

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Г.В. ЄРМОЛАЄВ, С.А. ЛОЙ, А.В. ЛАБАРТКАВА

**ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з дисципліни "Напруження та деформації при
зварюванні"**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2004

УДК 621.791

Єрмолаєв Г.В., Лой С.А., Лабарткава А.В. Збірник лабораторних робіт з дисципліни "Напруження та деформації при зварюванні". – Миколаїв: НУК, 2004. – 52 с.

Кафедра зварювального виробництва

Збірник містить дев'ять лабораторних робіт з дослідження механізму утворення деформацій і напружень при зварюванні та їх експериментального і розрахункового визначення.

Призначений для студентів спеціальності 8.092301 "Технологія та устаткування зварювання" при вивченні дисципліни "Напруження та деформації при зварюванні", а також може бути використаний як посібник при виконанні досліджень і розрахунків в процесі дипломного проектування.

Рецензент канд. техн. наук, проф. С.В. Драган

Лабораторна робота № 1

ВИВЧЕННЯ МЕТОДІВ ВИМІРУ ДЕФОРМАЦІЙ З ОЦІНКОЮ ЇХ ТОЧНОСТІ

Мета роботи: ознайомитися з двома методами виміру лінійних деформацій – фізичним і механічним (відповідно використовуються дровтові датчики і механічні деформометри); вивчити основні елементи статистичної обробки результатів вимірів, оцінити точність різних методів виміру.

Короткі теоретичні відомості

Результат будь-якого виміру – випадкова величина, що залежить як від неоднорідності властивостей об'єкта, так і від інструментальних помилок виміру.

Звичайно чисельне значення властивості визначається за результатами кількох вимірів. Сукупність з N значень певної властивості для даних умов іспиту – це статистична вибірка, що є частиною генеральної сукупності значень цієї властивості, об'єм якої теоретично нескінченно великий.

При нормальному законі розподілу окремих значень властивості її середнє значення x_{cp} розраховують як середнє арифметичне:

$$x_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (1.1)$$

Перш ніж визначити середнє значення, рекомендується перевірити, чи немає серед отриманих значень тих, що різко відрізняються від інших результатів випробувань. Вони звичайно є наслідком або грубої помилки у вимірах, або наявності великих дефектів у зразку. Такі результати варто виключити з подальшого розгляду. Окрім грубих помилок, необхідно, по можливості, виявити і врахувати помилки систематичні, тобто такі, природа яких відома, а величина може бути визначена. Наприклад, систематична помилка може бути викликана зсувом стрілки вимірювального приладу відносно нульового положення.

Помилки у результатах вимірів, з яких вилучені грубі та систематичні помилки, називають випадковими. Вони зумовлені дією великого числа факторів, вплив кожного з яких на вимірювану властивість не можна виділити і врахувати окремо. Випадкові помилки неможливо передбачити, але за допомогою методів теорії ймовірностей їх можна розрахувати і взяти до уваги при визначенні справжнього значення вимірюваної величини.

Для оцінки випадкової помилки (похибки) окремих вимірів визначають їх відхилення від середнього у вигляді дисперсії

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{\text{cp}})^2 \quad (1.2)$$

чи середнього квадратичного (стандартного) відхилення

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{\text{cp}})^2}{N-1}}. \quad (1.3)$$

Важливою характеристикою точності вимірів є також відносна величина середнього квадратичного відхилення – коефіцієнт варіації

$$w = \frac{s}{x_{\text{cp}}}. \quad (1.4)$$

Усі зазначені характеристики самі по собі ще мало говорять про надійність отриманих результатів. Найбільш повну оцінку

впливу помилок дає довірчий інтервал або довірчі межі в сполученні з довірчою ймовірністю.

Довірча ймовірність α – це ймовірність того, що відмінність істинного значення вимірюваної величини x від її середнього значення x_{cp} не перевищує похибки Δx , тобто

$$\alpha = P[-\Delta x < (x - x_{cp}) < \Delta x].$$

Довірчий інтервал – це інтервал значень від $x - \Delta x$ до $x + \Delta x$, у якому лежить справжнє значення величини x із встановленою довірчою ймовірністю. Рівні довірчої ймовірності звичайно приймають рівними 0,9; 0,95 або 0,99.

Похибка вимірів Δx визначається за середнім квадратичним відхиленням s , критерієм Стюдента t і числом вимірів N :

$$\Delta x = \frac{ts}{\sqrt{N}}. \quad (1.5)$$

Критерій Стюдента t залежить від обраної довірчої ймовірності α і числа вимірів N (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Значення критерію Стюдента

α	Значення t при числі вимірів N										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	∞
0,90	2,92	2,35	2,13	2,01	1,95	1,89	1,86	1,83	1,81	1,76	1,65
0,95	4,30	3,18	2,78	2,57	2,40	2,36	2,31	2,26	2,23	2,14	1,96
0,99	6,96	4,54	3,75	3,36	3,14	2,99	2,90	2,82	2,76	2,60	2,33

Один з методів визначення достовірного середнього при мінімальному N ґрунтується на апіорному завданні можливого розкиду x у межах довірчого інтервалу, тобто на визначенні Δx чи $\delta = \Delta x/x_{cp}$, якщо вони не відомі з попередніх дослідів. При цьому використовується співвідношення

$$\delta > \frac{wt}{\sqrt{N}}, \quad (1.6)$$

$$N \geq \left(\frac{w}{\delta} \right)^2 t^2. \quad (1.7)$$

Для рішення (1.7) можна скористатися методом послідовних наближень або графічним методом, оскільки критерій Стюдента t залежить від числа вимірів N .

Користуючись табл. 1.1, можна побудувати криву (1.7) у системі координат N – y і в цих же координатах провести пряму $y = N$. Точка перетину кривої і прямої покаже найменше значення N , що задовольняє умові (1.7).

Устаткування, прилади, матеріали

Вимірювання деформацій виконується на металевій пластині, що моделює поперечний переріз зварного з'єднання, модель розтягується на пристрої із зусиллям до 50 кН.

Деформації вимірюються двома методами: за допомогою механічного деформометра ДРВ-2 (рис. 1.1) конструкції КПП або дровтових тензодатчиків.

Деформометр складається з жорсткого корпусу 1, у якому укріплені нерухома 4 і рухома 2 конічні ніжки та індикатор годинникового типу 3, що дозволяє вимірювати переміщення рухомої

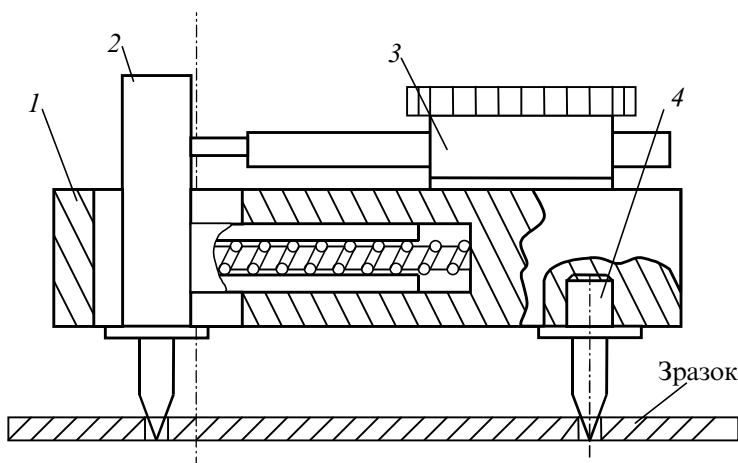


Рис. 1.1

ніжки з точністю до 0,01 мм. У якості гнізд для установки конічних ніжок деформометра на пластину використовуються отвори діаметром 1 мм. Деформометр установлюється вістрями ніжок у базові поглиблення (отвори) і утримується у вертикальному положенні рукою.

Точність настроювання деформометра перевіряється на спеціальній еталонній планці. Перевірку необхідно робити перед початком роботи і не менше ніж два-три рази у процесі виконання вимірів.

При проведенні вимірів необхідно пам'ятати, що деформометр є точним приладом, чутливим до ударів, поштовхів і т. п., тому треба поводитися з ним обережно.

Метод дротової тензометрії – один з найбільш розповсюджених фізичних методів виміру лінійних деформацій і напружень у різних інженерних спорудах та їх елементах (деталях машин, мостів, корпусів суден).

Дротові тензодатчики виготовляють з константанового дроту діаметром у кілька десятків мікрометрів. Тензодатчик (рис. 1.2) складається з чутливого елемента 1, виводів 2 та електроізоляційної підкладки 3. На підкладку нанесено шар клею 4, за допомогою якого тензодатчик приклеюється до бази В.

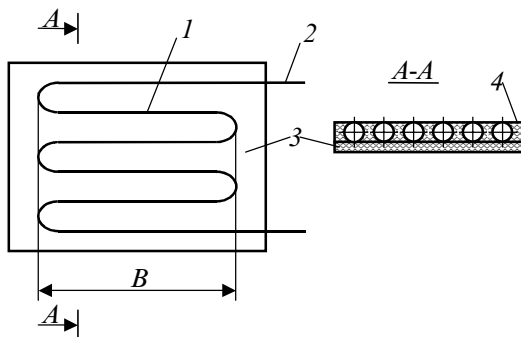


Рис. 1.2

Якщо металевий дріт розтягти, то внаслідок зміни питомого опору матеріалу, довжини і перетину дроту його електричний опір теж зміниться. Досвід показує, що ця зміна опору пропорційна до деформації металу, що виникає, і може бути використана для її виміру. Якщо деформації деталі пружні, то пропорційно до них змінюються і напруження. У цьому випадку дротові датчики дозволяють визначати не тільки деформацію, але і напруження в матеріалі деталі.

Вимірювальний пристрій, за допомогою якого вимірюється зміна опорів робочих датчиків, містить у собі гальванометр, пере-

микач, реохорд і джерело постійної напруги (рис. 1.3). Робочі тензодатчики $P_1 - P_6$ і один компенсаційний датчик K створюють два пле-

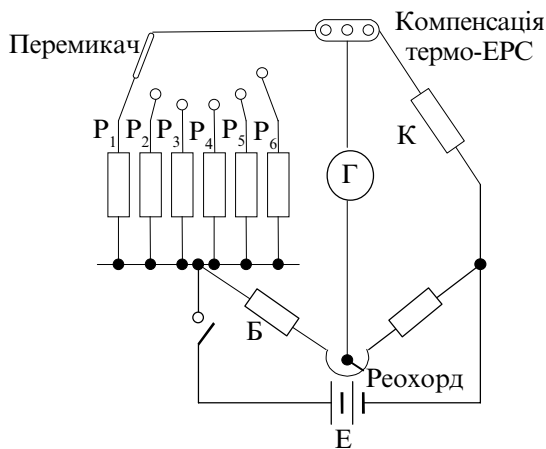


Рис. 1.3

ча моста. Два інших плеча створюють тензодатчики B , що наклеєні на ненавантажений елемент конструкції.

