

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи № 1
«Визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних
з'єднаннях» з дисципліни «Напруження та деформації при
зварюванні» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»
всіх форм навчання

2019

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 1
«Визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних
з'єднаннях» з дисципліни «Напруження та деформації при
зварюванні» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»
всіх форм навчання / Укл.: І.М. Білоник, О.Є. Капустян – Запоріжжя:
ЗНТУ, 2019. - 18 с.

Укладачі: І.М. Білоник, канд. техн. наук, доцент
О.Є. Капустян, старш. викл.;
Рецензент: А.О. Шумілов, канд. техн. наук, доцент
Редактор: І.П. Аверченко
Відповідальний за випуск: О.Є. Капустян

Затверджено
на засіданні кафедри ОТЗВ
Протокол №15 від 22.5.2019 р.

Рекомендовано
до видання НМК ІФФ
Протокол №8 від 20.06.2019 р.

ЗМІСТ

1 МЕТА РОБОТИ	4
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	4
2.1 Розрахункові методи визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних з'єднаннях	4
2.2 Вимірювання напружень у зварних з'єднаннях методом електротензометрії	7
2.3 Призначення і принцип роботи ЦТК-1	9
2.4 Підготовка тензометричного комплекту ЦТК-1 до роботи	10
2.5 Визначення ціни поділки комплекту ЦТК-1	12
2.6 Експериментальне дослідження концентрації напружень у зварних з'єднаннях	12
3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ	15
4 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ	15
5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ	15
6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ.....	16
7 ЗМІСТ ЗВІТУ	17
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	17

1 МЕТА РОБОТИ

- 1 Вивчити розрахункові методи визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних з'єднаннях.
- 2 Визначити коефіцієнти концентрації напружень зварного стикового і таврового з'єднання розрахунковим методом.
- 3 Дослідити характер розподілення напружень зварного стикового таврового з'єднання електротензометричним методом.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

У зварних з'єднаннях [1, 2] напруження розподіляються нерівномірно. Зміна, форми елементів конструкцій в районі зварних з'єднань порушує розподілення силового потоку і приводить до місцевої концентрації напружень, ступінь якої у зварних з'єднаннях залежить від їхнього конструктивного оформлення.

В практиці проектування конструкцій зустрічаються випадки, коли необхідно призначити розміри зварних з'єднань, при забезпеченні в них мінімальної концентрації напружень. В процесі виконання лабораторної роботи студенти знайомляться з розрахунковими методами визначення коефіцієнтів концентрації напружень, розраховують коефіцієнт концентрації напружень для одного з типів зварних з'єднань, а потім досліджують розподілення напружень в ньому методом електротензометрії.

2.1 Розрахункові методи визначення коефіцієнтів концентрації напружень у зварних з'єднаннях

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, 2, 3]. В роботі [1] приведена формула, котра 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] - 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 зварних стикових з'єднань (рис. 2.1) формула для розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень має вигляд:

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

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. 2.1 б) формула для визначення коефіцієнта концентрації напружень має вигляд:

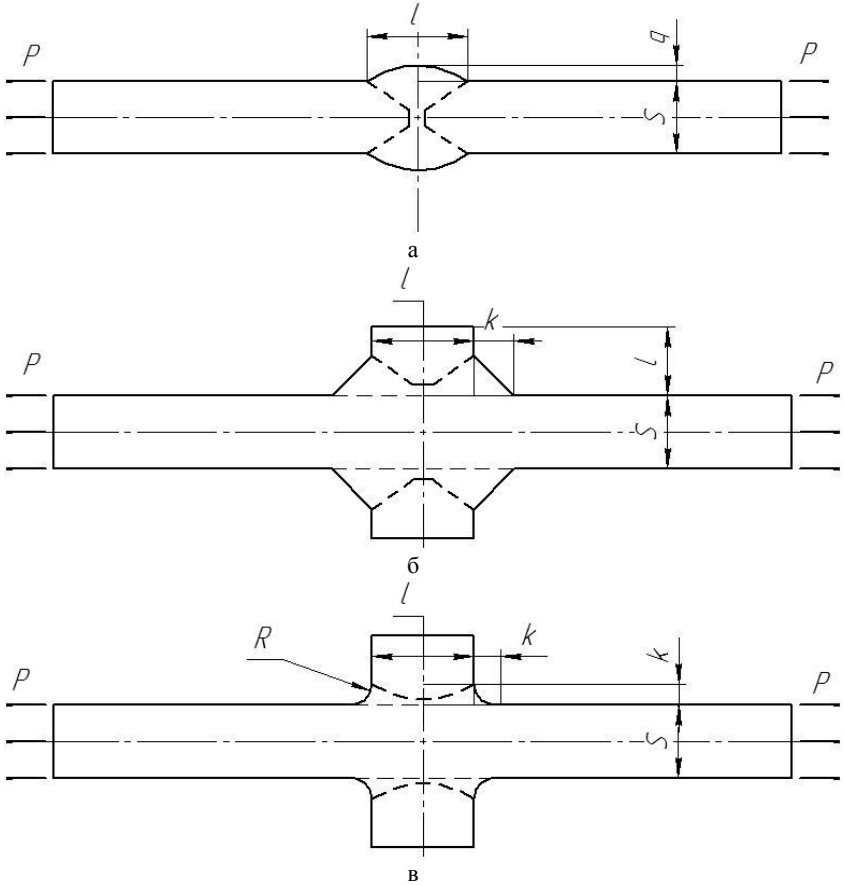
$$\alpha_k = 1 + 0.2 \frac{\sqrt{2S-K}}{R}, \quad (2.2)$$

