

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до лабораторних робіт  
з дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні» для  
студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізація  
«Технологія та устаткування зварювання», «Відновлення та  
підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» всіх форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Напруження та деформації при зварюванні” для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізація «Технологія та устаткування зварювання», «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» всіх форм навчання / Укладачі: В.В. Нетребко, І.М. Білоник, С.І. Замковий. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 24 с.

Укладачі: В.В. Нетребко, професор, д.т.н.  
І.М. Білоник, доцент, к.т.н.  
С.І. Замковий, зав. лаб.

Рецензент: А.О Шумілов, доцент, к.т.н.

Відповідальний  
за випуск: В.В. Нетребко, професор, д.т.н.

Голова НМК каф. ОТЗВ: С.М. Попов, професор, д.ф.н.

ЗАТВЕРДЖЕНО:  
на засіданні кафедри ОТЗВ  
Протокол №4 від 14.11.2019р.

Рекомендовано НМК ІФФ  
Протокол № 4  
від 10.12.2019р.

### Загальні положення

Метою лабораторних робіт з дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні» є отримання студентами глибоких знань та відомостей про процеси утворення зварювальних напружень та деформацій та їх впливу на міцність, надійність та працездатність зварних конструкцій, а також різних способів попередження виникнення напружень та деформацій та методів їх усунення.

Завданням лабораторних є засвоєння студентами фізичної сутності процесів утворення зварювальних деформацій та напружень, ознайомлення із існуючими методами розрахунків та експериментальним визначення зварювальних напружень та деформацій, розподілом залишкових напружень, впливом деформацій та напружень на властивості конструкцій, а також встановлення впливу технологічних режимів зварювання та наплавлення на величину напружень та деформацій, застосування засобів попередження та зменшення залишкових напружень та деформацій або їх усунення.

Перед виконанням лабораторної роботи студент повинен ознайомитись зі змістом роботи, усвідомити її мету та завдання, засвоїти правила техніки безпеки при виконанні робіт в лабораторії, відповісти на контрольні питання викладача і отримати дозвіл на виконання роботи. Прийом (здача) лабораторних робіт проводиться викладачем по мірі їх виконання та оформлення.

У методичних вказівках викладено опис і суть методики виконання та оформлення звітів з лабораторних робіт:

- Лабораторна робота № 1 «Визначення коефіцієнтів концентрації напружень в різних зварних з'єднаннях та виробих після наплавлення»;
- Лабораторна робота № 2 «Дослідження деформацій зварних з'єднань та виробів, на які наплавляється шар металу у процесі нагрівання та охолодження»;
- Лабораторна робота № 3 «Дослідження термічного впливу на структуру металу та виникнення в ньому неоднорідності властивостей у ЗТВ у зварних з'єднаннях та виробих після наплавлення».

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1**

**«Визначення коефіцієнтів концентрації напружень в різних зварних з'єднаннях та виробих після наплавлення»**

У зварних з'єднаннях та виробих після наплавлення напруження розподіляються нерівномірно. Це обумовлено особливістю зварних конструкцій та технологією їх виготовлення, що призводить до різких змін у площі перетину. Зміна форми елементів конструкцій, в районі зварних з'єднань, порушує розподілення силового потоку і приводить до місцевої концентрації напруження, ступінь якого, у зварних з'єднаннях, залежить від цих змін. Конструкція зварних з'єднань та виробів із наплавленими шарами обумовлена умовами експлуатації, що вимагають проектувати форму та розміри цих виробів, виходячи із забезпечення в них мінімальної концентрації напружень.

В процесі виконання лабораторної роботи студенти знайомляться з розрахунковими методами визначення коефіцієнтів концентрації напружень, розраховують коефіцієнти концентрації напружень для різних типів зварних з'єднань. Досліджують розподілення напружень в цих з'єднань методом тензометрії. Проводять порівняння коефіцієнтів концентрації напружень визначених розрахунковим методом та методом тензометрії.

### **1.1 МЕТА РОБОТИ**

1.1.1 Вивчити розрахункові методи визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних з'єднаннях.

1.1.2 Визначити коефіцієнти концентрації напружень зварного стикового і таврового з'єднання розрахунковим методом.

1.1.3 Дослідити характер розподілення напружень зварного стикового таврового з'єднання тензометричним методом.

### **1.2 РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ТА ВИРОБАХ ІЗ НАПЛАВЛЕНИМИ ШАРАМИ**

Вивченню концентрації напружень у зварних з'єднаннях присвячена значна кількість досліджень, в яких на основі рішень

плоскої задачі теорії пружності для пластини змінної ширини запропоновані приближені формули для розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень. Однак використання цих формул викликає труднощі, так як майже всі вони потребують звертання до спеціальних графіків чи громіздких обчислювань. Найбільш зручні для розрахунків формули пропонуються в роботах [1 - 3]. В роботі [1] приведена формула, яка дозволяє з достатнім ступенем точності по геометрії зварних швів розрахувати теоретичні коефіцієнти концентрації напружень в стикових з'єднаннях; у роботі [2] виведені формули для розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень у зварних стикових і таврових з'єднаннях; в роботі [3] наведено аналітичні формули для розрахунку концентрації напружень у таврових з'єднаннях. Вплив геометрії зварних з'єднань на формування напруженого стану в зварному шві експериментально підтверджено за допомогою поляризаційно-оптичного метода на фотопружних моделях [1 - 5].