Виміри виконуються у такій послідовності:

1. На прилад подають живлення і прогрівають протягом 15 хв.
2. Підключають датчик P_1 , для чого перемикач датчиків ставлять у положення 1.

3. Роблять балансування моста і знімають

вихідне (нульове) показання, для чого за допомогою перемикача діапазонів установлюють грубий баланс. Перемикач ставлять у таке положення, при якому стрілка гальванометра різко перекидається з однієї сторони на іншу. Точна установка стрілки гальванометра на нуль виконується реохордом. Показання після балансування моста складається з номера діапазону перемикача і відліку за шкалою реохорда.

4. Повторюють операцію п. 3 для всіх датчиків, перемикаючи їх за допомогою відповідного перемикача. Результати виміру початкових показань записують у таблицю.

5. Після навантаження конструкції і виникнення напружень повторюють операції пп. 3 і 4. Якщо при зростанні деформації тензометр не балансується на тому діапазоні, на якому знятий нульовий відлік, використовують перемикач. Результати виміру показань після навантаження записують у таблицю.

6. Виконують первинну обробку результатів виміру, при якій величина деформацій знаходиться як різниця між вимірами при навантаженні та без нього.

Для одержання дійсних значень напружень за допомогою ви-

мірювального пристрою потрібне тарування. У якості тарувального може бути використаний один з робочих датчиків, якщо напруження в місці його установки можна досить точно визначити іншими методами, наприклад розрахунком. Для компенсації можливого вигину зразка з його площини, що сильно впливає на показання тензодатчиків, останні наклеюють з двох боків зразка один під одним. Зразок-макет вставляють у захват розтягувальної машини, приєднують тензодатчики до вимірювального пристрою і вимірюють напруження, що виникають при навантаженні його визначеним зусиллям розтягу. Щоб виключити вплив вигину, при підрахунку напружень беруть середнє збільшення від показань тензодатчиків, розташованих з різних боків зразка.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з методикою виміру деформацій за допомогою механічного деформометра і дровових датчиків. Підготувати таблиці для запису вимірів і обчислень.

2. Виконати по десять вимірів кожним із двох методів до ($R_{\text{п}}$) і після ($R_{\text{к}}$) навантаження. Результати вимірів занести в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Результати вимірів тензодатчиками (деформометром)

Номер виміру	$R_{\text{п}}$	$R_{\text{к}}$	$x_i = R_{\text{к}} - R_{\text{п}}$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1					
...					
10					
Σ	—	—			

3. Виключити грубі помилки.

4. Визначити середнє значення за формулою (1.1).

5. Обчислити дисперсію s^2 і середнє квадратичне відхилення s за формулами (1.2) та (1.3).

6. Знайти похибку вимірів Δx (за формулою (1.5)) та довірчий інтервал при довірчій імовірності 0,95.

7. Підрахувати коефіцієнт варіації w і відносну помилку δ за формулами (1.4) та (1.6).

8. Визначити необхідне мінімальне число вимірів для одержання результату з відотною помилкою $\delta = \pm 0,05$ при знайденому

значенні коефіцієнта варіації w і довірчої ймовірності 0,95 за формулою (1.7).

9. Пп. 3–8 повторити для обох методів.

10. Порівняти точність обох методів.

Контрольні питання

1. З якою метою проводиться статистична обробка результатів вимірів?

2. Середнє арифметичне і математичне очікування.

3. Статистична вибірка і генеральна сукупність.

4. Види помилок вимірів.

5. Дисперсія і середнє квадратичне відхилення.

6. Коефіцієнт варіації.

7. Довірчий інтервал.

8. Довірча ймовірність.

9. Від чого залежить критерій Стюдента?

10. Від чого залежить мінімально необхідне число випробувань (вимірів)?

11. Похибка виміру, відносна похибка. Від чого вони залежать?

Лабораторна робота № 2

ТЕМПЕРАТУРНІ ТА ЗАЛИШКОВІ ДЕФОРМАЦІЇ І НАПРУЖЕННЯ ПРИ НАГРІВАННІ СТРИЖНЯ

Мета роботи: ознайомитись з механізмом утворення деформацій і напружень при зварюванні на прикладі нагрівання стрижня в різних умовах закріплення.

Короткі теоретичні відомості

При зварюванні має місце різко виражене нерівномірне нагрівання. У цьому випадку окремі волокна металу зварного елемента можна розглядати як певні стрижні, що нагріваються в умовах закріплення. Тому процеси, що відбуваються в стрижні, дозволяють одержати якісну картину утворення деформацій і напружень при зварюванні.

Між напруженнями і деформаціями при нагріванні не завжди

зберігається залежність, що встановлена законом Гука. Для розуміння процесів, що приводять до утворення залишкових деформацій і напружень, необхідно чітко уявляти різницю між температурними і силовими деформаціями. Вони різняться не тільки причинами, що їх викликають, але і своєю природою. Температурні деформації є наслідком вільного теплового розширення металу. Силові деформації виникають під дією зовнішніх і внутрішніх сил.

Температурні деформації ϵ^α , якщо вони розвиваються вільно, не викликають напружень. На відміну від них, силові деформації є завжди пов'язані із силовим впливом на метал. Вони виникають або при наявності зовнішньої сили, або при зміні температури в закріпленому стані. В останньому випадку роль зовнішніх сил відіграють реакції закріплення.

Силова деформація в загальному випадку складається з пружної і пластичної складових, тобто

$$\epsilon = \epsilon^{\text{пр}} + \epsilon^{\text{пл}}.$$

Співвідношення між пружною і пластичною складовими залежить від рівня діючих сил і властивостей металу. Так, під дією невеликої сили P при нормальній температурі у стрижні виникає тільки пружна деформація. Зі збільшенням сили деформація зростає і досягає граничного значення $\epsilon_{\text{г}}$, що відповідає границі плинності при даній температурі $\sigma_{\text{г}}$. Подальше збільшення сили приведе до появи і росту пластичної деформації. При високій температурі метали і сплави втрачають свої пружні властивості. Так, наприклад, у низьковуглецевої сталі при температурі $T \geq 600^\circ\text{C}$ границя плинності близька до нуля, тому навіть невелика сила викликає пластичну деформацію; пружна складова при цьому близька до нуля.

Пружна складова силової деформації залежить тільки від навантаження в даний час і пов'язана з напруженнями законом Гука

$$\sigma = E\epsilon^{\text{пр}}.$$

Пластична деформація визначається всією історією навантаження, тому між нею і напруженнями такої залежності немає. Так, після пластичного стиску стрижня і зняття навантаження напруження дорівнюють нулю, тоді як пластичні деформації відмінні

від нуля. Більш того, якщо такий стрижень завантажити розтяжною силою у межах пружних деформацій, напруження і пружні деформації подовження в ньому будуть поєднуватися з пластичними деформаціями укорочення.

У цій роботі температурні та силові деформації вивчаються за допомогою зразка, що є системою трьох жорстко зв'язаних між собою стрижнів – нероз'ємних (рис. 2.1) або роз'ємних, деформації

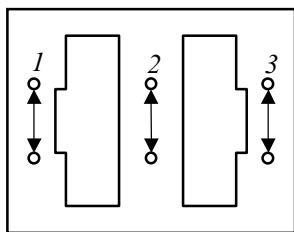


Рис. 2.1

яких вимірюються деформометрами або індикаторами годинникового типу.

Нагріванню піддається тільки середній стрижень 2. При відсутності зв'язку середнього стрижня із зовнішніми (що не нагріваються) у ньому виникають тільки температурні деформації. Якщо усі стрижні жорстко зв'язані між собою, вільне розширення середнього стрижня при нагріванні неможливе, тому в усіх стрижнях з'являються си-

лові деформації. При цьому в середньому стрижні вони будуть поєднуватися з температурними.

Деформації і напруження, що виникають у стрижнях при нагріванні, називаються тимчасовими. Вони змінюються протягом усього процесу нагрівання й охолодження. Після повного охолодження в стрижнях залишаються тільки залишкові напруження і деформації.

При виконанні роботи необхідно не тільки визначити величину виникаючих тимчасових і залишкових деформацій, але і виділити їх складові: температурну, пружну, пластичну.

Порядок виконання роботи

1. Визначення температурних деформацій при нагріванні стрижня у вільному стані.

1. Нагріти за допомогою газового пальника (або іншими методами) незакріплений стрижень до температури 100, 300, 600 °С. Записати показання деформометра: початкові (N_0), при різних температурах (N_1 , N_2 , N_3) і залишкові, після повного охолодження стрижня (N_0). Відлік показань індикаторів виконується за двома шкалами: мала показує цілі міліметри, велика – соті частки міліметра. При цьому заміряється не абсолютна довжина стрижнів, а тільки відхилення від початкового значення. На підставі вимірів

визначити температурні деформації:

$$\epsilon^{\alpha} = \frac{N_{\tau} - N_{\pi}}{l},$$

де l – початкова довжина стрижня, мм.

2. Порівняти отримані значення з теоретичними:

$$\epsilon^{\alpha} = \alpha T,$$

де $\alpha = 10,5 \cdot 10^{-6}$, град⁻¹ – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стрижня. Пояснити причини можливої розбіжності виміряних і теоретичних температурних деформацій.

3. Охолодити стрижень до початкової температури і визначити залишкові деформації:

$$\epsilon_0 = \frac{N_0 - N_{\pi}}{l}.$$

4. Результати усіх вимірів і розрахунків записати в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Результати вимірів у першому випробуванні

Номер стрижня	N_{Π}	N_1	N_2	N_3	N_0	ε_1^{α}	ε_2^{α}	ε_3^{α}	ε_0
	мм								
I									
II									
III									

Зробити висновки про характер деформацій, що виникають при нагріванні вільного стрижня.

II. Визначення деформацій при нагріванні закріпленого стрижня.

1. Закріпити середній стрижень і нагріти до температури 100 °С. Записати показання індикаторів початкові (N_{π}) і після нагрівання (N_{τ}). Визначити деформації стрижнів:

$$\epsilon^{\Sigma} = \frac{N_{\tau} - N_{\pi}}{l}.$$

2. Знайти силові деформації при нагріванні:

$$\varepsilon = \varepsilon^{\Sigma} - \varepsilon^{\alpha},$$

де ε^{α} – температурні деформації, що виміряні в першому випробуванні.

3. Визначити границю пружних деформацій стрижня $\varepsilon_{\text{т}} = \sigma_{\text{т}} / E$. Порівняти з отриманим значенням силових деформацій і зробити висновок про можливість появи пластичних деформацій.

4. Охолодити стрижень до початкової температури і визначити залишкові пружні та пластичні деформації:

$$\varepsilon_0^{\text{пр}} = \frac{N_0 - N'_0}{l}, \quad \varepsilon_0^{\text{пл}} = \frac{N'_0 - N_{\text{п}}}{l},$$

де N_0 – показання індикатора після охолодження в закріпленому стані; N'_0 – показання індикатора після охолодження і зняття закріплення.

