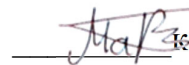


Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут
Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 к.т.н., доц. М.В. Матвієнко

«20» грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістра»

на тему: Експериментально-чисельний аналіз впливу потужності лазерного
випромінювання на деформації таврових з'єднань

Виконав: студент VI курсу, групи 6121м
зі спеціальності 132 Матеріалознавство
за освітньо-професійною програмою
Інжиніринг зварювання та споріднених
процесів

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Гулько Віктор Валентинович

(прізвище та ініціали)

Керівник Ярос Юрій Олександрович

(прізвище та ініціали)

Рецензент Матвієнко Максим Валентинович

(прізвище та ініціали)

Миколаїв-Херсон - 2025 р.

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

Факультет _____ суднобудівний _____

Кафедра _____ зварювання _____

Освітній рівень _____ магістр _____

Спеціальність _____ 132 Матеріалознавство _____

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ



Гарант освітньої програми
к.т.н., доц. Матвієнко М.В.

“ _____ ” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Гулько Віктору Валентиновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Експериментально-чисельний аналіз впливу потужності лазерного випромінювання на деформації таврових з'єднань

керівник проекту Ярос Юрій Олександрович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені розпорядженням ХННІ НУК від “17” жовтня 2025 року № 20

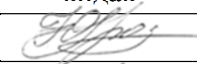
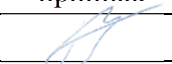
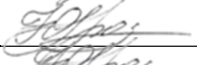
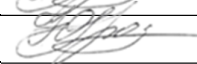
2. Строк подання студентом проекту 13 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до проекту Матеріал: сталь ВСт3, товщина 3 мм. Макрошліфи зварних з'єднань виконаних лазерним зварюванням.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз використання лазерного зварювання; 2. Методика проведення експерименту; 3. Проведення експерименту і обробка результатів; 4. Комп'ютерне моделювання деформованого стану при лазерному зварюванні; 5. Охорона праці і техніка безпеки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) мета й задачі роботи; обладнання для проведення експериментальних досліджень; планування експерименту, обробка експериментальних даних; методика проведення експерименту; визначення геометричних параметрів зварних швів; математична модель; результати моделювання.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Ярос Ю.О., к.т.н		
2	Ярос Ю.О., к.т.н		
3	Ярос Ю.О., к.т.н		
4	Ярос Ю.О., к.т.н		
5	Ярос Ю.О., к.т.н		

7. Дата видачі завдання 17.10.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз використання лазерного зварювання	24.10.2025	
2	Методика проведення експерименту	07.11.2025	
3	Проведення експерименту і обробка результатів	17.11.2025	
4	Комп'ютерне моделювання деформованого стану при лазерному зварюванні	28.11.2025	
5	Охорона праці і техніка безпеки	08.12.2025	
6	Оформлення пояснювальної записки	10.12.2025	
7	Графічна частина	12.12.2025	

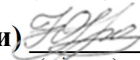
Студент


(підпис)

Гулько В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Ярос Ю.О.

(прізвище та ініціали)

Анотація

У магістерській роботі виконано комплексне експериментальне та чисельне дослідження деформацій, що виникають під час лазерного зварювання таврового з'єднання зі сталі Ст3 товщиною 3 мм. Експериментальна частина включала вимірювання стрілки прогину у семи характерних перетинах уздовж лінії шва з використанням електронного індикатора та побудову залежностей кутової деформації від відстані до торця зразка. Установлено, що кутова деформація зростає зі збільшенням відстані від краю та стабілізується на рівні близько 75 мм, що узгоджується з відомими закономірностями зварювальної деформації при процесах плавлення. Дослідження макрошліфів зварних з'єднань показало формування шва двозонної структури з трапецеїдальною та прямокутною частинами, при цьому зі збільшенням потужності лазерного випромінювання зростає висота трапецеїдальної частини за рахунок інтенсивнішого проплавлення металу. Для кількісної оцінки деформацій розроблено математичну модель визначення стрілки прогину методом скінченних елементів. Порівняння чисельних та експериментальних даних підтвердило адекватність моделі та можливість її використання для оптимізації режимів лазерного зварювання з метою мінімізації залишкових деформацій.

Ключові слова: лазерне зварювання; таврове з'єднання; деформації; кутова деформація; стрілка прогину; макрошліф; метод скінченних елементів; математичне моделювання.

Annotation

The master's thesis presents a comprehensive experimental and numerical investigation of deformations arising during laser welding of a T-joint made of 3-mm-thick St3 steel. The experimental part included measuring the deflection (out-of-plane deformation) at seven characteristic sections along the weld line using an electronic dial indicator, followed by constructing dependencies of angular deformation on the distance from the sample edge. It was established that angular deformation increases with distance from the edge and stabilizes at approximately 75 mm, which corresponds to known

deformation patterns typical for fusion welding processes. Macrostructural analysis of the welded joints revealed that the weld consists of a two-zone structure comprising trapezoidal and rectangular regions. With increasing laser power, the height of the trapezoidal part grows due to deeper metal penetration and expansion of the heat-affected zone. For quantitative evaluation of deformation, a finite element model was developed to determine the deflection. Comparison of numerical results with experimental data confirmed the adequacy of the model and its suitability for optimizing laser welding parameters in order to minimize residual deformations.

Keywords: laser welding; T-joint; deformations; angular deformation; deflection; macrosection; finite element method; mathematical modeling.

Зміст

ВСТУП	8
1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ.....	11
1.1. Сутність лазерного зварювання.....	11
1.2. Лазерне зварювання твердотілим лазером	14
1.3. Зварювання газовим лазером.....	16
1.4. Промислове застосування лазерного зварювання	19
1.5. Переваги та недоліки лазерного зварювання	22
1.6. Методи вимірювання деформацій.....	26
Висновки, постановка мети і завдання досліджень	29
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	32
2.1. Планування експерименту	32
2.2. Регресійний аналіз	41
2.3. Розробка зразка для проведення експерименту.....	42
2.4. Визначення мінімальної кількості вимірювань	47
Висновки	48
3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ І ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ	50
3.1. Зварювання експериментальних зразків	50
3.2. Вплив режимів на величину зони нагріву	56
Висновки	66
4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТОНКИХ ПЛАСТИН.....	68
4.1. Вибір комп'ютерного методу моделювання деформованого стану	68
4.2 Методика комп'ютерного моделювання напружено- деформованого стану	70
4.3. Комп'ютерне моделювання деформованого стану при лазерному зварюванні.....	71
Висновки	73

5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	81

					МР 8.132.6121м.03.05 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування, авіаційної, енергетичної та транспортної галузей зумовлює постійне зростання вимог до якості та точності виготовлення зварних конструкцій. Використання високопродуктивних технологій зварювання, зокрема лазерного, дозволяє отримувати з'єднання з мінімальною термічною дією та низьким рівнем деформацій. Проте навіть за умов локалізованого тепловкладу залишкові деформації продовжують залишатися одним із ключових технологічних чинників, що визначають точність, працездатність і експлуатаційну надійність конструкцій. Особливо чутливими до деформацій є тонкостінні таврові з'єднання, які широко застосовуються у каркасних та оболонкових конструкціях.

Однією з актуальних задач сучасної зварювальної науки є дослідження впливу параметрів лазерного зварювання на формування залишкових деформацій та розроблення методів їх прогнозування. Висока концентрація енергії та швидкість процесу зумовлюють специфіку теплових та механічних явищ під час формування зварного шва, що вимагає як експериментального вивчення, так і використання математичних моделей. Систематизація цих закономірностей дозволяє оптимізувати режимні параметри зварювання, забезпечити геометричну точність виробів та зменшити витрати на правку та доопрацювання.