де K - катет шва, мм.

Для зварного таврового з'єднання, шви якого мають увігнуту форму (рис. 2.1 в), розрахунок коефіцієнта концентрації напружень проводиться за формулою:

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

де R - радіус обрису шва, мм.



а - стикові; б, в - таврові

Рисунок 2.1 - Геометричні розміри зварних з'єднань

Приведені формули дозволяють розраховувати коефіцієнти концентрації напружень із достатньою для практичних цілей точністю ($\pm 10\%$ за порівнянням з уточненим рішенням).

2.2 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 тензорезистора покладена залежність омичного опору провідника від його довжини, питомого опору та перерізу. При прикладенні розтягуючої сили до тензорезистора 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 вимірювань. Коефіцієнт тензочутливості тензорезистора:

$$S_t = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}. \quad (2.4)$$

У вітчизняній техніці найбільше розповсюдження отримали тензорезистори з константового дроту діаметром 0,012...0,5 мм. Коефіцієнт тензочутливості константового дроту дорівнює 2 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 тензорезистора і зміну його опору.

Співвідношення (2.4) дозволяє виміряти деформацію конструкції і визначити напруження, що з'являються в місці наклеювання датчика.

Для вимірювання змін опору тензорезисторів, викликаних деформацією, використовують спеціальні електровимірювальні схеми - потенціометричну і мостову [6].

Найбільш розповсюджена схема включення тензорезисторів - мостова (міст Уїтстона). Вона складається з чотирьох послідовно з'єднаних опорів (R_{B1} , R_{B2} , R_K , R_n), джерела живлення, підсилювача і вимірювача (рис. 2.2).

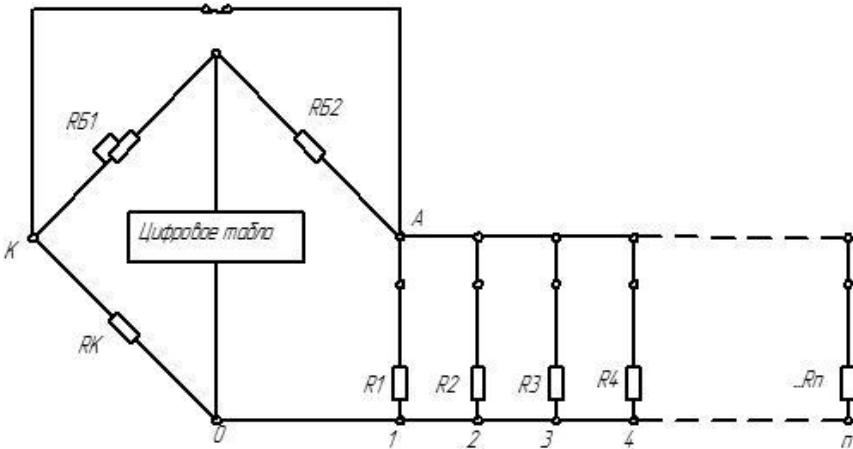


Рисунок 2.2 – Мостова схема включення тензорезисторів

При тензометруванні необхідно виключити вплив температури на електричний опір датчика, на довжину дроту тензорезистора, 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 досліджувальну деталь, а другий - на ненавантажену пластину з того ж матеріалу, яка знаходиться в тих же температурних умовах. Датчики вмикаються в сусідні плечі моста, і цим автоматично компенсується вплив температурних змін.