5. Порівняти отримані значення залишкових пластичних деформацій з очікуваними. Результати вимірів і розрахунків записати в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Результати вимірів

Номер стрижня	$N_{\text{п}}$	$N_{\text{т}}$	N_0	N'_0	ε^{Σ}	ε	$\varepsilon_{\text{т}}$	$\varepsilon_0^{\text{пл}}$	$\varepsilon_0^{\text{пр}}$	σ_0 , МПа
	мм									
	Друге випробування									
I										
II										
III										
	Третє випробування									
I										
II										
III										

6. Повторити випробування, нагріваючи стрижень до 600 °С. При визначенні межі пружних деформацій нагрітого стрижня врахувати, що при температурі вище 600 °С матеріал стрижня практично цілком втрачає пружні властивості, тобто $\sigma_{\text{т}} = 0$.

7. Визначити залишкові напруження σ_0 . Результати вимірів і розрахунків записати в табл. 2.2.

8. Зробити висновки за результатами вимірів і розрахунків.

Контрольні питання

1. Вектор внутрішніх сил, що діють на одиницю площі даної елементарної площадки при стягуванні її у точку.

2. Відносна величина взаємного зміщення точок об'єкта в результаті його деформування.

3. Деформації, що виникають:

а) при зовнішньому навантаженні силами;

б) унаслідок теплового розширення;

в) унаслідок структурних перетворень.

4. Деформації металу, що

а) зникають після зняття зовнішнього навантаження;

б) залишаються після зняття зовнішнього навантаження.

5. Види силових деформацій.

6. Які деформації утворюються при нагріванні стрижня?

7. Як виміряти деформації стрижня:

а) температурні;

б) пружні;

в) пластичні?

8. Від чого залежить величина деформацій при нагріванні стрижня:

а) температурних;

б) пружних;

в) пластичних?

9. У якому випадку виникають пластичні деформації при нагріванні стрижня?

ПОЗДОВЖНІ ЗВАРЮВАЛЬНІ ДЕФОРМАЦІЇ ТА НАПРУЖЕННЯ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ВАЛИКА НА КРАЙКУ ПЛАСТИНИ

Мета роботи: експериментальне і теоретичне визначення укорочення, вигину, величини усадкової сили та точки її прикладання після наплавлення валика на крайку пластини, що знаходиться у вільному стані.

Короткі теоретичні відомості

У процесі зварювання відбувається нагрівання металу і його розширення. Менш нагріті та холодні ділянки металу перешкоджають вільному подовженню волокон, у результаті чого в нагрітих зонах виникають напруження стиску і протікають пластичні деформації укорочення. При охолодженні металу відбувається його скорочення, з'являються напруження розтягу і пластичні деформації подовження. Ці деформації, як правило, менші за пластичні деформації укорочення, що виникають при нагріванні, тому в зоні зварного з'єднання після повного охолодження мають місце залишкові пластичні деформації укорочення $\epsilon_0^{пл}$. Зона, у межах якої зосереджені ці деформації, називається зоною пружно-пластичних деформацій. Якщо ординати епюри $\epsilon_0^{пл}$ помножити на модуль пружності металу E і проінтегрувати ці сили в межах зони пружно-пластичних деформацій, то одержимо так звану усадкову силу P .

Величина усадкової сили залежить від теплофізичних властивостей металу (теплоємності, коефіцієнта лінійного розширення, модуля пружності) і ступеня нагрівання при зварюванні (погонної енергії).

Для низьковуглецевої сталі й елементів великої жорсткості справедлива рівність

$$P = -0,335 \frac{\alpha}{\sigma_p} E q_{\pi} \text{ Н}, \quad (3.1)$$

де q_{π} – погонна енергія зварювання, Дж/см; α – коефіцієнт темпера-

турного розширення, 1/град; c_p – об'ємна теплоємність, Дж/см³·град; E – модуль нормальної пружності, Н/см².

З урахуванням обмеженої жорсткості зварного елемента усадкову силу можна визначити за формулою

$$P' = \frac{P}{1 - \frac{P}{\sigma_T} \left(\frac{e^2}{I} + \frac{1}{F} \right)}, \quad (3.2)$$

де P – усадкова сила, що обчислена за формулою (3.1); σ_T – межа плинності металу, Н/см²; F та I – площа і момент інерції площі поперечного перерізу зварного елемента, см² и см⁴; e – ексцентриситет прикладання усадкової сили відносно центра ваги поперечного перерізу, см.

Поздовжня усадка може характеризуватися не тільки усадковою силою, але й відносним об'ємом поздовжнього укорочення v (см³), що приходить на одиницю довжини шва, і абсолютним V (см³) – на всю його довжину.

Величина об'єму поздовжнього укорочення пов'язана з усадковою силою простою залежністю

$$v = \frac{P}{E} l_{\pi}. \quad (3.3)$$

Площа зони пружно-пластичних деформацій визначається за формулами:

для елемента великої жорсткості

$$F_T = \frac{-P}{\sigma_T} \text{ см}^2; \quad (3.4)$$

для елемента обмеженої жорсткості

$$F_T = \frac{1}{\frac{1}{F} + \frac{e^2}{I} - \frac{\sigma_T}{P}} \text{ см}^2. \quad (3.5)$$

Усадкові сили викликають укорочення і, якщо шов розташований не в центрі ваги перерізу, вигин пластини моментом $M = Pe$.

Поздовжнє укорочення по осі зварного елемента

$$\Delta_{\text{позд}} = \frac{Pl_1}{EF} \text{ см.} \quad (3.6)$$

Вигин може характеризуватися кутом повороту поперечних перерізів

$$\varphi = \frac{Ml_2}{EI} \text{ рад} \quad (3.7)$$

і стрілкою прогину осі для балки на двох опорах

$$f = \frac{Ml_3^2}{8EI} \text{ см} \quad (3.8)$$

або консольної балки

$$f = \frac{Ml_3^2}{4EI} \text{ см.} \quad (3.9)$$

Тут l_1 , l_2 , l_3 – бази, на яких заміряються укорочення, кути повороту і стрілка прогину.

У даній роботі вивчаються залишкові і тимчасові деформації, що викликаються поздовжньою усадкою шва на крайці пластини з низьковуглецевої сталі. Вимір деформації та змін залишкової і тимчасової стрілок прогину здійснюється на базі 280 мм у спеціальному приладі (рис. 3.1), який складається з жорсткої балки 1,

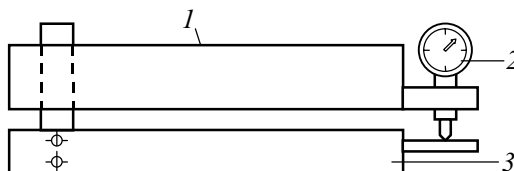


Рис. 3.1

індикатора годинникового типу 2 і пластини 3, на крайку якої наплавляється валик. Залишкова деформація може бути виміряна також за допомогою зразка на рис. 3.2. Вимір

укорочення виконується за допомогою деформометра ДРВ-2 (конструкції КПІ) на базі 100 мм.

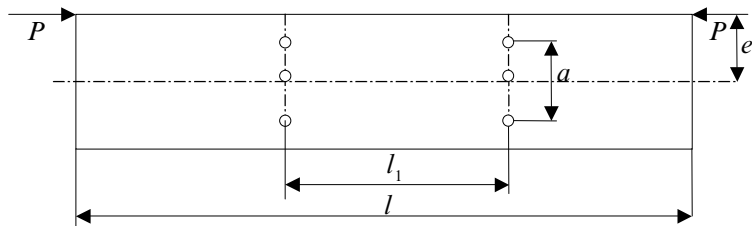


Рис. 3.2

Для збільшення точності виміру установка деформометра на кожній базі здійснюється не менше трьох разів і записується середній результат з точністю до 0,005 мм.

Порядок виконання роботи

І. Вивчення кінетики зварювальних деформацій.

1. Ознайомитись із конструкцією приладу для вимірювання деформацій (див. рис. 3.1).
2. Заміряти розміри штаби, обчислити площу поперечного перерізу і його момент інерції.
3. Наплавити валик на крайку пластини, записати показання індикатора через кожні три секунди на протязі всього процесу наплавлення і після закінчення через 3, 6, 10, 20, 30 с і т. д. до повного охолодження. Записати також режим (струм, напругу, швидкість) зварювання. Останній вимір зробити після повного охолодження пластини. Результати вимірів і розрахунку деформацій (як різниця поточного і першого вимірів) занести в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Результати вимірів тимчасових деформацій прогину пластини

Значення деформації	Під час наплавлення				Після закінчення наплавлення					
	час, с									
	0	5	10	...	5	10	15	20	25	...
Показання індикатора										
Деформація										

4. Побудувати графік залежності величини прогину від часу.
5. Визначити залишкову стрілку прогину в залежності від по-

гонної енергії та геометричних параметрів перерізу за формулою (3.9). Порівняти її з експериментальною після повного охолодження.

6. Проаналізувати результат і зробити висновки.

II. Вивчення залишкових деформацій і напружень.

1. Одержати пластину, зробити ескіз і записати розміри. Деформометром вимірити базу 100 мм на трьох рівнях із двох боків пластини. Вимір кожної бази зробити не менше ніж три рази, середні результати вимірів записати в табл. 3.2.

2. Установити пластину на призми в пристрої для виміру прогину так, щоб надріз на пластині потрапив на праву призму. Затиснути пластину гвинтами. Зняти відлік показань індикатора, вимір повторити не менше ніж три рази, середнє значення записати в табл. 3.2.

3. Вийняти пластину з пристрою і наплавити валик на крайку. Записати силу струму $I_{зв}$, напругу на дузі U_d , час зварювання. Підрахувати швидкість и погонну енергію зварювання q_n .

4. Після повного охолодження зробити повторний вимір відстаней і прогину, результати занести в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Результати вимірів залишкових деформацій, мм

Номер бази	Початковий вимір	Вимір після зварювання	Деформація від зварювання	Середнє значення
1				
2				
3				
Стрілка прогину f				

5. За результатами вимірів обчислити укорочення $\Delta_{\text{позд}}$. За формулою (3.6) визначити усадкову силу P , маючи на увазі, що база виміру укорочення $l_1 = 100$ мм.

6. Установити пластину в пристрої для виміру прогину і записати показання індикатора. За різницею вимірів до і після зварювання підрахувати стрілку прогину f .

7. За формулою (3.8) визначити момент M усадкової сили з урахуванням того, що база виміру прогину $l_3 = 280$ мм.

8. За різницею укорочень у верхніх і нижніх волокнах пластини визначити кут вигину

$$\varphi = \frac{\Delta_1 - \Delta_3}{a}.$$

9. За формулою (3.7) підрахувати момент M , маючи на увазі, що база виміру кута повороту перерізів $l_2 = 100$ мм. Порівняти значення моментів, що знайдені через стрілку прогину (п. 7) і кут (п. 8). Зробити висновок про точність виконаних вимірів.

10. Обчислити ексцентриситет усадкової сили $e = M / P$. Порівняти отримане значення e з відстанню від осі пластини до її крайки.