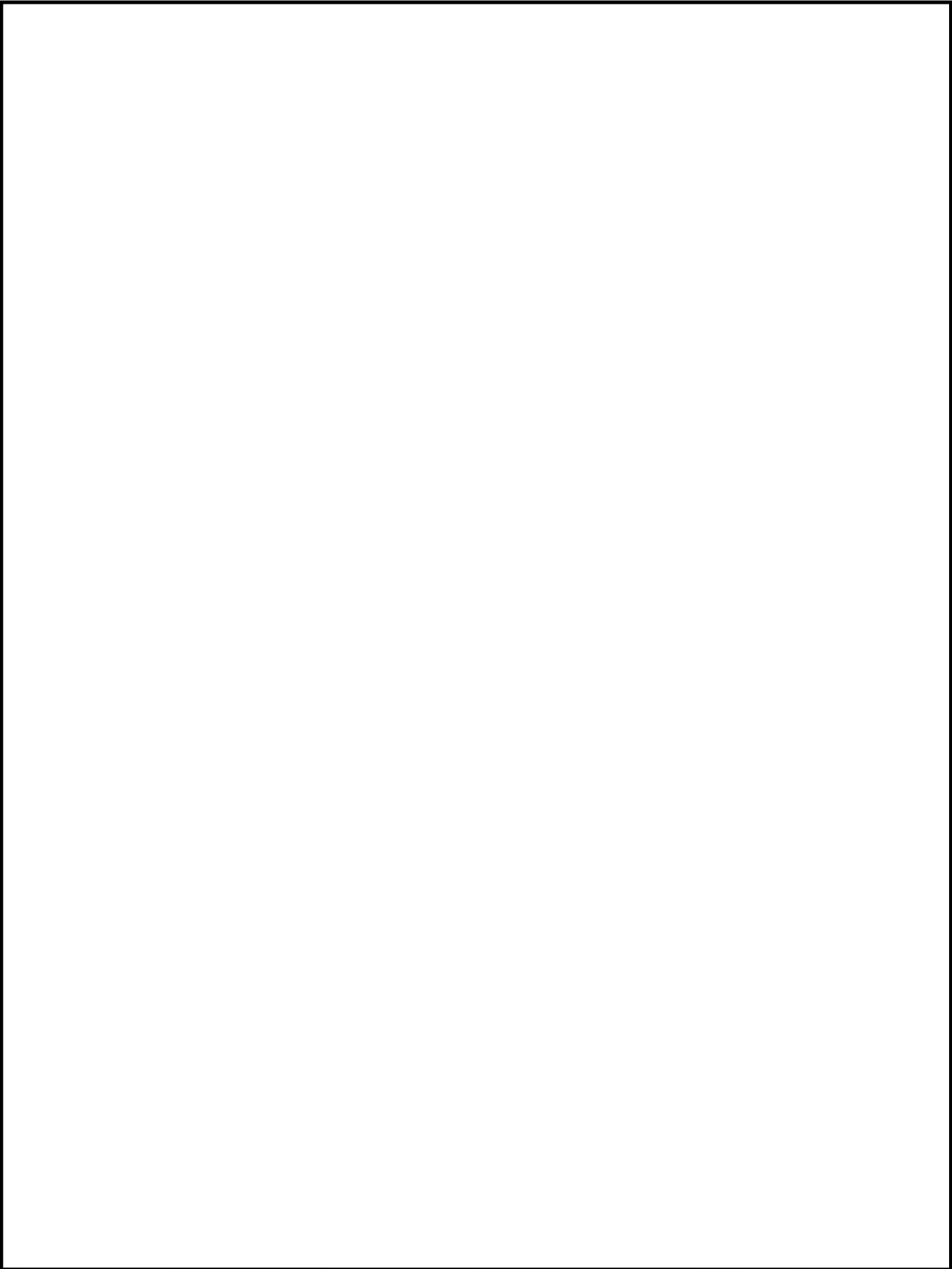
Метою даної роботи є дослідження впливу режимів лазерного зварювання тонкостінних таврових з'єднань на залишкові деформації. Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються задачі, пов'язані з плануванням експерименту, розробленням геометрії зразків та експериментальної оснастки, проведенням серії зварювальних випробувань, аналізом розподілу кутових деформацій, виконанням металографічних досліджень та встановленням залежностей між режимами зварювання, морфологією шва і величиною деформацій. Окрему увагу приділено розробленню математичної моделі визначення стрілки прогину із застосуванням методу скінченних елементів та її верифікації за експериментальними даними.

					МР 8.132.6121м.03.05 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі дослідження встановлено характерні закономірності зміни кутових деформацій уздовж довжини зразка та впливу потужності лазерного випромінювання на їх величину. Показано, що геометрія шва має двозонну структуру та безпосередньо корелює з параметрами термічної дії. Розроблена чисельна модель продемонструвала достатню адекватність і може бути використана для прогнозування деформацій та подальшої оптимізації технологічних режимів лазерного зварювання.

Отримані результати мають практичне значення для вдосконалення технологій виготовлення тонкостінних металевих конструкцій, підвищення їх точності та зниження витрат на технологічну правку, що підвищує актуальність і прикладну цінність проведеного дослідження.

					МП 8.132.6121м.03.05 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					MP 8.131.6121м.03.05.01. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Гулько В.В.				Аналіз використання лазерного зварювання	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Ярос Ю.О.						10	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.								
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

1. Аналіз використання лазерного зварювання

1.1. Сутність лазерного зварювання

Лазерне зварювання є одним із найсучасніших та високотехнологічних методів з'єднання металевих матеріалів, що базується на використанні сфокусованого лазерного променя як джерела тепла. Основна особливість лазерного зварювання полягає у можливості передавання великої густини енергії в надзвичайно малу зону термічного впливу, що забезпечує високу точність, мінімальні деформації та високу якість з'єднання [1]. Завдяки цим характеристикам технологія широко застосовується в авіакосмічній, автомобільній, суднобудівній та електронній промисловості.

Лазерне зварювання базується на перетворенні електричної енергії у когерентний промінь світла, який у подальшому фокусується оптичними системами до дуже малої плями. Така концентрація енергії забезпечує локальне плавлення металу та формування зварного шва. На відміну від традиційних методів зварювання, де джерело тепла має широку зону впливу (дуга, полум'я), лазер забезпечує майже точкове нагрівання, що дозволяє зварювати тонкі конструкції, мінімізувати зону термічного розширення і впливу, а також зменшити або усунути потребу в додатковому механічному обробленні [2].

Суттєвою перевагою лазерного зварювання є його висока швидкість. Завдяки великій глибині проплавлення та стабільності енергопідведення лазерне зварювання може виконуватися у рази швидше за дугове або електронно-променеве зварювання. Крім того, лазерне зварювання може виконуватися як у фокусі променя, так і на відстанях від кількох міліметрів до сотень міліметрів, що підвищує технологічну гнучкість обладнання [3].

Основними типами лазерів, що використовуються для зварювання, є газові (CO₂-лазери), твердотільні (Nd:YAG, Yb:YAG), волоконні та дискові лазери. Кожен із них має свої особливості. Наприклад, CO₂-лазери забезпечують високу потужність і довжину хвилі 10,6 мкм, однак потребують складнішої оптичної

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи та мають певні обмеження щодо зварювання відбивних матеріалів [4]. Волоконні лазери, навпаки, характеризуються високим ККД, компактністю, стабільністю променя та здатністю працювати з високою частотою імпульсів, що зробило їх найбільш популярним вибором у сучасному виробництві.

Застосування волоконних лазерів дозволяє працювати з широким спектром металів: сталями різних класів, алюмінієвими та титановими сплавами, нікельвмісними матеріалами. Завдяки цьому технологія набула широкого поширення в галузях, де критичною є якість та повторюваність результату [5].

Під час лазерного зварювання може реалізовуватися два основні режими: кондуктивний (теплопровідний) та режим глибокого проплавлення («keyhole»).

У кондуктивному режимі енергія лазерного променя поглинається поверхнею матеріалу і передається вглиб шляхом теплопровідності. Шов формується за рахунок плавлення верхнього шару металу та подальшого його затвердіння. Такий режим характерний для малих потужностей і застосовується переважно для тонких матеріалів [6].

У режимі keyhole густина енергії настільки висока, що матеріал плавиться і випаровується, утворюючи вузьку глибоку порожнину — «канал ключового отвору». Лазерне випромінювання багаторазово відбивається всередині цього каналу, ще більше збільшуючи глибину проплавлення. Саме цей режим забезпечує високу продуктивність і дозволяє створювати глибокі вузькі шви з мінімальним тепловим впливом [7].

До основних переваг технології належать:

мала зона термічного впливу, що знижує залишкові деформації та забезпечує високу точність конструкції;

висока швидкість процесу, що підвищує продуктивність виробництва;

мінімальна потреба в присадковому матеріалі, оскільки у більшості випадків достатня глибина проплавлення досягається без нього;

висока якість шва, зокрема мінімальний рівень пористості та тріщин, за умови правильного підбору параметрів;

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливість автоматизації та роботизації, що робить технологію придатною для масового виробництва.

