x - x		x <sub>0</sub> - x <sub>0</sub>		y <sub>0</sub> - y <sub>0</sub>		J <sub>xy</sub> , $\text{см}^4$	z <sub>0</sub> , см			
				J <sub>x</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>x</sub> , см	J <sub>x0 max</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>x0 max</sub> , см	J <sub>y0 min</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>y0 min</sub> , см					
				J <sub>x</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>x</sub> , см	J <sub>x0 max</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>x0 max</sub> , см	J <sub>y0 min</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>y0 min</sub> , см					
3,5	35	3	2,04	2,35	1,07	3,72	1,35	0,97	0,69	1,37	0,97	1,60		
		4	2,67	3,01	1,06	4,76	1,33	1,25	0,68	1,75	1,01	2,10		
		5	3,28	3,61	1,05	5,71	1,32	1,52	0,68	2,1	1,05	2,58		
4	40	3	2,35	3,55	1,23	5,63	1,55	1,47	0,79	2,08	1,09	1,85		
		4	3,08	4,58	1,22	7,26	1,53	1,90	0,78	2,68	1,13	2,42		
		5	3,79	5,53	1,21	8,75	1,52	2,30	0,78	3,22	1,17	2,98		
4,5	45	3	2,65	5,13	1,39	8,13	1,75	2,12	0,89	3	1,21	2,08		
		4	3,48	6,63	1,38	10,52	1,74	2,74	0,89	3,89	1,26	2,73		
		5	4,29	8,03	1,37	12,74	1,72	3,33	0,88	4,71	1,30	3,37		
5	50	3	2,96	7,11	1,55	11,27	1,95	2,95	1,00	4,16	1,33	2,32		
		4	3,89	9,21	1,54	14,63	1,94	3,80	0,99	5,42	1,38	3,05		
		5	4,80	11,20	1,53	17,77	1,92	4,63	0,98	6,57	1,42	3,77		
5,6	56	4	4,38	13,10	1,73	20,79	2,18	5,41	1,11	7,69	1,52	3,44		
		5	5,41	15,97	1,72	25,36	2,16	6,59	1,10	9,41	1,57	4,25		
		6	6,69	20,72	1,71	31,81	2,15	7,81	1,25	11,1	1,69	3,90		
6,3	63	4	4,96	18,86	1,95	29,90	2,45	7,81	1,25	11	1,69	3,90		
		5	6,13	23,10	1,94	36,80	2,44	9,52	1,25	13,7	1,74	4,81		
		6	7,28	27,06	1,93	42,91	2,43	11,18	1,24	15,9	1,78	5,72		

Продовження табл. Д.4.4

Номер профілю	b	d	Площа перерізу, $\text{см}^2$	Довідкові величини для осей								Маса 1 м довжини профілю, кг
				x - x		x <sub>0</sub> - x <sub>0</sub>		y <sub>0</sub> - y <sub>0</sub>		J <sub>xy</sub> , $\text{см}^4$	z <sub>0</sub> , см	
				J <sub>x</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>x</sub> , см	J <sub>x0 max</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>x0 max</sub> , см	J <sub>y0 min</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>y0 min</sub> , см			
7	70	4,5	6,20	29,04	2,16	46,03	2,72	12,04	1,39	17	1,88	4,87
		5	6,86	31,94	2,16	50,67	2,72	13,22	1,39	18,7	1,90	5,38
		6	8,15	37,58	2,15	59,64	2,71	15,52	1,38	22,1	1,94	6,39
		7	9,42	42,98	2,14	68,19	2,69	17,77	1,37	25,2	1,99	7,39
		8	10,67	48,16	2,12	76,35	2,68	19,97	1,37	28,2	2,02	8,37
7,5	75	5	7,39	39,53	2,31	62,65	2,91	16,41	1,49	23,1	2,02	5,80
		6	8,78	46,57	2,30	73,87	2,90	19,28	1,48	27,3	2,06	6,89
		7	10,15	53,34	2,29	84,61	2,89	22,07	1,48	31,2	2,10	7,96
8	80	8	11,50	59,84	2,28	94,89	2,87	24,8	1,47	35	2,15	9,02
		9	12,83	66,1	2,27	104,72	2,86	27,48	1,46	38,6	2,18	10,07
		5,5	8,63	52,68	2,47	83,56	3,11	21,8	1,59	30,9	2,17	6,78
8	80	6	9,38	56,97	2,47	94,0	3,11	23,54	1,58	33,4	2,19	7,36
		7	10,85	65,31	2,45	103,6	3,09	26,97	1,58	38,3	2,23	8,51
		8	12,30	73,36	2,44	116,39	3,08	30,32	1,57	43	2,27	9,65
9	90	6	10,61	82,1	2,78	130,0	3,50	33,97	1,79	48,1	2,43	8,33
		7	12,28	94,3	2,77	149,67	3,49	38,94	1,78	55,4	2,47	9,64
		8	13,93	106,11	2,76	168,42	3,48	43,8	1,77	62,3	2,51	10,93
		9	15,60	118,0	2,75	186,0	3,46	48,6	1,77	68	2,55	12,20