Якщо

$$R_{B1} \cdot R_K = R_{B2} \cdot R_n,$$

то напруга на виході моста дорівнює нулю. При зміні активного опору тензорезистора напруга на виході моста не дорівнює нулю і через реєструючий прилад проходить струм розбалансу. Зміна сили струму розбалансу характеризує величину і знак деформації (напруження) в об'єкті, що досліджується.

При проведенні експериментальних досліджень застосовується комплект тензометричної апаратури ЦТК-1.

2.3 Призначення і принцип роботи ЦТК-1

Комплект тензометричної апаратури ЦТК-1 призначений для вимірювання статичних деформацій. Він дозволяє робити вимірювання деформацій послідовно в 198 точках конструкції, що досліджується за допомогою дровових тензорезисторів і забезпечує автоматичне зчитування і виведення результатів на цифрове табло. Тензорезистори перемикаються автоматично або вручну з індикацією номера каналу вимірювання.

Прилад ЦТК-1 складається з автоматичного електронного вимірювача деформації АВ, двох 100-позиційних автоматичних прецизійних перемикачів АП-3, пульта керування і живлення, кнопчного пульта і з'єднувальних кабелів.

В автоматичному вимірювачі деформацій АВ через клеми «А» і «К» подається живлення напругою 2...4 В з частотою 50 Гц на послідовно з'єднані активний і компенсаційний тензодатчики, при цьому середня точка зовнішнього напівмосту заземлюється через клему «О».

Внутрішній міст приладу складається з двох опорів і п'ятивиткового реохорда. Вхідний трансформатор підсилювача увімкнений між двигком реохорда і клемою «О», тобто в діагоналі тензометричного мосту.

Сигнал розпобіжностей після підсилення подається на обмотку двигуна, вал якого через кінематичну схему відпрацьовує двигок реохорда до узгодження мосту. Показання розбалансу мосту в одиницях відносної деформації з'являються на цифровому табло автоматичного вимірювача деформацій (АВ).

Автоматичний перемикач АП-3 складається з електромагнітного шагового механізму, двох магнітних катушок, ламельного барабану, кодового диска, щіткового вузла. Вони з'єднані послідовно і живляться імпульсами напруги 30 В. Ламельний барабан має на зовнішній циліндричній поверхні два ряди ламелей: ряд активних і ряд компенсаційних ламелей. В кожному ряду по 100 ламелей, які носять номери: від 0 до 99. Всі ці ламелі можуть бути з'єднані з активними тензорезисторами. Ламельний барабан обслуговується щітковим вузлом, який здійснює шагові кутові переміщення: на АП-3 є кнопка, яка дозволяє натисненням на неї послідовно перемикати

номера каналів.

Ці перемикання можуть здійснюватися також кнопочним пультом.

На диску АП-3 є номери ламелей 0-98, що відповідають номерам тензорезисторів 1-99. Ламель № 99 служить для включення магнітних котушок.

Автономний блок керування і живлення складається з силової частини і схеми автоматичного керування.

Силова частина живить підсилювач блоку АВ змінною напругою 220 В і ланцюга управління автоматики - постійною напругою 250 В і 30 В.

Схема автоматичного керування забезпечує роботу ЦТК-1 у трьох режимах: 1 - напіваавтоматичному; 2 – автоматичному симетричному; 3 - автоматичному несиметричному.

Робота в 1-му, 2-му або 3-му режимі задається установкою кнопочного перемикача КП в положення 1,2 або 3.

Кнопочний перемикач КП знаходиться у верхній частині задньої стінки блока АП.

При натисненні кнопки КП в блоці АП, або ж кнопочного пульту, в автоматичний вимірювач деформацій АВ надсилаються імпульси. Першим імпульсом здійснюється читання і на табло автоматичного вимірювача деформацій АВ з'являється показання. При повторному натисненні на кнопку КП здійснюється скидання числа і надсилання імпульсу на перемикання каналу в перемикач АП.

Протягом витримки часу робиться відпрацювання нового показання і заспокоювання аналогової системи. Після цього за допомогою імпульсу на зчитування, що надсилається від електронного реле часу, на табло автоматичного вимірювача деформацій АВ з'являються нові показання і схема фіксується в цьому положенні до слідуючого натиснення на кнопку КП.

