

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ. ЧАСТИНА 2.  
НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ  
У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ І КОНСТРУКЦІЯХ**

**РОБОЧИЙ ЗОШИТ  
ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ**

**Навчальний посібник**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітньою програмою  
«Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»  
спеціальності 131 «Прикладна механіка»

Укладачі: О. В. Прохоренко, А. О. Перепічай

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

2022

Рецензент: *Коваль В.В., канд. техн. наук, ст. викладач  
кафедри динаміки і міцності машин  
та опору матеріалів НН ММІ КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Відповідальний редактор: *Квасницький В.В., докт. техн. наук, проф.*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 3 від 01.12.2022 р.)  
за поданням Вченої ради Навчально-наукового інституту  
матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона  
(протокол № 10/22 від 28.11.2022 р.)*

Навчальний посібник «Механіка матеріалів і конструкцій. Частина 2. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях». Робочий зошит до лабораторного практикуму» використовується під час проведення аудиторних лабораторних занять. У робочому зошиті представлені методика проведення лабораторних робіт, а також правила охорони праці і техніка безпеки. Для кожного заняття у робочому зошиті представлені такі структурні елементи: тема, мета, завдання роботи, перелік необхідних приладів і обладнання, тип зразків, порядок виконання робіт, послідовність обробки результатів вимірювань, а також передбачено місце для таблиць з даними експериментів, рисунків, графічних залежностей, математичних розрахунків, формулювання висновків і відповідей на контрольні запитання за темою роботи.

Посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» за освітньою програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій».

Реєстр. № НП 22/23-287. Обсяг 2,55 авт. арк.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА .....	4
ПРАВИЛА ОХОРОНИ ПРАЦІ І ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ .....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 ПРИЛАДИ І МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ І НАПРУЖЕНЬ .....	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ВЛАСНІ НАПРУЖЕННЯ І ДЕФОРМАЦІЇ У МОДЕЛІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ - ПЛАСТИНИ З ПРОРІЗАМИ .....	10
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ У СТИКОВОМУ З'ЄДНАННІ .....	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ДЕФОРМАЦІЇ І НАПРУЖЕННЯ ПІД ЧАС НАГРІВАННЯ ПОЗДОВЖНЬОЇ КРАЙКИ ПЛАСТИНИ .....	21
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 ПОЗДОВЖНЄ І ПОПЕРЕЧНЕ СКОРОЧЕННЯ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ В СТИК .....	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 КУТОВІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ .....	35
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7 ВПЛИВ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ .....	41
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8 ЗМЕНШЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ ПІД ЧАС ВІДПУСКУ .....	47
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	54
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	55
ДОДАТОК А ПРИКЛАД ТИТУЛЬНОГО АРКУША ЗВІТУ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ .....	56

## ПЕРЕДМОВА

Робочий зошит до лабораторного практикуму є необхідним доповненням до навчального посібника «Механіка матеріалів і конструкцій. Частина 2. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях. Лабораторний практикум» і призначений для студентів денної і заочної форм навчання за спеціальністю 131 Прикладна механіка за освітньою програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій».

Робочий зошит використовують під час аудиторних лабораторних занять для виконання математичних розрахунків, підготовки таблиць з даними вимірювань, рисунків і графіків, передбачених темою заняття.

Робочий зошит розроблений таким чином, щоб студенти під час занять поступово оволодівали методикою проведення експерименту, вчилися виконувати, обробляти і аналізувати результати вимірювань, отримували практичні навички роботи з устаткуванням і вимірювальними приладами.

Використання студентами робочого зошиту на заняттях дозволить наочно представити результати експериментів; розвине вміння зіставляти і аналізувати факти, формулювати чіткі висновки, сприятиме кращому засвоєнню теоретичного матеріалу і формуванню критичного мислення.

Роздрукований робочий зошит дозволить студенту оптимізувати роботу студентів в аудиторії, забезпечить раціональне використання навчального часу під час підготовки протоколів для виконання лабораторних робіт і забезпечить концентрацію уваги на сутності виконуваної роботи.

## ПРАВИЛА ОХОРОНИ ПРАЦІ І ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1. До виконання лабораторних робіт допускаються студенти, які пройшли інструктаж з правил безпечної експлуатації лабораторного обладнання, електричних приладів, а також інструктаж з техніки безпеки з відповідною реєстрацією в журналі.
2. Виконання лабораторних робіт дозволяється тільки зі справними пристроями, приладами та інструментом, на справному обладнанні з наявними захисними щитками та кожухами і в присутності викладача.
3. Під час виконання робіт в лабораторії слід врахувати наступні небезпечні фактори: ураження електричним струмом; ураження очей гострими частинами механічних приладів для вимірювання деформацій; травми від рухомих частин апаратів та окремих механізмів, падіння деталей та інструменту; пожежу.
4. Перед початком виконання робіт перевірити наявність та справність заземлення електричного обладнання та блокуючих пристроїв.
5. У випадку виявлення значних пошкоджень електричного обладнання робота на ньому забороняється. Приступати до роботи можливо тільки після ремонту та усунення несправностей.
6. У випадку появи небезпеки аварії чи травмування необхідно негайно припинити роботу і відключити установку від електричної мережі, надати першу допомогу потерпілому, звернутися в медпункт або викликати швидку допомогу і повідомити про нещасний випадок завідувача кафедри.

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1**  
**ПРИЛАДИ І МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ**  
**ДЕФОРМАЦІЙ І НАПРУЖЕНЬ**

**Мета роботи:** Оволодіти практичними навичками роботи з механічним деформометром та вивчити методикау визначення деформації і напружень.

**Прилади та обладнання:**

- деформометр з базою 25-100 мм та індикатором годинникового типу і ціною поділки 0,01 мм;
- ручна випробувальна машина Р10;
- устаткування для зварювання.

**Тип зразків:**

- контрольна пластинка - штаба розміром 15x15x150 мм;
- пластина зі сталі класу С235 з підготовленими базами для вимірювань;

**Завдання роботи:**

- вивчити конструкцію деформометра;
- навчитись виконувати вимірювання для обчислення деформацій;
- навчитись обробляти і оформляти результати експерименту.

**ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Підписати на схемі (рис.1.1) конструктивні елементи деформометра.
2. За допомогою контрольної пластинки виставити нуль на індикаторі деформометра.
3. Деформометром виконати заміри баз на зразку до зварювання  $l'$ .  
Результати вимірювань баз записати у таблицю 1.1.
4. Виконати зварювання зразка.
5. Виконати заміри баз на зразку після повного охолодження зразка  $l''$  і результати занести в таблицю 1.1.
6. Проаналізувати отримані результати і сформулювати висновки.

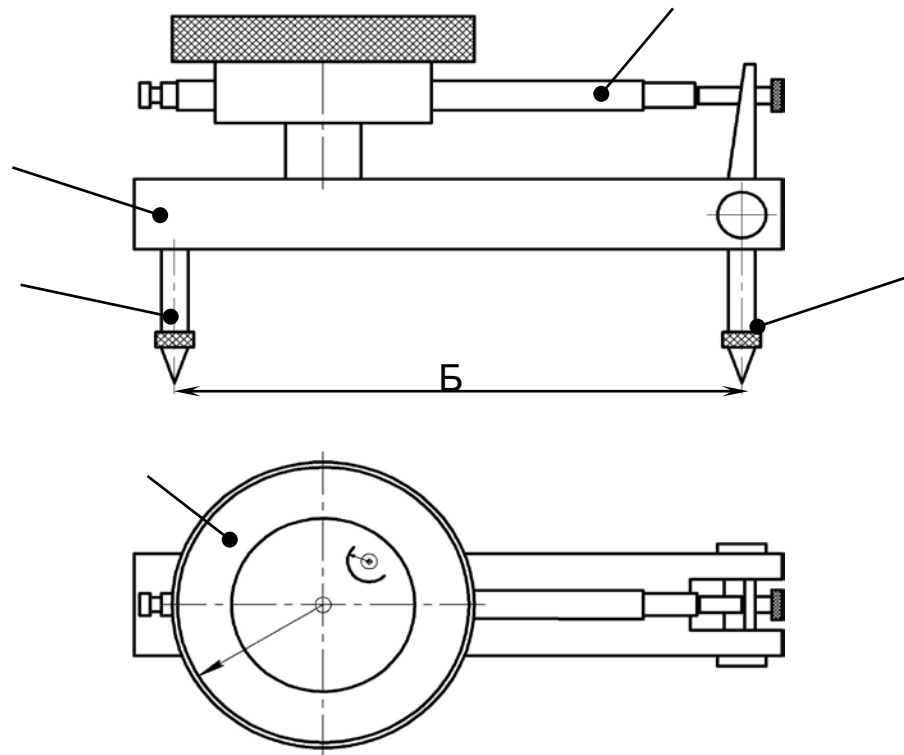


Рис. 1.1. Схема будови деформометра з індикаторною головкою годинникового типу

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Обчислити [1] зміну довжини бази, як різницю між показами деформометра «Після зварювання» і «До зварювання» у поділках  $\Delta l = l'' - l'$  і перевести у міліметри шляхом помноження на ціну поділки деформометра:  $\Delta l \times 10^{-2}$

2. Результати обчислень занести в таблицю 1.1.

3. Обчислити [1] величину пружних деформацій за формулою:  $\varepsilon = \frac{\Delta l \times 10^{-2}}{Б}$ . Результати обчислень занести в таблицю 1.1.

4. Обчислити величину напружень з використанням закону Гука [1] для одновісного напруженого стану  $\sigma = \varepsilon E$ . Результати обчислень занести в таблицю 1.1. У представленій формулі  $\sigma$  - величина напружень у МПа,  $\varepsilon$  - відносна пружна деформація,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа величина модуля пружності першого роду (модуль Юнга) для сталі класу С235.



## ВІДПОВІДІ НА КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Перерахуйте конструктивні елементи механічного деформометра:

2. Поясніть принцип роботи механічного деформометра.

3. Як правильно вибрати розмір «бази вимірювань» деформометра?

4. Як визначити зміну довжини бази вимірювань?

5. Як визначити відносну деформацію?

6. Що таке «знак приладу» і як його визначати?

7. Від чого залежить точність вимірювань індикаторного деформометра?

8. Поясніть призначення «контрольної пластинки» під час вимірювань.

9. Як визначити величину залишкових напружень, якщо відомі дані вимірювань деформометром?

10. Поясніть поняття «градієнт напружень».

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### ВЛАСНІ НАПРУЖЕННЯ І ДЕФОРМАЦІЇ У МОДЕЛІ ЗВАРНОГО

### З'ЄДНАННЯ - ПЛАСТИНИ З ПРОРІЗАМИ

**Мета роботи:** Дослідити механізм утворення власних залишкових напружень у зварних з'єднаннях під час нерівномірного нагрівання в процесі зварювання.

**Прилади та обладнання:**

- деформометр з голівкою годинникового типу і ціною поділки 0,01 мм з базою вимірювання 25...100 мм;
- штангенциркуль з ціною поділки 0,05 мм;
- ручний газовий пальник;
- секундомір;
- пірометр або термоолівець для реєстрації температури нагріву

**Тип зразків (на вибір викладача):**

- зразок пластини з прорізами з підготовленими базами для вимірювань розміром \_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_ мм з двома фрезерованими поздовжніми прорізами на відстані 20 мм від центру на  $2/3$  довжини зразка (випадок  $F_{сер} < F_{кр}$ )
- зразок пластини з прорізами з підготовленими базами для вимірювань розміром \_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_ з двома фрезерованими поздовжніми прорізами на відстані 40 мм від центру на  $2/3$  довжини зразка (випадок  $F_{сер} > F_{кр}$ )

**Завдання роботи:**

- виконати аналіз розвитку температурної, пружної, пластичної і повної деформацій у середній і крайніх смугах пластини під час нагрівання і охолодження середньої смуги для співвідношень  $F_{сер} < F_{кр}$  та  $F_{сер} > F_{кр}$ ;
- вивчити розподіл поздовжніх залишкових деформацій і напружень у поперечному перерізі пластини з прорізами.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Накреслити у вибраному масштабі (рис. 2.1) досліджуваний зразок.