Продовження табл. Д.4.4

Номер профілю	b	d	Площа перерізу, $\text{CM}^2$	Довідкові величини для осей								Маса 1 м довжини профілю, $\text{КГ}$
				x - x		$x_0 - x_0$		$y_0 - y_0$		$J_{xy}$ , $\text{CM}^4$	$z_0$ , $\text{CM}$	
				$J_{x_0}$ , $\text{CM}^4$	$i_{x_0}$ , $\text{CM}$	$J_{x_0 \max}$ , $\text{CM}^4$	$i_{x_0 \max}$ , $\text{CM}$	$J_{y_0 \min}$ , $\text{CM}^4$	$i_{y_0 \min}$ , $\text{CM}$			
10	100	6,5 7 8 10 12 14 16	12,82 13,75 15,60 19,24 22,80 26,28 29,68	122,1 139,59 147,19 178,95 208,9 237,15 263,82	3,09 3,08 3,07 3,05 3,03 3,00 2,98	193,46 207,01 233,46 283,83 330,95 374,98 416,04	3,89 3,88 3,87 3,84 3,81 3,78 3,74	50,73 54,16 60,92 74,08 86,84 99,32 111,61	1,99 1,98 1,98 1,96 1,95 1,94 1,94	71,4 76,4 86,3 110 122 138 152	2,68 2,71 2,75 2,83 2,91 2,99 3,06	10,06 10,79 12,25 15,10 17,90 20,63 23,30
11	110	7 8	15,15 17,20	175,61 198,17	3,40 3,39	278,54 314,51	4,29 4,28	72,68 81,83	2,19 2,18	106 116	2,96 3,00	11,89 13,50
12,5	125	8 9 10 12 14 16	19,69 22,0 24,33 28,89 33,37 37,77	294,36 327,48 359,82 422,23 481,76 538,56	3,87 3,86 3,85 3,82 3,80 3,78	466,76 520 571,04 670,02 763,9 852,84	4,87 4,86 4,84 4,82 4,78 4,75	121,98 135,88 148,59 174,43 199,62 224,29	2,49 2,48 2,47 2,46 2,45 2,44	172 192 211 248 282 315	3,36 3,40 3,45 3,53 3,61 3,68	15,46 17,3 19,1 22,68 26,2 29,65
14	140	9 10 12	24,72 27,33 32,49	465,72 512,29 602,49	4,34 4,33 4,31	739,42 813,62 956,98	5,47 5,46 5,43	192,03 210,96 248,01	2,79 2,78 2,76	274 301 354	3,78 3,82 3,90	19,41 21,45 25,5

Продовження табл. Д.4.4

Номер профілю	b	d	Площа перерізу, $\text{см}^2$	Довідкові величини для осей										Маса 1 м довжини профілю, кг
				x - x		x <sub>0</sub> - x <sub>0</sub>		y <sub>0</sub> - y <sub>0</sub>		J <sub>xy</sub> , $\text{см}^4$	z <sub>0</sub> , см			
				J <sub>x</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>x</sub> , см	J <sub>x0</sub> max, $\text{см}^4$	i <sub>x0</sub> max, см	J <sub>y0</sub> min, $\text{см}^4$	i <sub>y0</sub> min, см					
16	160	10	31,43	774,24	4,96	1229,1	6,25	319,38	3,19	455	4,30	24,67		
		11	34,42	844,21	4,95	1340,06	6,24	347,77	3,18	496	4,35	27,02		
		12	37,39	912,89	4,94	1450	6,23	375,78	3,17	537	4,39	29,35		
		14	43,57	1046,47	4,92	1662,13	6,20	430,81	3,16	615	4,47	33,97		
		16	49,07	1175,19	4,89	1865,73	6,17	484,64	3,14	690	4,55	38,52		
		18	54,79	1290,24	4,87	2061,03	6,13	537,46	3,13	771	4,63	43,01		
		20	60,4	1418,85	4,85	2248,26	6,10	589,43	3,12	830	4,70	47,44		
18	180	11	38,8	1216,44	5,60	1933,1	7,06	499,78	3,59	716	4,85	30,47		
		12	42,19	1316,62	5,59	2092,78	7,04	540,45	3,58	776	4,89	33,12		
20	200	12	47,1	1822,78	6,22	2896	7,84	749,4	3,99	1073	5,37	36,97		
		13	50,85	1960,77	6,21	3116	7,83	805,35	3,98	1156	5,42	39,92		
		14	54,6	2097	6,20	3333	7,81	861	3,97	1236	5,46	42,8		
		16	61,98	2362,57	6,17	3755	7,78	969,74	3,96	1393	5,54	48,65		
		20	76,54	2871,47	6,12	4560	7,72	1181,92	3,93	1689	5,70	60,08		
		25	94,29	3466,21	6,06	5494	7,63	1437,73	3,91	2028	5,89	74,02		
		30	111,54	4019,6	6,00	6351	7,55	1698,16	3,89	2332	6,07	87,56		
22	220	14	60,38	2814	6,83	4470	8,60	1158,56	4,38	1655	5,91	47,4		
		16	68,58	3175	6,80	5045	8,58	1305,52	4,36	1869	6,02	53,83		