2.4 Підготовка тензометричного комплексу ЦТК-1 до роботи

При роботі з цифровим тензометричним комплектом ЦТК-1, необхідно виконувати наступні операції.

1 Заземлити всі блоки приладу.

2 На блоці АВ тумблер поставити в положення «ЦТК-1». При роботі двома перемикачами АП цей тумблер також встановлюється в положення «ЦТК-1». В цьому випадку після вимірювань 99 тензодатчиками перемикання на 2-й АП (ЦТК-1) відбувається автоматично (на першому АП стрілка показчика повинна стояти між лімбами 0 та 99).

3 За допомогою перемикача встановити необхідний режим в блоці керування і живлення:

1 - напівавтоматичний; 2,3 - автоматичний.

Режимами 2, 3 слід користуватись за наявності значного навіка в роботі з комплектом ЦТК-1.

4 Увімкнути тумблер «Сеть» на блоці керування і живлення.

5 Перемикач АП встановити в початкове положення (0 на лімбі). Для цього необхідно при увімкненому приладі (мережа 220 В), натиснувши на кнопку перемикача в АП, повертати ручку на лімбі АП за годинниковою стрілкою і грубо (не доходячи) встановити перемикач в необхідну позицію. Точне встановлення на необхідну позицію здійснюється окремими, послідовними натисненнями на кнопку. При цьому позиції «0» на лімбі перемикача АП відповідає підключенню 1-го тензодатчика до вимірювального мосту.

6 Увімкнути вимикач мережа «~» на АВ і надати п'ятихвилинне прогрівання підсилювача.

7 Перевірити якість монтажу ланцюгів зовнішнього напівмосту. Для цього кнопкою перемикача АП перемикаються канали. Правильно змонтований напівміст при ненавантаженій конструкції визначається стійким установленням стрілок в зоні шкали стрілочної індикації АВ 400...600 поділок.

8 В обов'язковому порядку перед роботою з комплектом в блоці АП змастити ламельний барабан похитуванням перемикача АП. При цьому блок АП беруть на руки і нахилиють почергово в кожну з чотирьох сторін на кут 45°.

Кінцева підготовка комплекту ЦТК-1 до роботи виконується та контролюється учбовим майстром або лаборантом.

2.5 Визначення ціни поділки комплекту ЦТК-1

Ціна поділки комплекту ЦТК-1 залежить від тензочутливості (S_g) тензодатчиків. Прилад настроєний на чутливість $S_n = 2,0$. При цьому ціна поділки шкали приладу складає 1×10^5 одиниць відносної деформації.

Якщо S_g застосованих датчиків не відповідає тензочутливості, на яку настроєний комплект, то всі дані приладу коректуються множенням на коефіцієнт:

$$K = \frac{S_n}{S_g}.$$

Тоді

$$\Delta h' = k \cdot \Delta n,$$

де Δn - різниця відліків за приладом АВ при роботі з датчиками тензочутливістю S_g .

2.6 Експериментальне дослідження концентрації напружень у зварних з'єднаннях

Концентрація напружень характеризується коефіцієнтом концентрації напружень

$$\alpha_k = \sigma_{max} / \sigma_{cp} \quad (2.5)$$

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

σ_{max} - максимальне напруження в місцях зміни форми елемента (підсилення шва, непровару, підрізу).

В роботі досліджується розподілення і концентрація напружень в різних перерізах декількох типів зварних з'єднань.

Випробуванню підлягають макети, виготовлені з листового металу, з наклеєними на них тензорезисторами. Макети імітують поперечні перерізи стикових і таврових з'єднань (рис. 2.3, 2.4). Тензорезистори наклеєні в місцях очікуваної концентрації напружень

і на ділянках основного металу і металу шва.

Навантаження зразків робиться за допомогою розривної машини УММ-20. Навантаження при розтягуванні зразків, що випробуються, не повинно перевищувати 20000 Н.

