Міністерство освіти і науки України Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

Укладачі:

О. Г. Гринь І. О. Трембач Г.М. Кущій

# ПРОЄКТУВАННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Методичні вказівки

до лабораторних робіт

для студентів спеціальності 13 «Прикладна механіка» за освітніми програмами «Прикладна механіка» і «Зварювання і споріднені процеси та нанотехнології»

До друку екз. Перший проректор Затверджено на засіданні методичної ради Протокол № від

\_\_\_\_\_А. М. Фесенко

Краматорськ - Тернопіль 2023 Міністерство освіти і науки України Донбаська державна машинобудівна академія

# ПРОЄКТУВАННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

## Методичні вказівки

до лабораторних робіт

для студентів спеціальності 131 «Прикладна механік» за освітніми програмами «Прикладна механіка» і «Зварювання і споріднені процеси та нанотехнології»

> Краматорськ - Тернопіль 2023

Міністерство освіти і науки України Донбаська державна машинобудівна академія

# ПРОЄКТУВАННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

## Методичні вказівки

до лабораторних робіт

для студентів спеціальності 131 «Прикладна механік» за освітніми програмами «Прикладна механіка» і «Зварювання і споріднені процеси та нанотехнології»

> Затверджено на засіданні методичної ради Протокол <mark>№ від</mark>......

Краматорськ - Тернопіль 2023 УДК 624.014:539.4

Проєктування зварних конструкцій : *методичні вказівки до лабораторних робіт [для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»* за освітніми програмами «Прикладна механіка» і «Зварювання і споріднені процеси та нанотехнології»] / [уклад. О. Г. Гринь, І. О. Трембач, Г. М. Кущій]. – Краматорсь : ДДМА, 2023. – 60 с.

У методичних вказівках міститься перелік лабораторних робіт, інструкція з техніки безпеки, наводяться цілі робіт, загальні відомості щодо матеріалу, що вивчається, методика виконання, опис лабораторного обладнання, рекомендації щодо змісту, оформлення та обсягу звіту, питання для самоперевірки, список довідкової літератури.

Укладачі:

О. Г. Гринь, проф. кафедри І. О. Трембач, асп. Г.М. Кущій, ст. викл.

Відпов. за випуск Н. О. Макаренко

## **3MICT**

Загальна частина	4
Лабораторна робота 1. Тарування дротяних тензодатчиків	6
Лабораторна робота 2. Експериментальне визначення концентрації	
напруг у напускних зварних з'єднаннях	21
Лабораторна робота 3. Дослідження концентрації напруг у попереч-	
них перерізах зварних стикових з'єднань за допомогою тензодатчи-	
ків	28
Лабораторна робота 4. Дослідження стійкості стиснутих стрижнів	34
Лабораторна робота 5. Дослідження напруженого стану судини тиску	41
Лабораторна робота 6. Визначення зусиль у стрижнях ферми	47
Література	53
Додаток А. Значення показання АЦП – ZET 210	54
Додаток Б. Приклад тарувального графіка	55
Додаток В. Таблиця 3.1 – Результати визначення концентрації напруг	56

## ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

### Ціль лабораторного практикуму

Основна ціль лабораторного практикуму – закріплення та поглиблення матеріалу, що вивчається на лекціях та практичних заняттях, ознайомити студентів з методами проведення експериментальних робіт, приладами та обладнанням, що застосовуються під час їх виконання.

### Організація лабораторного практикуму

Заняття проводяться згідно з розкладом у лабораторії міцності зварних конструкцій. Кількість лабораторних робіт з курсу та кількість годин, що відводиться для виконання кожної роботи, визначається робочою програмою дисципліни. Роботи виконуються усією групою одночасно. При чисельності групи більше п'яти осіб група розбивається на бригади. Кожна бригада виконує свою роботу згідно з графіком кафедри.

#### Порядок допуску до лабораторних робіт та звітність щодо них

Студент зобов'язаний заздалегідь самостійно вивчити методичні вказівки до виконуваної роботи та повторити лекційний матеріал з теми роботи для того, щоб бути готовим відповідати на питання для самоперевірки.

Перед роботою викладачі контролюють готовність студентів до виконання роботи. Непідготовлені студенти до виконання роботи не допускаються.

Звіт про роботу складається відразу після її виконання і подається викладачеві не пізніше, ніж на наступному занятті. Робота вважається виконаною після співбесіди та підписання звіту викладачем.

Студенти, які не захистили попередню роботу без поважних причин, не допускаються до виконання чергової роботи. Звіти про виконані роботи оформлюються на аркушах формату A4 та зберігаються у студентів до закінчення лабораторного практикуму.

Під час виконання робіт необхідно дотримуватись наступних вимог техніки безпеки:

1 До роботи в лабораторії допускаються особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки, що оформлено у спеціальному журналі, а для студентів – у контрольному груповому журналі. 2 Перед включенням приладів попередньо зовнішнім оглядом переконатися у наявності та цілості заземлення.

3 Студентам забороняється відкривати розподільні шафи, розбирати та ремонтувати електроустановки та прилади. Про всі несправності необхідно повідомляти лаборанта чи викладача.

4 Під час перерв у роботі та після її закінчення все електроустаткування має бути знеструмлене.

## Лабораторна робота1

#### ТАРУВАННЯ ДРОТЯНИХ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

Мета роботи –- набути практичних навичок у вимірюванні робочих напруг за допомогою дротяних тензодатчиків.

#### 1.1 Теоретичні відомості

Для визначення напруги в області пружних деформацій поряд з розрахунком широко використовуються експериментальні методи. Більшість їх заснована на різних способах непрямого виміру деформацій, оскільки відносне подовження матеріалу в області пружних деформацій дуже мале. Прямим шляхом виміряти подовження важко. Залежність між напругою розтягування (або стискання)  $\sigma$  та відносною деформацією  $\varepsilon$  в області пружних деформацій визначається законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{afo} \quad \frac{P}{F} = E \cdot \frac{\Delta l}{l_n} \,. \tag{1.1}$$

Звідки

$$\Delta l = \frac{P \cdot l_n}{F \cdot E},\tag{1.2}$$

де E – модуль пружності,  $H/мм^2$ ;

 $\varepsilon = \Delta l/l_n$  – відносне видовження;

*P* – сила навантаження, H;

F – площа перетину, мм<sup>2</sup>;

 $\Delta l = l_{\kappa}$  -  $l_n$  – абсолютне видовження, мм;

*l<sub>n</sub>* – початкова довжина бази, мм;

 $l_{\kappa}$  – довжина бази після навантаження (кінцева), мм.

На практиці застосовуються такі експериментальні методи визначення деформацій та напруг:

- ультразвуковий;

- оптичні (голографічний, електронної спектр-інтерферометрії);

- рентгенівський;

- тензометричний (за допомогою тензодатчиків опору).

Визначення напруг та деформацій за допомогою дротяних тензодатчиків опору дозволяє отримати якісну оцінку напруженого стану об'єкта, що досліджується.

Цей метод широко застосовується у всіх галузях машинобудування, незамінний при дослідженні деформацій та напруг у важкодоступних місцях, а також при ударному навантаженні.

Метод застосовується лише в області пружних деформацій. Широкому використанню дротяних тензодатчиків опору сприяла їх мала вага, розміри, можливість виміру як статичних, так і динамічних деформацій, дистанційний відлік показань тощо. Спеціальні тензодатчики дозволяють вести вимірювання за високих температур (до 700...800 °C) а також вимірювати та перетворювати різноманітні фізичні величини в електричні сигнали, тому вони знайшли широке застосування в датчиках сили, тиску, переміщення, прискорення або крутного моменту.

Тензодатчики дозволяють:

- визначити напруги, у певному місці на поверхні об'єкта, що вимірюється;

- проводити швидкий відгук для швидкісних вимірювань завдяки компактній та легкій структурі;

- забезпечити лінійність у межах широкого діапазону напруг;

- проводити вимірювання в широкому діапазоні температур і несприятливих навколишніх середовищах;

- можливість вимірювань на відстані від об'єкта з метою виконання завдань моніторингу.

До недоліків дротяних тензодатчиків слід віднести відносну складність їхньої наклейки на виріб. Датчики не можна зняти для використання на іншому виробі.

Основою тензодатчика є тензорезистор, який служить чутливим елементом (металевий або напівпровідниковий), опір якого змінюється пропорційно напрузі на поверхні об'єкта, що досліджується. Чутливий елемент виконаний у вигляді тонких смужок із константанового сплаву (ніхром) діаметром 0,012...0,050 мм та розміщений на підкладці з поліаміду або іншого матеріалу. Зверху покриваються захисною плівкою. Це – класичне уявлення структури тензорезистора (рис. 1.1), готового до застосування на поверхні вимірюваного об'єкта. Для з'єднання з поверхнею об'єкта вимірювань зазвичай застосовується клей. До кінців дроту підпаяні виводи довжиною приблизно 30 мм та діаметром 0,5 мм. Величина омічного опору датчика 50...600 Ом (зазвичай 100...200 Ом) залежить від бази, числа петель, діаметра дроту і вибирається відповідно до вимірювальної апаратури, що застосовується. Товщина датчика разом із підкладкою становить 0,1 мм. Базою датчика називається довжина ділянки, де проводиться вимірювання деформації. Датчики виготовляють з наступною базою: 1, 3, 5, 10, 15, 20, 50 та 100 мм. Точність вимірювання напруги датчиком опору становить приблизно 2%.

Застосовуються також датчики фольги товщиною 0,005 мм, виготов-

лені шляхом травлення. Останнім часом все ширше застосовують напівпровідникові датчики.

Величина струму в дроті датчика обмежена найбільшою допустимою температурою, що виникає від нагрівання електричним струмом. При високій температурі розм'якшується клей, подовження предмета, що випробовується, не передається точно дроту і показання тензодатчика стають ненадійними.

Розмір сили струму, відповідний даному датчику, визначається експериментально.