Найбільш зручні для практичного використання формули запропоновані в роботі [2] для стикових та таврових з'єднань (рис. 1.2.1). Для зварних стикових з'єднань (рис. 1.2.1а) формула для розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень має вигляд:

$$\alpha_k = 1 + 1.1g \frac{l_1^2 + 1}{S} \sqrt{\frac{g}{R}}, \quad (2.1)$$

де  $l_1 = \frac{l}{S}$ ;  $l$  - ширина зварного шва, мм;

$S$  - товщина зварювального металу, мм;

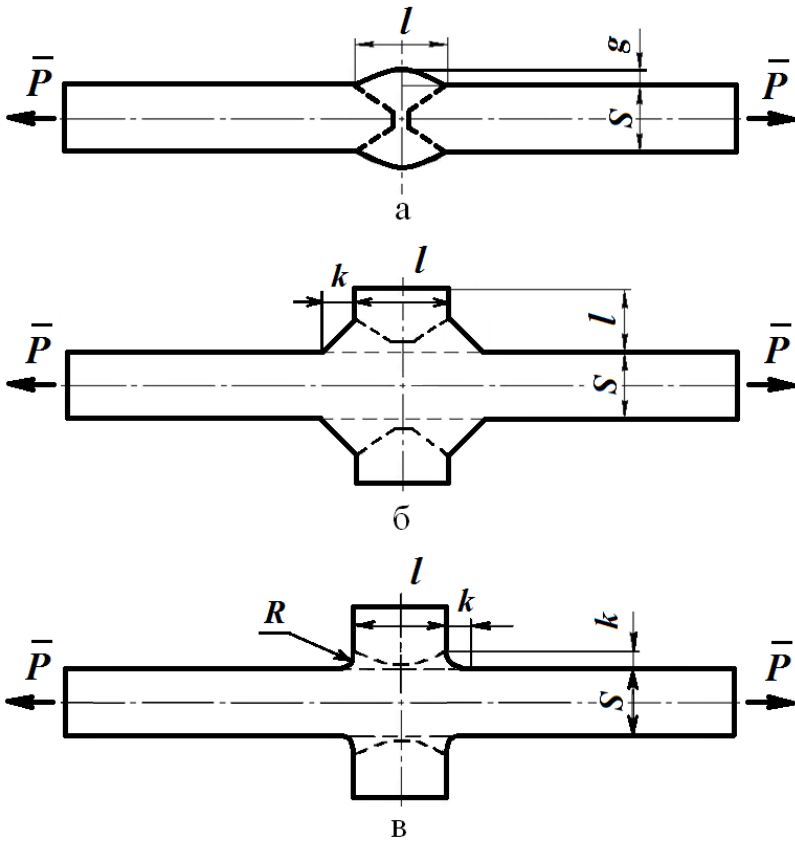
$g$  - висота підсилення зварного шва, мм;

$R$  - радіус переходу від наплавленого металу до основного, мм.

Для зварних таврових з'єднань (рис. 1.2.1 б) формула для визначення коефіцієнта концентрації напружень має вигляд:

$$\alpha_k = 1 + 0.2 \sqrt{\frac{2S-K}{R}}, \quad (2.2)$$

де  $K$  - катет шва, мм.



а – стикове з'єднання;

б, в – таврові з'єднання

Рисунок 1.2.1 – Геометричні форми зварних з'єднань

Для зварного таврового з'єднання, шви якого мають увігнуту форму (рис. 1.2.1 в), розрахунок коефіцієнта концентрації напружень проводиться за формулою:

$$\alpha_k = 1 + 0.4 \sqrt{\frac{2S+K}{R}}, \quad (2.3)$$

де  $R$  - радіус обрису шва, мм.

Приведені формули дозволяють розраховувати коефіцієнти концентрації напружень із достатньою, для практичних цілей, точністю ( $\pm 10\%$ ).

### **1.3 ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРІЇ**

Для вивчення характеру розподілення робочих і остаточних напружень у зварних конструкціях і з'єднаннях широко застосовується метод електротензометрії з використанням як тензоперетворювачів дрових або фольгових тензорезисторів (тензодатчиків). В основу роботи тензорезисторів покладена залежність омичного опору провідника від його довжини, питомого опору та перерізу. При прикладенні розтягувальної сили до тензорезистору змінюється його електричний опір внаслідок зміни довжини і перерізу провідника. Зміну опору провідника під дією розтягуючих або стискуючих деформацій називають тензорезисторним ефектом, який характеризується тензочутливістю, що встановлює зв'язок між відносною зміною опору і відносною деформацією в напрямку дії сили (вимірювань). Коефіцієнт тензочутливості тензорезистору:

$$S_t = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad (3.1)$$

Найбільше поширювання отримали тензорезистори з константового дроту діаметром 0,012...0,5 мм. Коефіцієнт тензочутливості константового дроту дорівнює  $S=2$  [1, 5] і не змінюється аж до самого його зруйнування.

Тензорезистор (тензодатчик) приклеюється до елементів конструкції і стає з ними як одне ціле. Деформація конструкції визиває деформацію провідника у тензорезисторі та змінює його електричний опір. Співвідношення (3.1) дозволяє розраховувати деформацію конструкції і визначити напруження, що з'являються у місці наклеювання датчика.

Для вимірювання зміни у опору тензорезисторів, що викликано деформацією, використовують спеціальні електровимірювальні схеми - потенціометричну і мостову. Найбільш поширеною схемою включення тензорезисторів є мостова (міст Уітстона) (рис.1.3.1). Вона складається

з чотирьох послідовно з'єднаних опорів ( $RB1$ ,  $RB2$ ,  $RK$ ,  $Rn$ ), джерела живлення, підсилювача, вимірювача та вимикача  $Q1$ .