11. Визначити за формулами (3.1) і (3.2) розрахункове значення усадкової сили. Порівняти його з отриманим на підставі виміру укорочення.

12. Визначити обсяг поздовжнього укорочення за формулою (3.3).

13. Визначити за формулами (3.4) і (3.5) площу зони пружно-пластичних деформацій F_T , підрахувати ширину цієї зони $b_T = F_T / s$ (для усадкової сили брати значення, отримане за результатами вимірів).

14. Перевірити відповідність розмірів перерізу пластини, ширини зони пружно-пластичних деформацій і ексцентриситету. Зробити висновки про точність розрахункових формул.

15. На підставі отриманих значень укорочень $\Delta_{\text{позд}}$ у трьох волокнах пластини та ширини зони пружно-пластичних деформацій b_T побудувати епюру залишкових напружень у поперечному перерізі

$$\sigma_i = \frac{\Delta_i}{l_i} E.$$

Контрольні питання

1. Причини виникнення усадкової сили після зварювання.

2. Залежність напруження σ_x у активній та реактивній зонах перерізу пластини від погонної енергії зварювання, товщини, ширини і довжини пластини, властивостей металу.

3. Як зміниться стрілка прогину f , якщо збільшити погонну енергію (товщину, ширину, довжину пластини)?

4. Як зміниться укорочення $\Delta_{\text{позд}}$ на осі пластини, якщо збільшити погонну енергію (товщину, ширину, довжину пластини і базу виміру)?

5. Види зварювальних переміщень.

6. Деформації, що утворюються у процесі зварювання.

7. Основний параметр, що визначає деформації поздовжнього укорочення в інженерних розрахунках.

8. Наведіть залежність між усадковою силою P і обсягом поздовжнього укорочення v ?

9. Від чого залежить усадкова сила після зварювання?

10. Укажіть властивості основного металу, що визначають:

а) усадкову силу в інженерних розрахунках;

б) об'єм поздовжнього укорочення в них.

11. Укажіть параметри режиму, що визначають об'єм поздовжнього укорочення в інженерних розрахунках.

12. Зона, у межах якої зосереджені усі пластичні деформації, що виникають у процесі зварювання.

13. Розподіл зони пружно-пластичних деформацій в усі боки від осі шва.

14. Чому дорівнюють напруження в зоні пружно-пластичних деформацій?

15. Від чого залежать:

а) величина напружень у зоні пружно-пластичних деформацій;

б) знак напружень у цій зоні;

в) площа зони пружно-пластичних деформацій?

ПОПЕРЕЧНА УСАДКА ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ВАЛИКА НА ПЛАСТИНУ

Мета роботи: експериментальне і розрахункове визначення поперечної усадки при наплавленні валика на пластину і порівняння її з максимально можливим теоретичним значенням.

Короткі теоретичні відомості

При зварюванні в стик, наплавленні валика і приварюванні кутовими швами до пластин різних елементів спостерігається поперечне укорочення (усадка) зварного з'єднання. Утворення поперечної усадки відбувається внаслідок нерівномірного нагрівання і розширення металу по довжині шва при зварюванні. На рис. 4.1 показане переміщення однієї з крайок, що зварюються, у напрямку осі u при зварюванні двох пластин у стик. Крайка переміщується в зазор у результаті розширення металу при нагріванні. Аналогічно відбувається переміщення і другої крайки. У точці O , в зоні дії зварювального джерела тепла переміщення крайки досягає максимуму, і в цей момент вони зварюються, фіксуючи виникле зменшення зазору на величину $2v_{\max}$.

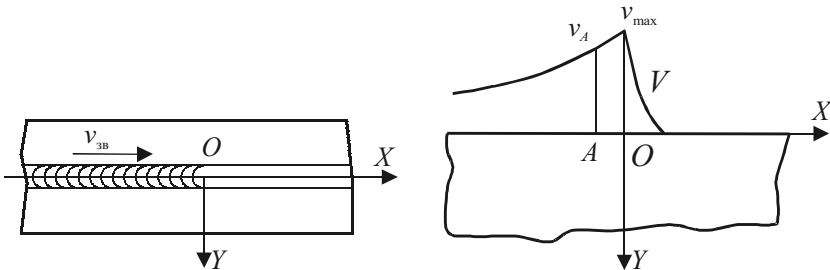


Рис. 4.1

Теоретично обчислене максимальне переміщення однієї з крайок за умови виникнення в металі, що нагрівається, тільки пружних деформацій складе величину

$$v_{\max} = \frac{\alpha}{c\rho} \frac{q_{\text{п}}}{s},$$

а максимальне зближення крайок (зменшення зазору)

$$2v_{\max} = 2 \frac{\alpha}{\sigma_p} \frac{q_p}{s}. \quad (4.1)$$

В міру охолодження пластин крайки прагнуть повернутися в колишнє положення, тобто збільшити зазор. При цьому до певної точки A , поки метал має низьку границю плинності і створює малий опір пластичному деформуванню, можливе деяке віддалення крайок. При подальшому охолодженні опір металу зростає, переміщення крайок стає неможливим через велику жорсткість холодного наплавленого металу, відбувається підтягування пластин одна до одної – це і є поперечна усадка.

Таким чином, після остигання поперечний розмір пластини зменшиться на величину $\Delta_{\text{поп}}$. Очевидно, величина поперечної усадки дорівнює $2v$, тобто менша за $2v_{\max}$. Аналогічно виникає усадка пластини і при наплавленні на її поверхню валкового чи кутового шва, але зазор у цьому випадку відсутній і зближення крайок перед джерелом нагрівання неможливо. Тільки в безпосередній близькості від зварювальної ванни, де метал нагрітий до високопластичного і рідкого стану, крайки зближаються, викликаючи пластичні деформації. Таким чином, при наплавленні валика на пластину виникає певна перешкода переміщенню металу в процесі нагрівання, тому поперечна усадка $\Delta_{\text{поп}}$ виявляється меншою, ніж при заварюванні стика по зазору.

Істотним фактором, що знижує поперечну усадку при наплавленні валика, є неповне проплавлення металу по товщині. Чим менший ступінь проплавлення, тим більша перешкода зближенню крайок, що створюється мало прогрітим металом під швом, тим менша поперечна усадка.

Отже, можна записати, що

$$\Delta_{\text{поп}} = A \frac{\alpha}{\sigma_p} \frac{q_p}{s}, \quad (4.2)$$

де A – коефіцієнт, що враховує вплив перелічених і деяких інших факторів на величину поперечної усадки. Він визначається експериментально порівнянням дійсної поперечної усадки з теоретичною максимально можливою. Величина коефіцієнта A , знайдено-

го на підставі аналізу експериментальних даних, наводиться в літературі. За даними С.А. Кузьміна¹⁾, вона може бути знайдена з виразу

$$A = 0,25 + 0,75K_s, \quad (4.3)$$

де K_s – коефіцієнт впливу товщини, що залежить від ступеня прогріву ($q_{\text{п}}/s^2$) і знаходиться за графіком (рис. 4.2).

Порядок виконання роботи

1. Одержати в лаборанта пластину, зробити її ескіз, записати розміри. Деформометром вимірити з двох боків нанесені на неї бази. Кожну базу вимірювати тричі. Середні значення вимірів з одного й другого боку занести в табл. 4.1.

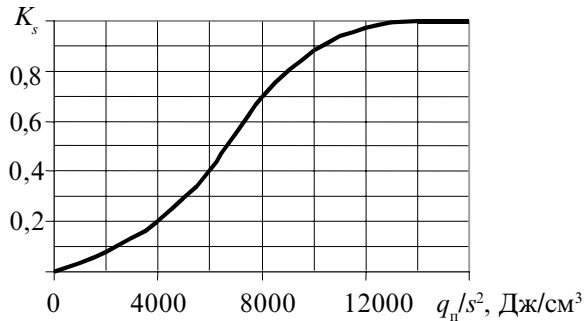


Рис. 4.2

Таблиця 4.1. Результати вимірів поперечного скорочення

Номер бази	Вимір до зварювання	Вимір після зварювання	Скорочення, мм	Середнє скорочення на базі, мм	$A = \frac{\Delta_{\text{поп}}}{\frac{\alpha}{c_p} \frac{q_{\text{п}}}{S}}$
1					
...					
5					

2. Проварити пластину по осі x . Під час зварювання замірити і записати силу струму, напруження і час зварювання.

3. Обчислити швидкість і погонну енергію зварювання $q_{\text{п}}$.

¹⁾ Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. – Л.: Судостроение, 1974. – 286 с. – С. 90.

4. Підрахувати значення $2\nu_{\max}$ за формулою (4.1) і значення A за формулою (4.3).

5. Після охолодження пластини повторити виміри баз. Результати середніх вимірів занести в табл. 4.1.

6. За результатами вимірів до і після зварювання визначити укорочення в районі кожної бази, знайти середнє значення укорочень з одного і з другого боку пластини. Результати вимірів пред'явити викладачу або лаборанту для перевірки.

7. За формулою (4.2) визначити значення коефіцієнта A , підставивши заміряні значення $\Delta_{\text{поп}}$, записати в табл. 4.1.

8. Порівняти отримані експериментально значення A з обчисленими за формулою (4.3).

9. Побудувати графік розподілу поперечної усадки по довжині шва. Там само для порівняння показати величину усадки, обчислену за формулою (4.2) з використанням розрахункових значень коефіцієнта A .

10. Проаналізувати і зробити висновки за результатами роботи.

Контрольні питання

1. Причини виникнення поперечної усадки при зварюванні.

2. Фактори, від яких залежить величина поперечної усадки.

3. Розподіл поперечної усадки по довжині пластини. Причини нерівномірності розподілу.

4. Фактори, що впливають на розбіжність теоретичних і експериментальних значень $\Delta_{\text{поп}}$.

5. Показати характер епюри напружень σ_y у перерізі пластини по осі шва, що виникають унаслідок неодночасності зварювання.

6. Як зміниться характер цієї епюри:

а) при збільшенні швидкості зварювання (при $q_{\text{п}} = \text{const}$);

б) при зварюванні зворотно-ступінчастим методом?

7. Як зміниться форма пластини, якщо її після зварювання розрізати на дві частини поперек осі шва (уздовж осі шва)?

8. Властивості основного металу, що визначають поперечне укорочення в інженерних розрахунках.

9. Параметри режиму, що визначають об'єм поперечного укорочення в інженерних розрахунках.

10. Геометричні параметри конструкції, що впливають на об'єм поперечного укорочення в інженерних розрахунках.

ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ВАЛИКА НА ПЛАСТИНУ

Мета роботи: експериментальне визначення кутових деформацій при наплавленні валика на пластину і порівняння їх з розрахунковими для обраного режиму зварювання.

Короткі теоретичні відомості

Нерівномірне нагрівання по товщині листів, що зварюються, викликає різні за величиною пластичні деформації стиску верхніх і нижніх волокон металу. Результатом цього є нерівномірні залишкові укорочення верхніх і нижніх волокон при остиганні, що приводять до вигину, тобто утворення кутової деформації.