1 – тонкий nanip; 2 – резистор; 3 – клейова підкладка; 4 – виводи; 5 – точкове зварювання або припій Рисунок 1.1 – Дротовий тензорезистор (а), види тензорезисторів (б) та наклеєний тензодатчик (в)

Метод вимірювання напруги заснований на тому, що, деформуючись спільно з виробом, датчик змінює свій опір (рис. 1.2), оскільки при деформації одночасно змінюється довжина дроту датчика, його поперечний переріз, а також питомий опір матеріалу дроту. Зміна відносного опору

$$\frac{\Delta R}{R}, \qquad (1.3)$$

де  $\Delta R$  – абсолютна зміна опору, Ом; *R* – вихідний опір датчика, Ом.

Якщо наклеїти тензодатчик, наприклад, на циліндричний пружний елемент у напрямку твірної (рис. 1.1) і потім навантажити елемент осьової силою, то поверхневі деформації елемента через шар клею та паперу передадуть дротяній спіралі (тензорезистору).

Основною характеристикою датчика є коефіцієнт тензочутливості *К*, що враховує властивості матеріалу, конструкцію та технологію виготовлення датчика

$$K = \frac{\Delta R}{\Delta l_l}.$$
 (1.4)



Рисунок 1.2 – Залежність між виміром опору та деформації

Для тензодатчиків у досить великих межах  $\Delta R/R$  пропорційно до відносного подовження  $\varepsilon = \Delta l/l$ , тому

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \,. \tag{1.5}$$

Отже, величину деформації можна визначити за зміною опору датчика.

Виходячи з того, що сам по собі замір електричних параметрів з одиночного датчика по суті не має сенсу – занадто велика кількість перешкод і «шумів» від різних факторів зовнішнього середовища і присутніх в ланцюгах живлення, застосовують так звані напівмостові і мостові схеми (рис. 1.3) із системами придушення «шумів», і навіть із застосуванням підсилювачів, що у комплексі дає хороші показники перешкодостійкості і точності показань.

Зважаючи на те, що показання, що знімаються за допомогою тензометричних датчиків, є, по суті, реєстрацією електричних параметрів, для отримання відомостей про напруги в елементах, об'єктах або машинах, що вимірюються, необхідно проведення натурного тарування – проведення серії вимірів показань датчиків на базових зразках з метою реєстрації показань при прикладанні сил або моментів відомої величини з наступним аналітичним перерахунком на напруги і побудови графіків тарування, що відображають залежність величини зміни показань опору від виникаючих напруг.



Рисунок 1.3 – Напівмостова схема установки тензодатчиків (а), вимірювальний та компенсаційний тензодатчик (б).

Загальний вигляд лабораторної установки для тарування тензодатчиків на рис. 1.4.



1-тарувальна балка; 2 –дротяний тензодатчик; 3 – рама; 4 –навантажувальний пристрій Рисунок 1.4 – Обладнання для тарування тензодатчика

При вимірюванні дротяними датчиками слід мати на увазі, що на результат вимірювання можуть впливати зміни температури об'єкта та навколишнього середовища, які призводять до зміни довжини дроту датчика та зміни лінійних розмірів об'єкта, що випробовується, внаслідок чого змінюється опір датчика.

Для компенсації впливу змінної температури в мостовій схемі використовують два однакових датчика, з яких один робочий датчик – РД наклеєний на об'єкт, що випробовується, а другий компенсаційний датчик – КД наклеєний на ненавантажену пластинку з цього ж матеріалу, що знаходиться в тих же температурних умовах.

Для спрощення схеми вимірювального приладу в роботі використовується один компенсаційний датчик (КД), який по черзі з'єднується з кожним робочим датчиком (РД), прикріпленим до об'єкта.

Згідно з напівмостовою схемою (рис. 1.3, а), де R<sub>вим</sub> – це вимірювальний тензодатчик (РД<sub>1</sub>, РД<sub>2</sub>, ..., РД<sub>n</sub>), наклеєний уздовж пластини. R<sub>1</sub> – (КД) – це компенсаційний тензодатчик, наклеєний поперек пластини. Для передачі сигналу використовується провід перетином 0,12 мм<sup>2</sup>, приклеєний до поверхні пластини (рис. 1.3, б).

Струм, що викликається розбалансом напівмоста, дуже малий і тому потрібний підсилювач. У роботі використовуємо підсилювач ZET 410, потім підключаємо підсилювач сигналу до АЦП ZET 210 (аналоговий цифровий перетворювач), а той, у свою чергу, до персонального комп'ютера з встановленим програмним забезпеченням «Тензодатчик».

Підключення проводів, що йдуть від досліджуваного зразка, здійснюється відповідно до схеми з'єднання (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Підключення тензодатчиків до підсилювача сигналу ZET 410 та АЦП ZET 210

Вимірювальний тензодатчик підключаємо до першого каналу (клема «1» і « $\downarrow$ »), компенсаційний тензодатчики — до другого каналу (клема «2» і « $\downarrow$ »). Живлення тензодатчиків — від клем генератора (клема «OUT1» та « $\downarrow$ »).

Зміна електричної напруги (мВ) тарувального датчика ТД внаслідок деформацій фіксується в поділах шкали на багатофункціональному осцилографі АЦП ZET 210. Спочатку відзначають показання АЦП, коли зразок не навантажений – початкове значення  $U_n$ , потім – коли зразок навантажений  $U_k$ , після чого підраховується різниця показань  $\Delta U_i = U_{ki} - U_{ni}$ . У разі збільшення прогину наступне значення  $\Delta U_i = U_{ki} - U_{ni}$ . Для правильного розрахунку та відображення параметрів необхідне початкове налаштування та калібрування програми «Тензодатчик». Для цього існують такі параметри:

- вимірювальний канал, до якого підключений тензодатчик ТД;

- опорний канал, показання якого використовуються при відносних вимірах;

- одиниця виміру – електричне напруження, мВ;

- тип вимірювань – величина прогину по індикатору, мм;

- файл калібрування – файл, що містить дані про калібрувальні параметри вимірювача.

При калібруванні студенту необхідно ввести коефіцієнти відповідності вимірюваного параметра значенням, які відображаються у вікні програми (рис. 1.6). Наприклад, при навантаженні тензодатчика вагою 1 кг, у вікні програми відображається значення 0,02. При навантаженні масою 100 кг – значення вікна програми збільшується до 2,0. І т.д. Кількість точок калібрування – до 15.



Рисунок 1.6 – Калібрування програми «Тензодатчик»

Зв'язати показання приладу з робочими напругами (МПа), що виникають у місці наклейки датчика, математично дуже важко, простіше провести тарування датчика так, щоб показання відразу переводити в робочі напруги (МПа), що зазвичай і робиться на практиці.

Тарування проводиться на балці, що згинається постійним моментом, на середній частині балки наклеєний робочий (тарувальний) датчик РД. У нашому випадку (рис.1.7) застосовується балка постійного прямокутного перерізу шириною B = 30 мм, товщиною h = 6 мм, що виготовлена зі сталі марки 45ХНМФА, модуль пружності якої  $E = 2,2 \cdot 10^5$  МПа. Відстань між опорами балки l = 340 мм. Кінці балки навантажені однаковими силами Р,

що забезпечується пристроєм навантаження із зубчастою передачею (рис. 1.4).



Рисунок 1.7 – Схема навантаження тарувальної балки

Частина балки між опорами має постійний згинальний момент (чистий вигин), а отже, і постійну відносну деформацію (відносну зміну довжини на поверхні балки) від розтягування в нижніх волокнах. Точність тарування багато в чому залежить від дотримання розмірів балки по всій довжині, особливо товщини h.

Задану робочу напругу (МПа) в нижніх волокнах балки легко отримати прогином, який створюється навантажувальним пристроєм.

Прогин, що створюється силами Р, легко встановити за допомогою індикатора годинного типу з точністю до 0,01 мм.

Зміна електричної напруги (мВ) датчика при прогині тарувальної балки фіксується на осцилографії АЦП ZET 210, який реагує на розбалансування напівмоста, викликану зміною електричного опору датчика в результаті його спільного деформування з балкою.

Тарування дротяного тензодатчика проводиться наступним чином.

Датчик РД, прикріплений до тарувальної балки, підключається до тензостанції. Після підключення схеми необхідно налаштувати входи та вихід модуля ZET 210. Для цього з меню Сервісні панелі ZETLab вибрати команду *Налаштування параметрів* АЦП та ЦАП (цифро-аналоговий перетворювач), після чого відкриється робоче вікно програми *Налаштування параметрів* АЦП та ЦАП (рис. 1.8).

Після налаштування всіх параметрів вид програми буде, як показано на рис. 1.8. Налаштувавши всі параметри, необхідно натиснути кнопку *Зберегти*. Ці параметри будуть встановлюватися щоразу під час завантаження сигнального процесора та панелі ZETLab, якщо пристрій буде включено до комп'ютера.

(П-ЦАЛ 16/16 USB N=422   АЦП устройства 16/16 USB				Reason
Частота дискретназация 				Сокрани
Номер канала канала 1 т ф. т				
Каналы		-		
	4 1 15	F	16	
F Breuzese sangok ALLIN				
ЦАП устройства 16/16 USB Частота енспользования				
100000.00 ·				

Рисунок 1.8 – Налаштування параметрів АЦП (аналого-цифровий перетворювач) та ЦАП (цифро-аналоговий перетворювач).

Далі необхідно налаштувати вимірювальні тракти вхідних каналів, які задіяні у вимірах. Для цього в меню *Сервісні панелі* ZETLab вибрати команду *Редагування файлів параметрів*, після чого з'явиться робоче вікно програми Редагування файлів параметрів (рис. 1.9).

Після налаштування параметрів АЦП та ЦАП таблиця програми «Редагування файлів параметрів» має виглядати приблизно таким чином, як показано на рис. 1.9. У цьому випадку в рядку № 1 таблиці відображаються налаштування тракту Диференціального Входу 1 (в даному прикладі названо Опорний). Те саме стосується Диференціального Входу 2 (рядок № 3) і Диференціального Входу 3 (рядок № 5) (в даному прикладі названо Тензодатчик 1). Сьомий канал був увімкнений як додатковий для встановлення цілого числа частоти дискретизації. Параметри вимірювальних каналів мають бути налаштовані щодо вимірювання напруги, як показано в таблиці 1.9. Назви каналів студент вводить на свій розсуд.