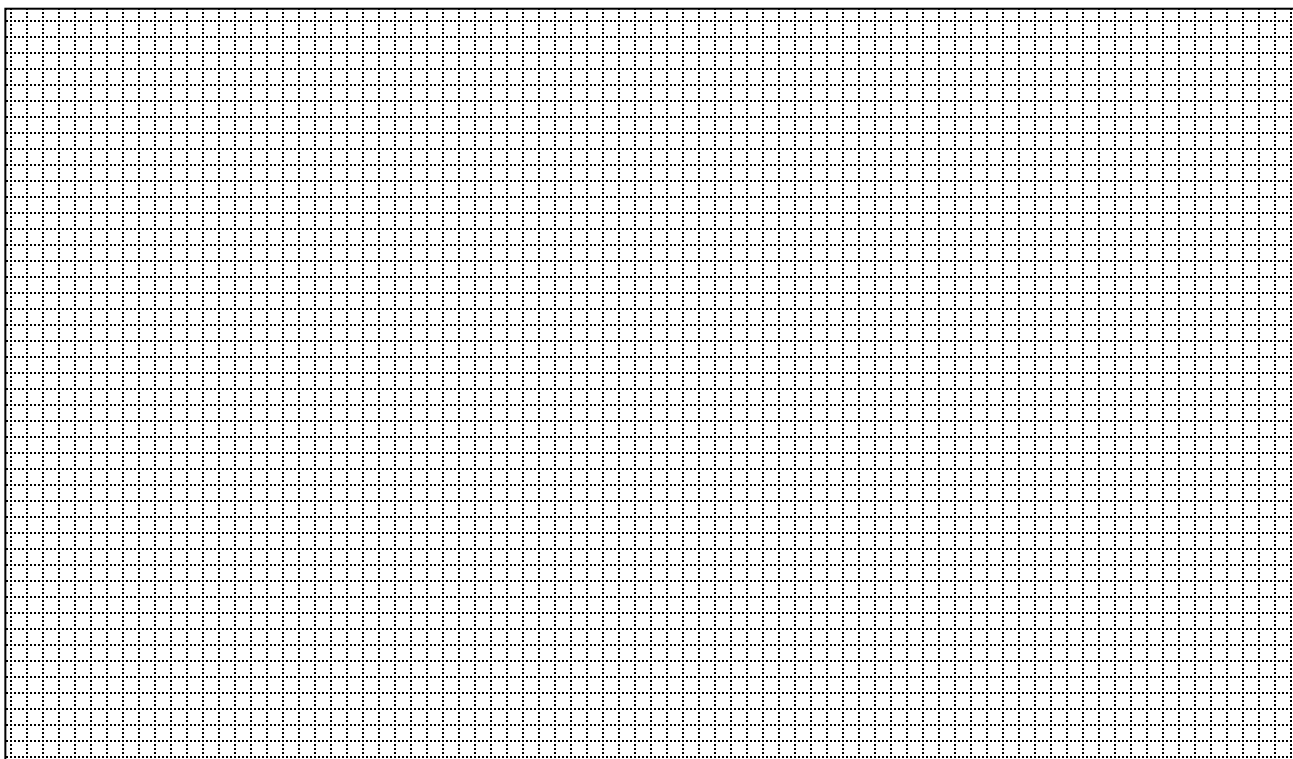


Рис. 2.1. Пластина з прорізами

2. Визначити площі поперечних перерізів: всієї пластини  $F = \text{_____}$  мм<sup>2</sup>, середньої  $F_{\text{сер}} = \text{_____}$  мм<sup>2</sup> і крайніх  $F_{\text{кр}} = \text{_____}$  мм<sup>2</sup> смуг.

3. За допомогою деформометра виконати заміри баз на крайніх смугах пластини. Результати вимірювань баз записати у таблицю 2.1.

4. Виконати нагрівання середньої смуги таким чином, щоб була виконана умова  $T_{\text{сер}} - T_{\text{кр}} > 600$  °С.

5. Виконати виміри баз на крайніх смугах пластини після повного охолодження і результати занести в таблицю 2.1.

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. За формулою  $\sigma = \varepsilon_{\text{пр}} E$  [1] за результатами вимірювань деформацій обчислити залишкові поздовжні напруження в крайніх смугах пластини  $\sigma_{\text{кр}}^{\text{екс}}$  і записати в таблицю 2.1. Усереднити  $\sigma_{\text{кр}}^{\text{екс}}$  по ширині крайніх смуг.

Табл.2.1. Результати експерименту

Етапи замірів та обчислень	Номер бази															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
До нагрівання середньої смуги $l_1$ , поділки																
Після нагрівання середньої смуги $l_2$ , поділки																
Зміна довжини бази $\Delta l = l_2 - l_1$ , мм																
Відносна деформація $\varepsilon_{пр}^{кр} = \Delta l / B$																
Напруження $\sigma_{кр}^{екс} = \varepsilon_{пр}^{кр} \cdot E$ , МПа																

2. Визначити теоретично  $\sigma_{кр}^{теор}$  за формулою [2]:  $\sigma_{кр}^{теор} = \epsilon_{пр.кр} E = -\epsilon_s \frac{F_{сер}}{F_{кр}} E$

$$\sigma_{кр}^{теор} = \epsilon_{пр.кр} E = -\epsilon_s \frac{F_{сер}}{F_{кр}} E = \text{_____ МПа},$$

де  $\epsilon_s = \text{___} 10^{-4}$  – границя текучості для деформацій матеріалу зразка,  
 $E = \text{___} 10^5$  МПа – модуль Юнга матеріалу зразка.

3. Порівняти  $\sigma_{кр}^{екс}$  та  $\sigma_{кр}^{теор}$ . Зробити необхідні висновки.

## ВИСНОВКИ

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## ВІДПОВІДІ НА КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. З яких доданків складається повна деформація?

---

---

2. Що є причиною утворення залишкових поздовжніх напружень у смугах пластини з прорізами?

---

---

3. Чому в середній смузі пластини під час її нагрівання утворюються напруження стиску?

---

---

---

4. Проаналізуйте діаграму  $\epsilon - T$  для пластини з прорізами і  $F_{\text{сер}} < F_{\text{кр}}$  з точки зору особливостей формування пружних деформацій і назвіть характерні відмінності від діаграми з  $F_{\text{сер}} > F_{\text{кр}}$ .

5. Проаналізуйте діаграму  $\epsilon - T$  для пластини з прорізами і  $F_{\text{сер}} > F_{\text{кр}}$  з точки зору особливостей формування пластичних деформацій і назвіть характерні відмінності від діаграми для  $F_{\text{сер}} < F_{\text{кр}}$ .

6. Що означає виконання гіпотези плоских перерізів для повних деформацій у смугах пластини?

7. Чи впливає на формування залишкових напружень пластична деформація скорочення в середній смузі, яка протікає за  $T > 600^\circ\text{C}$ ?

8. Чи залежить величина залишкових напружень у смугах пластини від властивостей матеріалу ( $\sigma_s$ ) і чому?

9. З яких доданків складається  $\epsilon_{\text{пл.сер}}$  в інтервалі температур  $500-600^\circ\text{C}$  для пластини з прорізами якщо  $F_{\text{сер}} < F_{\text{кр}}$ ?

10. Що відбудеться із середньою і крайніми смугами пластини, у якій  $F_{\text{сер}} < F_{\text{кр}}$ , якщо після охолодження відрізати ліву або праву перемичку?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ У СТИКОВОМУ З'ЄДНАННІ

**Мета роботи:** Дослідження основних закономірностей розподілу залишкових зварювальних напружень у характерних перерізах однопрохідного зварного стикового з'єднання.

**Прилади та обладнання:**

- деформометр з базою 25..100 мм та індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм;
- лінійка металева (з ціною поділки 1 мм);
- міліметровий папір.

**Тип зразків:**

- відфрезероване однопрохідне стикове зварне з'єднання зі сталі класу С235 розмірами \_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_ мм з підготовленими базами \_\_\_\_\_ мм;
- відфрезерована пластина-свідок зі сталі класу С235 розмірами \_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_ мм з перенесеними зі зварного з'єднання базами \_\_\_\_\_ мм.

**Завдання роботи:**

- вивчити розподіл поздовжніх залишкових напружень по ширині зварного з'єднання в середньому поперечному перерізі;
- дослідити розподілу поперечних залишкових напружень вздовж зварного з'єднання в поздовжньому перерізі по осі шва;
- ознайомитись з характером розподілу дотичних напружень у характерних перерізах.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Накреслити досліджуваний зразок і показати на рис. 3.1 схему розташування вимірювальних баз.

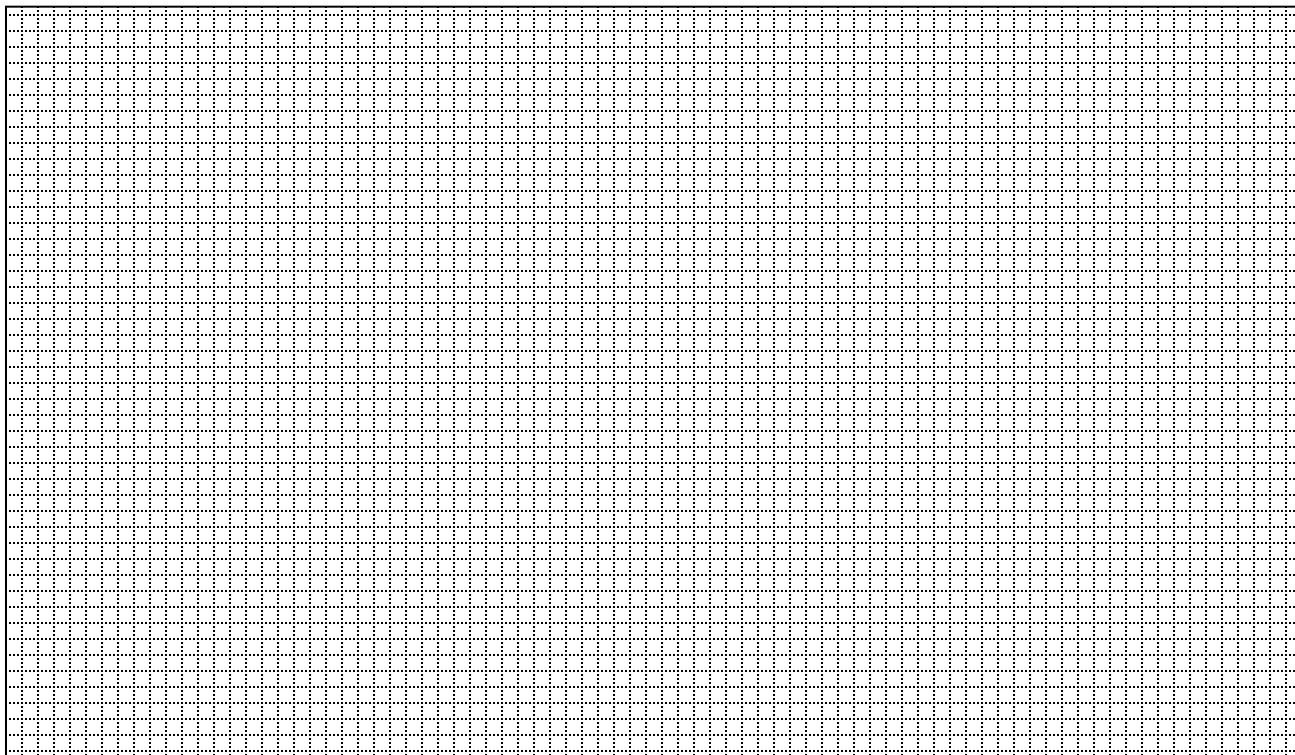


Рис. 3.1. Схема розташування вимірювальних баз на зразку

2. Виконати заміри вимірювальних баз на зразку-свідку (дані «після зварювання» або, що теж саме, «до розрізки»). Результати записати у таблицю 3.1.
3. Виконати заміри вимірювальних баз на зварному зразку (дані «після розрізки»). Результати записати у таблицю 3.1.

*Увага: для підвищення точності виконання вимірів, встановлення деформометра на кожен базу вимірювання необхідно виконувати не менше трьох разів.*

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. За результатами вимірювань розрахувати [1] пружні деформації  $\epsilon_x$  і  $\epsilon_y$  і записати результати в таблицю 3.1.

$$\epsilon_x = \frac{l_x'' - l_x'}{B}, \quad \epsilon_y = \frac{l_y'' - l_y'}{B};$$

де  $l'_x, l'_y$ - дані заміру баз на зразку-свідку;  $l''_x, l''_y$ - дані заміру баз на зварному зразку після розрізки; Б - база вимірювання.