Розглянемо процес утворення кутових деформацій при наплавленні валика (рис. 5.1).

Під час зварювання більш нагріті шари металу розширюються сильніше, ніж менш нагріті. Точка A , що належить більш нагрітій верхній площині, переміститься – в точку A_1 , у той час як точка B , що належить менш нагрітій нижній площині, – в точку B_1 . Відрізок AA_1 більший за відрізок BB_1 . У такому положенні відбудеться зварювання часток пластини. При охолодженні точки A і B не в змозі повернутися в колишнє положення, у результаті чого виникає кутовий злам.

Величина кутової деформації β залежить від багатьох факторів: відносної глибини і ширини провару, його форми, механічних та теплофізичних властивостей металу та ін. У зв'язку з цим наявні в даний час формули і залежності для визначення кутових деформацій β можна розглядати як орієнтовні.

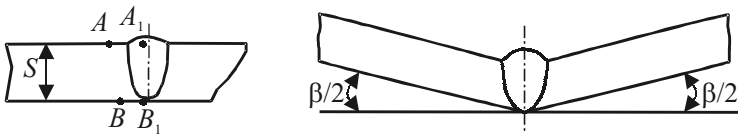


Рис. 5.1

При ручному зварюванні плавким електродом або під флюсом пластин з низьковуглецевих і низьколегованих сталей про визначення кутових деформацій найбільш достовірні дані дають емпіричні графіки, що побудовані С.А. Кузьміновим (рис. 5.2).

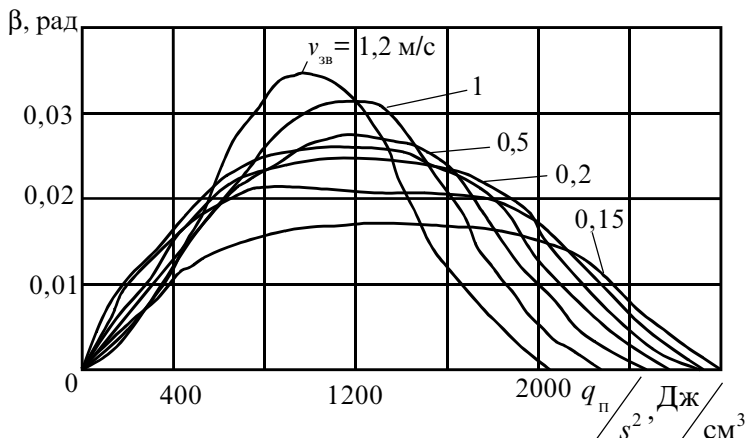


Рис. 5.2

Для визначення кутової деформації β у радіанах за приведеною номограмою необхідно попередньо вимірити або розрахувати $q_{\text{п}}$ – погонну енергію, $\text{Дж}/\text{см}$; s – товщину, см.

Порядок виконання роботи

1. Одержати від лаборанта пластину розміром $300 \times 200 \times 5$ мм.
2. Зробити прогиноміром вимір в п'яти перерізах (рис. 5.3). Результати занести в табл. 5.1. Вимір на кожній базі провести три рази.
3. Обчислити середні значення трьох вимірів. Результати показати лаборанту для перевірки.

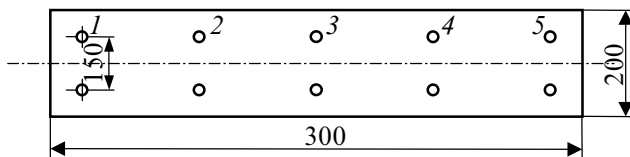


Рис. 5.3

4. Зварити шов, зафіксувавши при цьому середні значення сили зварювального струму, напруження на дузі, часу горіння дуги (швидкості зварювання).

5. Після повного остигання зразка виконати вимірювання баз і результати занести в табл. 5.1.

6. За результатами вимірів обчислити стрілку прогину f пластини і кут β в радіанах. Кут β визначається за формулою $\beta = 4f/B$, де B – база вимірів, мм. Результати обчислень занести в табл. 5.1.

7. Визначити за номограмою і занести в таблицю кутову деформацію β відповідно до обраних умов зварювання і товщини пластини.

8. Графічно зобразити розподіл кутової деформації по довжині пластини.

Таблиця 5.1. Результати вимірів кутової деформації, мм

Номер бази	Початкові виміри	Середнє значення	Виміри після зварювання	Середнє значення	Прогин	Кутова деформація, рад	
						експериментальна	за номограмою
1							
...							
5							

Контрольні питання

1. Причини і механізм виникнення кутових деформацій при зварюванні пластин у стик.

2. Зміни кутової деформації в залежності від зміни ступеня нагрівання і товщини пластини.

3. Причини нерівномірності розподілу кутової деформації по довжині пластини.

4. Шляхи запобігання та усунення кутових деформацій.

5. Параметри режиму, що впливають на кутові деформації.

6. Фактори, що впливають на кутові деформації.

7. Параметри режиму, що визначають кутові деформації в інженерних розрахунках.

8. Геометричні параметри конструкції, що впливають на кутові деформації в інженерних розрахунках.

9. Як змінюється кутова деформація зі збільшенням:

- а) товщини металу;
- б) погонної енергії зварювання?

Лабораторна робота №6

ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВОЇ ДЕФОРМАЦІЇ В ТАВРОВОМУ З'ЄДНАННІ

Мета роботи: визначення кутової деформації β_1 від першого шва і кутової деформації $\beta_2 + \beta_k$ від другого шва.

Короткі теоретичні відомості

При зварюванні в тавр лист, до якого приварюється ребро, нерівномірно нагрівається по товщині (рис. 6.1,*а*). Верхня частина листа має більш високу температуру, ніж нижня. Тому розширенню металу при нагріванні на ділянці AB перешкоджає опір більш холодних ділянок CD .

У зоні AB при нагріванні виникають пластична деформація скорочення і напруження стиску. При остиганні відбувається скорочення зони AB і виникає кутова деформація β_1 (рис. 6.1,*б*). Кут загину β_1 визначають за графіками (див. рис. 5.2). За розрахункову товщину s приймається товщина пояска $s_{\text{п}}$. Розрахункова погонна енергія дорівнює тій частці, що вводиться в лист пояска,

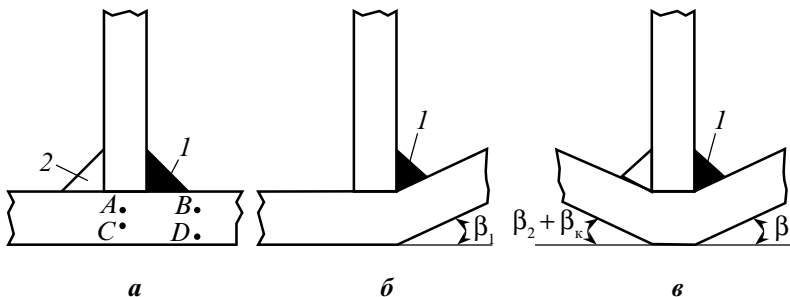


Рис. 6.1

$$q_{\text{пп}} = q_{\text{п}} \frac{2s_{\text{п}}}{2s_{\text{п}} + s_{\text{с}}},$$

де $s_{\text{с}}$ – товщина стінки тавра.

При зварюванні шва 2 відбуваються аналогічні явища (рис. 6.1, *б*).

Однак при цьому, крім кутової деформації від нерівномірної усадки листа β_2 , виникає ще кутова деформація $\beta_{\text{к}}$ від поперечного скорочення наплавленого металу шва 2, тому що ребро жорстко з'єднано з листом швом 1. Величину β_2 знаходять аналогічно до β_1 . Кут $\beta_{\text{к}}$ визначається в залежності від розмірів катета шва K , товщини пояса $s_{\text{п}}$ і властивостей металу. Для низьковуглецевих та низьколегованих сталей

$$\beta_{\text{к}} = 0,02 \left(\frac{K}{s_{\text{п}}} \right)^2. \quad (6.1)$$

Максимальне значення $\beta_{\text{к}}$ не може перевищувати 0,02 рад.

Порядок виконання роботи

1. Одержати від лаборанта пластину розміром 300×180×5 мм із прихопленим ребром.

2. Зробити прогиноміром і кутоміром виміри баз. Результати занести в табл. 6.1. Вимір кожної бази провести тричі.

Таблиця 6.1. Результати вимірів кутової деформації

Номер бази	Початкові виміри	Середнє значення	Виміри після зварювання шва 1	Середнє значення	Стрілка прогину f_1	Кутова деформація		Виміри після зварювання шва 2	Середнє значення	Стрілка прогину f_2	Кутова деформація	
						експериментальна	теоретична				експериментальна	теоретична
1												
...												

3. Обчислити середні значення трьох вимірів. Результати вимірів показати лаборанту для перевірки.

4. Зварити шов 1 катетом 4...5 мм, зафіксувати при цьому середні значення величини зварювального струму, напруження на дузі, час горіння дуги. Дати зразку цілком охолонути.

5. Зробити виміри баз і результати занести в таблицю.

6. За результатами вимірів обчислити прогин f полки і кут β_1 у радіанах.

7. Зварити шов 2 катетом 4...5 мм, зафіксувати режим зварювання. Дати зразку цілком охолонути.

8. Зробити виміри зразка і результати занести в таблицю. За результатами експериментів обчислити $\beta_2 + \beta_k$.

9. За графіками (див. рис. 5.2) визначити кутову деформацію β_1 і β_2 , а за формулою (6.1) – β_k . Порівняти дані з експериментальними.

10. Графічно зобразити розподіл кутової деформації по довжині зразка.

11. Порівняти між собою деформації, обумовлені першим і другим швами.

Контрольні питання

1. Складові кутової деформації, що виникають при зварюванні в тавр. Причини виникнення.

2. Шляхи запобігання, зменшення або усунення кутових деформацій при зварюванні таврових з'єднань.

3. Як змінюються кутові деформації при збільшенні погонної енергії, товщини пояску і стінки, катета?

Лабораторна робота № 7

ЗНЯТТЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ВІДПУСКОМ

Мета роботи: дослідження ефективності високого відпуску для зняття напружень і деформацій.

Короткі теоретичні відомості

Високий відпуск – один з найбільш ефективних і розповсю-

джених методів зниження залишкових напружень і деформацій у зварних вузлах і конструкціях. Сутність його полягає в нагріванні конструкції із залишковими напруженнями до певної температури, що не перевищує точки A_{C_3} матеріалу, і витримці при цій температурі протягом деякого часу. Для конструкцій з низьколегованих і низьковуглецевих сталей температура відпуску складає 600...700 °С, а час витримки може досягати кількох годин.