Багато досліджень підтверджують, що зварні з'єднання, виконані лазером, мають меншу структурну неоднорідність та вищу втому міцність порівняно з дуговими методами [8].

Незважаючи на численні переваги, лазерне зварювання має певні обмеження. Одним із головних факторів є висока вартість обладнання, особливо високопотужних лазерних систем. Також лазерне зварювання чутливе до точності складання деталей — зазор між з'єднуваними елементами має бути мінімальним [9].

Крім того, робота лазера вимагає контролю відбивності та теплопровідності матеріалу. Наприклад, алюмінієві сплави мають високу відбивну здатність, що може знижувати ефективність процесу. У таких випадках можуть застосовуватися попередній підігрів, імпульсний режим або використання лазера іншої довжини хвилі [10].

Сучасні дослідження спрямовані на удосконалення стабільності процесу та розширення можливостей контролю. Однією з перспективних тенденцій є застосування адаптивних систем керування променем, що автоматично коригують параметри залежно від стану зварювальної ванни.

Також активно розвиваються технології гібридного лазерного зварювання, які поєднують лазерне випромінювання та дуговий розряд. Це дозволяє збільшити ширину шва, стабілізувати процес і зменшити вимоги до точності складання конструкції [11].

Важливим напрямом стає моделювання процесу лазерного зварювання із застосуванням методу скінченних елементів, що дає змогу прогнозувати температурні поля, залишкові напруження та деформації, оптимізуючи параметри зварювання ще на етапі проектування [12].

1.2. Лазерне зварювання твердотілим лазером

Лазерне зварювання твердотілим лазером є одним із найбільш ефективних і високотехнологічних методів з'єднання металевих матеріалів, який ґрунтується на використанні сфокусованого когерентного променя, що генерується твердим активним середовищем. На відміну від газових або CO₂-лазерів, твердотілі лазери забезпечують високу якість променя, стабільність параметрів та значний коефіцієнт корисної дії, що робить їх провідною технологією у точному зварювальному виробництві [13]. Основним активним середовищем для таких лазерів є кристалічні матеріали, як-от Nd:YAG, або ж активовані волоконні структури на основі ітербію. Ці лазери здатні працювати як у безперервному, так і в імпульсному режимах, що дає змогу адаптувати процес під специфічні вимоги до глибини проплавлення, стабільності шва та мінімізації теплового впливу.

Зварювання твердотілим лазером базується на принципі локального висококонцентрованого підведення теплової енергії. Після фокусування промінь утворює на поверхні металу пляму діаметром від декількох сотень мікрометрів, що забезпечує миттєве нагрівання матеріалу, його плавлення, а за достатньої інтенсивності — випаровування. Якщо потужність лазера перевищує певний поріг, формується режим глибокого проплавлення (keyhole), за якого в зоні зварювання утворюється парова порожнина з багаторазовим внутрішнім відбиттям випромінювання, що збільшує ступінь поглинання та глибину проплавлення [14]. Саме цей режим забезпечує формування вузьких та глибоких швів, які характерні для твердотілого лазерного зварювання.

Твердотілі лазери вирізняються високою якістю променя, що дає змогу отримувати мінімальний діаметр фокусування та значну інтенсивність енергії на поверхні матеріалу. Особливо цим відзначаються волоконні лазери, які сьогодні є найбільш поширеним різновидом твердотілих лазерів у промисловості. Вони забезпечують коефіцієнт корисної дії до 40%, мають компактну конструкцію, мінімальні втрати під час транспортування

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випромінювання та чудово сумісні з роботизованими системами [15]. Завдяки цьому волоконні лазери широко застосовуються в автомобілебудуванні, авіаційній галузі та виробництві електронних компонентів.

Імпульсні твердотілі лазери використовуються тоді, коли потрібен контрольований мінімальний тепловий вплив і висока точність. Вони забезпечують короткочасне, але дуже інтенсивне підведення енергії, що дозволяє локально плавити матеріал без його значного перегрівання. Такі режими особливо корисні для мікрозварювання деталей малої товщини або зварювання дуже чутливих до температури сплавів, де критичним є уникнення зміни структури матеріалу [16]. Крім того, імпульсні режими ефективні під час роботи з матеріалами з високою тепловою провідністю, такими як мідь або алюміній.

Однією з головних переваг лазерного зварювання твердотілим лазером є мала зона термічного впливу, що мінімізує залишкові напруження та деформації конструкцій. Завдяки швидкому охолодженню зварного шва структура металу зазнає меншого перегріву, ніж у дугових процесах, що позитивно впливає на механічні властивості зварного з'єднання [17]. Це робить технологію надзвичайно цінною під час виготовлення конструкцій, які висувають високі вимоги до точності та повторюваності геометрії, наприклад у виробництві медичних інструментів або аерокосмічних компонентів.

Попри численні переваги, лазерне зварювання твердотілим лазером має низку обмежень. Зокрема, процес чутливий до підготовки кромки: надмірний зазор або відхилення за геометрією можуть призвести до перепалів, пор та нестабільності режиму keyhole. Також важливо враховувати відбивність матеріалу: мідні та алюмінієві сплави можуть відбивати значну частину випромінювання, що потребує збільшення потужності або використання лазера з іншою довжиною хвилі [18]. У таких випадках застосовуються спеціальні технічні прийоми, наприклад чорнення поверхні, імпульсне збудження або використання коротших довжин хвиль.

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки високій концентрації енергії твердотілі лазери здатні ефективно зварювати металеві матеріали з високою міцністю або жаротривкі сплави, які часто важко піддаються традиційним методам дугового зварювання. Також вони дозволяють зварювати різномірні матеріали, зокрема тонкі сталеві й алюмінієві листи, що відкриває широкі можливості для створення комбінованих конструкцій у легкій інженерії [19]. Одним із важливих напрямів розвитку технології є інтеграція твердотілих лазерів у гібридні системи, які поєднують лазерний промінь і дуговий розряд. Це дозволяє збільшити ширину шва, підвищити стабільність плавлення та розширити технологічні можливості процесу.

Сучасний розвиток твердотілого лазерного зварювання пов'язаний із розробкою систем адаптивного керування, машинного зору, онлайн-моніторингу зварювальної ванни та чисельного моделювання процесів теплопереносу. Використання цифрових моделей, наприклад на основі методу скінченних елементів, дає змогу прогнозувати розвиток температурних полів, характер охолодження та можливі залишкові напруження [20]. Це дозволяє інженерам точніше підбирати параметри процесу та оптимізувати зварювання ще на етапі проєктування. Твердотіле лазерне зварювання продовжує займати ключову позицію в сучасному машинобудуванні, забезпечуючи високу точність, надійність і стабільність результату.

1.3. Зварювання газовим лазером

Зварювання газовим лазером є одним із найпоширеніших методів лазерної обробки матеріалів, особливо у промисловості, де потрібна висока точність, стабільність і можливість дистанційного формування шва. Газові лазери, зокрема CO₂-лазери, залишаються одними з ключових інструментів у технологічних процесах завдяки високій потужності, гарній якості променя та відносно високому коефіцієнту корисної дії. Попри активний розвиток твердотілих та волоконних лазерів, газові лазери й надалі широко

застосовуються в галузях, де необхідне глибоке проплавлення, робота з товстими матеріалами та високошвидкісне зварювання [21].

Газовий CO₂-лазер працює на основі електричного збудження газової суміші, що складається з вуглекислого газу, азоту та гелію. Процес лазерної генерації виникає завдяки переходам у молекулі CO₂, які супроводжуються випромінюванням інфрачервоного світла з довжиною хвилі близько 10,6 мкм [22]. Саме ця довжина хвилі забезпечує досить високий коефіцієнт поглинання для більшості неметалевих матеріалів і прийнятний коефіцієнт поглинання для металів за умови попередньої підготовки поверхні або використання додаткового фокусування. Висока потужність випромінювання, яку можуть генерувати газові лазери (до десятків кіловат), робить їх ефективними для зварювання середніх і великих товщин металів [23].