No Pe	дактировани	не файла к	онфигурации	измерите.	тыных каналов	- tabconfig.cfg 💦 📃 🔣
Файл	Редактирован	не файлов	Строка <b>Справк</b>	a		
Signal	USB N#220					📕, Сохрансять 📕 Вьоход
Nº	Чувств. преобр., В/ед.изм.	Ед. изм.	КУ внешнего усилителя	Опорное знач. для вычисл. дБ	Смещ. пост. соот., ед.изм.	Название канала
1	0.001	мВ	1	0.001	0	Опорный
2	0.001	мВ	1	0.001	0	Сигнал2
3	0.001	мВ	1	0.001	0	Тензодатчик 1
4	0.001	MB	1	0.001	0	Curnan4

Рисунок 1.9 – Вікно «Редагування файлів параметрів»

Після налаштування вимірювальних трактів у програмі Редагування файлів параметрів для збереження інформації натисніть кнопку *Зберегти*. Щоб вийти з програми Редагування файлів параметрів, натисніть кнопку *Вихід*.

## 1.2 Порядок виконання роботи

1 У рамці *Одиниця виміру* (рис. 1.10) встановити одиницю виміру – величина прогину на індикаторі (мм). У цьому прикладі розглядається зміна величини прогину при певному зусиллі, з яким прогинається балка (зразок).

2 У рамці Вимірювання (рис 1.10) встановити прапорці відносні та змінний струм. Прапорець відносний, у даному прикладі, встановлюється для розрахунку відношення рівнів сигналів вимірювального каналу (Тензодатчик 1) до опорного каналу (Опорний). Прапорець змінний струм необхідно встановити, оскільки в даному прикладі запит тензодатчика здійснюється по змінному струму.

диница измерени	ня Измерения
н	относительные
100.0	перененный то
100.0	Сглаживание, ис
Файл калиброви	ки Тензо1.db
Калибровка Количество точе	ex 4
Калибровка Количество точе Н	як 4 💌
Калибровка Количество точе Н 1.000	ек 4 области и на
Калибровка Количество точе Н 1.000 10.000	ек 4 ×
Калибровка Количество точе Н 1.000 100.000 100.000 1000.000	ex 4 ₩ Показания 0.517500 0.519500 0.521500 0.525400
Колибровка Количество точе Н 1.000 100.000 1000.000	ек 4 🔹

Рисунок 1.10 – Вікно «Налаштування параметрів вимірювача»

3 У рамці Калібрувальної таблиці (рис. 1.10) для проведення калібрування тензодатчика необхідно провести наступні дії:

– натиснути кнопку *Калібрування*, при цьому на графічному індикаторі програми *«Тензодатчик»* відображатимуться дані прямих розрахунків відношення сигналів без внесення в них калібрувальних даних; – у списку *Кількість точок* вказати необхідну кількість точок для калібрування тензодатчика. У цьому прикладі вказати п'ять точок (див. табл.1.1 – значення величини прогину балки в мм), після чого в калібрувальній таблиці відобразяться п'ять рядків для введення калібрувальних даних;

 – у лівому стовпці одиниць виміру (у даному випадку назва стовпця буде – мм) для кожної точки калібрування (одній точці належить один рядок) ввести кількісне значення одиниць виміру.

4 Для першої точки в стовпці одиниць виміру вказати 0,1 (0,1 мм), для другої – 0,2 (0,2 мм), для третьої – 0,3 (0,3 мм), для четвертої – 0,5 (0,5 мм), для п'ятої – 1,0 (1,0 мм). Перша калібрувальна точка буде відповідати прогину 0,1 мм, остання – 1,0 мм, це означає, що вимірювання будуть проводитися в діапазоні від 0,1 мм до 1,0 мм.

5 Спочатку необхідно зняти показання тензодатчика без навантаження, при цьому величина прогину балки дорівнює нулю. Для цього необхідно з меню *Генератори* панелі *ZETLab* запустити програму *Генератор сигналів* (рис. 1.11) та з меню *Відображення* запустити програму *Багатоканальний осцилограф* (рис. 1.12).



Рисунок 1.11 – Вікно – «Генератор сигналів»



Рисунок 1.12 – Вікно – «Багатоканальний осцилограф»

6 У програмі *Генератор* сигналів встановити для генерування синусоїдального сигналу частоту 1000 Гц, рівень сигналу 0,5 В, зміщення нуля 0 В та послідовно натиснути кнопки Додати та Включити.

7 У програмі Багатоканальний осцилограф у списку Кількість кнл вибрати 1 канал. У списку Частота вибрати частотний діапазон відображення сигналів 25 кГц. В осцилограмі вибрати Диференціальний вхід 1 (у цьому випадку він названий Опорний).

У програмі Багатоканальний осцилограф має відображатись синусоїда на осцилограмі. У каналі на осцилограмі не має бути спотворення. Після зняття показання U<sub>1</sub> (електрична напруга мВ) тензодатчика без навантаження вийти з програм Багатоканальний осцилограф і Генератор сигналів.

8 Потім за допомогою навантажувального пристрою зробити прогин балки щодо заданої величини прогину, за індикатором годинникового типу. Занести показання програми *Тензодатчик* у стовпець Показання калібрувальної таблиці в той же рядок із встановленою одиницею виміру 0,1 мм – прогину (див. рис. 1.10). Далі необхідно з меню *Генератори* панелі *ZETLab* запустити програму Генератор сигналів (рис. 1.11) та з меню *Відображення* запустити програму *Багатоканальний осцилограф* (рис. 1.12), і зафіксувати нове показання U<sub>2</sub>. Різницю отриманих даних  $\Delta U_i = U_{\kappa i} - U_{ni}$  занести до табл. 1.1.

9 Потім докласти зусилля з величиною прогину 0,2 мм. Занести показання програми *Тензодатчик* у стовпець Показання калібрувальної таблиці в той же рядок із встановленою одиницею виміру 0,2 мм; для прогину 0,3; 0,5; 1,0 мм зробити такі ж операції як і для прогину 0,1 і 0,2 мм.

10 Після заповнення таблиці натисніть кнопку Зберегти файл калібрування, який використовується для збереження параметрів калібрування у файл. Після натискання кнопки відкривається стандартне діалогове вікно для збереження файлу. У цьому вікні потрібно вказати шлях та ім'я файлу. Директорія, куди пропонується зберегти файл калібрування, за замовчуванням – C:\ZetLab\config\. У цьому прикладі ім'я файлу було встановлено – Тензо1.clb. (Додаток А).

11 Далі необхідно відкрити цей калібрувальний файл. Для цього натиснути кнопку Файл калібрування, після чого з'явиться стандартне вікно відкриття файлу. У цьому вікні вказати ім'я калібрування файлу (У цьому прикладі Тензо1.clb). Для введення калібрувальних даних у програму *Тензодавець* натиснути кнопку *Застосувати*.

Програма *Тензодатчик* не проводить екстраполяцію даних, а лише інтерполяцію. Тобто, інтервал відображуваних величин задається в калібрувальній таблиці у вигляді максимальних та мінімальних значень.

Час розрахунку кожного значення тензодатчика становить 0,1 секунд. При використанні більшої кількості тензодатчиків для вимірювання опорного значення використовується один канал АЦП, а решта як вимірювальні канали.

Отримані значення U<sub>i</sub> заносяться до табл. 1.1.

Обчислення залежності f від  $\sigma$  для тарувальної балки виконується за даними рис. 1.13.



Рисунок 1.13 – Обчислення залежності f від для тарувальної балки

Величину напруг у тарувальній балці визначають у програмі Microsoft Excel за формулою (1.6), використовуючи залежність, за якою розраховуються необхідні прогини (*f*) балки

$$f = \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot I}, \qquad (1.6)$$

де f – прогин балки, мм; M – згинальний момент; Н·мм; l – відстань між опорами, мм; E – модуль пружності, Н/мм<sup>2</sup>; I – момент інерції перерізу балки, мм<sup>4</sup>.

Напруги у верхніх волокнах визначаються за формулою

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M \cdot y_{\text{max}}}{I}, \qquad (1.7)$$

де *W* – момент опору перетину балки, мм<sup>3</sup>;

*y<sub>max</sub>* – відстань від нейтральної осі до найвіддаленішого верхнього волокна перерізу балки, мм.

Для заданих розмірів балки прогин можна пов'язати з напругою наступним чином

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6},\tag{1.8}$$

де b – ширина балки, мм;

*h* – висота балки, мм.

Враховуючи те, що b = 30 мм, а h = 6 мм, то момент опору (*W*)

$$W = \frac{30 \cdot 6^2}{6} = 180 \text{Mm}^2.$$

Згинальний момент (див. рис. 1.13) розраховується за формулою

$$M = C \cdot P = 7P, \tag{1.9}$$

де Р – величина навантаження. Тоді величина напруг

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{70 \cdot P}{180} = 0,39 \cdot P.$$

Напруги (згідно схеми на рис. 1.12) визначаються за формулою:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{y}{r} \cdot E. \tag{1.10}$$

Звідки виводимо рівняння для *г* (див. р)

$$r=\frac{y\cdot E}{\sigma}.$$

АВ (згідно схеми на рис. 1.13) визначається за формулою:

$$\overline{AB}^{2} = r^{2} - (r - f)^{2} = 2rf - f^{2} \approx 2rf.$$
 (1.11)

Виводимо рівняння для *f* та підставляємо значення *r* 

$$f = \frac{\overline{AB}^2}{2r} = \frac{10^2}{2} \frac{1}{\left(\frac{y \cdot E}{\sigma}\right)} = \frac{10^2}{2} \frac{\sigma}{y \cdot E} = \frac{10^2 \cdot \sigma}{2 \cdot 0.3 \cdot 2.2 \cdot 10^5} = 0.76 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma.$$
(1.12)

Тоді

$$\sigma = \frac{f}{0.76 \cdot 10^{-3}}.\tag{1.13}$$

Результати розрахунку напруг за формулою (1.6) також заносять до табл. 1.1.

За результатами табл. 1.1 у програмі Microsoft Excel будуємо тарувальний графік залежності  $\sigma = f(\Delta U_i)$  (приклад в Додатку Б).

Отриманий тарувальний графік використовувати в наступних лабораторних робота для визначення натуральних значень напруг.

## 1.3 Зміст звіту

1 Назва роботи.

2 Мета роботи.

3 Робоче завдання.

4 Стисло порядок виконання роботи.