2. Розрахувати залишкові напруження згідно закону Гука [1] для двовісного напруженого стану  $\sigma_x, \sigma_y$  і записати результати в таблицю 3.1.

$$\sigma_x = \frac{E \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y)}{1 - \nu^2}, \quad \sigma_y = \frac{E \cdot (\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x)}{1 - \nu^2}.$$

Тут для сталі класу С235 прийняти  $E=2 \cdot 10^5$  МПа - модуль пружності, МПа;  $\nu=0.33$  - коефіцієнт Пуассона;  $\varepsilon_x$  і  $\varepsilon_y$  - відносні пружні деформації вздовж осей  $x$  та  $y$ , які були обчислені вище.

3. Побудувати епюри (рис. 3.2) поздовжніх напружень  $\sigma_x$  у середньому поперечному перерізі зразка і поперечних напружень  $\sigma_y$  у поздовжньому перерізі вздовж осі зварного шва. Виконати аналіз отриманих епюр нормальних напружень  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  і зробити висновки.

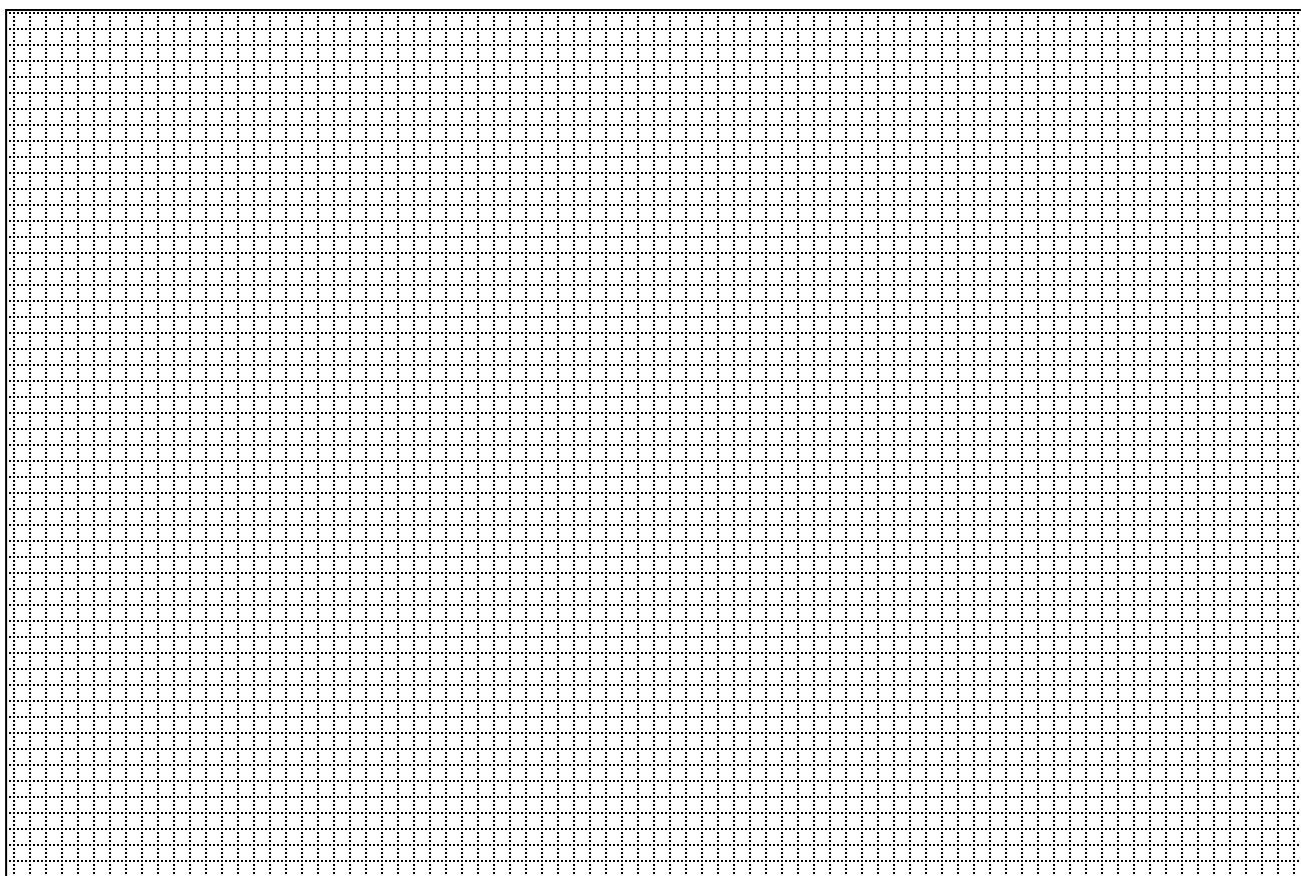


Рис. 3.2. Епюри поздовжніх і поперечних залишкових зварювальних напружень у характерних перерізах стикового зварного з'єднання

Табл.3.1. Результати експерименту

Вимірювальні бази			А		Б		В		Г		Д	
Напрямок вимірювань			х	у	х	у	х	у	х	у	х	у
Поздовжній переріз $y=0$	Етапи вимірювань	Після зварювання										
		Після розрізки										
		Зміна довжини вимірювальної бази										
		Відносна деформація										
		Напруження, МПа										
Вимірювальні бази			Е		Ж		В		З		И	
Напрямок вимірювань			х	у	х	у	х	у	х	у	х	у
Поперечний переріз $x=0$	Етапи вимірювань	Після зварювання										
		Після розрізки										
		Зміна довжини вимірювальної бази										
		Відносна деформація										
		Напруження, МПа										



4. Запишіть формули для визначення напружень через деформації (закон Гука) для плоского напруженого стану.

5. Запишіть формули для визначення відносних пружних деформацій.

6. Навіщо виконувати розрізку зварного з'єднання для визначення в ньому залишкових напружень. Чи завжди необхідно робити розрізку?

7. Як залежить точність визначення залишкових напружень експериментальним шляхом від розміру бази виміру?

8. У яких випадках, для визначення залишкових напружень, можна використовувати великі бази виміру?

9. Якої максимальної величини досягають поздовжні залишкові напруження в зоні залишкових пластичних деформацій скорочення з'єднання?

10. Запишіть умову рівноваги поздовжніх внутрішніх зусиль у зварному з'єднанні в залишковому стані.

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4**  
**ДЕФОРМАЦІЇ І НАПРУЖЕННЯ ПІД ЧАС НАГРІВАННЯ**  
**ПОЗДОВЖНЬОЇ КРАЙКИ ПЛАСТИНИ**

**Мета роботи:** Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) в пластині (смузі) під час нагрівання крайки (наплавленні валика на крайку).

**Прилади та обладнання:**

- контрольна пластинка;
- деформометр з базою 25...100 мм та індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм;
- стенд для вимірювання прогину;
- лінійка металева (з ціною поділки 1 мм)

**Тип зразків:**

- пластина зі сталі класу С235 розмірами \_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_ мм з підготовленими базами \_\_\_\_\_ мм для вимірювань на нижньому торці.

**Завдання роботи:**

- визначити експериментальним шляхом залишковий прогин поздовжньої вісі пластини;
- визначити теоретичним і розрахунково-експериментальним способами ширину зони пластичних деформацій скорочення і порівняти отримані результати;
- побудувати епюру поздовжніх сумарних залишкових напружень;
- визначити величину усадочного зусилля.

**ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Виміряти розміри (довжину, ширину, товщину) пластини-зразка і накреслити у масштабі (рис. 4.1). Показати розташування вимірювальних баз.

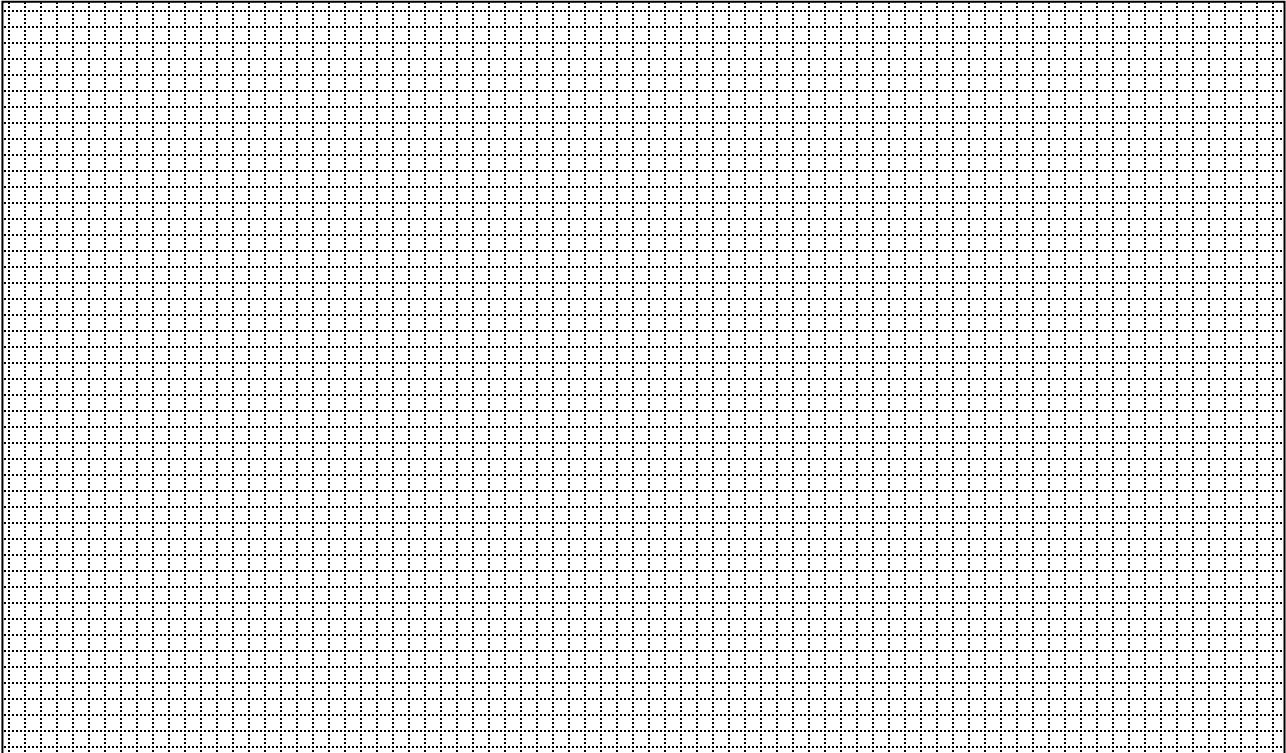


Рис. 4.1. Вид загальний пластини - зразка

2. Виконати заміри деформометром вимірювальної бази на не нагрітій крайці до наплавлення валика на поздовжню крайку пластини і перевести у «мм»:

$$l' = \text{_____ мм.}$$

3. Встановити пластину в експериментальний стенд. Виставити шкалу індикатора для вимірювання прогину на нуль.

Виконати наплавлення валика на крайку і після повного охолодження виміряти величину залишкового прогину  $f^{\text{експ}} = \text{_____ мм.}$

У процесі наплавлення зареєструвати значення зварювального струму, напругу на дузі, швидкість зварювання. Коефіцієнт корисної дії взяти відповідно до способу зварювання.

$$I = \text{_____ А}; U = \text{_____ В}; \eta = \text{_____}; v_{\text{зв}} = \text{_____ мм / сек};$$

4. Зняти пластину зі стенду і заміряти деформометром вимірювальну базу на не нагрітій крайці після наплавлення і перевести у «мм»:

$$l'' = \text{_____ мм.}$$

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Розрахувати за формулою [1] напруження на ненагрітій крайці після

наплавлення:  $\sigma_{\text{сум}}^{\text{не нагр.}} = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta l}{l} = E \cdot \frac{(l'' - l')}{l} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ МПа},$

де  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  – модуль Юнга для сталі класу С235, база вимірювання деформометра  $l = \underline{\hspace{1cm}} \text{ мм}.$

2. Розрахувати за формулою [3] максимальні напруження від вигину:

$$\sigma_{\text{виг.мах}} = \frac{M}{W} = \frac{4 \cdot E \cdot h \cdot f^{\text{експ}}}{L^2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ МПа},$$

де  $h = \underline{\hspace{1cm}} \text{ мм}$  – ширина пластини,  $L = \underline{\hspace{1cm}} \text{ мм}$  – довжина пластини.