Представлені на рис. 2.3, 2.4 моделі зварних з'єднань виконані із сталі Ст. 3 мають товщину 5 мм. Моделі зазнають плоского напруженого стану. При цьому зв'язок між відносними деформаціями й напруженнями виражається узагальненим законом Гука:

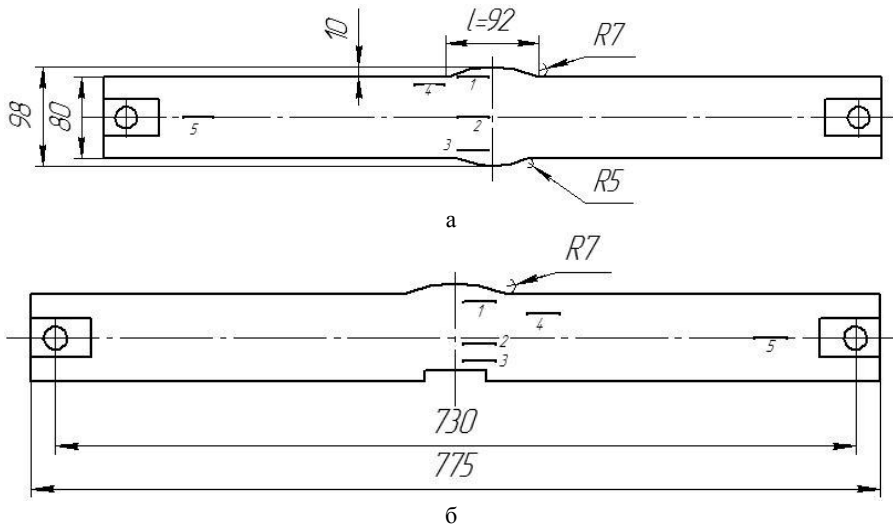
$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x)\end{aligned}\quad (2.6)$$

де σ_x , σ_y - напруження в зоні вимірювання;

ε_x , ε_y - значення деформацій, отримані при вимірюваннях;

E - модуль пружності матеріалу, для сталі Ст. 3 $E=2,1 \times 10^5$ МПа;

$\mu = 0,3$ - коефіцієнт Пуассона.



а - односторонній з повним проварюванням; б - з неповним проварюванням;
Н - місця наклеювання датчиків

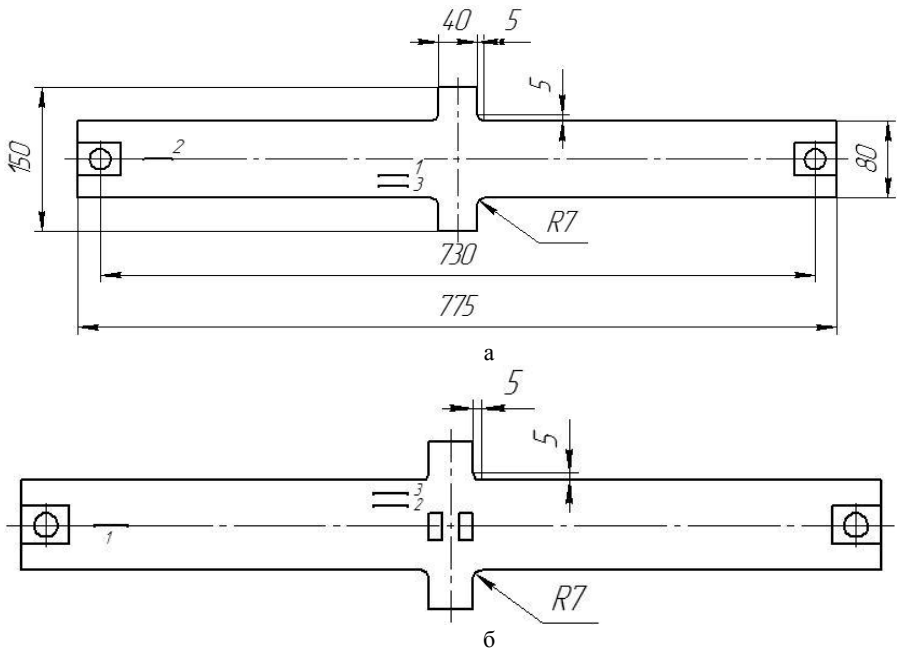
Рисунок 2.3 - Макети зварних стикових з'єднань

Так як величина ε_y набагато менше величини ε_x , то в першому приближенні цей зв'язок можна виразити законом Гука для

одноосного напруженого стану, МПа:

$$\sigma = \varepsilon E. \quad (2.7)$$

Користуючись цим законом за результатами заміру деформації за допомогою тензорезисторів при розтягуванні моделі, визначають експериментально значення напруження в досліджуваних точках зварного з'єднання.