5 Записується: матеріал зразка, його модуль пружності Е, розміри перерізу зразка і площа перерізу, задане навантаження Р і поділ індикатора, що відповідає цьому навантаженню, а також середня розрахункова напруга від навантаження Р.

6 Нижче міститься таблиця із записом результатів (див. табл. 1.1).

7 Тарувальний графік.

8 Висновок

Таблиця 1.1— Залежність показань АЦП від величини напруги в датчику при прогині тарувальної балки

№ 3/П	Величина про- гину по індика- тору, мм	Кількість поді- лів індикатора n	Напруга в та- рувальній балці, МПа	Різниця значень бага- токанального осцилографа ΔU, (мВ)
1	0,1	10		
2	0,2	20		
3	0,3	30		
4	0,5	50		
5	1,0	100		

## 1.4 Запитання для самоперевірки

1 Що являє собою тензодатчик?

2 Основні методи визначення деформацій та напруг у металоконструкціях?

3 У чому полягає метод вимірювання напруг у металоконструкціях за допомогою дротяних тензодатчиків?

4 Що називається базою тензодатчика?

5 Основна характеристика тензодатчика?

6 Принцип роботи тензодатчика?

7 Призначення компенсаційного тензодатчика?

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУГ У НАПУСКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ

Мета роботи – дослідити розподіл напруг по перерізу зварного з'єднання при осьовому розтягуванні зразка.

## 2.1 Короткі теоретичні відомості

При елементарних розрахунках зварних з'єднань на міцність припускають, що у всіх перерізах напруги від навантаження розтягу, розподіляються рівномірно, тобто у всіх волокнах перерізу

$$\sigma = \frac{P}{F} \tag{2.1}$$

Однак місцеві зміни форми та розмірів (товщини) перерізу зварного з'єднання спотворюють силовий потік, приводячи до того, що напруга розподіляється нерівномірно. Частина волокон зазнає напруги вище за середні (розрахункові), тоді як інші волокна виявляються недовантаженими.

Якщо перетин з'єднання несиметричний (центр тяжіння не збігається з віссю докладання сили), то з'являються згинальний момент і напруження від моменту (розтяг з одного боку і стиснення з протилежного).

Непровар (наприклад, у хрестовому з'єднанні кореня одностороннього стикового шва) та дефекти зварювання (підрізи, напливи, випуклість шва з різким переходом до основного металу) вносять додаткове спотворення у силовий потік і є небезпечними гострими концентраторами напруг. Піки напруг у таких концентраторів досягають значної величини. У багатьох випадках у відповідальних конструкціях непровари є неприпустимим дефектом. У цих випадках необхідний контроль (оглядом, магнітним, рентгенівським, ультразвуковим або іншими методами, що виявляють дефекти) та подальше виправлення дефектів.

Виправлення різких переходів та підрізів можливе шляхом зачистки наждачним колом, фрезою та оплавленням вольфрамовим електродом.

У разі непровару кореня необхідно повністю вирубати корінь, підварити з'єднання і знову проконтролювати (наприклад, ультразвуковим методом).

Дослідження розподілу напруги проводимо тензодатчиками опору за методикою, описаною в лабораторній роботі 1, згідно напівмостовій електричній схемі підключення тензодатчиків (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Електрична напівмостова схема підключення тензодатчиків

#### 2.2 Робоче завдання

Визначити за допомогою тензодатчиків величину напруги у характерних точках перерізу зварних з'єднань. Нанести значення істинної напруги на ескіз перерізу. Для перерізів і волокон, де даних достатньо, побудувати епюри розподілу напруг (наприклад див. Рис. 2.5). Порівняти напруги з розрахунковими середніми  $\sigma = P/F$ .

Зробити висновки, оцінити переваги та недоліки досліджених з'єднань, запропонувати заходи виправлення недоліків.

### 2.3 Порядок виконання роботи

1 Записати величину навантаження, для кожного зразка 10000 Н.

2 По черзі підключати датчики зразка до приладу. Спочатку необхідно зняти показання тензодатчика без навантаження U<sub>п</sub> і записати в табл. 2.1.

Для цього необхідно з меню *Генератори* панелі **ZETLab** запустити програму *Генератор* сигналів (рис. 2.2) та з меню *Відображення* запустити програму *Багатоканальний осцилограф* (рис. 2.4).

C	2		104	0.0		Dura
+ Ciergo	uegcz -AM nyc -P∆esn -Шим		- Ям-ЧМ	-Jor4M	- Mem	• вкод • Файл
Паранетра	OHYCONAN	HORO CHINA	Ma			
Hacm	ота, Гц		Уровень, В	C	мещен	ue, B
0010	00.00		0.5000		0.000	00
$\mathbf{O}$			$\odot$		Ó	
1.000					- In-	

Рисунок 2.2 – Вікно – «Генератор сигналів»



Рисунок 2.3 – Вікно – «Багатоканальний осцилограф»

З Після зняття показання U<sub>1</sub> (електрична напруга мВ) тензодатчика без навантаження, вийти з програм *Багатоканальний осцилограф* та *Генератор сигналів*.

4 За допомогою навантажувального пристрою навантажити зразок до заданого навантаження P = 10кН. У рамці *Одиниця виміру* (рис. 2.4) у програмі *Тензодатчик* встановити одиницю виміру – величина навантаження (Н). У рамці *Вимірювання* (рис. 2.4) встановити прапорці відносні та змінний струм. Прапорець відносні, у цьому прикладі, встановлюється для розрахунку відношення рівнів сигналів вимірювального каналу (Тензодатчик 1) до опорного каналу (Опорний). Прапорець змінний струм необхідно встановити, оскільки в даному прикладі запит тензодатчика здійснюється по змінному струму.

5 По черзі підключаючи датчики, зняти показання  $U_{\kappa}$  для всіх датчиків. Для фіксації показань необхідно з меню *Генератори* панелі *ZETLab* запустити програму *Генератор сигналів* (рис. 2.2) і меню *Відображення* запустити програму *Багатоканальний осцилограф* (рис. 2.4), і зафіксувати нове показання  $U_{\kappa}$ . Різницю отриманих даних  $\Delta U_i = U_{ki} - U_{ni}$  занести до табл. 2.1.

6 Зразок негайно розвантажити.

H	изнерени		Изнерення ↓ относительня ↓ относительня ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	
100.0			Сглаживание, но	
]Файл к	алибровк	94	Tercol.db	ſ
Количес	юровка тво точе	K 4		~
Ц Кали Количес Н	юровка тво точе	к 4 Пок	0.517500	~
ЦКали Количес Н	юровка ство точе 1.000 10.000	K 4	0.517500 0.519500	~
Количес	1.000 10.000	K 4	0.517500 0.519500 0.521500	~
Количес	1000.000	к 4	0.517500 0.519500 0.521500 0.525400	~

Рисунок 2.4 – Вікно «Налаштування параметрів вимірювача»

7 Визначити напруги у зразку за тарувальним графіком: якщо модуль пружності матеріалу зразка Е<sub>зр</sub> не відповідає модулю пружності тарувальної балки Е<sub>тар</sub>, для якого побудований графік, то зробити перерахунок напруг і визначити істинні напруги ( $\sigma_{ict}$ ) за формулою (2.2):

$$\sigma_{icm} = \sigma_{map} \cdot \frac{E_{_{3p}}}{E_{_{map}}}$$
(2.2)

8 Нанести отримані напруги поруч із ескізом відповідного зразка 1-3 (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Зразок 1. З'єднання внапуск довгою пластиною фланговими швами. Приклад побудови епюр у відповідних перетинах



Рисунок 2.6 – Зразок 2. З'єднання внапуск короткою пластиною фланговими швами



Рисунок 2.7 – Зразок 3. З'єднання внапуск короткою пластиною з фланговими і лобовими швами.

## 2.4 Прилади та обладнання



Рисунок 2.8 – Установка для розтягування зразка

1 Ескізи з'єднань внапуск (рис. 2.5-2.7).

2 Навантажувальні пристрої.

3 АЦП ZET 210.

4 Підсилювач сигналу ZET 410.

5 Персональний комп'ютер із встановленим програмним забезпеченням «*Тензодатчик*».

6 Штангенциркуль та лінійка для вимірювання перерізів зразків.

7 Тарувальна балка.

## 2.5 Зміст звіту

1 Назва та мета роботи.

2 Робоче завдання.

3 Порядок виконання роботи.

4 Вгорі листа записується: номер зразка, матеріал, його модуль пружності Е, розміри перерізу зразка та площа перерізу, задане навантаження Р, а також середні розрахункові напруги від навантаження Р.

5 Нижче розміщується таблиця із записом результатів (див. табл. 2.1).

6 Величини істинної напруги підписати в цифрах і зобразити у вигляді епюр σ<sub>іст</sub> (відповідно зразка).

7 Тарувальний графік.

8 Наприкінці роботи зробити висновок про переваги та недоліки досліджених типів з'єднань, пояснити причину появи стискаючих напруг у центрі накладок.

TT	Зн	ачення баг	за тарувальним		
номер да-		осцилогра	графіком		
тчика	U <sub>к</sub> , діл.	U <sub>п</sub> , діл.	$\Delta U_i = U_{\kappa i} - U_{\pi i}$ , діл.	$σ_{\text{тар}}, MΠ$ а	$σ_{ict}$ , ΜΠα

Таблиця 2.1 – Розподіл напруг у зразку

## 2.6 Запитання для самоперевірки

1 Що таке концентрація напруг (КН)?

2 Чим пояснюється реальний розподіл напруг у досліджених видах з'єднань?

3 За яких умов КН може впливати на міцність зварного з'єднання?

4 Що таке загладжування випуклості оплавленням?

5 Що таке релаксація напруги?

6 Чому непровар є небезпечним дефектом?

7 Як боротися з непроваром у корені шва?

8 Якими є заходи боротьби з КН у зварних конструкціях?

9 Назвіть причини КН у зварних конструкціях.

10 У чому різниця розрахунку таврового з'єднання з повним і неповним проваром?

11 Як розподіляється напруга по довжині флангових швів?

12 В чому проявляється вплив лобових швів при виконанні комбінованого з'єднання?