3. Розрахувати за [3] реактивні напруження:  $\sigma_p = \sigma_{\text{сум}}^{\text{не нагр.}} - \sigma_{\text{виг.мах}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ МПа} .$

4. Розрахувати за формулою [2] ширину зони пластичних деформацій

скорочення:  $b_n^{\text{експ}} = - \frac{\sigma_p \cdot h}{\sigma_s - \sigma_p} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мм},$

де  $\sigma_s = \underline{\hspace{1cm}} \text{ МПа}$  – границя текучості для сталі класу С235 .

5. Побудувати у масштабі епюри **залишкових зварювальних, від вигину і сумарних поздовжніх напружень** за даними п. 1...4. і показати на рис. 4.2.

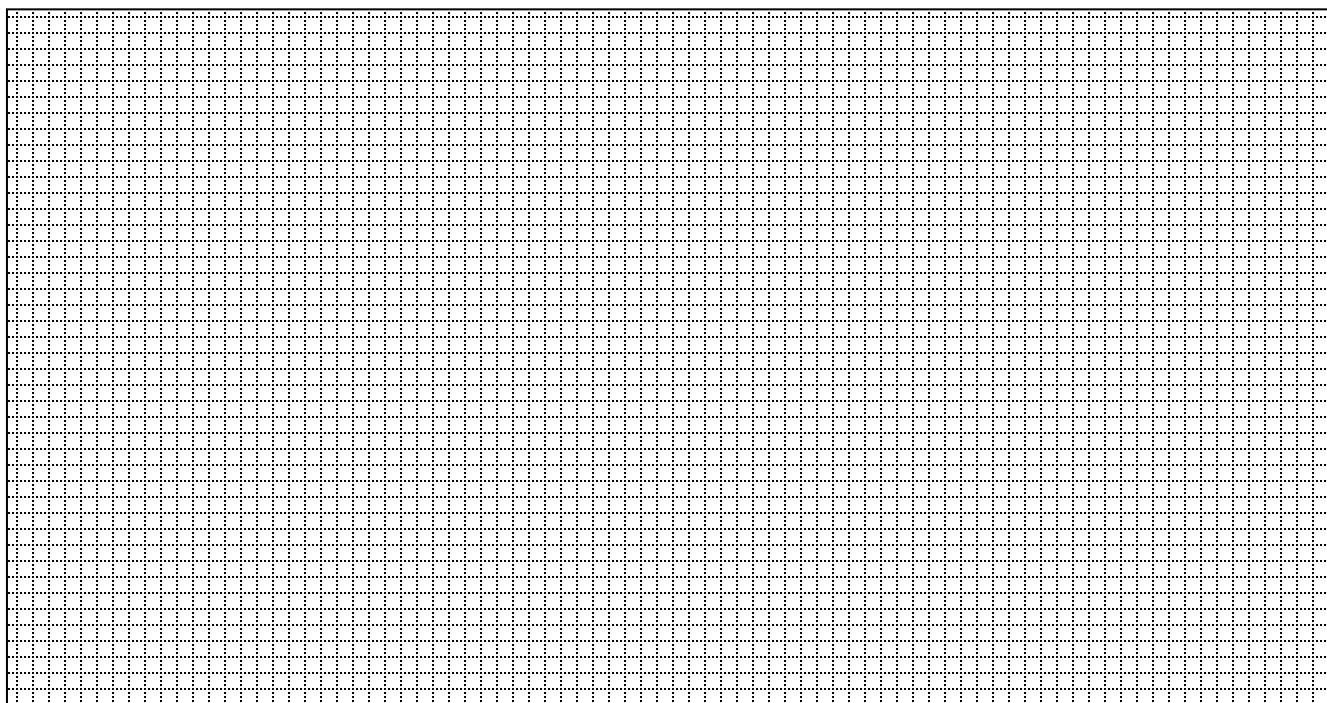


Рис. 4.2. Епюри залишкових напружень після наплавлення поздовжньої крайки пластини

6. За розрахунковим методом Трочуна [2] визначити ширину зони пластичних деформацій скорочення (ЗПДС)  $b_n^{Трочуна}$  і порівняти її зі значенням, визначеним за формулою для  $b_n^{експ}$  (п.8).

Коефіцієнт  $k_2$  розрахувати за поліноміальною залежністю [2], яка враховує питому енергію тепловкладення [2]  $q_0$  Дж/мм<sup>2</sup> під час наплавлення крайки і границю текучості матеріалу.

$$q_0 = \frac{l \cdot U \cdot \eta}{\delta \cdot v_{зв}} = \text{_____ Дж / мм}^2$$

$$k_2^{\sigma_s=240 \text{ МПа}} = 3,218 \cdot 10^{-8} \cdot (q_0)^3 - 1,579 \cdot 10^{-5} \cdot (q_0)^2 + 3,153 \cdot 10^{-3} \cdot (q_0) + 0,036 = \text{_____}$$

*Ширина зони тільки пластичних деформацій :*

$$b_1^{Трочуна} = \frac{0.484 \cdot q_0}{c\gamma \cdot T^{**}} = \text{_____ мм},$$

де  $c\gamma = 5,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$  – об'ємна теплоємність сталі класу С235,

$T^{**} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура, за якої матеріал втрачає пружні властивості.

*Ширина зони пружно – пластичних деформацій :*

$$b_2^{Трочуна} = k_2^{\sigma_s=235 \text{ МПа}} \cdot (h - b_1^{Трочуна}) = \text{_____ мм},$$

де  $\sigma_s^{235 \text{ МПа}} = \text{_____ МПа}$  – границя текучості для сталі класу С235 .

Тоді згідно [2]  $k_2^{\sigma_s=240 \text{ МПа}} \cdot \sigma_s^{240 \text{ МПа}} = k_2^{\sigma_s=235 \text{ МПа}} \cdot \sigma_s^{235 \text{ МПа}} \Rightarrow$

$$k_2^{\sigma_s=235 \text{ МПа}} = \frac{k_2^{\sigma_s=240 \text{ МПа}} \cdot \sigma_s^{240 \text{ МПа}}}{\sigma_s^{235 \text{ МПа}}} = \text{_____}$$

*Ширина пластичної зони :*

$$b_n^{Трочуна} = b_1^{Трочуна} + b_2^{Трочуна} = \text{_____ мм}.$$

7. Розрахувати за формулою [2]:  $P_{yc}^{експ} = (|\sigma_s| + |\sigma_p|) \cdot b_n^{експ} \cdot \delta = \text{_____ кН}$

і порівняти з теоретичним значенням  $P_{yc}^{Трочуна} = (|\sigma_s| + |\sigma_p|) \cdot b_n^{Трочуна} \cdot \delta =$

$= \text{_____ кН}$ . Проаналізувати яким чином і на які параметри залишкового НДС пластини це вплине.

8. Сформулювати висновки.



3. Запишіть формули для визначення сил: усадкової  $P_{yc}$ , активної  $P_a$ , реактивної  $P_p$ .

4. Запишіть формули для визначення ширини зони залишкових пластичних деформацій скорочення експериментальним шляхом і за методом Трочуна?

5. Запишіть формулу для визначення сумарних поздовжніх напружень у поперечному перерізі пластини.

6. Як буде змінюватися ширина зони залишкових пластичних деформацій скорочення якщо збільшити ширину пластини?

7. Яка відмінність між  $P_{yc}$  і  $P_a$ ?

8. Запишіть умову рівноваги поздовжніх внутрішніх сил у пластині.

9. Запишіть формули для визначення згинального моменту  $M$  через  $P_{yc}$  і на основі  $P_a$  ( $P_p$ ).

10. Запишіть формулу для визначення ефективної теплової потужності зварювальної дуги  $q$  і вкажіть розмірність.

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5**  
**ПОЗДОВЖНЄ І ПОПЕРЕЧНЕ СКОРОЧЕННЯ**  
**ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ В СТИК**

**Мета роботи:** Експериментальна перевірка розрахункових залежностей для визначення поздовжнього і поперечного скорочень під час зварювання в стик.

**Прилади та обладнання:**

- деформометр з базою 25...100 мм та індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм;
- лінійка металева з ціною поділки 1 мм;
- міліметровий папір;

**Тип зразків:**

- контрольна пластинка;
- пластина зі сталі класу С235 розмірами \_\_\_\_х\_\_\_\_х\_\_\_\_ мм з підготовленими базами для вимірювань \_\_\_\_ мм.

**Завдання роботи:**

- вивчення розподілу поздовжніх скорочень по ширині з'єднання експериментальним шляхом;
- вивчення розподілу поперечних скорочень по довжині з'єднання експериментальним шляхом;
- визначення поздовжнього скорочення розрахунковим шляхом для умов експерименту;
- порівняння розрахункових і експериментальних даних. Визначення для поперечних скорочень коефіцієнта  $K$ .

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Виміряти розміри (довжину, ширину, товщину) пластини-зразка і накреслити у масштабі (рис. 5.1). Показати розташування вимірювальних баз.

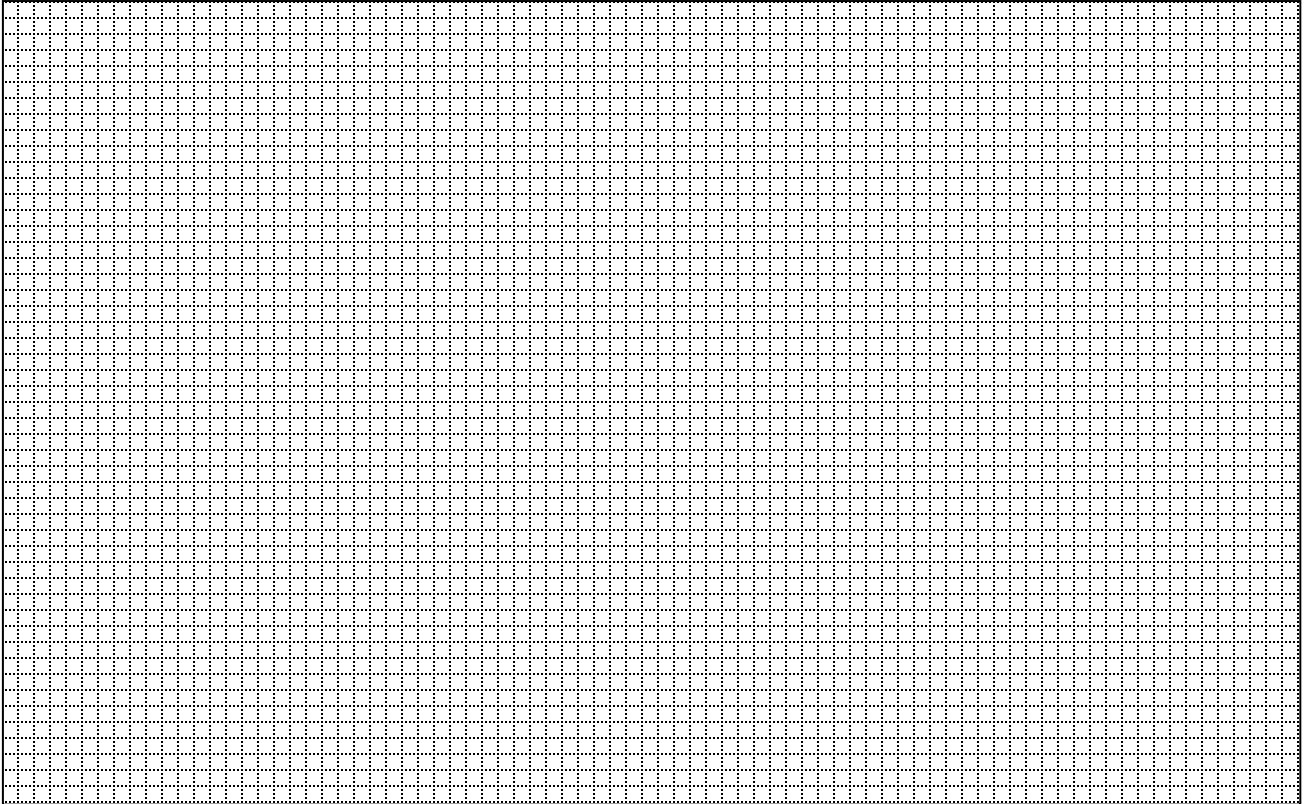


Рис. 5.1. Вид загальний пластини - зразка

2. Виконати заміри вимірювальних баз до зварювання ( $l'$ ). Результати записати в таблицю 5.1.