а - з повним проплавленням; б - неповним проплавленням

Рисунок 2.4 - Макет зварних таврових з'єднань

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ

1. Причини виникнення концентрації напружень в зварних з'єднаннях.
2. Розрахункові методи визначення коефіцієнтів концентрації напружень в різних типах зварних з'єднань.
3. Суть методу електротензометрії, принцип роботи тензодатчиків (коефіцієнт тензочутливості тензорезистора).
4. Зв'язок між відносними деформаціями і напруженнями, що виникають у випробуваному зразку.
5. Підготовка комплекту ЦТК-1 до роботи, визначення ціни поділки приладу.

4 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ

- 1 Макети зварних з'єднань з наклеєними на них тензорезисторамн.
- 2 Розривна машина УММ-20.
- 3 Цифровий тензометричний комплект ЦТК-1.

5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

- 5.1 До лабораторних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці та пожежної безпеки.
- 5.2 Забороняється вмикати електричні прилади та обладнання без дозволу завідуючого лабораторією або викладача.
- 5.3 У випадку виявлення неполадок обладнання студент повинен негайно повідомити викладача або завідуючого лабораторією.
- 5.4 У випадку виникнення пожежі або поразки електричним

струмом студенти повинні діяти у відповідності з затвердженими інструкціями з охорони праці та пожежної безпеки.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. З урахуванням геометричних розмірів зварних з'єднань визначити розрахункові коефіцієнти концентрації напруження.

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

3. За допомогою кнопочного пульта почергово підключити всі тензорезистори у вимірювальну схему (рис. 3.1). Показання цифрового табло автоматичного вимірювача АВ (n_1) записати до табл. 6.1.

Таблиця 6.1 - Показання цифрового табло автоматичного вимірювача

Тип зварного з'єднання	Номер тензодатчика	Показання ЦТК-1		Значення величин			Концентрація напружень	
		n_1 позн.	n_2 позн.	Δn позн.	ε	σ , МПа	дослід на	розрахунко ва
		до нагріву	після нагріву					

4 Навантажити зразок зусиллям 10000...20000 Н.

5 Послідовно підключити тензорезистори, зняти показання цифрового табло АВ (n_2) і записати до таблиці 6.1.

6 Визначити різницю, Δn , між показаннями цифрового табло до і після навантаження зразків.

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

8. Повторити експерименти з іншими моделями зварних з'єднань.

9 Використовуючи отримані дані та ціну поділки приладу ЦТК-1 (1×10^{-5} одиниць відносної деформації), визначити для кожного тензорезистора відносну деформацію при навантаженні ε .

10 За формулою (2.7) визначити напруження в місцях

наклеювання датчиків.

11 За формулою (2.5) визначити коефіцієнти концентрації напружень в небезпечних перерізах. При цьому при визначенні $\sigma_{сер}$ показання тензорезисторів 1, 5 для стикових з'єднань (рис. 2.3) та 1, 2 для таврових (рис. 2.4), розташованих поза зоною концентрації напружень, не урахувати.

12 Порівняти розрахункові і експериментальні значення коефіцієнтів концентрації напружень.

7 ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Назва і мета роботи.
2. Розрахункове визначення коефіцієнтів концентрації напружень в зварних з'єднаннях.
3. Стислий опис методу вимірювання напружень за допомогою тензодатчиків.
4. Схема мосту для вимірювання напружень.
5. Стислий опис будови та принципу дії приладу ЦТК-1.
6. Ескізи зразків, що випробуються.
7. Результати випробувань у вигляді таблиці.
8. Результати розрахунків і експериментальних визначень коефіцієнтів концентрації напружень в небезпечних перерізах.
9. Аналіз отриманих результатів.
10. Висновки по роботі.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кархин В.А., Копельман Л.А. Концентрация напряжений в стыковых соединениях. // Сварочное производство. 1976. № 2. С. 6-7.
2. Турмов Г.П. Определение коэффициента концентрации напряжений. // Автоматическая сварка. 1976. № 10. С. 14-16.
3. Бакши О.А., Зайцев Н.Л., Шрон Л.Б. Влияние геометрии угловых швов на коэффициенты концентрации и градиенты

напряжении в тавровых соединениях. Сварочное производство. 1982. №8. С. 3-5.

4. Гузь И.С., Иосевич И.С., Гайдамака А.В. Влияние геометрии стыковых швов на напряженное состояние. Автоматическая сварка. 1979. №6. С. 5-7.

5. Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Полухин П.И., Чиченев Н.А. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие под ред. В.С. Касаткина. К.: Наук. думка. 1981. – 584 с.

6. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И. М. Напряжения и деформации при сварке. К.: Вища школа, 1987. 246 с.