### Лабораторна робота 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУГ У ПОПЕРЕЧНИХ ПЕРЕРІЗАХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

Мета роботи – експериментально визначити концентрацію напружень у перерізах зварних з'єднань та зіставити їх із розрахунковими значеннями.

### 3.1 Короткі теоретичні відомості

Руйнування зварних конструкцій дуже часто відбуваються при навантаженнях, що значно менше за ті, для яких вони були спроєктовані. Це підтверджує те, що навіть за відносно невисоких експлуатаційних навантаженнях у деяких зонах зварних конструкцій утворюються значні за величиною напруги, що перевищують середній рівень, розрахований за формулами опору матеріалів. У цьому разі говорять про наявність концентрації напруг, тобто місцеве збільшення рівня напруги в окремих зонах. Величину концентрації напруг прийнято характеризувати теоретичним коефіцієнтом концентрації напруг ( $\alpha_{\sigma}$ ), що дорівнює відношенням найбільшої напруги ( $\sigma_{max}$ ) в даній точці до середньої (номінальної) напруги ( $\sigma_{H}$ )

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{nom}},\tag{3.1}$$

де  $\sigma_{max}$  – найбільша напруга в даній точці, МПа;  $\sigma_{H}$  – середня (номінальна) напруга, що діє в перетині, МПа.

Найчастіше концентрацію напруг викликають концентратори – місцеві різкі зміни геометрії зварного шва, якими є зовнішні та внутрішні дефекти, шви, виконані з конструктивними та технологічними похибками. У стикових з'єднаннях це можуть бути пори, непровари, шлакові та неметалеві включення, зони переходу посилення шва до основного металу, різкі зміни обрису швів. Для оцінки концентрації напруг використовуються формули, отримані в результаті вирішення відповідних завдань теорії пружності.

Концентрація напруг у стиковому зварному з'єднанні з непроваром (рис. 3.1) утворюється поблизу місць переходу випуклості шва до основного металу та в околиці непровару.



Рисунок 3.1 – Зразок з «непроваром» зварного шва

Коефіцієнт концентрації напруг в зоні переходу випуклості шва до основного металу розраховується за формулою

$$\alpha_{\sigma} = \left(\frac{B}{2R}\right)^{0,231},\tag{3.2}$$

де *В* – ширина випуклості шва, мм; *R* – радіус зони переходу, мм.

Для оцінки α<sub>σ</sub> в зоні непровару може бути використана формула

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 2\sqrt{\frac{h}{c}},\tag{3.3}$$

де *h* – висота непровару, мм;

с – ширина непровару, мм.

У зварному стиковому з'єднанні з внутрішнім дефектом еліптичної форми (рис. 3.2) концентрація напруг утворюється поблизу місць переходу випуклості шва до основного металу, а також поблизу дефекту.



Рисунок 3.2 – Зразок стикового з'єднання з дефектом у шві

Коефіцієнт концентрації напруг у зоні переходу шва до основного металу розраховується за формулою (3.2), а поблизу дефекту – за формулою

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 2\frac{b}{c},\tag{3.4}$$

де *b* – вісь еліпсів, розташована перпендикулярно лінії дії зовнішнього навантаження;

с – вісь еліпса, паралельна лінії дії зовнішнього навантаження.

Використання виразів (3.2) – (3.4) у поєднанні з формулою (3.1) дозволяє визначити найбільшу величину напруги поблизу концентратора

$$\sigma_{\max} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{\mu}, \qquad (3.6)$$

де  $\sigma_{\rm H}$  – середні (номінальні) напруги, що визначаються за виразом

$$\sigma_{H} = \frac{P}{s \cdot l}, \qquad (3.7)$$

де *P* – величина прикладеного навантаження, H;

*s* – товщина з'єднання, мм;

*l* – довжина з'єднання, мм.

Дослідження розподілу напруги проводимо тензодатчиками опору за методикою, описаною в лабораторній роботі 1, згідно напівмостової електричної схеми підключення тензодатчиків (рис 3.3).



Рисунок 3.3 – Електрична напівмостова схема підключення тензодатчиків

### 3.2 Робоче завдання

Визначити розрахунковим та експериментальним шляхом коефіцієнти концентрації напруг у характерних точках перерізу. Для цих перерізів побудувати епюри розподілу напруги. Порівняти отримані розрахункові та експериментальні значення.

## 3.3 Прилади та обладнання

Рисунок 3.5 – Лабораторна установка для навантаження зразка

1 Випробувальна установка для статичного навантаження моделей зварних з'єднань (P<sub>max</sub> = 50 кH).

2 Зразок № 1 - модель з'єднання з непроваром в корені шва.

3 Зразок № 2 – модель стикового з'єднання з внутрішнім дефектом.

5 АЦП ZET 210

6 Підсилювач сигналу ZET 410

7 Персональний комп'ютер із встановленим програмним забезпеченням «*Тензодатчик*».

8 Штангенциркуль, металева лінійка.

## 3.4 Порядок виконання роботи

1 Встановити зразок-макет в установку (рис.3.5) для навантаження (розтяг) та підключити датчики до вимірювального приладу.

2 Записати величину навантаження для кожного зразка (10 кН).

3 По черзі підключаючи датчики зразка до приладу, спочатку необхідно зняти показання тензодатчика без навантаження  $U_n$  і записати в табл. 3.1 (див. Додаток В).

Для цього необхідно з меню *Генератори* панелі *ZETLab* запустити програму *Генератор* сигналів та з меню *Відображення* запустити програму *Багатоканальний осцилограф*.

Після зняття показання U<sub>1</sub> (електрична напруга мВ) тензодатчика без навантаження вийти з програм *Багатоканальний осцилограф* та *Генератор сигналів*.

4 За допомогою пристрою навантаження (рис.3.5) навантажити зразок до заданого навантаження P = 10000 H. У рамці Одиниця вимірювання (рис. 3.6) в програмі Тензодатчик встановити одиницю вимірювання – величина навантаження (H). У рамці Вимірювання (рис. 3.6) встановити прапорці відносні та змінний струм. Прапорець відносні, у цьому прикладі, встановлюється для розрахунку відношення рівнів сигналів вимірювального каналу (Тензодатчик 1) до опорного каналу (Опорний). Прапорець змінний струм необхідно встановити, оскільки в даному прикладі запит тензодатчика здійснюється по змінному струму.

н	• относительные
	Перененный то
100.0	Сглаживание, ис
Файл калибровк	H Tercol.db
н	Показання
1.000	0.517500
10.000	0.519500
100.000	0.521500

Рисунок 3.6 – Вікно «Налаштування параметрів вимірювача»

5 По черзі підключаючи датчики, зняти показання  $U_{\kappa}$  для всіх датчиків і записати в табл. 3.1, підрахувати:  $\Delta U_i = U_{ki} - U_{ni}$ , результати показати викладачеві. Далі необхідно з меню *Генератори* панелі *ZETLab* запустити програму *Генератор* сигналів і меню *Відображення* запустити програму *Багатоканальний осцилограф*, і зафіксувати нове показання  $U_{\kappa}$ . Різницю отриманих даних  $\Delta U = U_k - U_{\pi}$  занести до табл. 3.1, результати показати викладачеві.

6 Зразок негайно розвантажити.

7 За графіком тарування визначити величину тарувальних напруг у відповідних точках. Підрахувати дійсну напругу для всіх датчиків за формулою (2.2).

8 Визначити експериментальну величину теоретичного коефіцієнта концентрацій напруг за формулою (3.1).

9 Підрахувати розрахункові значення теоретичного коефіцієнта концентрації напруг у зоні переходу посилення шва до основного металу за формулою (3.2) та внести до табл. 3.1 (див. Додаток В).

10 Занести до таблиці результати розрахунків та експериментів та зробити висновки про порівняльну небезпеку різних концентраторів.

## 3.5 Зміст звіту

1 Назва роботи.

2 Мета роботи.

3 Робоче завдання.

4 Порядок виконання роботи

5 Викреслені ескізи зразків із нанесеними розмірами із зазначенням матеріалу, модуля пружності, задане навантаження.

6 Таблиця із записом результатів.

7 Величини істинних напруг зобразити як епюри, позначивши характерні точки цифрами.

8 Тарувальний графік.

9 Висновки відповідно до робочого завдання та отриманих результатів.

## 3.6 Запитання для самоперевірки

1 Які причини появи концентрації напруг у зварних з'єднаннях?

2 Що таке теоретичний коефіцієнт концентрації напруг? Його фізична суть.

3 Як впливає концентрація напруг на міцність зварних з'єднань?

4 Як можна знизити концентрацію напруг або зовсім усунути?

5 Як впливають різні параметри дефектів на теоретичний коефіцієнт концентрації напруг?

6 Як впливають властивості матеріалу зварного з'єднання на концентрацію напруг?

7 У чому причина розбіжності експериментальних та розрахункових значень теоретичних коефіцієнтів концентрації? Як зменшити цю розбіжність?

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СТИСНЕНИХ СТРИЖНІВ**

Мета роботи – експериментально перевірити вплив гнучкості гілок стійок складеного перерізу на величину критичної сили  $P_{\rm kp}$ , що викликає втрату стійкості.

### 4.1 Короткі теоретичні відомості

Якщо елемент конструкції працює на стиск, то, крім міцності, необхідно забезпечити його стійкість. Леонард Ейлер показав, що для стисненого стрижня, шарнірно закріпленого по кінцях, втрата стійкості настане, якщо стискаюча сила перевищить критичну  $P_{\kappa p}$ 

$$P_{\kappa p} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2}.$$
(4.1)

При цьому напруга стискання

$$\sigma_{\kappa p} = \frac{P_{\kappa p}}{F} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2 \cdot F} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot r^2}{l^2} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(l/r)^2} = \frac{\pi^2}{\lambda^2} \cdot E, \qquad (4.2)$$

де *I* – момент інерції перерізу стисненого елемента, мм<sup>4</sup>;

F – площа перерізу, мм<sup>2</sup>;

Е-модуль пружності матеріалу, МПа;

*l* – геометрична довжина стрижня, мм;

*r* – радіус інерції перерізу, мм;

 $\lambda$  – гнучкість стрижня.