Зняття напружень при відпуску звичайно пов'язують з такими явищами, як повзучість і релаксація напружень, що інтенсивно відбуваються в тілах при нагріванні їх до високих температур. Процес релаксації полягає у зменшенні напружень за рахунок переходу пружних деформацій у пластичні, що відбувається за витримки деформованого матеріалу при підвищеній температурі. Процес повзучості полягає в рості пластичних деформацій з часом без помітних змін температурного і силового навантаження тіла. При підвищенні температури нагрівання швидкість релаксації напружень та росту пластичних деформацій повзучості зростає.

Оскільки зняття напружень при високому відпуску відбувається як в області розтягу, так і в області стиску, то відпуск практично не змінює залишкових зварювальних деформацій. Тому в тих випадках, коли, крім зняття напружень, метою відпуску є ще і додання конструкції необхідної форми (усунення деформацій), нагрівання виконують у спеціальних затисних пристроях, що надають виробу необхідну форму.

Основними параметрами високого відпуску є температура нагрівання і час, що по різному впливають на ефективність зняття напружень (рис. 7.1).

Як правило, при підвищенні температури скорочується час, необхідний для зниження напружень з деякої початкової величини σ_{π} до необхідної σ_0 . Цей процес приблизно описується рівнянням

$$\sigma_0 = A\sigma_{\pi} \left(1 + \frac{t}{t_0} \right)^{\beta},$$

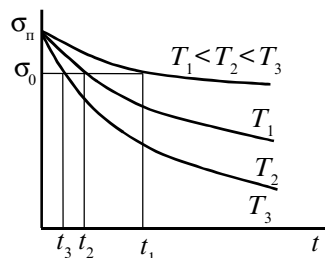


Рис. 7.1

де A — параметр, що залежить від властивостей матеріалу і тем-

ператури нагрівання; t – час нагріву, хв; $t_0 \approx 10$ хв – постійна часу; β – параметр, що залежить від властивостей матеріалу (для сталі Ст3 $\beta = 0,16$).

Порядок виконання роботи

1. Одержати від лаборанта необхідні пристрої і зразки: циліндричний стрижень з рамкою для надання початкових напружень і вигнуту пластину з затисним пристроєм для надання їй площинної форми.

2. Замірити в пристрої початкову довжину стрижня, знявши найменше показання індикатора при обертанні стрижня навколо осі. Позначити верхній кінець стрижня, щоб уникнути його перекидання при повторних вимірах.

3. Підрахувати величину деформації стрижня, що відповідає $\sigma = 210$ МПа. Матеріал стрижня – сталь Ст3.

4. Натягом гайок викликати в стрижні напруження на рівні 210 МПа. Величину напруження контролювати в міру натягу, встановлюючи стрижень у пристрої для виміру його довжини.

5. Заміряти штангенциркулем прогин кожної кутової точки вигнутої пластинки.

6. Результати вимірів записати в табл. 7.1 і показати лаборанту для перевірки.

Таблиця 7.1. Результати вимірів деформації

Параметр	Замір		
	початковий	після 0,5 год	після 1,0 год
<i>Стрижень:</i>			
Δ , мм			
$\sigma_{п}$, МПа			
<i>Пластина:</i>			
Δ_1 , мм			
...			
Δ_4 , мм			

7. Завантажити в піч усі пристрої зі зразками .

8. Витримати зразки в печі при температурі $T = 650$ °С протягом 0,5 год.

9. Вийняти з печі стрижень та пластину з пристроями.

10. Витримати вийняті зразки до повного остигання і заміряти

подовження стрижня і прогини пластини. Показання записати в таблицю.

11. Повторити пп. 7 – 9.

12. Витримати до повного остигання, заміряти подовження і прогин; результати записати в таблицю.

13. Підрахувати залишкові напруження в стрижні після 0,5 і 1,0 год.

14. Побудувати графіки зміни з часом напружень у стрижні та середніх прогинів пластини.

Контрольні питання

1. Сутність високого відпуску для зняття залишкових напружень.

2. Основні параметри високого відпуску та їх вплив на зниження напружень.

3. Основні достоїнства та недоліки високого відпуску для зняття напружень.

4. У яких випадках неможливо або недоцільно використовувати високий відпуск?

5. Чим відрізняються місцевий та загальний відпуск?

6. У чому полягає шкідливий вплив на конструкцію:

а) зварювальних напружень;

б) зварювальних деформацій?

7. Основні принципи, на яких ґрунтуються усі методи регулювання:

а) зварювальних напружень;

б) зварювальних деформацій.

8. Методи зменшення зварювальних напружень.

9. Методи зменшення зварювальних деформацій.

Лабораторна робота №8

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛІВ ДЕФОРМАЦІЙ ТА НАПРУЖЕНЬ

Мета роботи: ознайомитись з методом комп'ютерного моделювання полів деформацій і напружень, виконати дослідження

полів напружень у зварному вузлі, порівняти результати з експериментальними.

Короткі теоретичні відомості

Методи розрахунку, що засновані на гіпотезі плоских перерізів (ГПП), унаслідок своєї простоти знайшли широке застосування в інженерній практиці. Вони використовуються при розрахунках міцності зварних з'єднань і конструкцій, а також власних деформацій і напружень. На жаль, вони дають досить точні результати тільки для конструкцій та їх елементів, у яких довжина (один з розмірів) у кілька разів (6...10) більша від двох інших розмірів (висоти і ширини), тобто для стрижнів, балок, стійок і т. п. На практиці доводиться часто мати справу з плоскими й об'ємними елементами і конструкціями. Для таких конструкцій більш точну і повну картину дають методи теорії пружності та пластичності. Ці методи відрізняються більшою складністю, до того ж, рішення в загальному вигляді (інтегруванням диференціального рівняння) можуть бути отримані для обмеженого числа порівняно простих задач теорії пружності. Разом з тим в останні роки у зв'язку з поширенням і вдосконаленням електронно-обчислювальної техніки широке застосування одержали чисельні методи, зокрема метод кінцевих елементів (МКЕ).

Сутність цього методу полягає в тому, що конструкція будь-якої складності може бути представлена у вигляді сукупності скріплених між собою кінцевих елементів (КЕ) простої форми. Для плоских конструкцій КЕ звичайно мають прямокутну або трикутну форму. Кінцеві елементи вважаються жорстко скріпленими між собою у вузлах.

Досить точні рішення для простих КЕ, що зв'язують вузлові зусилля з їх переміщеннями і переміщення вузлів з напруженнями всередині КЕ, отримані. У кожному конкретному випадку задача зводиться до складання і рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що виражають умови рівноваги і спільності деформацій в усіх вузлах.

Кожен КЕ має число ступенів волі, тобто незалежних переміщень вузлів, що дорівнює подвоєному числу вузлів, по два переміщення (по осях x та y) у кожному вузлі. Тобто прямокутні КЕ мають по вісім, а трикутні – по шість незалежних переміщень u і v зусиль P у вузлах (рис. 8.1, *a, б* відповідно).

Зв'язок між P і u знаходиться з узагальненого закону Гука й умов безперервності переміщень (спільності деформацій) і подається в матричній формі

$$[P] = [k][u], \quad (8.1)$$

де $[P]$ – матриця-стовпець зусиль у вузлах; $[u]$ – матриця-стовпець переміщень у вузлах; $[k]$ – квадратна матриця жорсткості КЕ. Усі матриці мають порядок $2n$, де n – число вузлів у КЕ.

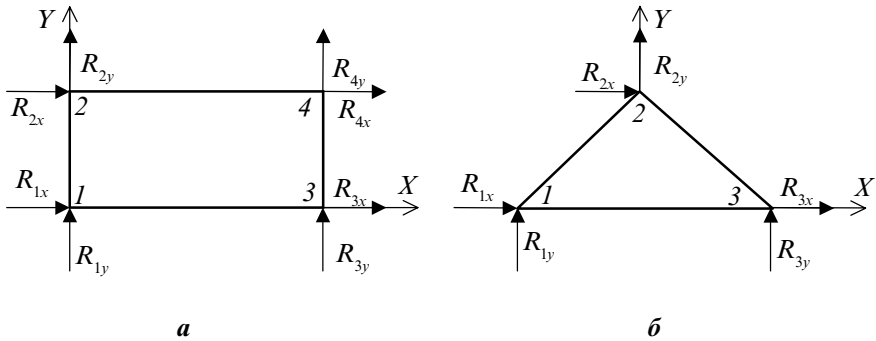


Рис. 8.1

Аналогічний вигляд має і система рівнянь для всієї конструкції, що має m вузлів, тільки порядок цих матриць $2m$.

Точність рішення МКЕ залежить від трьох факторів. По-перше, від кількості КЕ. Чим дрібніші КЕ і більше їх число, тим точніше опис конструкції сукупністю КЕ. По-друге, від точності наявних рішень для одного КЕ. З цього погляду перевагу мають прямокутні елементи. Трикутні КЕ доцільно застосовувати тільки у випадках, коли конструкція має складний криволінійний контур, який неможливо описати лише прямокутними елементами. По-третє, від точності рішення (8.1), що має для досить складних конструкцій порядок, обчислюваний тисячами.

Сутність методу комп'ютерного моделювання полягає в тому, що на підставі опису конструкції (її геометрії і властивостей) і силового, або температурного навантаження ЕОМ складає і вирішує систему рівнянь і видає результат рішення – переміщення усіх вузлів і напруження у всіх КЕ в графічній або табличній формі.

Порядок виконання роботи

I. Моделювання полів переміщень і напружень при наплавленні валика на вузьку пластину.

1. Побудувати кінцево-елементну модель пластини (рис. 8.2) з двох блоків – основний метал (реактивна зона) і зона пружно-пластичних деформацій (активна зона). З урахуванням симетрії щодо осі y досить побудувати модель половини, наприклад, правої, замінивши відкинуту ліву відповідним закріпленням вузлів по осі y . Загальна кількість КЕ не повинна бути більшою за 900. Увести геометричні та фізичні характеристики моделі: товщина 5 мм, довжина 150 мм, ширина реактивної зони 50 мм, ширина активної зони 5 мм, модуль пружності матеріалу $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$, коефіцієнт температурного розширення $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}$, границя плинності $\sigma_T = 240$ МПа, температура реактивної зони $T_1 = 0$ °С, активної $T_2 = -600$ °С (охолодження).

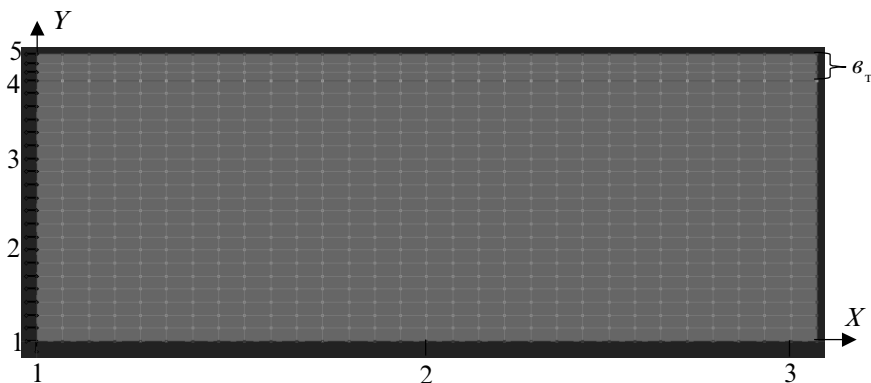


Рис. 8.2

2. Виконати рішення на ЕОМ.