3. Виконати зварювання стикового шва. Охолодити пластину.

Під час зварювання зареєструвати значення зварювального струму, напругу на дузі, швидкість зварювання. Коефіцієнт корисної дії врахувати відповідно до способу зварювання.

$$I = \text{_____} A; U = \text{_____} B; \eta = \text{_____}; v_{зв} = \text{_____} \text{ мм / сек};$$

4. Виконати заміри вимірювальних баз після зварювання і охолодження ( $l''$ ). Результати записати в таблицю 5.1.

Табл. 5.1. Результати вимірювань

Поздовжні	Етапи вимірювань	Номери баз																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$l'$ , поділ.																				
	$l''$ , поділ.																				
	$\Delta L_{\text{скор}}^{\text{експ}}$ , мм																				
Поперечні	Етапи вимірювань	Номери баз																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$l'$ , поділ.																				
	$l''$ , поділ.																				
	$\Delta_{\text{пол}}^{\text{експ}}$ , мм																				

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Визначити експериментальні значення поздовжнього і поперечного скорочення ( $\Delta L_{\text{скор}}^{\text{експ}}$ ,  $\Delta L_{\text{поп}}^{\text{експ}}$ ). Побудувати у вибраному масштабі графіки розподілу поздовжніх скорочень по ширині зразка і поперечних - по довжині (рис. 5.2).

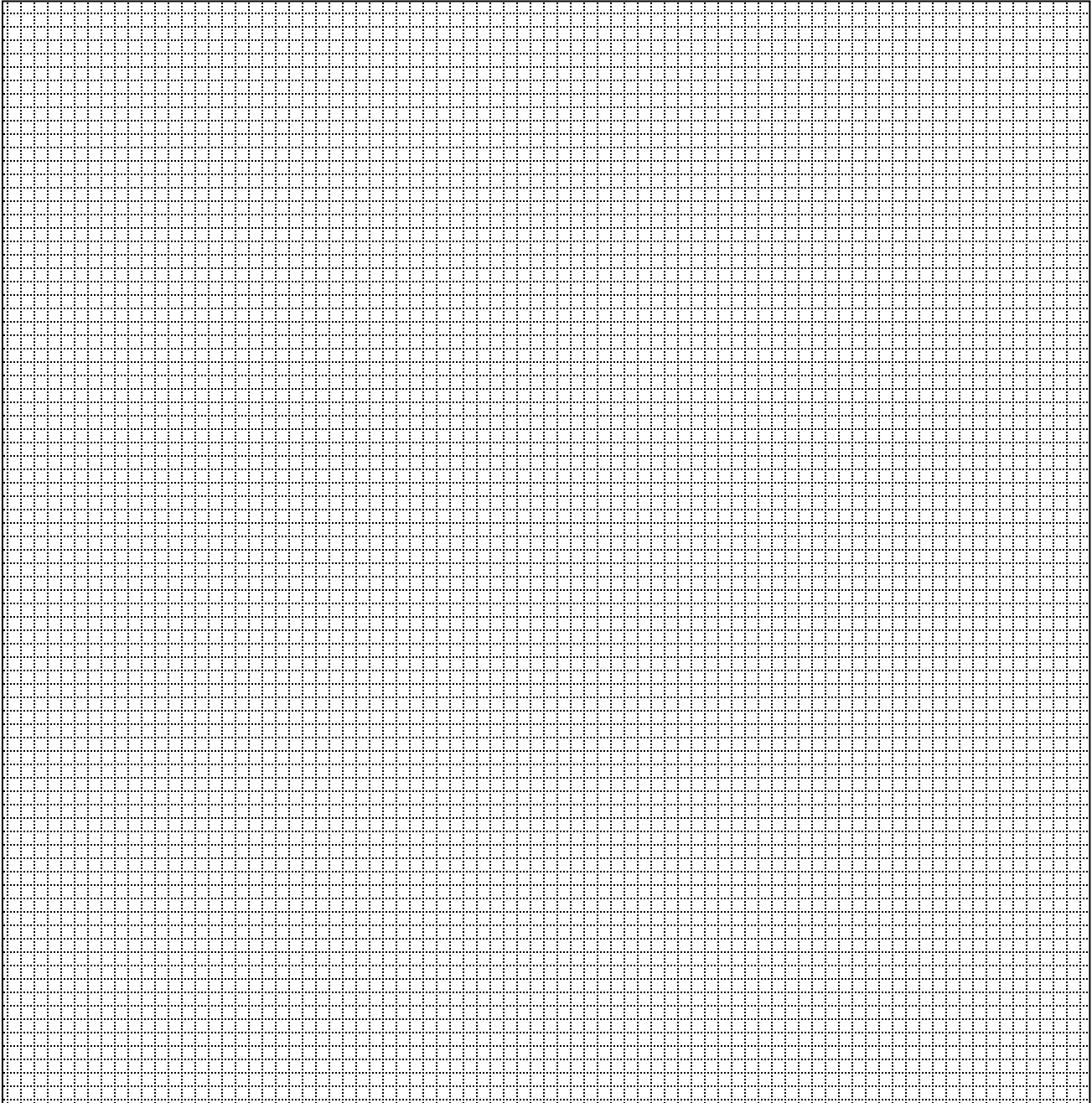


Рис. 5.2. Розподіл поздовжніх скорочень по ширині зразка - (а)  
і поперечних скорочень по довжині зразка - (б)

2. На основі параметрів режиму зварювання обчислити за методом Трочуна [2] залишкові реактивні напруження  $\sigma_p$  і визначити теоретичне значення поздовжнього скорочення. Порівняти його з експериментальними даними.

2.1. За розрахунковим методом Трочуна визначити ширину пластичної зони  $b_n^{Трочуна}$ . Коефіцієнт  $k_2$  розрахувати за поліноміальною залежністю [2], яка враховує питому енергію тепловкладення  $q_0$  (Дж/мм<sup>2</sup>) під час зварювання стикового шва і границю текучості матеріалу  $\sigma_s$ .

$$q_0 = \frac{I \cdot U \cdot \eta}{2 \cdot \delta \cdot v_{зв}} = \text{_____ Дж / мм}^2,$$

де  $I = \text{_____ А}$ ,  $U = \text{_____ В}$ ,  $\eta = \text{_____}$ ,  $\delta = \text{_____ мм}$  – товщина пластини,  $v_{зв} = \text{_____ мм / сек}$  – параметри режиму зварювання (див. п.3 на с.28);

Ширина зони тільки пластичних деформацій :

$$b_1^{Трочуна} = \frac{0.484 \cdot q_0}{c\gamma \cdot T^{**}} = \text{_____ мм},$$

де  $c\gamma = 5,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$  – об'ємна теплоємність сталі класу С235;

$T^{**} = 600 ^\circ\text{C}$  – температура, за якої матеріал втрачає пружні властивості.

Ширина зони пружно – пластичних деформацій :

$$b_2^{Трочуна} = k_2^{\sigma_s=235 \text{ МПа}} \cdot (B - b_1^{Трочуна}) = \text{_____ мм},$$

де для досліджуваної сталі :  $k_2^{\sigma_s=240 \text{ МПа}} \cdot \sigma_s^{240 \text{ МПа}} = k_2^{\sigma_s=235 \text{ МПа}} \cdot \sigma_s^{235 \text{ МПа}} \Rightarrow$

$$k_2^{\sigma_s=235 \text{ МПа}} = \frac{k_2^{\sigma_s=240 \text{ МПа}} \cdot \sigma_s^{240 \text{ МПа}}}{\sigma_s^{235 \text{ МПа}}} = \text{_____},$$

$$k_2^{\sigma_s=240 \text{ МПа}} = 3,218 \cdot 10^{-8} \cdot (q_0)^3 - 1,579 \cdot 10^{-5} \cdot (q_0)^2 + 3,153 \cdot 10^{-3} \cdot (q_0) + 0,036 = \text{_____},$$

$\sigma_s^{235 \text{ МПа}} = \text{_____ МПа}$  – границя текучості

для досліджуваної сталі класу С235,

$B = \text{_____ мм}$  – половина ширини зварного з'єднання.

Ширина пластичної зони :

$$b_n^{Трочуна} = b_1^{Трочуна} + b_2^{Трочуна} = \text{_____ мм}.$$

2.2. З умови рівноваги внутрішніх зусиль у зварному з'єднанні [2] розрахувати залишкові напруження  $\sigma_p$  у реактивній зоні після зварювання:

$$\sigma_s \cdot 2 \cdot b_n^{\text{Трочуна}} \cdot \delta + \sigma_p \cdot (2 \cdot B \cdot \delta - 2 \cdot b_n^{\text{Трочуна}} \cdot \delta) = 0 \Rightarrow$$

$$\sigma_p = -\sigma_s \frac{b_n^{\text{Трочуна}}}{(B - b_n^{\text{Трочуна}})} = \text{_____ МПа},$$

де  $\sigma_s = \sigma_s^{235 \text{ МПа}} = \text{_____ МПа}$  – границя текучості досліджуваної сталі класу С235.

2.3. Визначити теоретичне значення  $\Delta L_{\text{скор}}^{\text{теор}}$  поздовжнього скорочення за формулою [2] і порівняти з експериментальним  $\Delta L_{\text{скор}}^{\text{експ}}$ :

$$\Delta L_{\text{скор}}^{\text{теор}} = \frac{\sigma_p \cdot L}{E} = \text{_____ ММ},$$

де  $L = \text{_____ ММ}$  – довжина зварного з'єднання,

$E = \text{_____ МПа}$  – Модуль Юнга для сталі класу С235.

Порівняти:  $\Delta L_{\text{скор}}^{\text{експ}} = \text{_____ ММ}$ ,  $\Delta L_{\text{скор}}^{\text{теор}} = \text{_____ ММ}$ .

3. За формулою [4]  $\Delta_{\text{пол}} = K \cdot \frac{\alpha}{c_p} \cdot \frac{q}{v_{\text{зв}} \delta}$  і експериментальними даними для

$\Delta_{\text{пол}}^{\text{експ}}$  у середній частині з'єднання визначити значення коефіцієнта  $K$ , який враховує вплив конструктивно-технологічних факторів на поперечне скорочення.

$$K = \frac{\Delta_{\text{пол}}^{\text{експ}}}{\frac{\alpha}{c_p} \cdot \frac{q}{v_{\text{зв}} \cdot \delta}} = \frac{\Delta_{\text{пол}}^{\text{експ}} \cdot c_p \cdot v_{\text{зв}} \cdot \delta}{\alpha \cdot q} = \text{_____},$$

де для сталі класу С235:  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$  – коефіцієнт лінійного розширення,  $c_p = 5,2 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{см}^3$  – об'ємна теплоємність;  $q = I \cdot U \cdot \eta = \text{_____ Дж/сек}$  - ефективна теплова потужність джерела нагрівання,  $v_{\text{зв}} = \text{_____ см/сек}$  – швидкість зварювання,  $\delta = \text{_____ см}$  – товщина зварюваних пластин.

4. Сформулювати висновки.



3. Як впливає збільшення ширини з'єднання на поздовжнє скорочення?

4. Як впливає швидкість зварювання на поперечне скорочення?

5. Що враховує коефіцієнт  $K$  у формулі для поперечних скорочень?

6. Як розподіляється поперечне скорочення по довжині з'єднання?

7. Як визначається усадкова сила  $P_{yc}$ ?

8. В чому полягає причина поздовжнього скорочення під час зварювання?

9. Якщо зварне з'єднання розрізати по межах зони ЗПДС на три частини, то наскільки зона ЗПДС буде коротше реактивних зон?

10. Доведіть, що поздовжнє скорочення залежить від ефективної теплової потужності джерела нагрівання

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### КУТОВІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ

**Мета роботи:** Експериментальна перевірка утворення кутових переміщень під час зварювання. Порівняння розрахункових залежностей з експериментальними даними.

**Прилади та обладнання:**

- вимірювальний стенд з індикатором годинникового типу (з ціною поділки 0,01 мм);
- зварювальний напівавтомат MIG/MAG Fronius 3000 Pulse;
- секундомір.