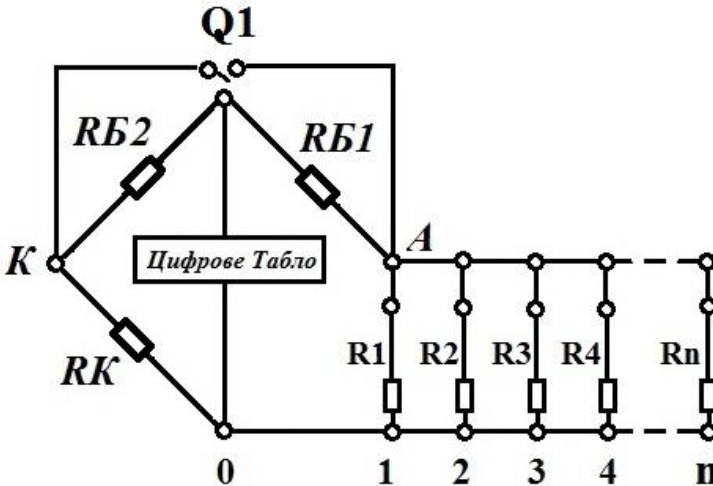


Рисунок 1.3.1 – Мостова схема включення тензорезисторів

При вимірюванні необхідно виключити вплив температури на електричний опір датчика, на довжину дроту тензорезистору, на деформацію об'єкту, що досліджується. Це досягається за допомогою так званих компенсаційних датчиків ( $RK$ ). Метод компенсації впливу температури полягає в застосуванні двох ідентичних тензорезисторів, один з яких наклеюється на зразок, що досліджується, а інший - на ненавантажену пластину з того ж матеріалу, яка знаходиться в тих же температурних умовах і цим автоматично компенсується вплив температури, що змінюється.

Якщо  $RB1 + RK = RB2 + Rn$  то напруга на виході мосту дорівнює нулю. При зміні активного опору тензорезистору напруга на виході моста не дорівнює нулю, що призводить до того, що через прилад реєстрації проходить струм розбалансу. Зміна сили струму розбалансу характеризує величину і знак деформації (напруження) в досліджуваному об'єкті. При проведенні експериментальних досліджень застосовується цифровий тензометричний комплект апаратури (ЦТК-1). Він дозволяє робити вимірювання деформацій послідовно в 198 точках досліджуваної конструкції за допомогою

дротових тензорезисторів і забезпечує автоматичне зчитування і виведення результатів на цифрове табло. Тензорезистори перемикаються автоматично або вручну з індикацією номера каналу (тензорезистора), що вимірюється.

Прилад ЦТК-1 складається з автоматичного електронного вимірювача деформації АВ, двох 100-позиційних автоматичних прецизійних перемикачів АП-3, пульта керування і з'єднувальних дротів. Живлення під напругою 2...4 В із частотою 50 Гц послідовно подається на з'єднані активний і компенсаційний тензодатчики, при цьому середня точка зовнішнього напівмосту має бути заземленою.

Вимірювання деформацій виконується у відповідності до інструкції по експлуатації приладу ЦТК-1. Ціна одиниці вимірювання комплектом ЦТК-1 залежить від тензочутливості тензодатчиків ( $S_g$ ). Прилад настроєний на чутливість  $S_n = 2,0$ . При цьому ціна шкали приладу складає  $1 \cdot 10^5$  одиниці відносної деформації.

Якщо тензочутливість ( $S_g$ ) застосованих датчиків не відповідає  $S_n$ , на яку настроєний комплект, то всі дані приладу коректуються множенням на коефіцієнт:

$$K = \frac{S_n}{S_g}, \quad (3.2)$$

#### **1.4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ**

Концентрація напружень характеризується коефіцієнтом концентрації напружень:

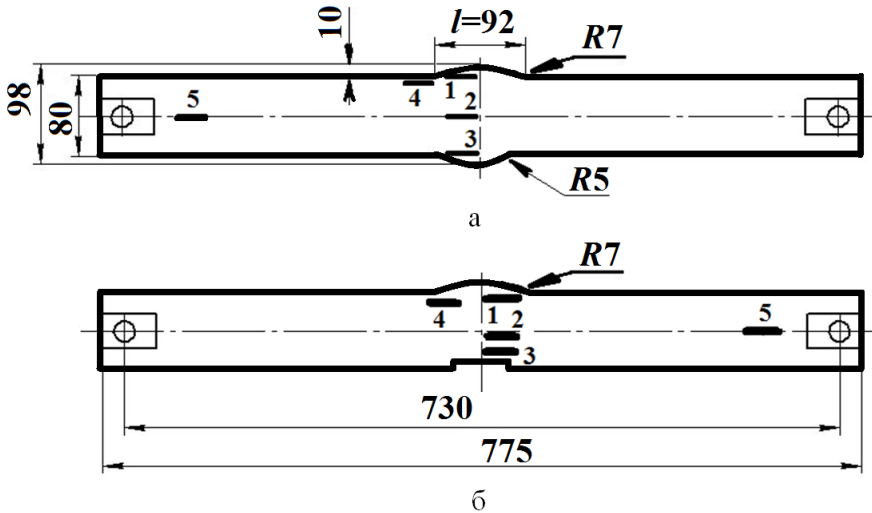
$$\alpha_k = \sigma_{max} / \sigma_{cp}, \quad (4.1)$$

де  $\sigma_{cp}$  - середнє напруження в перерізі з'єднання, що розглядається;

$\sigma_{max}$  - максимальнє напруження в місцях зміни форми елемента (підсилення шва, не провар, підріз).