3. Подивитися зображення полів переміщень вузлів моделі та полів напружень (σ_x , σ_y , τ_{xy}). Звернути увагу на форму перерізів пластини: де вони близькі до плоских і де помітно викривляються? Звернути увагу на характер поля напружень σ_x на торці крайки: чим воно відрізняється від середньої частини?

4. Записати в табл. 8.1 числові значення переміщень і напружень у контрольних точках (у трьох перерізах). Звернути увагу

на співвідношення їх величин, наскільки близький напружений стан до лінійного?

Таблиця 8.1. Результати вимірів

Вимірювані величини	Рівні перерізів														
	Переріз 1					Переріз 2					Переріз 3				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
u_x															
u_y															
σ_x															
σ_y															
τ_{xy}															

5. Побудувати епюри переміщень і напружень у трьох перерізах. Порівняти їхній характер з отриманими експериментально в роботі № 3.

II. Моделювання полів переміщень і напружень при наплавленні валика по вісі пластини.

1. Побудувати кінцево-елементну модель пластини (рис. 8.3) з двох блоків – основний метал (реактивна зона) і зона пружно-пластичних деформацій (активна зона). З урахуванням симетрії

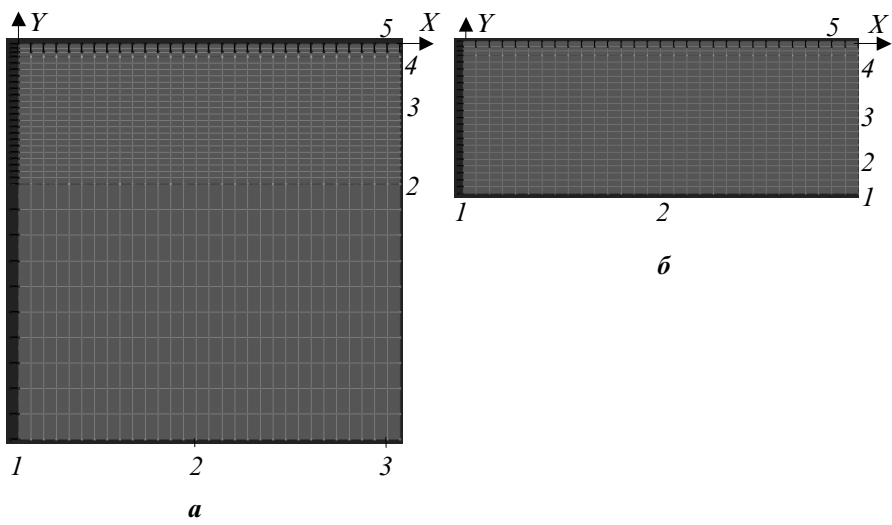


Рис. 8.3

щодо осей x та y досить побудувати модель для чверті пластини, наприклад, правої нижньої, замінивши відкинуті частини відповідними закріпленнями вузлів по осях x та y . Увести геометричні і фізичні характеристики моделі: товщина 5 мм, довжина 150 мм, ширина реактивної зони 150 мм (див. рис. 8.3,а) і 50 мм (див. рис. 8.3,б), ширина активної зони 5 мм, модуль пружності матеріалу, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт температурного розширення, границя плинності, температура реактивної та активної зони – такі ж самі, як у попередній частині.

2. Виконати рішення на ЕОМ.

3. Подивитися зображення полів переміщень вузлів моделі та полів напружень (σ_x , σ_y , τ_{xy}). Звернути увагу на форму перерізів пластини: де вони близькі до плоских і де помітно викривляються? Звернути увагу на характер полів напружень σ_x на торці пластини: чим воно відрізняється від середньої частини?

4. Заповнити табл., аналогічну 8.1 для другої моделі: записати числові значення переміщень і напружень у контрольних точках (у трьох перерізах). Звернути увагу на співвідношення їх величин, наскільки близький напружений стан до лінійного?

5. Побудувати епюри переміщень і напружень у трьох перерізах. Порівняти їх характер у вузькій та широкій моделях.

Контрольні питання

1. Сутність методу кінцевих елементів.
2. Розподіл напруження в різних перерізах пластини.
3. Розподіл переміщень в різних перерізах пластини.
4. Наскільки виконується гіпотеза плоских перерізів у вузькій та широкій пластині?

Лабораторна робота № 9

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ МАГНІТНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи: ознайомитися з магнітним методом визначення напружень, виконати дослідження полів напружень у зварному вузлі, порівняти результати з розрахунковими.

Короткі теоретичні відомості

Метод вимірювання заснований на явищі зміни магнітної проникності під впливом напружень (пружних деформацій) в металі, в результаті чого магнітно-ізотропний матеріал перетворюється на магнітно-анізотропний. Дослідження магнітної анізотропії виконується за допомогою спеціального датчика, що є перетворювачем трансформаторного типу (рис. 9.1).

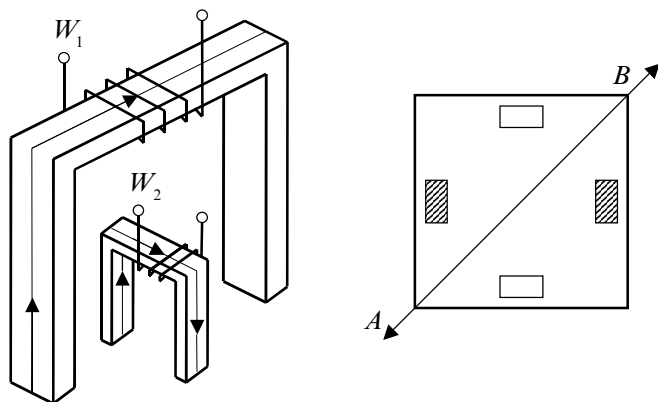


Рис. 9.1

Первинна обмотка трансформатора розташована на П-образному осердді, закріпленому в ебонітовій основі, і має 250 витків. Живиться ця котушка від окремого силового трансформатора через реостат, який дозволяє регулювати силу струму в ній. Під кутом 90° до площини сердечника первинної обмотки розміщується індикаторна котушка з осердям, яке також прикріплюється до ебонітової основи. Індикаторна котушка має 2500 витків. ЕРС на виході індикаторної котушки в повітрі або в ізотропному металі правильно зібраного і відрегульованого датчика повинна бути рівною нулю. При наявності магнітної анізотропії матеріалу, на якому встановлений датчик, ЕРС розбалансу поступає на вхід підсилювача, далі на змінний резистор і вимірювальний прилад.

Для переводу величини розбалансу (електрична величина) в напруження або пружну деформацію (механічна величина) виконується тарування датчика на тарувальній балці, в якій величина напружень може бути підрахована досить точно.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись із побудовою і принципом дії датчика та вимірювального приладу.
2. Ввімкнути прилад до мережі та прогріти 15 хв.
3. Встановити датчик на тарувальну балку так, щоб стрілка на датчику була напрямлена вздовж балки до її кінця.
4. Протарувати датчик, результати занести в табл. 9.1 і побудувати таровочний графік. Тарування заключається в поступовому підвищенні навантаження балки і фіксуванні показань приладу.

Таблиця 9.1. Результати тарування датчика

Вантаж, Н	Дані приладу		Напруження в балці, МПа
	дійсні	з поправкою	

5. Визначити розподіл залишкових напружень у зварній пластині (рис. 9.2). Для цього встановити датчик на пластину 1 таким чином, щоб стрілка на датчику 3 була напрямлена перпендикулярно до лінійки 2, що закріплена на зразку. Заміри виконувати два рази: перший на відстані 5 мм від лінійки, другий – 50 мм від

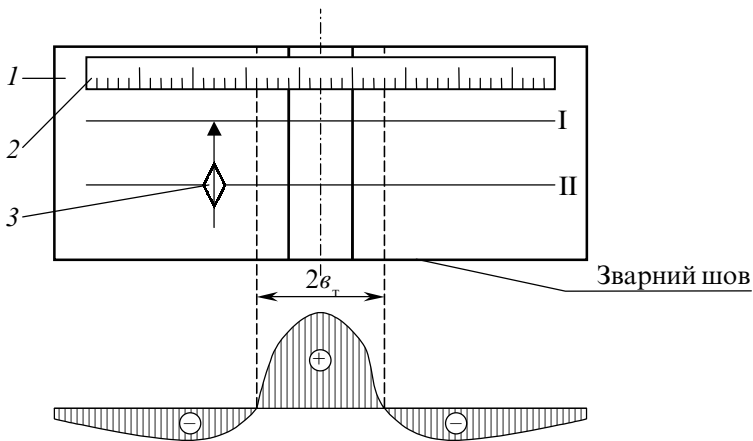


Рис. 9.2

неї. Показання міліамперметра знімати після переміщення датчика вздовж лінійки через кожні 10 мм. Результати занести в табл. 9.2.

Таблиця 9.2. Результати вимірювань напружень

Відстань, мм	Показання приладу			Напруження, МПа
	Переріз 1	Переріз 2	Середнє значення	
0				
10				
20				
...				
330				

6. За тарувальним графіком визначити напруження, побудувати епюру напружень у перерізі пластини.

7. Порівняти результати з тими, що отримані в роботі № 8. Зробити висновки.

Контрольні питання

1. Сутність методу виміру напружень магнітним датчиком.
2. Розподіл напруження в поперечних перерізах пластини.
3. Наскільки виконується гіпотеза плоских перерізів у широкій пластині?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Ермолаев Г.В.* Сварочные деформации и напряжения: Конспект лекций. – Николаев: НКИ, 1975.
2. *Ермолаев Г.В., Христенко В.Н.* Прочность и деформации сварных соединений и конструкций: Сборник вопросов и задач. – Николаев: НКИ, 1985.
3. *Кузьминов С.А.* Сварочные деформаций. – Л.: Судостроение, 1974.
4. *Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А.* Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М.: Высш. шк., 1982.
5. Расчеты в дипломных проектах по технологии и оборудованию сварочного производства: Учеб. пособие /Под ред. *В.Ф. Квасницкого*. – Николаев: НКИ, 1991.
6. Справочник по теории упругости / Под ред. *П.М. Варвака, А.Ф. Рябова*. – К.: Наук. думка, 1977.
7. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / *Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов* и др. – К.: Наук. думка, 1981.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Вкажіть основні причини утворення зварювальних напружень і деформацій.

2. Як називаються напруження:

- а) що існують у конструкції при відсутності зовнішніх сил;
- б) в зоні пружно-пластичних деформацій після зварювання;
- в) що існують у конструкції в процесі зварювання;
- г) що існують у конструкції після зварювання?