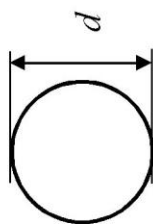
Закінчення табл. Д.4.4

Номер профілю	b	d	Площа перерізу, $\text{см}^2$	Довідкові величини для осей								Маса 1 м довжини профілю, кг
				x - x		x <sub>0</sub> - x <sub>0</sub>		y <sub>0</sub> - y <sub>0</sub>		J <sub>xy</sub> , $\text{см}^4$	z <sub>0</sub> , см	
				J <sub>x</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>x</sub> , см	J <sub>x0</sub> max, $\text{см}^4$	i <sub>x0</sub> max, см	J <sub>y0</sub> min, $\text{см}^4$	i <sub>y0</sub> min, см			
				J <sub>x</sub> , $\text{см}^4$	i <sub>x</sub> , см	J <sub>x0</sub> max, $\text{см}^4$	i <sub>x0</sub> max, см	J <sub>y0</sub> min, $\text{см}^4$	i <sub>y0</sub> min, см			
25	250	16	78,4	4717	7,76	7492,1	9,78	1942,09	4,98	2775	6,75	61,55
		18	87,72	5247	7,73	8336,69	9,75	2157,78	4,96	3089	6,83	68,86
		20	96,96	5765	7,71	9159,73	9,72	2370,01	4,94	3395	6,91	76,11
		22	106,12	6270	7,69	9961,6	9,69	2579,04	4,93	3691	7,00	83,31
		25	119,71	7006	7,65	11125,52	9,64	2887,26	4,91	4119	7,11	93,97
		28	133,12	7717	7,61	12243,84	9,59	3189,89	4,89	4527	7,23	104,5
		30	141,96	8177	7,59	12964,6	9,56	3388,98	4,89	4788	7,31	111,4



Продовження дод. 4

Сортамент гарячекатаного круглого прокату за ГОСТ 2590-88



Таблиця Д.4.5

Діаметр $d$ , мм	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Маса 1 м профілю, кг	Діаметр $d$ , мм	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Маса 1 м профілю, кг
5	0,1963	0,154	50	19,64	15,42
5,5	0,2376	0,186	52	21,24	16,67
6	0,2827	0,222	53	22,06	17,32
6,3	0,3117	0,245	54	22,89	17,97
6,5	0,3318	0,260	55	23,76	18,65
7	0,3848	0,302	56	24,63	19,33
8	0,5027	0,395	58	26,42	20,74
9	0,6362	0,499	60	28,27	22,19
10	0,7854	0,616	62	30,19	23,7
11	0,9503	0,746	63	31,17	24,47
12	1,131	0,888	65	33,18	26,05
13	1,327	1,04	67	35,26	27,68
14	1,539	1,21	68	36,32	28,51
15	1,767	1,39	70	38,48	30,21
16	2,011	1,58	72	40,72	31,96