В роботі досліджується розподілення і концентрація напружень у різних перетинах декількох типів зварних з'єднань. Випробуванню

підлягають макети, виготовлені з листового металу, з наклеєними на них тензорезисторами. Макети імітують поперечні перетини стикових та таврових зварних з'єднань (рис. 1.4.1, 1.4.2).



а – зразок із повним проварюванням;

б – зразок із неповним проварюванням

Рисунок 1.4.1 – Макети зварних стикових з'єднань з місця наклеювання 5 тензорезисторів

Тензорезистори наклеєні в місцях очікуваної концентрації напружень і на ділянках основного металу і металу шва. Статичне навантаження зразків робиться за допомогою розривної машини УММ-20. Навантаження при розтягуванні зразків, що випробуються, не повинно перевищувати 20000 Н.

Представлені моделі зварних з'єднань (див. рис. 1.4.1, 1.4.2) виконані із сталі Ст. 3 та мають товщину 5 мм. Моделі зазнають плоского напруженого стану. При цьому зв'язок між відносними деформаціями й напруженнями виражається узагальненим законом Гука:

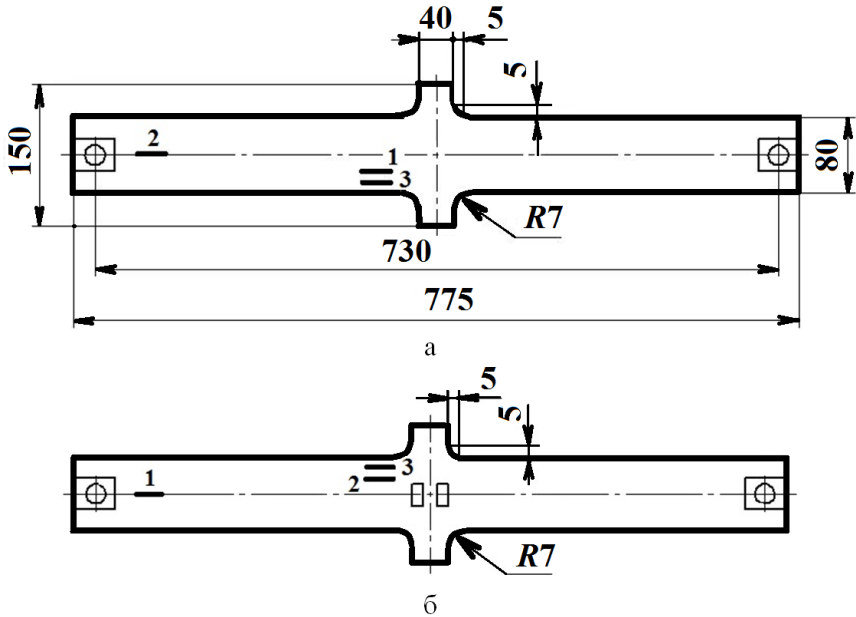
$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y); \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x), \quad (4.2)$$

де  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  - напруження в зоні вимірювання у напрямках вісі X та вісі Y;

$\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  - значення деформацій, отримані при вимірюваннях;

$\mu = 0,3$  - коефіцієнт Пуассона.

E - модуль пружності матеріалу, для сталі Ст.3 він становить –  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа.



а – з повним проплавленням;

б – неповним проплавленням

Рисунок 1.4.2 – Макети зварних таврових з'єднань з місця наклеювання тензорезисторів

Для одноосного напруженого стану величина  $\varepsilon_y$  набагато менше величини  $\varepsilon_x$ , тому в першому приближенні значення  $\varepsilon_y$  можна не враховуватися. Відповідно до закону Гука для одноосного напруженого стану, МПа:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (4.3)$$

Користуючись цим законом за результатами вимірювання деформації за допомогою тензорезисторів, за розтягуванні зразку, визначають експериментальні значення напруження в досліджуваних точках зварного з'єднання.

## 1.5 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ЗРАЗКИ

5.1 Зразки стикових та таврових зварних з'єднань із Ст.3 з наклеєними тензорезисторами.

5.2 Розривна машина УММ-20.

5.3 Комплект тензометричної апаратури ЦТК-1.

## 1.6 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

6.1 З урахуванням геометричних розмірів зварних з'єднань визначити розрахункові коефіцієнти концентрації напружень.

6.2 Встановити модель зварного стикового з'єднання в затискачі розривної машини і підключити комплект ЦТК-1 до тензорезисторів.

6.3 За допомогою кнопочного пульта по чергово підключити всі тензорезистори у вимірювальну схему (рис. 3.1). Показання цифрового табло автоматичного вимірювача АВ ( $n_1$ ,  $n_2$ ) записати у таблицю 1.6.1.

Таблиця 1.6.1 – Показання автоматичного вимірювача ЦТК-1

| Тип зварного з'єднання | Номер тензодатчика | Показання ЦТК-1            |                               | Значення величин |               |                   | Концентрація напруження |              |
|------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------------|--------------|
|                        |                    | $n_1$ ,<br>до навантаження | $n_2$ ,<br>після навантаження | $\Delta p$       | $\varepsilon$ | $\sigma$ ,<br>МПа | експериментальна        | розрахункова |
|                        |                    |                            |                               |                  |               |                   |                         |              |

6.4 Навантажити зразок силою в інтервалі 10000...20000 Н.