**Тип зразків:**

- дві пластини розмірами \_\_\_\_\_x\_\_\_\_\_x\_\_\_\_\_ мм з V подібною розробкою крайок згідно ДСТУ EN ISO 9692-1:2014

**Завдання роботи:**

- спостереження за процесом утворення кутових переміщень в часі в процесі зварювання і охолодження зварного з'єднання;
- одержання даних про величину залишкового кутового переміщення після повного охолодження;
- виконання розрахунків з метою отримання значень кутового переміщення теоретичним методом згідно умов проведеного експерименту і порівняння його з експериментальними даними.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Встановити зразок у пристрій і виставити стрілку індикатора на нуль.
2. Виконати наплавлення шва. Коефіцієнт корисної дії врахувати відповідно до способу зварювання. У процесі наплавлення зареєструвати параметри режиму:

$$I = \text{_____} A; U = \text{_____} B; \eta = \text{_____}; v_{\text{зв}} = \text{_____} \text{ см / сек},$$

а також покази стрілки індикатора через встановлені проміжки часу до повного охолодження зразка. Покази індикатора занести у табл. 6.1.

Табл. 6.1. Покази індикатора в процесі наплавлення

	Час від початку наплавлення, с															
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Покази індикатора, поділки																
Кутові переміщення, радіани																
	Час від початку наплавлення, с															
	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	$\infty$
Покази індикатора, поділки																
Кутові переміщення, радіани																

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Накреслити у масштабі поперечний переріз досліджуваного зразка (рис. 6.1), позначити кут розробки крайок  $\varphi = \underline{\hspace{2cm}}$  :

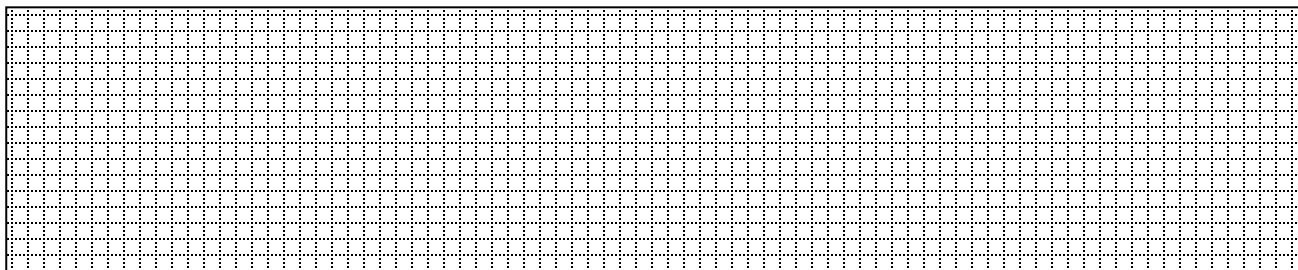


Рис. 6.1. Поперечний переріз досліджуваного зразка

2. Побудувати графік зміни кутових переміщень в часі  $\beta^{експ}(t)$  (рис. 6.2):

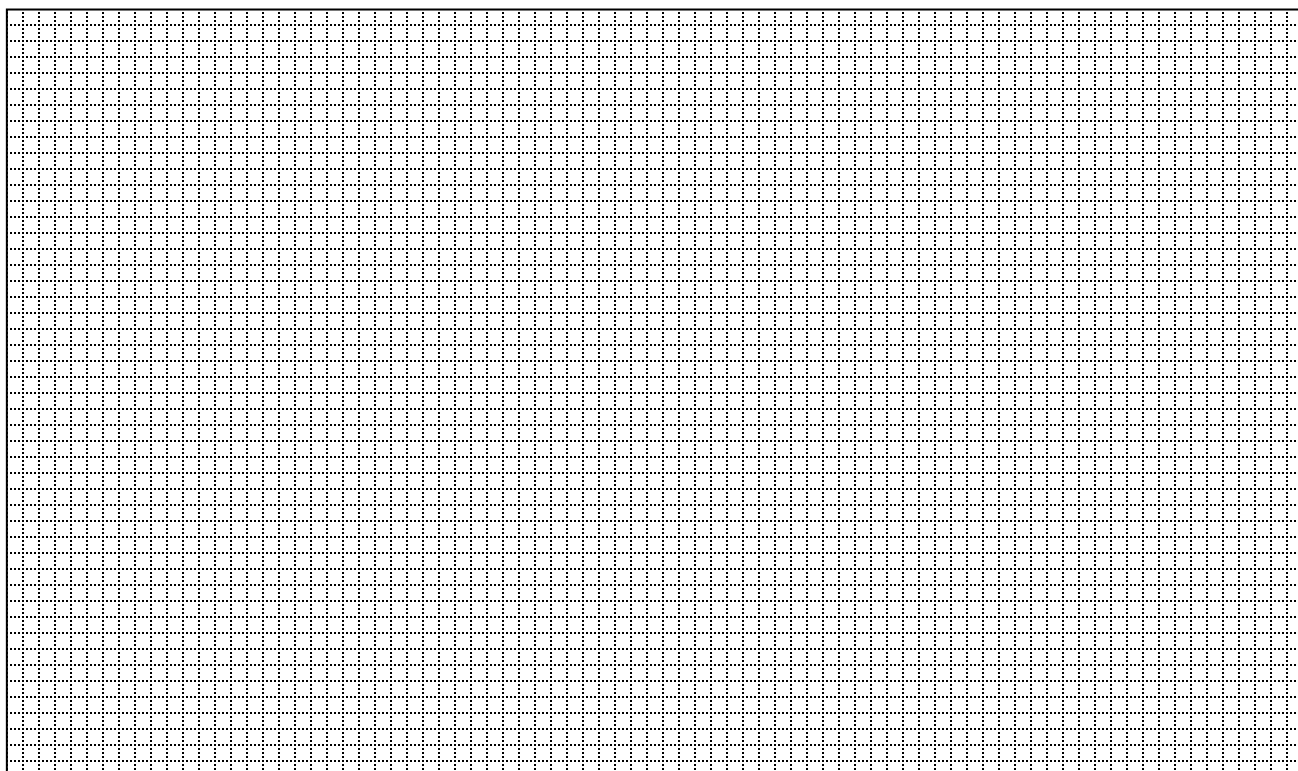


Рис. 6.2. Залежність зміни кутових переміщень від часу

3. Відповідно до умов експерименту визначити розрахункову величину кутового переміщення за формулою Троचना [2] ( $\beta^{Трочуна}$ ) і за номограмою Кузьміна С.А. [5] ( $\beta^{Кузьміна}$ ):

3.1.  $\beta^{Трочуна} = 2 \cdot \alpha \cdot T_{сеп} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \underline{\hspace{4cm}}$  рад;

$\alpha = 12 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення металу;  
 $T_{\text{сер}} = 600^\circ\text{C}$  – середня температура шару наплавленого металу у момент переходу найбільш нагрітих його точок з пластичного стану у пружний;  
 $\varphi = \text{_____}^\circ$  – кут розробки зварюваних крайок.

3.2. За номограмою (рис. 6.3.) для погонної енергії зварювання визначити кутове переміщення:

$$\beta^{\text{Кузьміна}} = \text{_____ рад};$$

$$\text{погонна енергія зварювальної дуги } q_{\text{п}} = \eta \cdot U \cdot I / v_{\text{зв}} = \text{_____ Дж / см},$$

де  $v_{\text{зв}}$  - швидкість зварювання у см/сек,  $\delta_{\text{р}}$  - розрахункова товщина у см, яка для повного провару дорівнює товщині листів  $\delta$ , а для неповного - глибині провару.

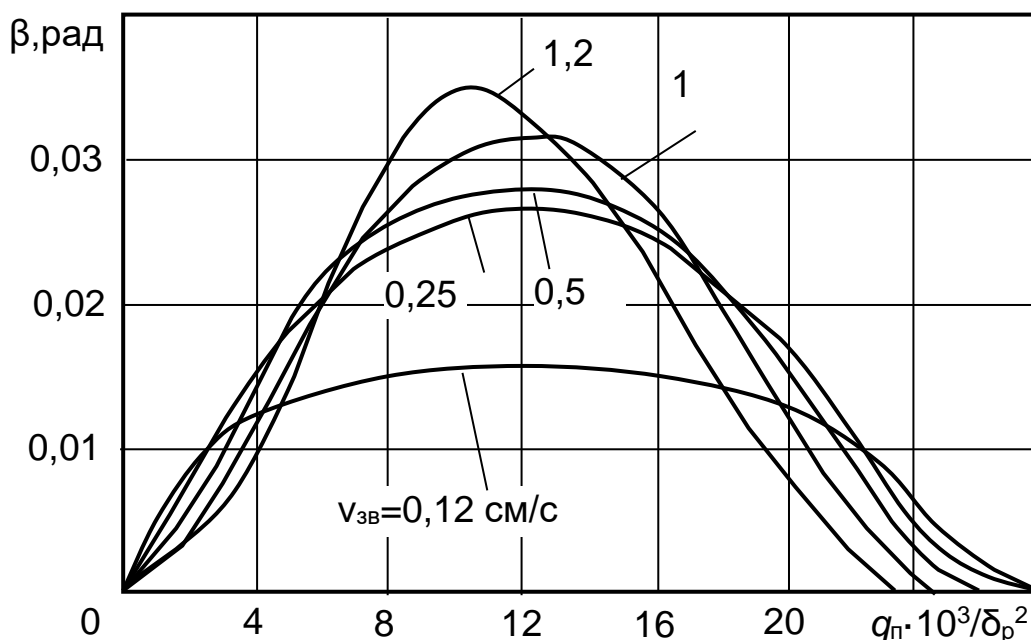


Рис.6.3. Номограма для визначення кутового переміщення у зварних з'єднаннях [5]

4. Порівняти розрахункові  $\beta^{\text{Трочуна}}$ ,  $\beta^{\text{Кузьміна}}$  та експериментальні дані  $\beta_{\text{зал}}^{\text{експ}}$ :

$$\beta^{\text{Трочуна}} = \text{_____ рад}; \beta^{\text{Кузьміна}} = \text{_____ рад}; \beta_{\text{зал}}^{\text{експ}} = \text{_____ рад}.$$

5. Виконати аналіз отриманих даних і сформулювати висновки.



3. Якими складовими визначається сумарне кутове переміщення під час зварювання другого кутового шва таврових з'єднань?

4. Як залежить кутове переміщення від відносної глибини провару?

5. Як залежить кутове переміщення від швидкості зварювання?

6. Як залежить кутове переміщення від відносної ширини провару?

7. Чим відрізняються кутові переміщення під час виконання кутового і стикового швів?

8. Як визначається сумарне кутове переміщення для багатопрохідного двобічного зварювання стикових з'єднань?

9. Як впливає кількість проходів на величину сумарного кутового переміщення під час зварювання?

10. Як визначаються кути  $\beta_2$  і  $\beta_k$  під час зварювання кутових швів таврового з'єднання?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

### ВПЛИВ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ

**Мета роботи:** Експериментальна перевірка впливу зварювальних напружень на міцність під час крихкого руйнування. Визначення питомих енерговитрат (ефективної щільності поверхневої енергії  $\gamma_{ef}$ ) під час руйнування.

**Прилади та обладнання:**

- лінійка металева з ціною поділки 1 мм
- секундомір;
- зварювальний напівавтомат MIG/MAG Fronius 3000 Pulse;
- ємність з чистою водою об'ємом 10 літрів для охолодження зразка.

**Тип зразків:**

- 2 однакові пластини розмірами \_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_х\_\_\_\_\_ мм з V подібною розробкою крайок згідно ДСТУ EN ISO 9692-1:2014

**Завдання роботи:**

- визначення експериментальним шляхом довжини поздовжньої рівноважної тріщини у зварному шві стикового з'єднання;
- визначення ширини зони залишкових пластичних деформацій скорочення в експериментальному зразку;
- побудова кривої швидкості зміни енергії пружних зварювальних деформацій, яка скидається із зварного з'єднання під час руйнування по мірі збільшення довжини крихкої тріщини у зварному шві;
- визначення питомих енерговитрат під час руйнування.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Заміряти габаритні розміри зварного з'єднання.
2. Виконати зварювання стикового поздовжнього шва. У процесі зварювання зареєструвати параметри режиму зварювання. Коефіцієнт корисної дії врахувати відповідно до способу зварювання.

$$I = \text{_____} A; U = \text{_____} B; \eta = \text{_____}; v_{зв} = \text{_____} \text{ см / сек},$$

3. Охолодити примусово зварне з'єднання водою. Спостерігати утворення у шві поздовжньої крихкої тріщини.

### ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Накреслити у масштабі (рис. 7.1) зразок і поперечний переріз досліджуваного зразка.

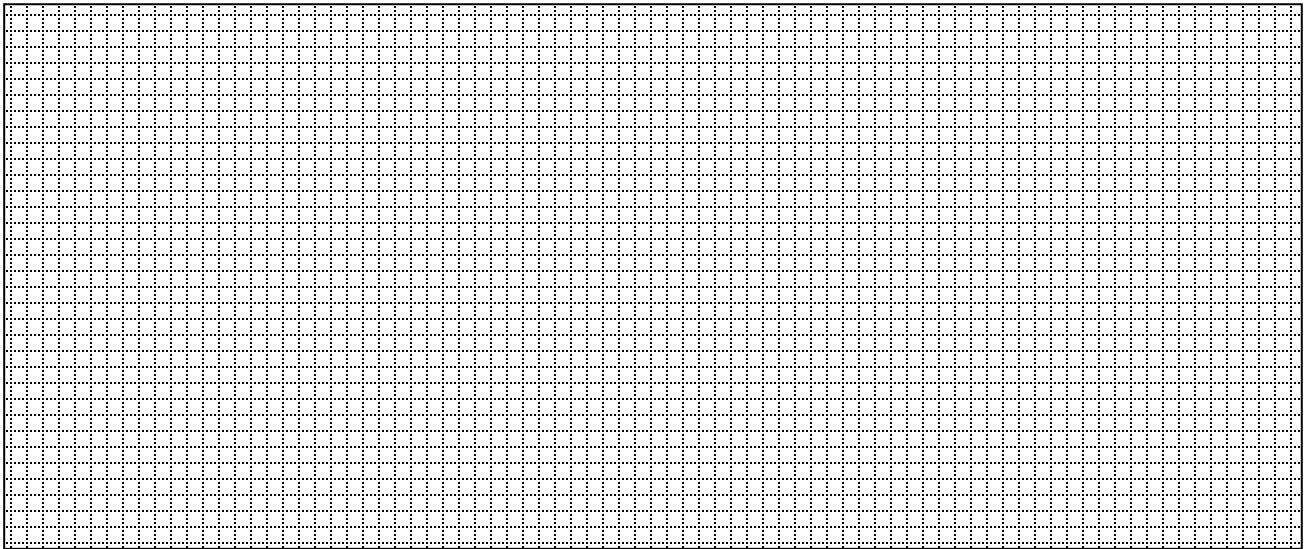


Рис. 7.1. Вид загальний досліджуваного зразка

2. Заміряти довжину тріщини і вирахувати її відносну довжину

$$\alpha_2 = l/L = \text{_____},$$

де  $l = \text{_____}$  довжина тріщини мм;  $L = \text{_____}$  довжина з'єднання мм.

3. Використовуючи ординати точок з рис. 7.2 і з урахуванням залежності

$$[6]: W_{\text{скид}} \approx \frac{\sigma_s^2 \cdot B^2 \cdot b_p^2 \cdot \delta}{E \cdot L^2} \cdot f(\alpha)_{\text{скид}} = A_{\text{скид}} \cdot f(\alpha)_{\text{скид}} \text{ побудувати криву}$$

$$W'_{\text{скид}}(\alpha)_{\text{скид}} = dW_{\text{скид}}/d\alpha = A_{\text{скид}} \cdot f'(\alpha)_{\text{скид}}.$$

3.1. За розрахунковим методом Трочуна [2] визначити ширину ЗПДС

$b_p = b_p^{\text{Трочуна}}$ . Коефіцієнт  $k_2$  розрахувати за поліноміальною залежністю [2],

яка враховує питому енергію тепловкладення  $q_0$  Дж / мм<sup>2</sup> під час зварювання стикового шва і границю текучості матеріалу  $\sigma_s$ .

$$q_0 = \frac{I \cdot U \cdot \eta}{2 \cdot \delta \cdot v_{3\phi}} = \text{Дж} / \text{мм}^2$$

$$k_2^{\sigma_s=240 \text{ МПа}} = 3,218 \cdot 10^{-8} \cdot (q_0)^3 - 1,579 \cdot 10^{-5} \cdot (q_0)^2 + 3,153 \cdot 10^{-3} \cdot (q_0) + 0,036 =$$

Ширина зони тільки пластичних деформацій :

$$b_1^{\text{Трочуна}} = \frac{0,484 \cdot q_0}{c\gamma \cdot T^{**}} = \text{мм},$$

де  $c\gamma = \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$  – об'ємна теплоємність дослідної сталі,

$T^{**} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура, за якої матеріал втрачає пружні властивості;

Ширина зони пружно – пластичних деформацій :

$$b_2^{\text{Трочуна}} = k_2^{\sigma_s} \cdot (B - b_1^{\text{Трочуна}}) = \text{мм},$$

де  $B = \text{мм}$  – половина ширини зварного з'єднання;

для дослідної сталі  $\sigma_s = \text{МПа}$ .

$$\text{тоді } k_2^{\sigma_s=240 \text{ МПа}} \cdot \sigma_s^{240 \text{ МПа}} = k_2^{\sigma_s} \cdot \sigma_s \Rightarrow k_2^{\sigma_s=235 \text{ МПа}} = \frac{k_2^{\sigma_s=240 \text{ МПа}} \cdot \sigma_s^{240 \text{ МПа}}}{\sigma_s} =$$

Ширина пластичної зони:

$$b_n^{\text{Трочуна}} = b_1^{\text{Трочуна}} + b_2^{\text{Трочуна}} = \text{мм}.$$

$$3.2. \text{ Розрахувати [6]: } A_{\text{скид}} = \frac{\sigma_s^2 \cdot B^2 \cdot b_n^2 \cdot \delta}{E \cdot L^2} =$$

де  $\sigma_s = \text{МПа}$  межа текучості сталі, з якої виготовлений зразок,

$E = \text{МПа}$  - модуль пружності сталі, з якої виготовлений зразок,

$L = \text{мм}$  - половина довжини зразка,  $B = \text{мм}$  – половина ширини зразка,  $\delta = \text{мм}$  - товщина зразка;

$b_n = b_n^{\text{Трочуна}} = \text{мм}$  - ширина пластичної зони.

3.3. Показати на рис.7.3 криву  $W'_{\text{скид}}(\alpha)_{\text{скид}} = dW_{\text{скид}}/d\alpha = A_{\text{скид}} \cdot f'(\alpha)_{\text{скид}}$ , яку

побудувати на основі залежності  $f'(\alpha)_{\text{скид}}$  (рис.7.2):

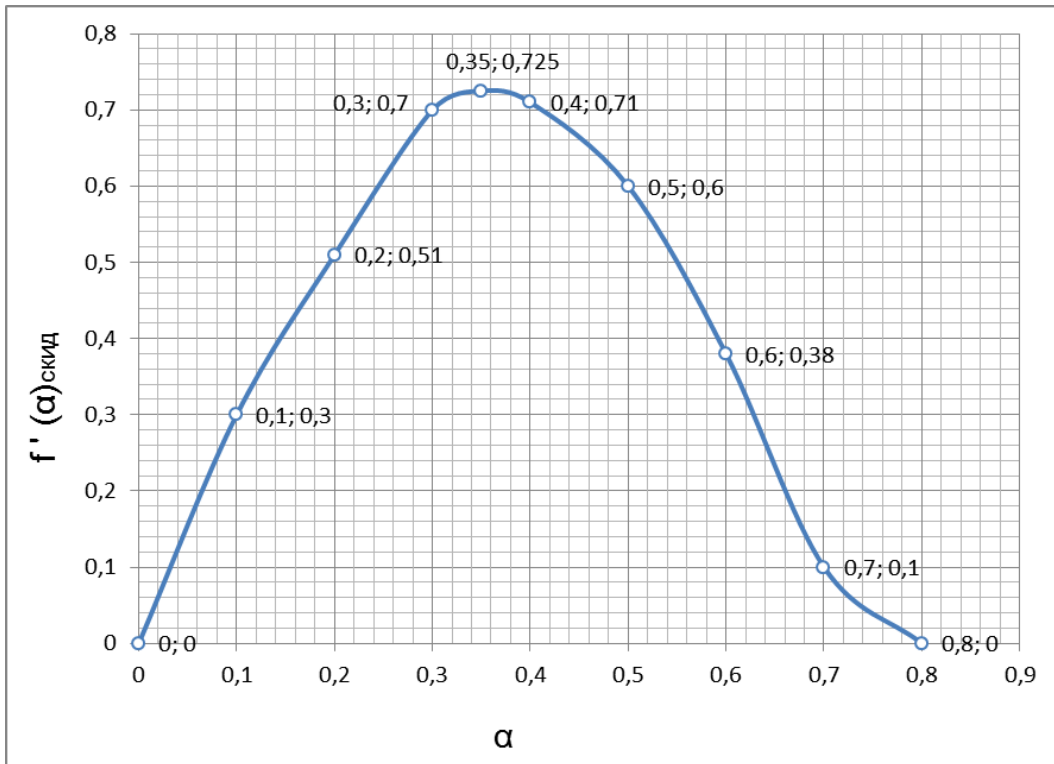


Рис.7.2. Залежність швидкості зміни функції енергоскидання від відносної довжини тріщини

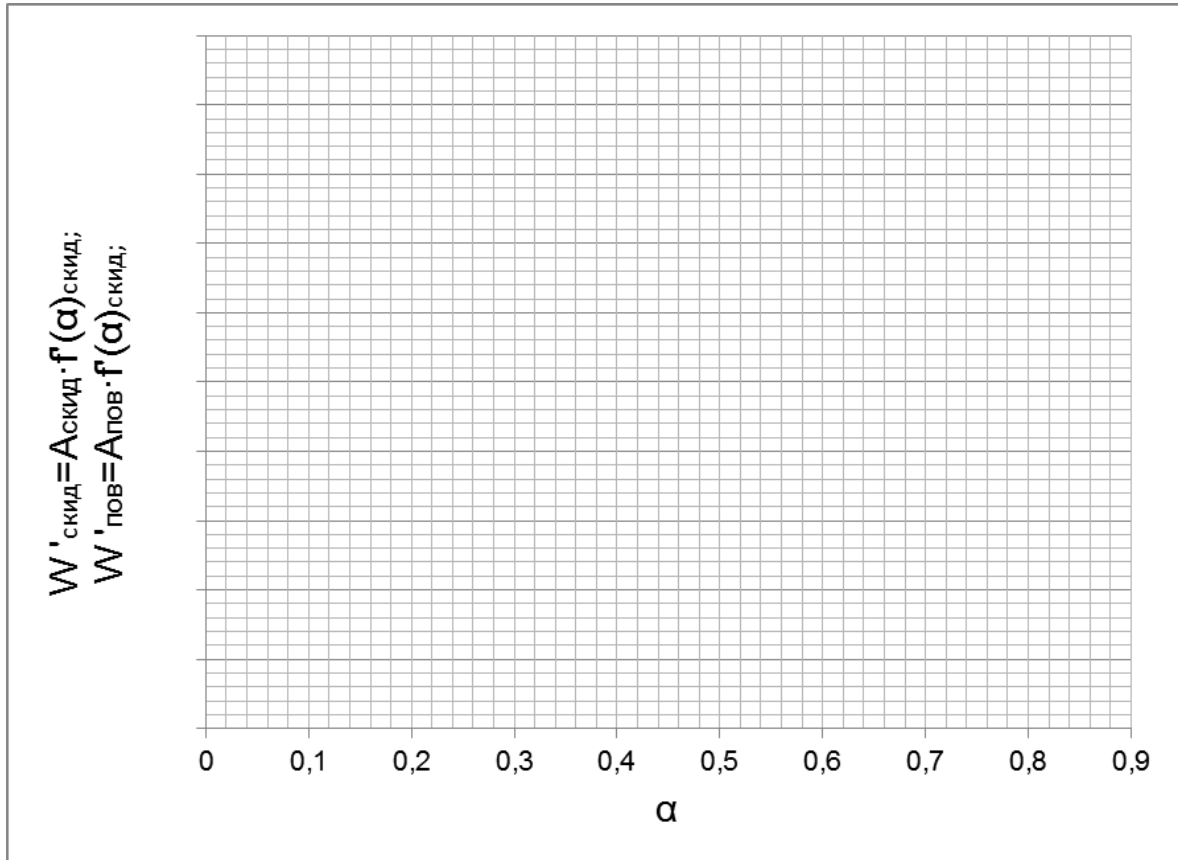


Рис.7.3. Енергетичні співвідношення під час крихкого руйнування



3. Чому під час руйнування зварного з'єднання запас потенційної енергії пружних деформацій від дії зварювальних напружень у ньому зменшується?