Зварювання газовим лазером відбувається за принципом глибокого проплавлення (keyhole-mode), коли лазерний промінь нагріває матеріал до температури кипіння, утворюючи вузьку та глибоку парову порожнину. Ця порожнина поглинає більшу частину енергії, що надходить, і таким чином процес стає самопідтримуваним [24]. Глибина проплавлення може сягати значних значень залежно від потужності лазера, швидкості переміщення променя та характеристик матеріалу. Форма та стабільність keyhole визначають якість шва, а також схильність до утворення пористості та тріщин, що є характерними проблемами для лазерного зварювання металів з високою теплопровідністю або низькою температурою випаровування.

Газові лазери мають низку технічних переваг, серед яких можна виділити стабільність випромінювання, можливість передачі високої потужності, а також відносну простоту масштабування системи. На відміну від твердотіlnих лазерів, газові лазери мають меншу чутливість до теплових деформацій активного середовища, оскільки газ рівномірно розподіляє теплову енергію в об'ємі робочої камери [25]. Завдяки цьому CO₂-лазери здатні працювати тривалий час із мінімальними тепловими перекосами, забезпечуючи стабільність променя.

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще однією важливою перевагою газового лазера є можливість сформувати промінь великого діаметра, що дозволяє зменшити щільність енергії, запобігти надмірному випаровуванню та покращити якість шва під час обробки товстих листових матеріалів. Таке зварювання часто використовується в авіабудуванні, суднобудуванні та машинобудуванні, де необхідна висока продуктивність при роботі з великими поверхнями [26].

Однак газові лазери мають і певні недоліки. Зокрема, їхній ККД є нижчим, ніж у сучасних волоконних лазерів, що призводить до підвищених енергетичних витрат. Крім того, використання газової суміші потребує складної системи охолодження та регулярного обслуговування. Також значні габарити газових лазерів частково обмежують їх застосування у компактних виробничих системах. Незважаючи на це, їх здатність забезпечувати надвисоку потужність і глибоке проплавлення робить їх важливими для важкого машинобудування [27].

При роботі з газовим лазером важливим фактором є якість поверхні. Через інфрачервону довжину хвилі CO₂-лазера метали мають менший коефіцієнт поглинання порівняно з твердотільними або волоконними лазерами, які працюють у діапазоні 1–1,1 мкм [28]. Це означає, що поверхневе окиснення, нанесення покриттів або попередня механічна обробка можуть значно підвищити ефективність процесу. Підвищення поглинання також забезпечує стабільніший процес утворення keyhole, що зменшує ризик дефектів у шві.

Зварювання газовим лазером підтримує широкий спектр технологічних параметрів, серед яких варто виділити потужність випромінювання, частоту імпульсів для імпульсних систем, швидкість переміщення променя та діаметр фокусної плями. Поєднання цих параметрів дозволяє отримувати різні режими зварювання: від поверхневого плавлення до глибокого проплавлення. Саме можливість точного контролю параметрів робить лазерне зварювання ефективним для матеріалів з високою теплопровідністю, таких як алюмінієві сплави [29].

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання газових лазерів вимагає також подачі захисного газу, найчастіше — гелію або азоту, які забезпечують захист розплавленого металу від окиснення. Застосування захисного газу дозволяє запобігти появі пористості та покращує якість шва. Через велику теплову пляму газові лазери можуть створювати ширший шов, ніж волоконні або твердотільні лазери, що іноді є перевагою, адже дозволяє забезпечити кращу змочуваність і заповнення зазору [30].

Попри конкуренцію з боку сучасних високоефективних волоконних лазерів, газові лазери продовжують займати важливе місце в промисловості. Їхня здатність забезпечувати рівномірне нагрівання, високу потужність і глибоке проплавлення робить їх актуальними в умовах виробництва, де потрібна максимальна надійність та висока продуктивність. Завдяки тривалому досвіду експлуатації й відпрацьованим технологічним режимам, газові лазери залишаються одними з найбільш передбачуваних і стабільних джерел лазерного зварювання [31].

1.4. Промислове застосування лазерного зварювання

Лазерне зварювання є однією з найважливіших сучасних технологій обробки матеріалів, що активно впроваджується у провідних галузях промисловості завдяки високій точності, продуктивності та здатності забезпечувати глибоке проплавлення при мінімальній тепловій деформації. Інтенсивний розвиток лазерних джерел — твердотільних, волоконних та газових — значно розширив можливості застосування технології, дозволивши інтегрувати її в автоматизовані та роботизовані виробничі комплекси. Лазерне зварювання широко використовують для обробки сталі, алюмінію, титану, магнію та інших матеріалів, що традиційно вважалися складними для зварювання класичними методами [33].

У сучасному машинобудуванні лазерне зварювання застосовується для формування високоточних швів, де необхідні мінімальні теплові деформації та

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висока повторюваність процесу. Завдяки малій ширині зони термічного впливу лазерне зварювання дає змогу зберігати геометричну точність складних деталей, що особливо важливо при виготовленні корпусів редукторів, коробок передач, гідравлічних елементів, рам автомобільних шасі та високонавантажених машинобудівних компонентів. Використання лазера також дозволяє зварювати матеріали різної товщини, що є суттєвою перевагою під час складальних операцій, де необхідне високоточне з'єднання різнорідних елементів [34].

Автомобільна промисловість є одним із найбільших споживачів лазерних технологій. Лазерне зварювання використовується для виготовлення дверей, дахів, рам, сидінь, систем вихлопу, паливних баків, трансмісійних елементів та інших структурних частин автомобіля. Технологія lap-welding дозволяє значно підвищити швидкість процесу, забезпечуючи стабільну якість шва і можливість автоматизації. Завдяки тому, що лазерний промінь може проникати глибоко в матеріал при мінімальному внесенні тепла, зменшується ризик появи короблення або внутрішніх дефектів. У сучасних електромобілях лазерне зварювання використовується для з'єднання акумуляторних модулів, струмопровідних шин і тонкостінних елементів охолоджувальних систем, що потребують високої герметичності та механічної міцності [35].

У суднобудуванні лазерне зварювання використовується для з'єднання великих сталевих конструкцій, таких як корпуси, панелі та секції кораблів. Завдяки здатності лазера створювати глибоке проплавлення та рівномірний шов, технологія дозволяє значно знизити кількість додаткової механічної обробки після зварювання. Однією з ключових переваг є можливість дистанційного керування і легкого інтегрування в роботизовані системи, що зменшує трудомісткість процесу й підвищує продуктивність. Лазерне зварювання також дозволяє зменшити масу конструкцій завдяки меншому об'єму розплавленого металу і високій точності формування шва [36].

Авіаційна промисловість активно використовує лазерне зварювання для виготовлення елементів фюзеляжів, паливних баків, двигунів, ребер жорсткості

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та інших відповідальних конструкцій. Алюмінієві та титанові сплави, що широко застосовуються в авіації, є складними для зварювання традиційними методами через схильність до утворення гарячих тріщин та пористості. Лазерне зварювання з контролем енергетичних параметрів дозволяє мінімізувати такі дефекти, забезпечуючи стабільну якість. Завдяки високій концентрації енергії лазер дає змогу створювати легкі й водночас міцні конструкції, що сприяє зниженню маси літальних апаратів і підвищенню їх паливної ефективності [37].

Лазерне зварювання також широко застосовується у виробництві електроніки та мікроелектроніки. Завдяки точності променя та можливості локального нагрівання технологія дає змогу з'єднувати мікроскопічні елементи, не пошкоджуючи сусідні ділянки. Лазер застосовують для зварювання корпусів мікросенсорів, мікросхем, оптичних датчиків, корпусів акумуляторів мобільних пристроїв та медичного обладнання. Завдяки швидкому локальному нагріву шов можна формувати без значної зміни мікроструктури матеріалу, що є критично важливим у високоточних приладах [38].

У стоматології та хірургії лазерне зварювання використовується для виготовлення імплантів, ортодонтичних конструкцій та медичних пристроїв, де необхідна висока біосумісність та герметичність. У цих галузях застосовуються твердотільні імпульсні лазери, які створюють локальний нагрів без розширення зони термічного впливу. Це особливо важливо при роботі з матеріалами, що мають низьку теплопровідність або чутливі до перегріву [39].

В енергетичній галузі лазерне зварювання застосовується для виготовлення елементів газових турбін, теплообмінників, трубопроводів, батарейних модулів та інших конструкцій, що працюють у складних температурних умовах. Висока точність формування шва дозволяє мінімізувати дефекти, які можуть призвести до зниження довговічності обладнання. Окремою сферою є виробництво сонячних панелей, де лазерне зварювання використовується для з'єднання тонких металевих провідників, що забезпечує надійну електричну провідність і тривалу експлуатацію пристрою [40].