6.5 Послідовно підключити тензорезистори, зняти показання цифрового табло А В ( $p_2$ ) і записати до таблиці.

6.6 Визначити різницю  $\Delta p$  між показаннями до і після навантаження зразку.

6.7 Зняти навантаження із зразка, вийняти зразок із розривної машини.

6.8 Повторити експерименти з іншими моделями зварних з'єднань.

6.9 Використовуючи отримані дані та ціну поділки приладу ЦТК-1 ( $1 \cdot 10^{-5}$  одиниць відносної деформації), визначити для кожного тензорезистора відносну деформацію за навантаження  $\varepsilon$ .

6.10 За формулою (4.3) визначити напруження в місцях наклеювання датчиків.

6.11 За формулою (4.1) визначити коефіцієнти концентрації напружень в небезпечних перерізах. При цьому при визначенні  $\sigma_{cp}$  показання тензорезисторів І та 5 для стикових з'єднань (рис. 1.4.1) та І, 2 для таврових (рис. 1.4.2), розташованих поза зоною концентрації напружень не урахувати.

6.12 Порівняти розрахункові і експериментальні значення коефіцієнтів концентрації напружень

## 1.7 ВКАЗІВКИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1.7.1 До лабораторних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці та пожежної безпеки.

1.7.2 Забороняється вмикати електричні прилади та обладнання без дозволу завідуючого лабораторією або викладача.

1.7.3 У випадку виявлення неполадок обладнання студент повинен негайно повідомити викладача або завідуючого лабораторією.

1.7.4 У випадку виникнення пожежі або поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності з затвердженими інструкціями з охорони праці та пожежної безпеки.

## 1.8 ЗМІСТ ЗВІТУ

Звіт повинен мати:

- назву та мету роботи;
- стислий опис методу вимірювань напружень за допомогою тензодатчиків;
- схему мосту для вимірювання напружень;
- ескізи зразків, що досліджуються;

- результати вимірювання у вигляді таблиці із розрахунковими та експериментальними даними визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних з'єднаннях;
- порівняльний аналіз отриманих результатів та висновки по роботі.

## 1.9 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1.9.1 У чому полягає шкідливий вплив зварювальних напружень на конструкцію?

1.9.2 У чому полягає шкідливий вплив зварювальних деформацій на конструкцію?

1.9.3 Назвіть причини виникнення концентрації напружень в зварних з'єднаннях.

1.9.4 Наведіть приклади розрахункових методів визначення коефіцієнтів концентрації напружень в різних типах зварних з'єднань.

1.9.5 Поясніть суть методу електротензометрії та принцип роботи тензодатчиків (коефіцієнт тензочутливості тензорезистора).

1.9.6 У чому полягає зв'язок між відносними деформаціями і напруженнями, що виникають у випробуваному зразку.

1.9.7 Як впливають зварювальні напруження на міцність при статичному навантаженні, якщо конструкція виготовлена з достатньо пластичного матеріалу?

1.9.8 Як впливають зварювальні напруження на міцність конструкції при циклічному навантаженні?

1.9.9 Як впливають зварювальні напруження на жорсткість конструкції;

1.9.10 Як впливають зварювальні напруження на корозійну стійкість металу;

1.9.11 Як впливають зварювальні напруження на сповільнення руйнування металу.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### «Дослідження деформацій зварних з'єднань у процесі зварювання та охолодження»

У процесі зварювання відбувається нагрів металу та його розширення у напрямку переміщення джерела тепла. Менш нагріті та холодні ділянки металу перешкоджають вільному видовженню волокон, внаслідок чого у нагрітих зонах виникають напружена стиску та відбуваються пластичні деформації укорочення. При охолодженні металу відбувається його укорочення, що призводить до виникнення напружень розтягу та залишкової пластичної деформації подовження.

Величина залишкових напружень та деформацій зварних з'єднань залежить від багатьох факторів: хімічного складу, структури металу, режиму зварювання, розмірів зварювання зразків, теплофізичних і міцностних властивостей основного та наплавленого металу.

При зварюванні низьколегованих сталей відбуваються структурні перетворення у шві та зоні біля шва. Перетворення структури призводять до зміни об'єму фаз у зоні нагріву та викликають зміни механічних та фізичних властивостей матеріалу. Зміни властивостей матеріалу у зоні біля шва відбуваються як при нагріванні так і охолодженні, при відносно низьких температурах (500...600 °C). Все це впливає на величину пружної та пластичної деформації матеріалу у шві та зоні біля шва й призводить до макродеформацій зварювальної конструкції.

При зварюванні конструкцій із вуглецевої чи легованої сталей (окрім сталей феритного чи аустенітного класів) вплив структурного перетворення збільшується. Зміни відбуваються при більш високих температурах, що збільшує залишкові напруження й деформації зварних з'єднань.

Зміну деформації може бути досліджено шляхом нагрівання кромки пластини за різних технологічних режимів (постійного і періодичного) або наплавлення металу на кромку пластини із низьковуглецевої та легованої сталей із подальшим вимірюванням деформації (вигину пластини) у процесі охолодження до кімнатної температури. У випадку періодичного нагрівання відбувається вирівнювання температури у різних зонах пластини (нагрітої та холодної), що зменшує величину деформації. Вирівнювання

температури залежить від теплопровідності матеріалу, конструкції виробу та технології зварювання (додатковий нагрів чи охолодження).