Чим більше гнучкість  $\lambda$ , тим менше  $\sigma_{\kappa p}$  і тим менше повинні бути допустимі напруги стискання  $[\sigma]_{cr}$ . Тому розрахунок довгих стиснутих стрижнів ведеться по граничним напругам, зниженим порівняно з напругами  $[\sigma]_p$ , що допускаються при розтягуванні:

$$[\sigma]_{cm} = \varphi \cdot [\sigma]_p, \qquad (4.3)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт зниження напружень (коефіцієнт поздовжнього вигину).

Величина  $\varphi$  залежить від гнучкості стрижня  $\lambda$  і його матеріалу. Для різних конструкційних матеріалів значення  $\varphi$  наводяться у таблицях. Фізичний сенс коефіцієнтів  $\varphi$  показує, у скільки разів для даного стисненого стрижня напруги  $\sigma_{\kappa p}$ , при яких стрижень втрачає стійкість (несучу здатність), менше межі плинності матеріалу  $\sigma_{\tau}$ .

Якщо поздовжньо стиснутому тонкостінному стрижню (рис. 4.1) до втрати стійкості перетин 1-1 плоский, то після втрати стійкості перетин переміститься в положення 2-2 і буде неплоским.



Рисунок 4.1 – Схема втрати стійкості стрижня

Розглядаючи перетин 1-1 як плоский диск, перехід його в положення 2-2 можна здійснити переміщенням вздовж осі Z (стискання) і вздовж осей X і Y (зсув), поворотом навколо осі Z (кручення) і щодо осей X і Y (вигин). Крім цих деформацій, пов'язаних з переміщенням перерізу як жорсткого диска, виникає деформація, пов'язана з викривленням його поперечного перерізу (депланація), тобто перетин має сім ступенів свободи і після втрати стійкості може виникнути сім видів деформацій, кожному з яких буде відповідати своя система внутрішніх напруг.

До втрати стійкості вся потенційна енергія стрижня – енергія стиснення, після втрати стійкості розподілиться за вказаними семи ступенями, розподіл залежить від геометричних розмірів і форми стрижня:

- для досить довгого масивного стрижня найбільша кількість енергії піде на вигин (Ейлерова форма втрати стійкості);

- для коротших масивних стрижнів значна частина енергії піде на зсув (Ейлерова форма втрати стійкості з урахуванням впливу поперечних сил на вигин стрижня);

- для тонкостінних стрижнів незамкнутого перерізу – на депланацію (7-му форму). Зазвичай депланація викликається стисненим крученням, що призводить до згинально-крутильної форми втрати стійкості. Це пояснюється тим, що жорсткість на кручення відкритих тонкостінних конструкцій (рис. 4.2) дуже мала.



Рисунок 4.2 – Профілі сортаменту з відкритим тонкостінним перетином

Щоб вибрати значення, необхідно визначити

$$\lambda = \frac{l_0}{r},\tag{4.4}$$

де  $l_0 = K \cdot l$  – наведена вільна довжина стрижня;

*К* – коефіцієнт приведення, залежить від геометричної довжини стрижня та характеру закріплення його кінців.

Переріз стрижня може бути суцільним або складовим. Складовим перерізом вважається той, у якого є хоча б одна вільна вісь - вісь, що проходить через переріз, але не перетинає метал. Елементи стрижня складеного перерізу називаються його гілками. На рис. 4.3 наведено приклади суцільних та складових перерізів.



а – суцільні; б – складові Рисунок 4.3 – Види перерізів стояків

Гнучкість стрижня зі складовим перерізом більша, ніж із суцільним, за рахунок гнучкості гілки (рис. 4.4).



*L* – довжина стійки: *L*<sub>b</sub> – довжина гілки Рисунок 4.4 – Схема визначення гнучкості гілки стійки

$$\lambda_{z} = \frac{l_{z}}{r_{z}}, \qquad (4.5)$$

де *l*<sub>2</sub> – довжина гілки, відстань між точками скріплення окремих елементів складеного перерізу;

*r*<sub>2</sub> – радіус інерції (мінімальний) окремої гілки.

Тому для розрахунку стиснутих стрижнів складеного перерізу, у яких гілки з'єднані планками або сухарями, користуються наведеною гнучкістю:

- при одній вільній осі:

$$\lambda_{\mu} = \sqrt{\lambda^2 + \lambda_{e}^2}; \qquad (4.6)$$

- при двох вільних осях:

$$\lambda_{\mu} = \sqrt{\lambda^2 + \lambda_{ex}^2 + \lambda_{ey}^2}.$$
(4.7)

Таким чином, для складового перерізу при згині щодо вільної осі розташування закріплень (планок, сухарів) визначає довжину гілок, а через неї - і величину гнучкості  $\lambda_{H}$ .

У свою чергу, відповідно до формули (4.1), від гнучкості залежить критична сила  $P_{\kappa p}$ , що викликає втрату стійкості стисненого стрижня. Вочевидь, що чим частіше розставлені сухарі (менше  $l_r$ ), тим стійкіший стрижень. У всіх випадках втрата стійкості під дією стискаючої сили відбувається шляхом згинання стрижня відносно тієї осі (вільної або матеріальної), гнучкість якої найбільша.

#### 4.2 Робоче завдання

У цій роботі слід визначити величину Р<sub>кр</sub> для перерізів (рис. 4.5):

- одиночного кутика;
- таврового з 3 сухарями;

- хрестового з 3 сухарями.



Рисунок 4.5– Ескізи досліджуваних перерізів

Робота виконується на пристрої (рис. 4.6). Стрижні з алюмінієвих кутиків 1 встановлюються в прорізі головок 2 і 3. Стискаюча сила від домкрата 4 передається на стрижень через рухому головку 2.

Величина прикладеного зусилля визначається за допомогою динамометра 5. Поперечне переміщення стрижнів при навантаженні їх поздовжнім зусиллям від домкрата визначається індикатором 6, укріпленим на кронштейні.

Перед навантаженням необхідно встановити шкали індикатора на 0. Навантаження проводити ступінчасто, щоразу записувати збільшення прогину стрижня і стискаючої сили. Р<sub>кр</sub> визначається як сила, за якої відхилення пропорційності між прогином і прикладеним навантаженням перевищить 50%. Результати вимірів при ступінчастому навантаженні зводяться до табл. 4.1 і визначається Р<sub>кр</sub> для усіх перерізів.

Розраховуються теоретичні величини:

- для стійки на рис. 4.8, а:

$$\lambda_1 = \frac{l}{r_0}; \qquad \sigma_{\kappa p 1} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda_1^2}; \qquad P_{\kappa p 1} = \sigma_{\kappa p 1} \cdot F_1; \qquad (4.8)$$



1 – досліджувана стійка; 2 та 3 – упори з прорізами в головках; 4 – домкрат; 5 – динамометр; 6 – індикатор динамометра Рисунок 4.6 – Схема і фото лабораторної установки

- для стійки на рис. 4.8, б

$$\lambda_{2} = \frac{l}{r_{x}}; \ \lambda_{b2} = \frac{l_{b}}{r_{y}}; \ \lambda_{\kappa p2} = \sqrt{\lambda_{2}^{2} + \lambda_{b2}}; \ \sigma_{\kappa p2} = \frac{\pi^{2} \cdot E}{\lambda_{\kappa p2}^{2}}; \ P_{\kappa p2} = \sigma_{\kappa p2} \cdot F_{2};$$

$$(4.9)$$

- для стійки на рис. 4.8, в

$$\lambda_{3} = \frac{l}{r_{yo}}; \ \lambda_{\kappa p3} = \sqrt{\lambda_{b2} + \lambda_{b3}}; \ \sigma_{\kappa p3} = \frac{\pi^{2} \cdot E}{\lambda_{\kappa p3}^{2}}; \ P_{\kappa p3} = \sigma_{\kappa p3} \cdot F_{3}; \ (4.10)$$

Таблиця 4.1 – Залежність збільшення прогину стійки від збільшення стискаючої осі домкрата

Навантаження	Перетин стійки	1	2	3	•••		
Прирощення на індикаторі							
динамометра							
Прирощення на індикаторі							
прогину стійки							

Порівнюються експериментальні та теоретичні величини: b = 15 мм; S = 2 мм; F = 56 мм<sup>2</sup>; Z<sub>o</sub> = 4,48 мм; I<sub>x</sub> = I<sub>y</sub> = 1158,7 мм<sup>4</sup>; I<sub>x1</sub> = I<sub>y1</sub> = 2284 мм<sup>4</sup>; Ixy = -678 мм<sup>4</sup>; I<sub>xo</sub> = 1836,7 мм<sup>4</sup>; I<sub>yo</sub> = 480,7 мм<sup>4</sup>; r<sub>x1</sub> = r<sub>y1</sub> = 6,38 мм; r<sub>xo</sub> = 57 мм; r<sub>x</sub> = r<sub>y</sub> = 4,55 мм; ryo = 2,93 мм.

## 4.3 Прилади та обладнання

1 Лабораторна установка

2 Динамометр.

3 Випробувані стрижні.

4 Індикатор годинникового типу

## 4.4 Порядок виконання роботи

1 Плавно навантажуючи стрижень, фіксувати його прогин через кожні 5 поділів індикатора на динамометрі.

2 Дані занести до таблиці 4.1 та обчислити збільшення прогину залежно від збільшення навантаження.

3 Розвантажити стрижень.

4 Для всіх випадків визначити Р<sub>кр</sub> за експериментальними даними.

5 Підрахувати теоретичні значення Р<sub>кр</sub>.

6 Зробити висновки про роботу.

## 4.5 Зміст звіту

1 Назва роботи

2 Мета роботи.

3 Робоче завдання.

4 Порядок виконання роботи.

5 Ескіз пристосування, схеми досліджуваних перерізів та з'єднання гілок стійок.

6 Таблиця розрахунків.

7 Розрахунки.

8 Висновки.

## 4.6 Запитання для самоперевірки

1 Що розуміють під несучою здатністю конструкції?

2 Від чого залежить величина напруг, що допускаються при розрахунку на міцність?

3 Як визначається допустима напруга для стиснутих довгих елементів?

4 Наведіть приклади наскрізних елементів.

5 Що таке втрати загальної стійкості стійки та балки?

6 Напишіть формулу Ейлера. Як залежить окр від міцності матеріалу?

7 Що таке гнучкість стрижня?