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Промислове застосування лазерного зварювання значною мірою залежить від можливостей автоматизації. Сучасні виробничі лінії оснащуються роботизованими комплексами, у яких лазерні системи інтегруються в автоматизовані маніпулятори. Це дозволяє забезпечити високу повторюваність і точність процесу, зменшити вплив людського фактора та збільшити продуктивність. Використання систем з адаптивним керуванням, які автоматично коригують фокус, потужність та швидкість зварювання, робить процес більш стабільним і ефективним [41].

Важливим напрямом розвитку є застосування волоконних лазерів, які за останні десятиліття значно потіснили газові та твердотільні лазери. Волоконні лазери мають високу якість променя, малий розмір фокусної плями та високу енергоефективність, що робить їх ідеальними для високошвидкісного зварювання тонкостінних деталей. Завдяки можливості передавання променя через оптичне волокно вони легко інтегруються в роботизовані комплекси та багатокоординатні системи [42].

Попри розвиток альтернативних методів зварювання, лазерне зварювання зберігає свої ключові переваги: мінімальний тепловий вплив, високу швидкість та здатність утворювати шви з високою щільністю та малою кількістю дефектів. Саме тому технологія продовжує впевнено займати провідне місце в сучасному виробництві. Завдяки постійному вдосконаленню джерел випромінювання, інтеграції з цифровими системами керування та зростанню автоматизації лазерне зварювання має всі передумови для подальшого розвитку та розширення сфер застосування у промисловості [43].

1.5. Переваги та недоліки лазерного зварювання

Лазерне зварювання належить до високоточних та високоефективних методів отримання нерознімних з'єднань матеріалів і посідає важливе місце серед сучасних технологій обробки. Його основою є використання сфокусованого лазерного променя, який забезпечує високу густину потужності

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та створює умовний «ключовий отвір» у металі, сприяючи глибокому проплавленню та формуванню вузької зони шва. Висока локалізація теплового впливу забезпечує специфічний комплекс переваг, завдяки чому процес лазерного зварювання активно впроваджується у машинобудуванні, електроніці, авіаційній та автомобільній промисловості [46; 47].

Однією з найважливіших переваг лазерного зварювання є його здатність формувати високоякісні та дуже точні з'єднання. Завдяки значній густині енергії забезпечується малий діаметр зони термічного впливу, що мінімізує теплові деформації та дозволяє зварювати тонкі елементи з мінімальним ризиком викривлення [48]. Характерною особливістю є глибоке проплавлення при незначній ширині шва, що робить процес особливо привабливим для відповідальних та герметичних з'єднань. Вироби, отримані лазерним зварюванням, зазвичай мають високу повторюваність технічних показників та мінімальні дефекти у вигляді пор, непроварів чи тріщин, що є критично важливим у високоточному обладнанні, медичних інструментах і конструкціях, які працюють під тиском [49].

Важливою перевагою технології є можливість зварювання широкого спектра матеріалів. Лазерне зварювання успішно застосовується для обробки сталей різних марок, алюмінієвих, титанієвих, магнієвих та нікелевих сплавів, а також матеріалів із різною теплопровідністю чи відбивною здатністю. При використанні лазерів високої потужності стає доступним навіть зварювання металів із високою температурою плавлення чи матеріалів, що важко піддаються традиційним видам термічної обробки [50]. Можливість зварювання різнорідних матеріалів є однією з ключових причин активного використання лазерів у виробництві сучасних електронних компонентів та акумуляторних систем.

Ще однією перевагою є висока швидкість процесу. Завдяки концентрації енергії в невеликій зоні зварювання досягається значна швидкість переміщення променя, що дозволяє зменшити тривалість циклу виготовлення продукції та підвищити продуктивність. У випадку автоматизованого або роботизованого

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лазерного зварювання ефективність може збільшуватися в кілька разів порівняно з традиційними методами. Крім того, лазерне зварювання характеризується невеликим обсягом розбризкування металу та утворенням мінімальної кількості окалини, що знижує витрати на механічне доопрацювання швів [46].

Ще однією перевагою лазерного зварювання є висока ступінь автоматизації. Лазерні установки легко інтегруються в системи числового програмного керування, роботизовані комплекси та виробничі лінії, що забезпечує повторюваність процесу та зменшує вплив людського фактора. Використання автоматизації забезпечує стабільність енергії випромінювання, точність наведення променя та можливість програмування параметрів зварювання для різних типів деталей. Це особливо важливо в умовах серійного виробництва, де потрібна висока продуктивність і мінімальні відхилення у геометрії деталей [48; 50].

Однак попри численні переваги, лазерне зварювання має і певні недоліки. Одним із ключових є висока вартість обладнання та супутніх систем, включно з генераторами лазерного випромінювання, оптичними елементами, системами охолодження та складною електронікою. Початкові інвестиції можуть бути значними, що обмежує використання лазерних технологій у малих підприємствах або в галузях із низькою рентабельністю. Висока ціна обумовлена як складністю конструкції лазера, так і вимогами до точності систем позиціонування [47].

Іншою проблемою є значні вимоги до точності підготовки поверхні. Лазерний промінь чутливий до змін у геометрії стику, наявності оксидів, забруднень або мастильних матеріалів. Неналежна підготовка поверхні може призвести до нестабільності процесу, утворення дефектів або зміни глибини проплавлення. В окремих випадках для забезпечення якості з'єднання доводиться застосовувати допоміжні технології, такі як попереднє очищення поверхні або контроль параметрів зазорів [51].

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лазерне зварювання також характеризується складністю у контролі глибини проплавлення. Незважаючи на те, що лазер здатний створювати глибокі та вузькі шви, навіть невеликі зміни параметрів — таких як фокусування, потужність або швидкість зварювання — можуть призвести до суттєвих коливань глибини ключового отвору. Ці коливання здатні спричинити дефекти у вигляді непроварів або пор, що негативно впливає на надійність з'єднання [49].

До недоліків також належить чутливість лазерного обладнання до умов експлуатації та потреба у висококваліфікованому персоналі. Налаштування параметрів, контроль якості оптичної системи та обслуговування лазера потребують досвідчених фахівців. Неправильне використання лазерного обладнання може призвести не лише до погіршення якості шва, а й до зниження ресурсу роботи самого лазера або його оптичних компонентів [50].

Серед інших недоліків варто згадати обмеження щодо товщини матеріалів. Попри те, що сучасні лазери здатні зварювати товсті деталі, для багатьох промислових застосувань все ще виникає потреба у використанні багатопрхідного зварювання або комбінованих технологій, таких як гібридне лазерно-дугове зварювання. Це підвищує складність технології та може збільшувати витрати [52].

Таким чином, лазерне зварювання є високотехнологічним і перспективним методом отримання нерознімних з'єднань, який поєднує у собі низку суттєвих переваг: високу точність, можливість отримання вузьких і глибоких швів, мінімальні деформації та високу продуктивність. Однак, поряд із перевагами, існують і недоліки, що пов'язані передусім із високою вартістю обладнання, вимогами до підготовки поверхні, складністю контролю параметрів та необхідністю високої кваліфікації персоналу. Ефективне впровадження лазерного зварювання потребує ретельного аналізу технічних і економічних факторів, однак у багатьох галузях цей метод залишається одним із найбільш оптимальних способів отримання якісних та надійних з'єднань.

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.6. Методи вимірювання деформацій

Вимірювання деформацій є важливим етапом у вивченні механічних властивостей матеріалів та аналізі напружено-деформованого стану конструкцій. Коректне визначення деформацій дозволяє оцінити роботу зварних з'єднань, визначити рівень залишкових напружень і прогнозувати надійність та довговічність елементів конструкцій. Умови сучасних досліджень потребують точних, високочутливих та відтворюваних методів контролю деформацій, що охоплюють як контактні, так і безконтактні технології [53; 54].

Контактні методи вимірювання деформацій є традиційними й широко застосовуються у лабораторній практиці. Найпоширенішими серед них є тензорезисторні датчики, принцип роботи яких ґрунтується на зміні електричного опору провідника під дією механічної деформації. Тензорезистор має вигляд тонкої металевої або напівпровідникової сітки, прикріпленої до поверхні зразка спеціальним клеєм. При деформації зразка відбувається пропорційна зміна геометричних розмірів тензорезистора, що викликає зміну його опору, яку фіксує вимірювальна схема — зазвичай тензоміст Вітстона. Цей метод характеризується високою точністю, чутливістю та можливістю вимірювати дуже малі деформації, що робить його незамінним у прецизійних експериментах.