3. Як називаються власні напруження, які урівноважені:

- а) в обсягах, порівняних з розмірами всієї конструкції;
- б) в мікроскопічних обсягах, порівняних з розмірами окремих зерен;
- в) в субмікроскопічних обсягах, порівнянних з параметром кристалічних ґрат?

4. Як називають напружений стан, при якому:

- а) одна зі складових напружень набагато більша від двох інших;
- б) дві зі складових напружень набагато більші від третьої;
- в) всі три складові напружень рівні між собою?

5. Як називають вектор внутрішніх сил, що діють на одиницю площі даної елементарної площадки при стягуванні її в точку?

6. Як називають відносну величину взаємного зміщення точок об'єкта в результаті його навантаження?

7. Як називають деформації, що виникають:

- а) при зовнішньому навантаженні силами;
- б) унаслідок теплового розширення;
- в) унаслідок структурних перетворень?

8. Як називають деформації металу, що після зняття зовнішнього навантаження:

- а) зникають;
- б) залишаються.

9. Види силових деформацій.

10. Види зварювальних переміщень.

11. Які деформації утворюються у процесі зварювання?

12. Основний параметр, що визначає деформації поздовжнього укорочення в інженерних розрахунках.

13. Укажіть залежність між усадковою силою P і обсягом поздовжнього укорочення v .

14. Чому дорівнює усадкова сила після зварювання?

15. Укажіть властивості основного металу, які в інженерних розрахунках визначають:

а) усадкову силу;

б) обсяг поздовжнього укорочення.

16. Укажіть параметри режиму, які в інженерних розрахунках визначають:

а) усадкову силу;

б) обсяг поздовжнього укорочення.

17. Як називається зона, у межах якої зосереджені всі пластичні деформації, що виникають у процесі зварювання?

18. Розподіл зони пружно-пластичних деформацій в усі боки від осі шва.

19. Величина напружень в зоні пружно-пластичних деформацій.

20. Від чого залежить величина напружень у зоні пружно-пластичних деформацій?

21. Яким є знак напружень у зоні пружно-пластичних деформацій?

22. Від чого залежить площа зони пружно-пластичних деформацій?

23. На верхню крайку пластини зі сталі наплавлений валик. Укажіть:

а) напрямок вигину після наплавлення;

б) напруження виникають на нижній крайці;

в) напруження, що виникають на осі пластини.

24. На верхню крайку пластини з низьковуглецевої сталі наплавлений валик:

а) які напруження виникають у наплавленому металі;

б) які напруження, що виникають на осі пластини;

в) як зміняться напруження на нижній крайці при збільшенні погонної енергії;

г) як зміняться напруження на нижній крайці при збільшенні ширини пластини;

г) як зміняться напруження на нижній крайці при збільшенні товщини пластини?

25. На верхній крайці і на осі пластини з низьковуглецевої сталі

наплавлені два валики з однаковою погонною енергією. Який з них викликає:

- а) найбільшу стрілку прогину пластини в її площині;
- б) найбільше укорочення на осі пластини;
- в) напруження стиску на осі пластини;
- г) напруження стиску на нижній крайці пластини;
- ґ) напруження розтягу на осі пластини;
- д) напруження розтягу на нижній крайці пластини?

26. На верхню крайку (1) і на осі пластини (2) з низьковуглецевої сталі наплавлені два валики з однаковою погонною енергією. У якого з валиків зона пружно-пластичних деформацій більша? Як зміняться:

- а) прогин пластини при зміні послідовності наплавлення валиків (з 1–2 на 2–1);
- б) деформації укорочення після наплавлення другого валика;
- в) напруження в першому валику після наплавлення другого валика;
- г) укорочення пластини при збільшенні довжини валика в два рази;
- ґ) стрілка прогину при збільшенні довжини валика в два рази;
- д) кут повороту кінцевих перерізів при збільшенні довжини валика в два рази;
- е) напруження на осі пластини при збільшенні довжини валика в два рази;
- є) напруження на нижній крайці пластини при збільшенні довжини валика в два рази;
- ж) прогин пластини при зміні послідовності наплавлення валиків (з 1–2 на 2–1);
- з) укорочення пластини при зміні послідовності наплавлення валиків (з 1–2 на 2–1);
- і) прогин пластини після наплавлення другого валика;
- к) укорочення пластини після наплавлення другого валика;
- л) напруження на осі пластини після наплавлення другого валика?

27. На верхню (1) і нижню (2) крайки пластини з низьковуглецевої сталі наплавлені два валики з однаковою погонною енергією. Які напруження будуть:

- а) на осі пластини після наплавлення другого валика;
- б) у першому валику після наплавлення другого валика;

в) у першому валику після наплавлення другого валика?

28. На верхню крайку пластини зі сталі наплавлений валик.

Як зміниться вигин пластини, якщо:

а) на нижній крайці видалити невеликий шар металу;

б) на наплавленій крайці видалити невеликий шар металу;

в) видалити наплавлений метал разом із зоною пружно-пластичних деформацій;

г) перед зварюванням до неї докласти розтяжну силу;

г) перед зварюванням до неї докласти стискаючу силу?

29. На верхню крайку пластини зі сталі наплавлений валик.

Як зміниться довжина пластини, якщо:

а) на наплавленій крайці видалити невеликий шар металу;

б) видалити наплавлений метал разом із зоною пружно-пластичних деформацій;

в) на нижній крайці видалити невеликий шар металу?

30. Основні причини утворення поперечного укорочення при зварюванні.

31. Основні фактори, що впливають на величину поперечного укорочення при зварюванні.

32. Укажіть властивості основного металу, що визначають поперечне укорочення в інженерних розрахунках.

33. Укажіть параметри режиму, що визначають обсяг поперечного укорочення в інженерних розрахунках.

34. Укажіть геометричні параметри конструкції, що впливають на обсяг поперечного укорочення в інженерних розрахунках.

35. При зварюванні "напрохід" полотнини з довгих листів утворюються:

а) "будиночки" по кінцях шва. Що ви запропонуєте для їхнього зменшення;

б) "опуклість" у середній частині шва. Що ви запропонуєте для її зменшення?

36. При вварюванні фланця в плоску секцію після остигання може утворитися тріщина. Що ви запропонуєте для зменшення ймовірності її утворення?

37. При заварюванні монтажного стику двотаврової балки приходится заварювати стик по стінці (1), стики по поясах (2), недоварені ділянки поясних швів (3). У якій послідовності їх необхідно заварювати?

38. Основні причини утворення кутових деформацій при зварюванні.

39. Укажіть параметри режиму, що впливають на кутові деформації.

40. Укажіть фактори, що впливають на кутові деформації.

41. Укажіть параметри режиму, що визначають кутові деформації в інженерних розрахунках.

42. Укажіть геометричні параметри конструкції, що впливають на кутові деформації в інженерних розрахунках.

43. Як змінюється кутова деформація зі збільшенням:

а) товщини металу;

б) погонної енергії зварювання?

44. Які основні причини утворення деформацій втрати стійкості при зварюванні?

45. Які параметри режиму впливають на деформації втрати стійкості?

46. Які конструктивні фактори впливають на деформації втрати стійкості пластини?

47. Які параметри режиму визначають деформації втрати стійкості в інженерних розрахунках?

48. Які геометричні параметри конструкції визначають деформації втрати стійкості в інженерних розрахунках?

49. Які фактори визначають деформації втрати стійкості в інженерних розрахунках?

50. Як змінюється ймовірність деформації втрати стійкості:

а) зі збільшенням товщини металу;

б) зі зменшенням модуля пружності металу;

в) зі збільшенням довжини листової конструкції;

г) зі збільшенням погонної енергії зварювання?

51. Які основні причини утворення деформацій закручування при зварюванні:

а) таврових балок;

б) коробчатих балок;

в) балок хрестоподібного профілю?

52. Як виконувати зварювання з метою зменшення деформації закручування:

а) таврових балок;

б) сусідніх швів балок коробчатого перерізу;

в) балок хрестоподібного профілю?

53. Яка основна причина деформації зламу осі товстостінних оболонок при зварюванні кільцевих швів?

54. Яка основна причина деформації зламу:

а) твірної товстостінних оболонок при зварюванні кільцевих швів;

б) кола товстостінних оболонок при зварюванні поздовжніх швів?

55. Як рекомендується виконувати зварювання для зменшення деформації зламу осі товстостінних оболонок при зварюванні кільцевих швів?

56. Що рекомендується виконувати для зменшення деформації зламу:

а) твірної товстостінних оболонок при зварюванні кільцевих швів;

б) кола товстостінних оболонок при зварюванні поздовжніх швів?

57. Основна причина деформації зламу:

а) твірної тонкостінних оболонок при зварюванні кільцевих швів;

б) кола тонкостінних оболонок при зварюванні поздовжніх швів.

58. Що рекомендується застосовувати для зменшення деформації зламу:

а) твірної тонкостінних оболонок зі сталі при зварюванні кільцевих швів;

б) твірної тонкостінних оболонок зі сплавів АМг при зварюванні кільцевих швів;

в) кола тонкостінних оболонок при зварюванні поздовжніх швів?

59. У чому полягає шкідливий вплив на конструкцію:

а) зварювальних напружень;

б) зварювальних деформацій?

60. Основні принципи методів регулювання:

а) зварювальних напружень;

в) зварювальних деформацій?

61. Які методи можна застосувати для зменшення:

а) зварювальних напружень;

б) зварювальних деформацій?

62. Якому способу зварювання варто віддати перевагу для зменшення зварювальних деформацій?

63. Якій формі підготовки крайок варто віддати перевагу для зменшення зварювальних деформацій?

ЗМІСТ

Лабораторна робота № 1. Вивчення методів виміру деформацій з оцінкою їх точності	3
Лабораторна робота № 2. Температурні та залишкові деформації і напруження при нагріванні стрижня	10
Лабораторна робота № 3. Поздовжні зварювальні деформації та напруження при наплавленні валика на крайку пластини	16
Лабораторна робота № 4. Поперечна усадка при наплавленні валика на пластину	23
Лабораторна робота № 5. Визначення кутової деформації при наплавленні валика на пластину	27
Лабораторна робота №6. Визначення кутової деформації в тавровому з'єднанні	30
Лабораторна робота № 7. Зняття залишкових напружень відпуском	32
Лабораторна робота №8. Комп'ютерне моделювання полів деформацій та напружень	35
Лабораторна робота № 9. Експериментальне визначення зварювальних напружень магнітним методом	40
Рекомендована література	44
Додаток. Питання для самостійної роботи	45

ЄМОЛАЄВ Геннадій Володимирович
ЛОЙ Сергій Анатолійович
ЛАБАРТКАВА Андрій Володимирович

ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з дисципліни "Напруження та деформації при зварюванні"

Видавництво НУК, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5
Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Редактор Л.К. Сокол
Комп'ютерна правка та верстка А.Й. Тріщ
Коректор Н.О. Шайкіна

Підписано до друку 07.07.04. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 3,0. Обл.-вид. арк. 3,2. Тираж 100 прим.
Вид. № 18. Зам. № 314. Ціна договірна.