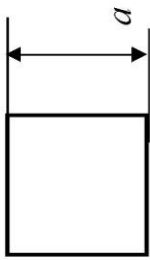
Продовження табл. Д.4.5

Діаметр $d$ , мм	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Маса 1 м профілю, кг	Діаметр $d$ , мм	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Маса 1 м профілю, кг
17	2,270	1,78	75	44,18	34,68
18	2,545	2,00	78	47,78	37,51
19	2,835	2,23	80	50,27	39,46
20	3,142	2,47	82	52,81	41,46
21	3,464	2,72	85	56,74	44,54
22	3,801	2,98	87	59,42	46,64
23	4,155	2,26	90	63,62	49,94
24	4,524	3,55	92	66,44	52,16
25	4,909	3,85	95	70,88	55,64
26	5,309	4,17	97	73,86	57,98
27	5,726	4,50	100	78,54	61,65
28	6,158	4,83	105	86,59	67,97
29	6,605	5,18	110	95,03	74,6
30	7,069	5,55	115	103,87	81,54
31	7,548	5,92	120	113,1	88,78
32	8,042	6,31	125	122,72	96,33
33	8,533	6,71	130	132,73	104,2
34	9,079	7,13	135	143,14	112,36
35	9,621	7,55	140	153,94	120,84
36	10,18	7,99	145	165,1	129,6

Закінчення табл. Д.4.5

Діаметр $d$ , мм	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Маса 1 м профілю, кг	Діаметр $d$ , мм	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Маса 1 м профілю, кг
37	10,75	8,44	150	176,72	138,72
38	11,34	8,9	155	188,6	148,05
39	11,95	9,38	160	201,06	157,83
40	12,57	9,87	165	213,72	167,77
41	13,2	10,36	170	226,98	178,18
42	13,85	10,87	175	240,41	188,72
43	14,52	11,4	180	254,47	199,76
44	15,2	11,94	185	268,67	210,91
45	15,9	12,48	190	283,53	222,57
46	16,62	13,05	195	298,5	234,32
47	17,35	13,75	200	314,16	246,62
48	18,1	14,2			

## Сортамент гарячекатаного квадратного прокату за ДСТУ 4746:2007



Таблиця Д.4.6

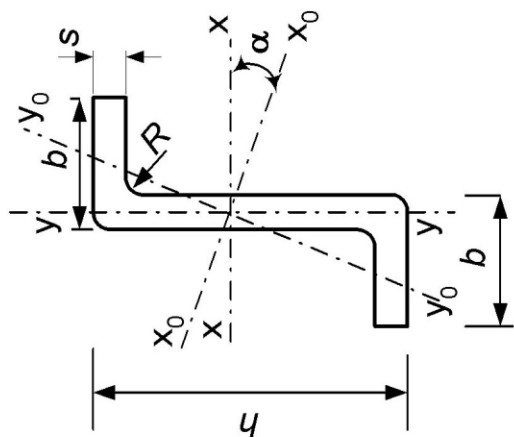
Сторона квадрата $a$ , мм	Площа поперечного перерізу, $\text{см}^2$	Маса 1 м профілю, кг	Сторона квадрата $a$ , мм	Площа поперечного перерізу, $\text{см}^2$	Маса 1 м профілю, кг
6	0,36	0,283	45	20,25	15,9
7	0,49	0,385	46	21,16	16,61
8	0,64	0,502	48	23,04	18,09
9	0,81	0,636	50	25	19,63
10	1	0,785	52	27,04	21,23
11	1,21	0,95	55	30,25	23,75
12	1,44	1,13	58	33,64	26,4
13	1,69	1,33	60	36	28,26
14	1,96	1,54	63	39,69	31,16
15	2,25	1,77	65	42,25	33,17
16	2,56	2,01	70	49	38,46
17	2,89	2,27	75	56,25	44,16
18	3,24	2,54	80	64	50,24
19	3,61	2,82	85	72,25	56,72
20	4	3,14	90	81	63,58
21	4,41	3,46	93	86,49	67,9
22	4,84	3,8	95	90,25	70,85

Продовження табл. Д.4.6

Сторона квадрата $a$ , мм	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Маса 1 м профілю, кг	Сторона квадрата $a$ , мм	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Маса 1 м профілю, кг
23	5,29	4,15	100	100	78,5
24	5,76	4,52	105	110,25	86,57
25	6,25	4,91	110	121	94,98
26	6,76	5,3	115	132,25	103,82
27	7,29	5,72	120	144	113,04
28	7,84	6,15	125	156,25	122,66
29	8,41	6,6	130	169	132,67
30	9	7,06	140	182,25	143,07
32	10,24	8,04	145	196	153,86
34	11,56	9,07	150	210,25	165,05
35	12,25	9,62	160	225	176,63
36	12,96	10,17	170	256	200,96
38	14,44	11,24	180	289	227
40	16	12,56	190	324	254
42	17,64	13,85	200	400	314

Продовження дод. 4

Сортамент гнутих рівнополічних зетових профілів  
за ГОСТ 13229-78\* зі сталі марок С235 та С245 за ДСТУ 8539:2015\*