8 Назвіть коефіцієнт приведення довжини для різних схем закріплення стійок. Чому він дорівнює у цій роботі?

9 Від чого залежить гнучкість стрижня?

10 У чому різниця наскрізного (складового) та суцільного перерізу стійки?

11 Призначення сполучних планок?

## дослідження напруженого стану посудини тиску

Мета роботи – дослідити розподіл напруг у зварній посудині, що працює під тиском.

## 5.1 Короткі теоретичні відомості

Листові конструкції – це резервуари, посудини, баки, котли, газгольдери, цистерни, хімічні апарати, конструкції металургійного виробництва, трубопроводи, корпуси судин тощо.

Кожен з перерахованих типів має свої конструктивні і технологічні особливості, але всіх їх поєднує загальна вимога – міцне і щільне з'єднання окремих їх елементів. Якнайкраще цій вимозі задовольняють зварні з'єднання. Усі листові конструкції можна розбити на дві основні групи:

- резервуари та інші вироби для зберігання неотруйних та невибухонебезпечних рідин та газів при тиску Р ≤ 0,05 МПа та температурі T = 100 °C;

- посудини, що працюють при більш високих експлуатаційних параметрах (тиск і температура, агресивні та вибухонебезпечні середовища).

Конструкції першої групи виготовляють за загальними правилами проєктування та експлуатації промислових споруд. Конструкції другої групи виготовляють відповідно до вимог інспекції Держпраці.

Листові конструкції умовно ділять на товстостінні та тонкостінні. За умови y/Д > 0,1, де у – товщина стінки; Д – діаметр, конструкцію вважають товстостінною, якщо y/Д < 0,1 її відносять до тонкостінних. В останньому випадку згинальні напруги в стінці практично відсутні, напруги, що розтягують, по товщині стінки розподілені рівномірно.

Напруги в тонкостінній посудині тиску знаходять, розглядаючи рівновагу окремого його елемента, навантаженого по контуру силами, що розтягують. Зв'язок між напругами, тиском та розмірами посудини встановлює формула Лапласа-Лессіга. У загальному випадку для оболонок подвійної кривизни

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{P}{S},\tag{5.1}$$

де  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  – нормальні розтягувальні напруги, що діють у стінці посудини;

Р – тиск у посудині;

 $R_1$  та  $R_2$  – радіуси кривизни оболонки у напрямках дії  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$ .

*S* – товщина стінки посудини.

Стосовно сферичних оболонок ( $R_1 = R_2 = R$ ) або їх частин (сферичні

днища циліндричних посудин, тощо) залежність (5.1) набуває вигляду

$$\sigma = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S}.\tag{5.2}$$

Для циліндричних оболонок:

- напруги, що діють по дотичній, перпендикулярні до утворюючої (в поздовжньому шві циліндричної частини)

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot R_{\mu i \pi}}{S}.$$
 (5.3)

- напруги, що діють уздовж твірної (у поперечному шві)

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S}.\tag{5.4}$$

Як бачимо,  $\sigma_1 = 2 \sigma_2$ , тобто нормальна напруга в поздовжніх перерізах або швах циліндричної обичайки вдвічі більша, ніж у кільцевих.

Напруги у сферичній частині радіусу  $R_0$  з товщиною стінки  $S_0$  складають

$$\sigma_0 = \frac{P \cdot R_0}{2 \cdot S_0}.$$
(5.5)

Експериментальним шляхом напруження у стінці посудини можна визначити методом тензометрування за методикою, описаною у додатку А.

Однак у стінці посудини напруги двовісні, тому в даному випадку для визначення  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  недостатньо просто виміряти деформації в одному напрямку та скористатися законом Гука ( $\sigma = \varepsilon \cdot E$ ). Необхідно виміряти деформації  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  у двох взаємно перпендикулярних напрямках і потім визначити напруги за формулами:

$$\sigma_i = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot \left(\xi_i + \mu \cdot \xi_u\right). \tag{5.6}$$

$$\sigma_u = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot \left(\xi_u + \mu \cdot \xi_i\right). \tag{5.7}$$

Для сферичного днища приймаємо за датчиком № 1

$$\sigma = \frac{\varepsilon \cdot E}{1 - \mu^2},\tag{5.8}$$

де  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  – значення виміряних деформацій;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_i$  та  $\sigma_u$  – напруги в зоні вимірювання;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Схема розподілу напруг наведена на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 – Схема розподілу напруг

При вимірі деформацій приладом ІДЦ-1 відносна деформація

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \Delta n \cdot 10^{-5}, \tag{5.9}$$

де  $\Delta n = n_{\kappa} - n_n$ ;

*n<sub>n</sub>* – показання приладу за відсутності тиску в посудині;

*n*<sub>к</sub> – показання приладу при досліджуваному тиску.

Щоб отримати  $\sigma_i / \sigma_u = 2$ , необхідно забезпечити  $\varepsilon_i / \varepsilon_u = 2$ .

У цій роботі передбачається досліджувати розподіл напруг у циліндричній посудині. Матеріал посудини – сталь марки Ст. 3. На рис. 5.2 наведено схему наклейки датчиків.



Рисунок 5.2 – Схема підключення тензодатчиків

На рис. 5.3 показано гідро схему установки, за допомогою якої у посудині створюється тиск.



Рисунок 5.3 – Гідравлічна схема установки

## 5.2 Робоче завдання

Виміряти деформації у стінці посудини за допомогою тензодатчиків. Розрахувати напруги  $\sigma_i$  та  $\sigma_u$  у точках вимірювання за формулами (5.6) та (5.7). Розрахувати теоретичні значення напруги у стінці за формулами (5.3), (5.4) та (5.5). Порівняти теоретичні та експериментальні значення напруги. Пояснити отримані результати.

## 5.3 Прилади та обладнання

На рис. 5.4 наведена схема установки для дослідження напружень



Рисунок 5.4 – Лабораторна установка для дослідження напружень в стінці посудини тиску

1. Посудина тиску з наклеєними тензодатчиками.

2 Масляний насос.

3 Манометр.

4 АЦП ZET 210.

5 Підсилювач сигналу ZET 410.

6 Персональний комп'ютер із встановленим програмним забезпеченням «Тензодатчик».

7 Датчик тиску «Местехнік НВМ».

8 Вимірювальний інструмент.

## 5.4 Порядок виконання роботи

1 Підключити до АЦП ZET 210 тарувальну балку, провести тарування датчиків, побудувати графік тарувань (див. Додаток Б).

2 Почергово підключаючи датчики до приладу АЦП ZET 210, зняти початкові показання  $U_n$  і записати табл. 5.1.

3 За допомогою ручного насоса створити в резервуарі заданий тиск, контролюючи його за манометром.

4 Здійснити зняття нових показань  $U_{\kappa}$  приладу, для всіх робочих датчиків та записати їх значення до табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати досліджень

Номер	Початкові	Кінцеві	Різниця	Дослідне	Дослідне	Розрахункове	Тарувальне
датчика	показання	показання	показань	значення	значення	значення у,	значення у,
	$U_{\pi}$	$\mathbf{U}_{\kappa}$	$\Delta U$	Е	у, МПа	МПа	МПа

5 Обчислити алгебраїчну різницю показань приладу ΔU для кожного датчика.

6 Скинути тиск у посудині до 0, вимкнути прилади.

7 За дослідними значеннями деформацій ( $\varepsilon_t = \Pi_t \cdot 10^{-5}$ ) обчислити дослідну величину напруги  $\sigma_t$  використовуючи співвідношення (5.6) і (5.7).

8 Розрахувати теоретичні значення напруги за допомогою залежностей (5.3), (5.4) та (5.5), і параметрів посудини (див. рис. 5.2).

9 Використовуючи графік тарування, визначити напруги для кожного датчика.

10 Порівняти значення напруги, отримані експериментально – за формулами (5.6) і (5.7), теоретично – за формулами (5.3), (5.4) і (5.5) та за допомогою тарувального графіка. Пояснити, чому величини напруги, отримані за допомогою тарувального графіка, неприйнятні у разі двовісного напруженого стану.

11 Зробити висновок про особливості напруженого стану судини та окремих її конструктивних елементів, пояснити причину утворення стискаючих напруг уздовж лінії периметра денця.

## 5.5 Зміст звіту

1 Назва роботи.

2 Мета роботи.

3 Робоче завдання.

4 Порядок виконання роботи.

5 Ескіз посудини із зазначенням місць встановлення датчиків.

6 Розрахункові співвідношення обробки результатів. Таблиця результатів вимірів та розрахунків.

7 Розрахунок напруг в циліндричній частині та днищі.

8 Короткий аналіз напруженого стану посудини за дослідними даними та висновки.

## 5.6 Запитання для самоперевірки

1 Напишіть формулу Лапласа-Лессіга в загальному вигляді і стосовно до сферичних і циліндричних посудин.

2 Чому для визначення напруги в стінці посудини необхідні показання двох датчиків, як вони розташовані?

3 Напишіть залежності, що зв'язують у та *Е* для двовісного розтягування.

4 Опишіть методику експериментального визначення напруги в посудині, яка використовується в роботі.

5 Чим пояснити відмінність у співвідношенні напруг, що вимірюються парами датчиків у циліндричній частині та днищі посудини?

6 Чим пояснити зниження напруги в циліндричній частині посудини поблизу днища?

7 Чи розвантажується стиковий шов посудини під односторонньою накладкою?

### ВИЗНАЧЕННЯ ЗУСИЛЬ У СТРИЖНЯХ ФЕРМИ

Мета роботи – виміряти робочі напруги у стрижнях ферми тензодатчиками і зіставити їх із величинами, отриманими теоретично, перевірити основні закономірності, які застосовуються під час розрахунків ферм.

### 6.1 Короткі теоретичні відомості

Для визначення зусиль в елементах зварних ферм при дії нерухомого навантаження використовують кілька методів: вирізання вузлів, перерізів, побудови діаграми зусиль.

При цьому в інженерних розрахунках використовують такі закономірності:

- принцип незалежності дії сил (принцип накладання) - якщо на спорудження діє кілька сил, то зусилля у кожному його елементі дорівнюватиме сумі зусиль, що виникають в них під час дії кожної сили окремо;

- принцип одиничного навантаження - якщо на споруду діє сила P = 1, то в будь-якому елементі зусилля від сили P = 6 дорівнює зусиллю від сили P = 1, збільшеному в "а" разів.