Основними перевагами тензорезисторного методу є висока точність та простота інтерпретації результатів, однак він має й низку недоліків. Зокрема, процес наклеювання датчика вимагає високої чистоти поверхні та дотримання технології монтажу. Крім того, тензорезистори працюють лише у місці їх контакту зі зразком, що обмежує можливість просторового аналізу деформацій. Попри це, тензорезисторні системи залишаються одними з найбільш доступних та широко застосовуваних інструментів експериментальної механіки [55].

До ще одного контактного методу можна віднести механічні індикатори зміщення, що використовуються переважно для вимірювання макродеформацій та переміщень. Індикаторний метод застосовується у випадках, коли не

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потрібна надвисока точність або коли досліджувані деформації мають значні величини. Такі прилади часто використовуються у випробуваннях на розтяг, стиск або згин. Незважаючи на відносну простоту, індикатори не дають можливості досліджувати локальні поля деформацій, що обмежує їх застосування у точних наукових дослідженнях.

З розвитком оптичних та лазерних систем значного поширення набули безконтактні методи вимірювання деформацій. Вони мають суттєві переваги, оскільки не впливають на об'єкт дослідження та можуть застосовуватися на високотемпературних поверхнях, у зонах складної геометрії або на деталях, до яких неможливо прикріпити датчики. Одним із найефективніших сучасних методів є цифрова кореляція зображень (DIC), яка базується на аналізі змін цифрового зображення поверхні об'єкта під дією навантаження. На поверхню наносять контрастний стохастичний шаблон, після чого камера фіксує серію зображень до і після деформації. Спеціальне програмне забезпечення порівнює кореляцію точок шаблону та обчислює поле переміщень, на основі якого визначаються деформації [56].

Метод цифрової кореляції зображень відрізняється високою просторовою роздільною здатністю, можливістю візуалізації повного поля деформацій та зручністю використання в експериментальних дослідженнях. DIC дозволяє отримувати тривимірні поля переміщень та деформацій, що є особливо цінним при дослідженні зварних з'єднань, де деформації мають складний просторовий характер.

До іншого класу безконтактних методів відносять лазерні сканувальні системи, які використовують триангуляцію або інтерферометрію для визначення змін геометричних розмірів матеріалу під дією навантаження. Лазерні сканери забезпечують дуже високу точність, а інтерферометричні методи дозволяють вимірювати переміщення у нанометровому діапазоні. Лазерні інтерферометри широко застосовуються у високоточних дослідженнях, але мають складну конструкцію та високу вартість, що обмежує їх використання у промислових умовах. Однак для лабораторних вимірювань

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залишкових напружень або деформацій після зварювання такі системи є одним із найточніших інструментів [57].

Оптична методика спекл-інтерферометрії (ESPI) також належить до високоточних методів вимірювання деформацій і базується на аналізі інтерференції лазерного світла, розсіяного поверхнею об'єкта. ESPI дозволяє отримувати повні поля деформацій і є надзвичайно чутливою до мікропереміщень. Методика широко застосовується в аналізі тонкостінних матеріалів, елементів авіаційних конструкцій та мікромеханіки [58].

Ще одним важливим методом є використання систем тривимірного сканування, які дозволяють вимірювати зміну геометрії великогабаритних деталей. На основі тривимірних моделей можна оцінити деформації після зварювання або обробки. Такі системи базуються на структурованому світлі, лазерному скануванні або методах фотограмметрії. Остання, зокрема, відзначається гнучкістю та можливістю аналізу великих площ, що робить її популярною у будівництві та важкому машинобудуванні [59].

У дослідженнях залишкових деформацій після зварювання часто застосовують комбіновані методи, які поєднують контактні та безконтактні засоби контролю. Наприклад, тензорезисторні датчики можуть використовуватися для локального вимірювання деформацій у зоні зварювання, тоді як цифрова кореляція зображень — для визначення загального поля деформацій по всьому об'єму зразка. Такий підхід дозволяє отримати комплексне уявлення про поведінку матеріалу та порівняти результати експериментів із числовим моделюванням [60].

Таким чином, вибір методу вимірювання деформацій залежить від умов експерименту, необхідної точності, доступності обладнання та особливостей досліджуваного матеріалу. Контактні методи залишаються надійними і точними засобами локального контролю, тоді як безконтактні оптичні системи відкривають можливість визначення повних полів деформацій з високою просторою роздільною здатністю. Поєднання різних вимірювальних технологій

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

є оптимальним підходом до досліджень деформацій у зварних конструкціях, особливо при вивченні складних термомеханічних процесів.

Висновки, постановка мети і завдання досліджень

1. У лазерному зварюванні застосовують кілька основних типів лазерів, серед яких твердотільні, газові лазери з поздовжньою або поперечною прокачкою газу, а також газодинамічні установки. Кожен тип має специфічні характеристики, що визначають сферу його ефективного використання.

2. Твердотільні лазери вирізняються можливістю високоточного керування енергією випромінювання, що забезпечує формування якісних і стабільних з'єднань навіть при зварюванні мікромасштабних деталей. Це робить їх особливо придатними для високоточної електронної та приладобудівної промисловості.

3. Газові лазери великої потужності забезпечують значну глибину проплавлення за малої ширини шва, що сприяє зменшенню зони термічного впливу та дозволяє знижувати рівень залишкових деформацій і внутрішніх напружень у виробах. Це робить їх ефективними для зварювання товстостінних матеріалів і конструкцій відповідального призначення.

4. До основних недоліків лазерного зварювання належать висока складність та вартість обладнання, порівняно низький ККД більшості типів лазерів, а також необхідність у висококваліфікованому обслуговуючому персоналі. Додатковою умовою є потреба в використанні вібростійких платформ для забезпечення стабільності процесу.

5. Хоча лазерне зварювання дає можливість суттєво зменшити рівень зварювальних деформацій порівняно з дуговими процесами, повністю усунути їх не вдається. Якщо для дугових методів існують напрацьовані моделі та методики прогнозування деформацій на етапі проектування, то для лазерного зварювання подібні дані практично відсутні, що зумовлює потребу в подальших дослідженнях у цьому напрямі.

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому метою роботи було дослідження впливу режимів лазерного зварювання тонкостінних таврових з'єднань на залишкові деформації.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести планування експерименту, розрахувати мінімальну кількість вимірювання для отримання даних з довірчою ймовірністю $\alpha=0,95$.

2. Розробити конструкцію та геометрію зразка для експериментального дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на кутові деформації таврових з'єднань; обґрунтувати вибір розмірів, матеріалу та типу стику.

3. Розробити й виготовити експериментальну оснастку (мікропозиціонери, кріплення, засоби фіксації та вимірювання), необхідну для забезпечення повторюваного й контрольованого проведення зварювальних випробувань.

4. Провести серію експериментів з лазерного зварювання таврових з'єднань у нахлест за різних значень потужності випромінювання; зафіксувати технологічні параметри (потужність, швидкість, фокусну відстань, захисний газ тощо) для кожного випробування.

5. Визначити та проаналізувати розподіл кутових деформацій уздовж довжини зразка; виконати статистичну обробку результатів, зокрема розрахунок середньоквадратичного відхилення, систематичної та випадкової похибок вимірювань, а також оцінити відтворюваність результатів.

6. Виконати металографічне дослідження макрошліфів зварних швів (опис структурних зон, вимірювання геометрії шва, ідентифікація зон трапецієподібної й прямокутної форми), встановити зв'язок між параметрами зварювання, морфологією шва та величинами деформацій.

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					МР 8.131.6121м.03.05.02. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Гулько В.В.				Методика проведення експерименту	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Ярос Ю.О.						31	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.								
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

2. Методика проведення експерименту

2.1. Планування експерименту

Вибір методу дослідження визначається насамперед метою експерименту. Для забезпечення надійності та інформативності отриманих результатів метод повинен відповідати характеру процесу, що вивчається. Некоректний вибір методики може призвести до отримання недостатньої або надмірної кількості даних, ускладнення процедури експерименту, підвищення його вартості, а подекуди — до суттєвих помилок у висновках [61], [63]. Наприклад, задачі, пов'язані з вивченням поширення пластичних деформацій, визначенням геометрії осередку деформування та оцінкою нерівномірностей у розподілі деформацій, ефективно розв'язуються за допомогою методів прямого визначення деформацій, серед яких тензометрія та поляризаційно-оптичні методи [66].