Таблиця Д.4.7

h	b	s	R, не більше	tg α	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Довідкові значення для осей												Маса 1 м, кг			
						x - x			y - y			x <sub>0</sub> - x <sub>0</sub>							y <sub>0</sub> - y <sub>0</sub>		
						J <sub>x</sub> , см <sup>4</sup>	i <sub>x</sub> , см	J <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>	i <sub>y</sub> , см	J <sub>x0</sub> , см <sup>4</sup>	W <sub>x0</sub> <sup>1</sup> , см <sup>3</sup>	W <sub>x0</sub> <sup>2</sup> , см <sup>3</sup>	i <sub>x0</sub> , см	J <sub>y0</sub> , см <sup>4</sup>	W <sub>y0</sub> <sup>1</sup> , см <sup>3</sup>	W <sub>y0</sub> <sup>2</sup> , см <sup>3</sup>	i <sub>y0</sub> , см				
40	32	2	3	0,854	15	5,14	1,63	3,97	1,43	8,26	2,34	5,9	2,07	0,85	0,75	0,73	0,66	1,52			
	55	4	6	0,554	5	14,37	1,63	39,72	2,71	3,16	0,72	2,51	0,76	50,93	13,26	65,3	3,07	4,24			
76	60	4	6	0,842	14	68,9	3,08	52,07	2,68	109,72	16,21	41,25	3,89	11,25	5,36	5,14	1,23	5,68			
	40	3	4	0,434	11	43,51	3,12	11,43	1,6	50,95	9,67	15,68	3,37	3,99	1,92	2,64	0,94	3,52			
80		2	3	0,707	35	30,57	3,17	7,91	1,61	35,65	6,84	23,3	3,42	2,83	1,41	6,58	0,96	2,4			
	50	3	4	0,536	22	52,41	3,21	22,83	2,12	68,57	11,44	21,98	3,67	6,67	2,95	3,49	1,15	3,99			
135	75	6	9	0,51	20	440,23	5,28	149,55	3,08	542,98	57,64	104,02	5,87	46,81	12,97	16,6	1,72	12,36			

Продовження табл. Д.4.7

h	b	s	R, не більше	tg α	Площа попереч- ного перерізу, см <sup>2</sup>	Довідкові значення для осей												Маса l м, кг	
						x - x		y - y		x <sub>0</sub> - x <sub>0</sub>				y <sub>0</sub> - y <sub>0</sub>					
						J <sub>x</sub> , см <sup>4</sup>	i <sub>x</sub> , см	J <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>	i <sub>y</sub> , см	J <sub>x0</sub> , см <sup>4</sup>	J <sub>y0</sub> , см <sup>4</sup>	W <sub>x0</sub> <sup>m</sup> , см <sup>3</sup>	W <sub>y0</sub> <sup>m</sup> , см <sup>3</sup>	J <sub>x0</sub> , см <sup>4</sup>	J <sub>y0</sub> , см <sup>4</sup>	W <sub>x0</sub> <sup>m</sup> , см <sup>3</sup>	W <sub>y0</sub> <sup>m</sup> , см <sup>3</sup>		i <sub>x0</sub> , см
200	60	5	7	0,206	9,6	35,2	816,09	7,35	63,58	2,05	849,3	77,21	96,4	7,5	30,36	7,87	14,81	1,42	11,81
	87	6	9	0,354	12	28,3	1253,99	7,71	237,45	3,35	1399,61	113,79	161,42	8,14	91,84	18,9	28,61	2,09	16,55
250	80	5	7	0,224	45,2	13,6	1713,64	9,35	155,41	2,81	1796,32	129,28	137,09	9,57	72,72	3,21	20,05	1,92	15,38
340	50	3	4	0,068	108,6	14,8	1742,54	11,68	229,03	4,33	1750,75	101,24	102,5	11,66	14,7	0,48	4,72	1,66	10,11

Примітка. Профілі за цим сортаментом виготовляють з вуглецевої кияччої і напівспокійної сталі з тимчасовим опором розриву не більше 461 МПа (у тому числі марок С235 та С245 за ДСТУ 8539:2015).

Навчальний посібник

**Ватуля Гліб Леонідович,  
Галагура Євгеній Іванович,  
Калашніков Іван Володимирович  
та ін.**

**ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ  
З ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ  
ТА БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ**

**Друге видання**

Відповідальний за випуск Петренко Д. Г.

Редактор Еткало О. О.

---

Підписано до друку 14.12.20 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк. арк. 17,5. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет  
залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.