Метод вирізання вузлів

Подумки вирізують окремі вузли ферми, прикладаючи у місцях розрізу невідомі внутрішні зусилля (попередньо вважаючи їх розтягуючими), та згодом визначають їх із рівнянь статики:

$$\sum X = 0; \qquad \sum Y = 0; \qquad (6.1)$$

Спочатку визначають опорні реакції, потім "вирізають" вузол, в якому сходяться лише два стрижні, і визначають невідомі зусилля з рівняння (6.1). Потім послідовно "вирізають" сусідні вузли, у яких сходяться трохи більше 2 невідомих зусиль, і визначають з рівняння (6.1).

#### 6.2 Робоче завдання

Дослідити розподіл напруг у стрижнях ферми за допомогою тензодатчиків, розрахувати теоретичні значення напруг у стрижнях методом побудови діаграми зусиль. Порівняти теоретичні та експериментальні значення напруги, переконатися у справедливості принципу накладання та одиничного навантаження. На рис. 6.1 представлена схема підключення тензодатчиків за мостовою схемою на стрижень ферми. На рис. 6.2 показана схема визначення зусиль у стрижнях ферми.



Рисунок 6.1 – Схема підключення тензодатчиків



а – схема ферми; б – переріз стрижнів Рисунок 6.2 – Визначення зусиль у стрижнях ферми

### 6.3 Прилади та обладнання

1. Макет ферми (рис. 6.3).

2. АЦП ZET 210.

3. Підсилювач сигналу ZET 410.

4. Персональний комп'ютер із встановленим програмним забезпеченням «Тензодатчик».

5. Домкрати навантажування

6. Динамометри



Рисунок 6.3 – Макет ферми з тензодатчиками на стрижнях

## 6.4 Порядок виконання роботи

1 Записати величину навантаження для кожного вузла, що навантажується.

2 Підключити тензостанцію ZET 210 до установки. По черзі підключаючи датчики стрижнів ферми, зняти початкові показання приладу U<sub>п</sub> для всіх датчиків і записати в табл. 6.1.

3 Навантажити ферму у вузлі А до заданого навантаження Р (не перевантажувати).

4 Почергово підключаючи датчики, зняти показання приладу  $U_{\kappa}$ та занести до табл. 6.1. Обчислити  $\Delta U = U_{\kappa} - U_{\pi}.$ 

5 Повторити роботу за пп. 3 та 4 для вузла. Переконатися, що зусилля у стрижнях при навантаженні в вузлі А та вузлі В будуть взаємно симетричні (властивість симетрії конструкції та навантаження).

6 Збільшити навантаження у вузлі В вдвічі, результати показань приладу занести до табл. 6.1. Переконатися, що зусилля у стрижнях збільшаться вдвічі (принцип розрахунку одиничного навантаження).

Номер датчика	1	3	4	5	6	8	10
Номер стрижнів	1-6	1-5	5-6	6-7	7-8	1-9	7-3
Навантаження у вузлі «А» Р, Н:							
$\Delta U$							
σ							
t							
N <sub>t</sub>							
Навантаження у вузлі «В» Р, Н:							
$\Delta U$							
σ							
t							
N_t							
Навантаження у вузлі «А» 2Р, Н:							
$\Delta U$							
σ							
t							
N <sub>t</sub>							
Навантаження у вузлі «А» та «В» 2Р, Н:							
$\Delta U$							
σ							
t							
N <sub>t</sub>							
Методом вирізування вузлів: σ <sub>t</sub>							
N <sub>t</sub>							
Методом перерізів: σ <sub>t</sub>							
N <sub>t</sub>							
Методом побудови діаграми зусиль: σ <sub>t</sub>							
N <sub>t</sub>							

Таблиця 6.1 – Результати експериментального та теоретичного визначення зусиль

7 Навантажити вузли А та В однаковим навантаженням Р, результати показань приладу занести до табл. 6.1. Переконатися, що зусилля у стрижнях у цьому разі рівні сумі зусиль від навантаження в вузлі А та в вузлі В, якщо їх докласти по черзі (принцип накладання).

8 Визначити зусилля у трьох стрижнях (за завданням викладача) методами вирізання вузлів, перерізів та побудови діаграми зусиль. Порівняти результати, отримані експериментально та теоретично, зробити висновки.

## 6.5 Зміст звіту

1 Назва роботи.

2 Мета роботи.

3 Робоче завдання.

4 Порядок виконання роботи.

5 Ескіз ферми та навантаження.

6 Таблиця експериментальних даних.

7 Розрахунки зусиль у стрижнях ферми, діаграма зусиль.

8 Висновки.

## 6.6 Запитання для самоперевірки

1 Що називається шарнірною фермою та механізмом?

2 У чому основна різниця між шарнірною фермою та механізмом?

3 Якщо виконано умова t = 2k - 3, то це значить, що система є геометрично незмінною?

4 Як зміниться геометрична незмінність при додаванні додаткових стрижнів?

5 Як пишеться умова статичної визначення шарнірної ферми в загальному випадку?

6 У чому полягає аналогія між розподілом зусиль у поясах ферми та балки із суцільною стінкою?

7 Який знак має зусилля у верхніх поясах консольної ферми під час її навантаження вертикальними силами?

8 Як визначаються зусилля у стрижнях ферми під час побудови діаграми Кремони?

9 Як визначається перетин стиснутого стрижня?

10 Як визначається за діаграмою Кремони величина зусилля ферми?

11 Що розуміють під прогином ферми?

### ЛІТЕРАТУРА

1 Чертов І. М. Зварні конструкції : підручник / І. М. Чертов. – К. : Арістей, 2006. – 376 с.

2 Гринь О. Г. Проектування зварних конструкцій : для практичних занять та самостійної роботи студентів спеціальності «Прикладна механіка» усіх форм навчання / О. Г. Гринь, М. В. Агєєва. – Краматорськ : ДДМА, 2019. – 100 с. – ISBN 978-966-379-881-3.

3 Гринь О. Г. Проектування функціональних зварних конструкцій : навчальний посібник / О. Г. Гринь, Г. М. Кущій, Д. А. Волков – Краматорськ : ДДМА, 2021. – 166 с. – ISBN 978-617-7889-37-2.

4 Серенко А. Н. Расчет сварных соединений и конструкций / А. Н. Серенко, М. Н. Крумбольдт, К. В. Багрянский // Примеры и задачи. – Киев : Вища школа, 1977. – 335 с.

# додаток а

# Значення показання АЦП – ZET 210

🖾 1 - Блокнот										
Файл Правка Форна	т Вид Справка									
oscilloscope Data File Experiment Time : Number of Channels : 6 Kadrs Number : 3413 Input Rate In kHz: 0.390625 Input Time In Sec: 8.737280 Decimation: 1 Data as Time Sequence										
Ch 1 -0.01099 -0.01001 -0.01097 -0.01097 -0.01097 -0.01097 -0.01099 -0.0109 -0.0109 -0.0109 -0.0109 -0.0109 -0.0109 -0.0109 -0.0109	$\begin{array}{c} Ch & 2\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01236\\ 0.01236\\ 0.01236\\ 0.01236\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.01236\\ 0.01234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.00234\\ 0.0023$	$\begin{array}{c} {\rm Ch} & 3\\ 0.09096\\ 0.09096\\ 0.09098\\ 0.09098\\ 0.09098\\ 0.09098\\ 0.09098\\ 0.09094\\ 0.09096\\ 0.09094\\ 0.09096\\ 0.09096\\ 0.09096\\ 0.09094\\ 0.09096\\ 0.09096\\ 0.09094\\ 0.09096\\ 0.$	Ch 4 -0.005883 -0.00588 -0.00588 -0.00588 -0.005883 -0.	$\begin{array}{c} {\rm Ch} & 5\\ 0& 00026\\ 0& 00029\\ 0& 00031\\ 0& 00033\\ 0& 00033\\ 0& 00029\\ 0& 00029\\ 0& 00029\\ 0& 00029\\ 0& 00029\\ 0& 00033\\ 0& 00035\\ 0& 00035\\ 0& 00035\\ 0& 00035\\ 0& 00035\\ 0& 00033\\ 0& 00029\\ 0& 0& 00029\\ 0& 0& 0& 0& 0\\ 0& 0& 0& 0& 0\\ 0& 0& 0& 0& 0\\ 0& 0& 0& 0& 0\\ 0& 0& 0& 0& 0\\ 0& 0& 0& 0& 0\\ 0& 0& 0& 0& 0\\ 0& 0& 0& 0& 0\\ 0& 0& 0& 0& 0\\ 0& 0& 0& $	Ch 6 -0.00060 -0.00060 -0.00060 -0.00062 -0.00062 -0.00062 -0.00062 -0.00062 -0.00060					

# Додаток Б



# Приклад тарувального графіка

# додаток в

Номер датчика	Значення багатоканального осцилографа U <sub>i</sub> , (мВ)		Напруження, МПа		Коефіцієнт концентрації Кт						
	Uк, поділ	U <sub>п</sub> , поділ	ΔU=U <sub>к</sub> -U <sub>п</sub> , поділ	Експер.	Розрах.	I Зразок		II Зразок		III Зразок	
						Експер.	Розрах.	Експер.	Розрах.	Експер.	Розрах.
Зразок1											
1											
2											
3											
i											
Зразок 2											
1											
2											
i											
Зразок3											
1											
2											
i											

# Таблиця 3.1 - Результати визначення концентрації напруг

Навчальне видання

# ПРОЄКТУВАННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

## Методичні вказівки

до лабораторних робіт

для студентів спеціальності 13 «Прикладна механіка» за освітніми програмами «Прикладна механіка» і «Зварювання і споріднені процеси та нанотехнології»

Укладачі ГРИНЬ Олександр Григорович, ТРЕМБАЧ Ілля Олександрович, КУЩІЙ Ганна Михайлівна

> За авторською редакцією Корегування і комп'ютерне верстання І.І.Дьякова

22/2022. Формат 60 х 84/16. Ум. друк. арк. 3,72. Обл.-вид. арк. 1,42. Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготівник Донбаська державна машинобудівна академія 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1633 від 24.12.2003