Експериментальні методи можуть забезпечувати отримання даних як у дискретній формі, так і у вигляді безперервних полів. Дискретні експериментальні дані, як правило, характеризуються високою точністю, проте безпосередньо не дають цілісного уявлення про просторовий розподіл вимірюваних величин. У таких випадках для формування повної картини необхідно виконувати значну кількість точкових вимірювань, що робить дискретні методи більш доцільними для прецизійних або одиничних досліджень [62], [67]. Натомість при проведенні масових експериментів або попередніх досліджень доцільніше використовувати методики, які дозволяють отримувати дані у вигляді безперервних полів. Це дає змогу швидко здійснювати якісний аналіз процесу та виявляти закономірності без складної обробки великих масивів первинних вимірювань [64].

Більшість наукових робіт у галузі механіки, матеріалознавства й інженерії базуються на експериментальних даних. Експеримент може проводитися безпосередньо на реальному об'єкті або на його моделі. Модель може відрізнятися від об'єкта масштабом, матеріалом чи фізичною природою, однак

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якщо вона правильно відтворює закономірності поведінки системи, то результати модельного експерименту можуть бути перенесені на реальний об'єкт [61], [65]. Це особливо важливо в умовах, коли практичні випробування на повномасштабних об'єктах є дорогими, ризикованими або технічно складними.

Для узагальненого опису будь-якого об'єкта дослідження часто застосовують концепцію кібернетичної системи або так званого «чорного ящика». У такому представленні об'єкт розглядається як система з певною кількістю входних параметрів (керуючих чи збурювальних впливів) та вихідних величин, які містять інформацію про реакцію системи [62]. При цьому реальні вимірювання завжди супроводжуються певною помилкою — систематичною або випадковою. У структурних схемах дослідних об'єктів, які можуть бути подані аналогічно рис. 2.1 та рис. 2.2, ця помилка зазвичай представляється у вигляді адитивної складової ϵ , що дозволяє формалізувати вплив похибок вимірювальної техніки та зовнішніх факторів [63], [68].



Рисунок 2.1 "Чорний ящик" Модель досліджуваного процесу

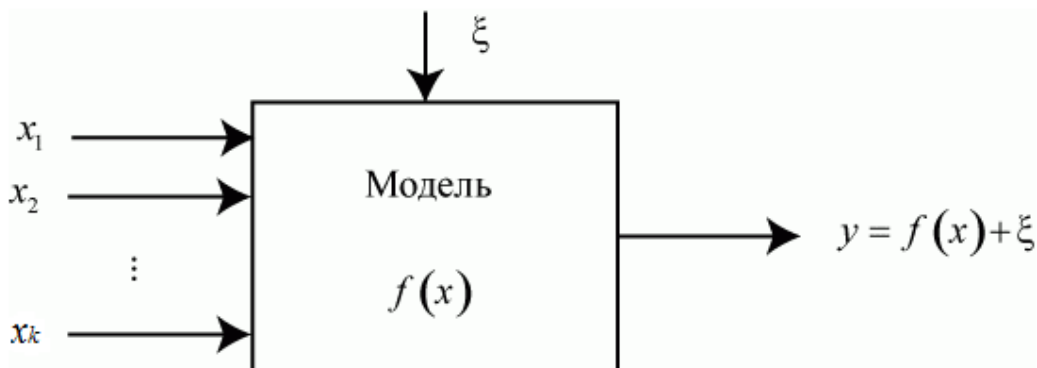


Рисунок 2.2 Кібернетичне уявлення експерименту

Стрілки, спрямовані праворуч, відображають числові характеристики цілей дослідження й визначаються як вихідні параметри (y) або параметри оптимізації. У науковій літературі їх також називають критеріями оптимізації, цільовими функціями чи виходами «чорного ящика».

Для виконання експерименту необхідно здійснити цілеспрямований вплив на поведінку «чорного ящика». Усі такі впливи позначають через x_i (де $i = 1, 2, \dots, n$) і визначають як входні параметри або фактори, що керують процесом. Їх також називають незалежними змінними чи входами системи.

Кожний фактор може набувати одного з кількох значень, які називають рівнями. Сукупність обраних рівнів і факторів формує одне з можливих станів «чорного ящика» й водночас визначає умови проведення конкретного дослід. Дані, отримані під час експерименту, використовуються для побудови математичної моделі об'єкта дослідження.

Однак застосування всіх можливих комбінацій факторів та їх рівнів призводить до надмірно великої кількості експериментів, що є ресурсоємним і практично недоцільним. Саме тому виникає потреба в раціональному плануванні експерименту, яке дає змогу зменшити кількість дослідів без втрати інформативності та забезпечити отримання достовірної моделі досліджуваного об'єкта.

При вирішенні задачі будемо використовувати математичні моделі об'єкта дослідження. Тут під математичною моделлю ми розуміємо рівняння, що зв'язує параметр оптимізації з факторами. Це рівняння в загальному вигляді можна записати так:

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Така функція називається функцією відгуку. Поверхня, що є геометричним чином функції відгуку, називають поверхнею відгуку.

Вимірювальні прилади. Під час вибору вимірювальних приладів необхідно враховувати низку важливих факторів, що впливають на точність і надійність експериментальних даних. Передусім слід оцінювати точність приладу, робочий діапазон вимірювань, а також характер та форму отримуваної інформації. Важливо пам'ятати, що самі вимірювальні засоби можуть вносити

додаткові похибки через створення електричних, теплових або механічних навантажень на об'єкт, що досліджується.

Перевагу необхідно надавати приладам, які серійно випускаються й мають стабільні метрологічні характеристики. Регулярне порівняння їх показань з еталонними дозволяє своєчасно виявляти систематичні похибки, що виникають унаслідок зношення, несправностей або іншого відхилення у роботі обладнання. Перед використанням приладів обов'язково слід перевіряти їх клас точності, тобто значення допустимої похибки вимірювання.

Не рекомендується одночасно застосовувати вимірювальні засоби з різними класами точності, оскільки це ускладнює порівняння результатів і може знизити достовірність отриманих даних. Варто пам'ятати, що абсолютно точне вимірювання виконати неможливо, а похибка вимірювання ніколи не може бути меншою за похибку самого вимірювального приладу.

Послідовність проведення експерименту. Перед початком експериментальних робіт необхідно виконати ґрунтовний інформаційний пошук та проаналізувати наявні оглядові матеріали з тематики дослідження. Наступним етапом є визначення обсягу експериментальної програми та її оптимізація. Дослідник має забезпечити отримання максимально достовірних результатів за мінімальних часових і фінансових витрат, що є ключовим завданням при плануванні експерименту.

Кількість експериментальних точок повинна бути достатньою для формування надійних висновків, але не надмірною, щоб уникнути необґрунтованих витрат ресурсів. Оптимальний обсяг досліджень дає змогу ефективно поєднати точність вимірювань, репрезентативність даних і раціональність проведення експерименту.

Орієнтоване час експерименту визначається за формулою:

$$t = n \sum_{i=1}^m t_i \cdot p_i$$

де n - кількість серій випробувань; p_i - повторюваність кожного експерименту; m - кількість різних експериментів (наприклад, точок на діаграмі розтягування); t_i - час проведення одного експерименту.

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді трудомісткість Q визначається твором часу на один експеримент, на кількість працівників z_i :

$$Q = n \sum_{i=1}^m t_i \cdot p_i \cdot z_i$$

Отримані значення t і Q слід збільшити приблизно вдвічі, тому що в них не враховані витрати на допоміжні організаційні роботи.

Обробка та аналіз результатів. Похибки експерименту

Після виконання вимірювальних операцій настає ключовий етап експериментальної роботи — **математична обробка результатів**. Всі отримані під час вимірювань числові значення є наближеними, і жодні математичні дії не можуть підвищити їхню первинну точність. Надмірне використання значущих цифр без оцінки їх достовірності лише ускладнює розрахунки та не несе корисної інформації.