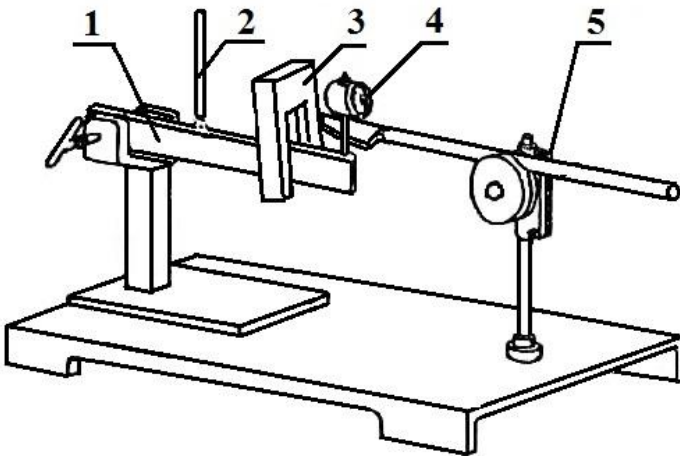
## 2.1 МЕТА РОБОТИ

Дослідити вплив технологічних режимів зварювання та наплавлення різних матеріалів на величину деформації зварних з'єднань у процесі нагрівання та охолодження.

## 2.2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

2.2.1 Визначити послідовність роботи. Вибрати матеріал (пластину) Ст.3 або 12Х18Н10, та режими зварювання чи наплавлення (постійне горіння дуги чи періодичне).

2.2.2 Пластину (зразок) встановити в установку (рис. 2.2.1) для вимірювання деформації у процесі нагрівання та охолодження.



1 – пластина (зразок), що нагрівається; 2 – електрод; 3 – захисний екран; 4 – індикатор годинникового типу; 5 – штатив

Рисунок 2.2.1 – Схема установки для визначення деформацій

2.2.1 Встановити і закріпити пластину (зразок) на вільному кінці пластини.

2.2.2 Виставити індикатор годинникового типу так, щоб вимірювальний шток індикатора знаходився у середньому положенні (значення 2 мм), а стрілка індикатора була на позначці нуль.

2.2.3 Встановити захисний екран.

2.2.4 Надіти захисні засоби (окуляри чи маску зварника, рукавиці, халат).

2.2.5 Встановити потрібний електрод.

2.2.6 Після перевірки безпечності роботи, увімкнути зварювальний апарат. Виставити потрібні режими зварювання ( силу току, напруження холостого хода та інші).

2.2.7 Нагрівати пластину чи наплавляти валик на кромку пластини посередині зразку за потрібного режиму.

2.2.8 Визначити відхилення кромки пластини на момент закінчення нагрівання. Зміни положення кромки зразку вимірювати через 10 с, до сталого положення індикатора (три однакових значення).

2.2.9 Результати вимірювання занести у таблицю 2, вказавши також розмір та матеріал пластини, режим та час нагрівання (наплавлення), марку електрода.

Таблиця 2.2.1 – Результати вимірювання деформації

| Режими зварювання, матеріал | Матеріал, напруга, сила струм, електрод, режим та інше   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| № виміру                    | 0                                                        | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| значення                    |                                                          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |
|                             | матеріал, напруга, сила струму, електрод, режими та інше |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |
| № виміру                    | 0                                                        | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| значення                    |                                                          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |

2.2.10 Повторити дослідження на інших режимах чи зразках.

2.2.11 На підставі даних таблиці побудувати графік положення кромки пластини за різних режимів зварювання (наплавлення).

2.2.12 На підставі даних таблиці побудувати графік положення кромки пластини у різних сталей, за однакових режимів зварювання чи наплавлення.

## 2.3 ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

- 2.3.1 Штативи.
- 2.3.2 Зварювальний апарат (марка за вибором викладача).
- 2.3.3 Пластини із різних типів сталей розмірами 300...400х40...50 мм і товщиною 3...5 мм.
- 2.3.4 Електроди марки УОНИ-13/55, Т-590, Т-620 та вугільний.
- 2.3.5 Індикатори годинникового типу (рис. 2.2).

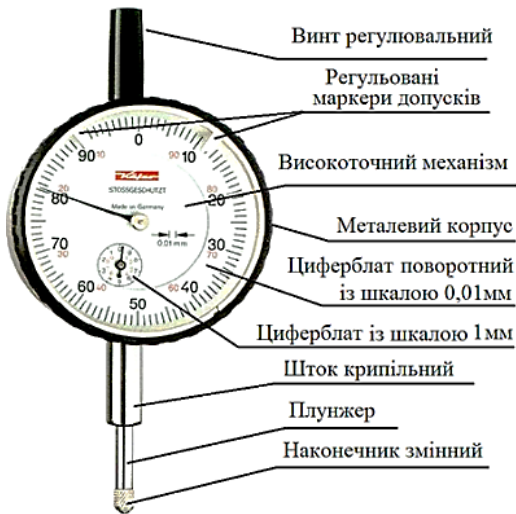


Рисунок 2.2.2 – Індикатор годинникового типу

- 2.3.6 Засоби безпеки (окуляри, маски зварника, рукавиці та халати).

## 2.4 ВКАЗІВКИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

- 2.3.6 До лабораторних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці та пожежної безпеки.

- 2.3.7 Забороняється вмикати електричні прилади та обладнання без дозволу завідуючого лабораторією або викладача.

2.3.8 У випадку виявлення неполадок обладнання студент повинен негайно повідомити викладача або завідуючого лабораторією.