4. Як впливають розміри зварного з'єднання на величину пружної енергії, яка вивільняється під час руйнування?

5. У чому полягає методика визначення енергії, яка вивільняється під час руйнування?

6. Запишіть умову розвитку тріщин у навантажених тілах.

7. Назвіть імена видатних вітчизняних і закордонних вчених, які займалися питаннями механіки руйнування.

8. Як пов'язана енергія, яка вивільняється, з коефіцієнтом інтенсивності напружень?

9. З яких причин у вершині тріщини утворюється пластична зона і від чого залежать її розміри і форма?

10. Які Ви знаєте критерії крихкого руйнування?

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8**  
**ЗМЕНШЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ**  
**ПІД ЧАС ВІДПУСКУ**

**Мета роботи:** Експериментальна перевірка зменшення залишкових зварювальних напружень під час загального пічного відпуску. Визначення ступеня зменшення напружень під час пічного відпуску.

**Прилади та обладнання:**

- деформометр з базою 25...100 мм та індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм;
- лінійка металева (з ціною поділки 1 мм);
- міліметровий папір.

**Тип зразків:**

- відфрезероване однопрохідне стикове зварне з'єднання зі сталі класу С235 розмірами \_\_\_\_х\_\_\_\_х\_\_\_\_ мм з підготовленими базами \_\_\_\_ мм;
- відфрезерована пластина-свідок без шва зі сталі класу С235 розмірами \_\_\_\_х\_\_\_\_х\_\_\_\_ мм з перенесеними зі зварного з'єднання базами \_\_\_\_ мм;
- відфрезероване однопрохідне стикове зварне з'єднання зі сталі класу С235 після термообробки розмірами \_\_\_\_х\_\_\_\_х\_\_\_\_ мм з підготовленими базами \_\_\_\_ мм.

**Завдання роботи:**

- вивчення розподілу поздовжніх напружень після відпуску в середньому поперечному перерізі зварного стикового з'єднання;
- вивчення розподілу поперечних напружень після відпуску в поздовжньому перерізі зварного стикового з'єднання (вздовж шва);
- оцінка ступеня зменшення залишкових зварювальних напружень під час загального пічного відпуску.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Накреслити досліджуваний зразок і зразок-свідок і показати взаємне розташування вимірювальних баз і розеток (рис. 8.1):



Рис. 8.1. Схема розташування вимірювальних баз і розеток на зразках

2. Виконати вимірювання вимірювальних баз на зразку-свідку  $l'$  (дані на зварному зразку після термообробки, але до розрізки). Результати занести в таблицю 8.1.

3. Виконати вимірювання баз на зварному зразку після термообробки і розрізки  $l''$ . Результати занести в таблицю 8.1.

*Увага: для підвищення точності виконання вимірів, встановлення деформометра на кожен базу вимірювання необхідно виконувати не менше трьох разів.*

Табл. 8.1. Результати експериментів для з'єднання після термообробки

Вимірювальні бази			А		Б		В		Г		Д	
Напрямок вимірювань			Х	У	Х	У	Х	У	Х	У	Х	У
Поздовжній переріз У=0	Етапи вимірювань	Після зварювання										
		Після розрізки										
		Зміна довжини вимірюваної бази										
		Відносна деформація										
		Напруження, МПа										
Вимірювальні бази			Е		Ж		В		З		И	
Напрямок вимірювань			Х	У	Х	У	Х	У	Х	У	Х	У
Поперечний переріз Х=0	Етапи вимірювань	Після зварювання										
		Після розрізки										
		Зміна довжини вимірюваної бази										
		Відносна деформація										
		Напруження, МПа										

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. У відповідності до схеми плоского напруженого стану за результатами виконаних вище вимірювань, розрахувати [1] пружні деформації  $\epsilon_x$  і  $\epsilon_y$ , які залишились після відпуску і записати результати в таблицю 8.1.

$$\epsilon_x = \frac{l_x'' - l_x'}{B}, \quad \epsilon_y = \frac{l_y'' - l_y'}{B};$$

де  $l_x'$ ,  $l_y'$  - дані заміру баз дані на зварному зразку після термообробки, але до розрізки;  $l_x''$ ,  $l_y''$  - дані заміру баз на зварному зразку після термообробки і розрізки; B - база вимірювання.

2. Розрахувати залишкові напруження згідно закону Гука [1] для двовісного напруженого стану  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  і записати результати в таблицю 8.1.

$$\sigma_x = \frac{E(\epsilon_x + \nu\epsilon_y)}{1 - \nu^2}, \quad \sigma_y = \frac{E(\epsilon_y + \nu\epsilon_x)}{1 - \nu^2}.$$

Тут  $E$  - модуль пружності, МПа;  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона;  $\epsilon_x$  і  $\epsilon_y$  - відносні пружні деформації вздовж осей  $x$  та  $y$ , які були обчислені вище.

3. Побудувати епюри (рис. 8.2) поздовжніх напружень  $\sigma_x$  у середньому поперечному перерізі зразка і поперечних напружень  $\sigma_y$  у поздовжньому перерізі вздовж осі зварного шва **після термообробки і до термообробки** (дані до термообробки взяті з роботи № 3).

4. Виконати аналіз отриманих епюр нормальних напружень  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$ , показаних на рис.8.2, і зробити висновки про вплив відпуску заданого режиму на зменшення залишкових напружень.

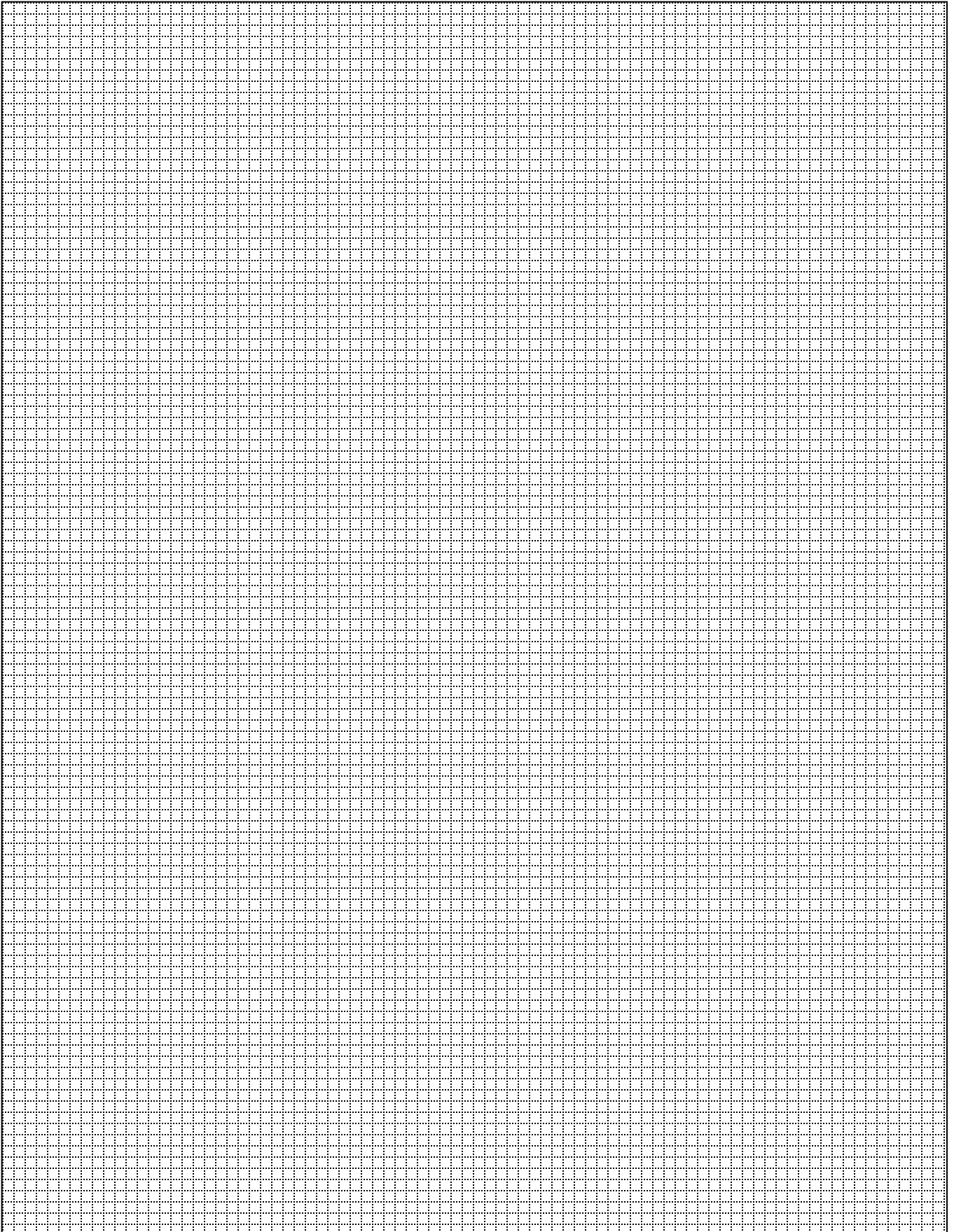


Рис. 8.2. Епюри поздовжніх і поперечних залишкових зварювальних напружень у характерних перерізах стикового зварного з'єднання: до термообробки – (а); після термообробки – (б)



4. Чим визначається температура нагрівання зварного виробу під час термообробки з метою зменшення залишкових напружень?

5. Як впливає на зменшення залишкових напружень під час термообробки тривалість витримки виробу в печі, швидкість нагрівання виробу та інші параметри?

6. У чому полягають недоліки (переваги) методу зменшення залишкових напружень у зварних конструкціях шляхом термообробки?

7. Запишіть формули для визначення напружень через деформації (закон Гука) для плоского напруженого стану?

8. Навіщо робити розрізку зварного зразка і чи завжди це необхідно для визначення в ньому залишкових напружень?

9. Як залежить точність визначення експериментальним шляхом залишкових напружень від розміру бази вимірювань?

10. У яких випадках можна використовувати більші бази вимірювань для експериментального визначення напружень?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Прохоренко В.М. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях : навч. посіб. / В.М. Прохоренко, О.В. Прохоренко. — Київ : НТУУ «КПІ», 2009. — 268 с.
2. Напруження та деформації при зварюванні і паянні : Підручник / [Л.М. Лобанов, Г.В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький та ін.] ; за заг. ред. Л.М. Лобанова. — Миколаїв : НУК, 2016. — 246 с.
3. Писаренко Г.С. Опір матеріалів : Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; за ред. Г.С. Писаренка. — 2-ге вид., допов. і переробл. — Київ: Вища шк., 2004. — 655 с.
4. Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо підготування зварних з'єднань. Частина 1. Ручне дугове зварювання, зварювання в захисному газі, газове зварювання, TIG - зварювання та променеве зварювання сталей (EN ISO 9692-1:2013, IDT) [Текст] : ДСТУ EN ISO 9692-1:2014. — [Чинний від 2015-07-01]. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014. — 19 с.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б.С. Касаткин и др. Киев : Наукова думка, 1981. 584 с.
2. Прохоренко В.М., О.В. Прохоренко Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2009. 268 с.
3. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів : Підручник / за ред. Г.С. Писаренка. 2-ге вид., допов. і переробл. Київ : Вища шк., 2004. 655 с.
4. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений : Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. 331 с.
5. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Ленинград : Изд. «Судостроение», 1974. 286 с.
6. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. Напряжения и деформации при сварке. Киев : Вища шк. Головное изд-во, 1987. 246 с.

## ДОДАТОК А

### ПРИКЛАД ТИТУЛЬНОГО АРКУША ЗВІТУ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кафедра зварювального виробництва

**ЗВІТ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**  
з освітнього компонента  
«Механіка матеріалів і конструкцій. Частина 2.  
Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях»

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, група ЗВ – 91

Бондар Ліна Петрівна

залікова книжка № ЗВ-7101

Викладач: к.т.н., Перепічай А. О.

Оцінка: \_\_\_\_\_

Кількість балів: \_\_\_\_\_

Київ – 2022