2.3.9 У випадку виникнення пожежі або поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності з затвердженими інструкціями з охорони праці та пожежної безпеки.

## **2.5 ЗМІСТ ЗВІТУ**

Звіт повинен вміщати:

- опис методики проведення експериментів;
- результати експериментів у вигляді таблиць та графіків;
- аналіз отриманих результатів та висновків по роботі повинен містити інформацію про вплив режимів зварювання чи наплавлення на величину деформацій або залежність залишкових напружень та деформацій від властивостей матеріалу.

## **2.6 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

2.6.1 Які основні фізичні явища впливають на величини напружень, деформацій та переміщень.

2.6.2 Поясніть механізм виникнення залишкових напружень та деформацій при зварюванні чи напавленні.

2.6.3 Поясніть вплив структурних перетворень в сталях на утворення напружень та деформацій при зварюванні.

2.6.4 У яких випадках і чому структурні перетворення при зварюванні впливають на величину і знак залишкових напружень та деформацій?

2.6.5 Які фактори впливають на величини напружень, деформацій та переміщень при зварюванні чи напавленні.

2.6.6 Поясніть вплив температурних та пластичних деформацій, анізотропії властивостей, нерівномірність нагріву на утворення напружень та деформацій при зварюванні.

2.6.7 Надайте пояснення чому зварні з'єднання з низьколегованих сталей деформуються з часом?

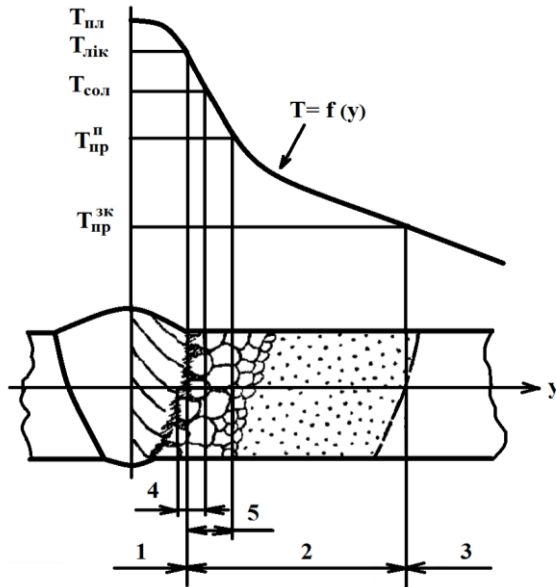
2.6.8 Чи будуть однаковими за величиною деформації зварних з'єднань низьковуглецевої та високолегованої аустенітної сталі за однакових параметрів режиму зварювання зразків?

2.6.9 Як впливають технологічні режими зварювання чи напавлення на величину залишкових напружень та деформацій.

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

#### «Дослідження неоднорідності властивостей зварних з'єднань»

Зварювальне стикове з'єднання у поперечному перетині має декілька ділянок із різними механічними властивостями. Це, передусім, сам шов, зварюваний метал у стані прокату, зона біля шва, яка може зазнавати структурні перетворення у залежності від температури нагрівання (зона нормалізації, зона рекристалізації, зона високого відпуску, зона низького відпуску та інші) (рис. 3.1).



1 – шов; 2 – зона термічного впливу; 3 – зварювальний метал;  
4 – зона сплавлення; 5 – зона біля шва

Рисунок 3.1 – Зони термічного впливу процесу зварювання на матеріал деталей

Безпосередньо зона шва може бути умовно поділена на зону рідкого металу із температурою плавлення ( $T_{пл}$ ), зону кристалізації із температурою початку утворення кристалів – температура ліквідус

сплаву ( $T_{\text{лік}}$ ) та температурою повного твердого стану – солідус ( $T_{\text{сол}}$ ). Температура початку термічних перетворень ( $T_{\text{пр}}$ ) структури зварювального матеріалу відповідає температурам поліморфного перетворення та реструктуризації, характерної для цього сплаву.

У різних матеріалах, у цих зонах може відбуватися як зміцнювання (збільшення твердості) так і знеміцнення (зменшення твердості). В тій чи іншій мірі для усіх з'єднань характерна відмінність механічних властивостей металу на різних ділянках, так звана механічна неоднорідність. Загалом, розглядають неоднорідність властивостей, а саме зміну твердості у різних зонах у поперечному перетині зварного з'єднання. Зони, де метал має знижену границю плинності і твердості, відносно границі плинності та твердості сусідніх ділянок металу, називають м'якими прошарками.

Зони, де метал має вищу твердість у порівнянні із основним металом (у стані прокату), називають твердими прошарками. Необхідність вивчення прошарків пояснюється тим, що механічні властивості зварних з'єднань такі, як міцність, здатність до деформації, енергоємність за руйнування, а також місця і характер руйнування залежать від ступеню, та топографії механічної неоднорідності, тобто, відносних розмірів м'яких і твердих прошарків, їх розташування відносно напрямку прикладеного зусилля.

### **3.1 МЕТА РОБОТИ**

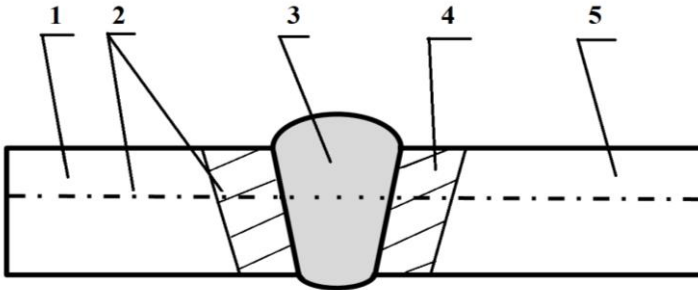
Визначити наявність і розміри м'яких та твердих прошарків у зварних стикових з'єднаннях.

### **3.2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

3.2.1 Шліфи поперечного перетину місця зварювання, що виготовленні зі стикових зварних з'єднань однорідних матеріалів розмітити для вимірювання твердості уздовж шліфу, через кожні 2...5мм. Схема нанесення місць вимірювання твердості наведена на рис. 3.2.1.

3.2.2 Зробити вимірювання твердості на твердомірі Роквелла ТР-5006 ГОСТ 23677-79 за шкалою С або В у залежності від твердості металу зразка.

3.2.3 Зробити вимірювання твердості на твердомірі Роквелла ТР-5006 ГОСТ 23677-79 за шкалою С або В у залежності від твердості металу зразка



- 1, 5 – деталі, що зварювалися;  
2 – місця вимірювання твердості;  
3 – шов; 4 – зона термічного впливу

Рисунок 3.2.1 – Схема розмітки зразку для визначення твердих та м'яких прошарків

3.2.4 Шліфи поперечного перетину місця зварювання, що виготовленні зі стикових зварних з'єднань різнорідних матеріалів розмітити для вимірювання твердості уздовж шліфу, через кожні 2...5мм див. рис. 3.2.1.

3.2.5 Зробити вимірювання твердості на твердомірі Роквелла ТР-5006 ГОСТ 23677-79 за шкалою В (куля діаметром 1,588мм).

### 3.3 ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

3.3.1 Зразки шліфів, виготовлених із зварних стикових з'єднань зі сталей Ст 3, низьколегованих, високолегованих сталей та сплавів.

3.3.2 Твердомір ТР-5006 ГОСТ 23677-79

### 3.4 ВКАЗІВКИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

3.4.1 До лабораторних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці та пожежної безпеки.

3.4.2 Забороняється вмикати електричні прилади та обладнання без дозволу завідуючого лабораторією або викладача.

3.4.3 У випадку виявлення неполадок обладнання студент повинен негайно повідомити викладача або завідуючого лабораторією.

3.4.4. У випадку виявлення пожежі або поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності з затвердженими інструкціями з охорони праці та пожежної безпеки.

### **3.5 ЗМІСТ ЗВІТУ**

Звіт повинен вміщати:

- опис методики проведення експериментів;
- на рисунку шліфа зварного стикового з'єднання, вказати місця вимірювання твердості, пронумерувавши їх з урахуванням, двох-трьох вимірювань на основному металі, шві і праворуч та ліворуч від шва на основному металі. Результати вимірювань твердості занести до таблиці.
- за результатами вимірювань побудувати графік розподілу твердості в поперечному перетині зварного стикового з'єднання. Визначити розміри м'яких та твердих прошарків; надати пояснення походження прошарків, враховуючи їх місце розташування; сформулювати передбачений механізм впливу прошарків на механічні властивості зварного з'єднання, взагалі.
- аналіз отриманих результатів та висновків по роботі повинен містити інформацію про вплив режимів зварювання чи наплавлення на величину деформацій або залежність залишкових напружень та деформацій від властивостей матеріалу.

### **3.6 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

3.6.1 Поясніть чому зварні стикові з'єднання неоднорідні за механічними властивостями?

3.6.2 Які зони зварного з'єднання називаються м'якими та твердими прошарками?

3.6.3 З якою метою виникає необхідність вивчення механічної неоднорідності зварних з'єднань?

3.6.4 Назвіть механізми впливу м'яких та твердих прошарків на міцність зварних з'єднань?

## Рекомендована література

### Базова

1. Касаткин, В. С. Напряжения и деформации при сварке [Текст] / В. С. Касаткин, В. М. Прохоренко, И. М. Чертков. – К.: Вища школа, 1987. – 246с.
2. Винокуров, В. А. Сварочные деформации и напряжения Методы их устранения [Текст] / В. А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 236с.
3. Єрмолаєв, Г. В. Міцність зварних з'єднань: підручник [Текст] / Г. В. Єрмолаєв. – Миколаїв : НУК, 2007. – 220 с.
4. Напруження та деформації при зварюванні і паянні: підручник [Текст] / Л. М. Лобанов, Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, О. В. Махненко, Г. В. Єгоров, А. В. Лабарткава; за заг. ред. Л. М. Лобанова. – Миколаїв: НУК, 2016. – 246 с.
5. Касаткин, Б. С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие [Текст] / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанів. – К.: Наукова думка, 1981. – 581с.

### Допоміжна

1. Гуляев, А.П. Металоведение [Текст] / А.П. Гуляев. – М.: Металургия, 1978. – 648 с.
2. Брок Д. Основы механики разрушения [Текст]: Пер. с англ. / Д. Брок. – М.: Высшая школа, 1980, – 368 с.
3. Николаев, Г. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций [Текст] / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1971. – 760 с.
4. Паяння матеріалів: підручник [Текст] / Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, С. В. Максимова, В. Ф. Хорунов, В. В. Чигарьов ; за заг. ред. В. Ф. Хорунова і В. Ф. Квасницького. – Миколаїв : НУК, 2015. – 340 с.

### Інформаційні ресурси

1. Сайт [zntu@otzw.ua](mailto:zntu@otzw.ua).
2. Все о сварке, сварочных технологиях и оборудовании <http://weldingsite.com.ua/gas.html>.