Неможливість отримати абсолютне значення вимірюваної величини зумовлюється такими чинниками:

- обмеженість технічних можливостей вимірювальних приладів;
- недосконалість органів чуття оператора;
- неоднорідність об'єкта вимірювань;
- вплив зовнішніх та внутрішніх умов на об'єкт.

Види похибок

Залежно від джерела виникнення розрізняють три основні групи похибок:

1. Грубі помилки

Виникають через неуважність: неправильне зчитування показів приладу, помилки під час запису або обчислень. Такі похибки не підкоряються жодним статистичним законом і мають бути усунуті шляхом проміжного контролю даних.

2. Приладові похибки

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зумовлені конструктивними особливостями вимірювальних пристроїв. Вони є постійними і не можуть бути усунені, саме тому їх часто ототожнюють із **точністю приладу**.

3. Систематичні похибки

Виникають при багаторазових вимірюваннях через несправність приладів, недоліки методики або використання неточних початкових даних. Для їхнього усунення необхідно застосовувати поправки, які отримують під час порівняння робочих приладів з еталонними. Систематична похибка завжди зміщує результат в один бік, тому навіть ідентичність результатів не гарантує її відсутності.

4. Випадкові похибки

Залишаються навіть після усунення грубих і систематичних помилок. Виникають через сукупну дію багатьох непередбачуваних факторів та можуть як збільшувати, так і зменшувати результат.

Випадкові похибки описуються законами теорії ймовірностей, зокрема **нормальним законом розподілу (законом Гаусса)**, згідно з яким:

- малі за модулем помилки трапляються частіше;
- випадкові похибки однакової величини, але різних знаків, зустрічаються однаково ймовірно;
- зі зростанням точності вимірювань щільність розподілу помилок збільшується.

Методи теорії ймовірностей дозволяють визначити найбільш ймовірне значення величини та оцінити можливі відхилення. Проте ці висновки є коректними лише при достатньо великій кількості вимірювань. Збільшення числа повторів зменшує вплив випадкової складової похибки.

На основі врахованих похибок обчислюють:

- **абсолютну,**
- **відносну,**
- **середньоквадратичну похибку** вимірювань.

Форми представлення результатів

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані дані подають у вигляді **емпіричних формул, таблиць або графіків**.

- **Таблиці** дозволяють компактно представити великі масиви даних, однак потребують уваги до коректного числа значущих цифр.
- **Графічні матеріали** є наочнішими, але дискретні експериментальні точки потребують апроксимації — використання методів для побудови узагальнюючих залежностей.

Наприклад, в разі, коли похибки експериментальних вимірювань істотні застосовують метод найменших квадратів, де при апроксимації не потрібно збіг функції в вузлах аргументу. У разі ж, коли значення функції в експериментальних точках відомі з великою точністю застосовується інтерполяція.

Середнє значення (arithmetic mean) вимірюваної величини за формулою:

$$x_{av} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad 2.1$$

Для оцінки випадкових помилок окремих вимірювань оцінюють їх відхилення від середнього в вигляді дисперсії:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2 \quad 2.2$$

або середньоквадратичного стандартного відхилення:

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{cp})^2}{N-1}} \quad 2.3$$

Помилка вимірювання Δx визначається по середньоквадратичне відхилення s_n , критерієм Стюдента t і кількості вимірювань N :

$$\Delta x = \frac{t \cdot s}{\sqrt{N}} \quad 2.4$$

					МР 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Критерій Стюдента t залежить від обраної довірчої ймовірності α і числа вимірювань N

Середню похибку вибірки (середня квадратична похибка середнього арифметичного) (m) визначали за формулою:

$$m = \frac{s_n}{n} \quad 2.5$$

Двостороння зворотне t -розподілу Стюдента $t_{a,n}$ (Квантиль розподілу Стюдента) розраховували для ймовірності 0,95.

Довірчий інтервал визначали за формулою:

$$\Delta X = t_{a,n} \cdot s_n \quad 2.6$$

Відносну помилку $\Delta, \%$ розраховували за формулою:

$$\Delta = \frac{\Delta X}{x_{(av)}} 100 \quad 2.7$$

Математичне планування експерименту. Одним із ключових завдань математичного планування експерименту є визначення оптимальної кількості дослідів, необхідних для встановлення залежності між досліджуваними змінними величинами [69]. Параметри, що змінюються під час випробувань, називають **факторами**, а параметри, що досліджуються або оптимізуються, — **вихідними змінними**, або **відгуками системи** [70].

Найпростішим підходом до планування експерименту є метод повного перебору — виконання випробувань при всіх можливих поєднаннях факторів. Проте навіть для двох факторів повний перебір потребує великої кількості дослідів, що робить його малоефективним [71]. Інший метод полягає у зміні лише одного фактора за фіксованих значень інших. Такий підхід дозволяє

знайти частковий екстремум для кожного фактора, але не гарантує глобальної оптимальності [72].

З цієї причини застосовують **методи математичного планування експерименту**, в яких передбачається наявність певного аналітичного зв'язку між факторами й відгуком процесу. Мета — вибрати мінімальну кількість умов експерименту, що дозволяють визначити область оптимальних параметрів або побудувати наближену залежність вихідної величини від факторів [69; 73].

Планування однофакторного експерименту. У класичній теорії експерименту плани формують таким чином, щоб забезпечити можливість проведення дисперсійного аналізу та перевірки статистичних гіпотез [74]. Вихідною передумовою є визначення мети дослідження, після чого обирається тип моделі, список факторів та їхні рівні.

Найпростішим варіантом планування є **однофакторний експеримент**, покликаний встановити залежність результату від зміни лише одного чинника за умов, коли вплив інших факторів вважається несуттєвим [75].

У нашому випадку розглядається визначення залежності між вимірюваним параметром Y (стрілка прогину), що характеризує рівень кутових деформацій, та одним вхідним фактором X — потужністю лазерного випромінювання. Через наявність похибок вимірювального обладнання необхідно проводити **багаторазові рандомізовані вимірювання**, що дозволяє забезпечити статистичну достовірність результатів [70; 76].

Основні етапи планування та проведення ПФЕ. Планування, проведення та обробка результатів повного факторного експерименту включає такі етапи [69; 73]:

1. кодування факторів;
2. складання план-матриці експерименту;
3. реалізація плану експерименту;
4. перевірка відтворюваності дослідів;
5. оцінка значущості коефіцієнтів регресії;
6. перевірка адекватності математичної моделі.

					МР 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кодування факторів застосовують для переходу від натуральних значень до безрозмірних, що дає змогу використовувати стандартні ортогональні матриці планування та спрощує подальший аналіз моделі [72].

Для кожного фактора визначають **основний рівень** (базове значення) та **інтервал варіювання**. Додавання інтервалу до основного рівня задає верхній рівень, віднімання — нижній. Прийнято використовувати таку систему кодування:

- нижній рівень — **-1**,
- основний рівень — **0**,
- верхній рівень — **+1**.

Приклад для дослідження. У цьому дослідженні ставиться задача визначити вплив потужності лазерного променя на стрілку прогину при постійній швидкості зварювання. Попередні дослідження визначили діапазон потужності, у якому забезпечується формування якісних зварних з'єднань за швидкості $V_{sv} = 30 \text{ мм/с}$, а саме: **$P = 3750...4500 \text{ Вт}$** .

Цей інтервал приймається як основа для формування рівнів фактора в експерименті.

2.2. Регресійний аналіз

Регресійний аналіз полягає у визначенні аналітичної форми зв'язку, в якій зміна результативного ознаки зумовлено впливом одного або декількох факторних ознак, а безліч всіх інших чинників, також впливають на результативну ознаку, приймається за постійні і середні значення.

Парна регресія - рівняння зв'язку двох змінних y і x :

$$y = f(x)$$

де y -залежна змінна (результативна ознака); x -незалежна, що пояснює змінна (ознака-фактор).

Розрізняють лінійні і нелінійні регресії.

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лінійна регресія: $y = a + bx + \varepsilon$

Нелінійні регресії діляться на два класи: регресії, нелінійні щодо включених в аналіз пояснюючих змінних, але лінійні по оцінюваним параметрами, і регресії, нелінійні по що оцінюються параметрам.

Регресії, нелінійні по пояснюючим змінним:

- поліноми різних ступенів $y = a + b_1x + b_2x + b_3x + \varepsilon$
- рівнобічна гіпербола $y = a + \frac{b}{x} + \varepsilon$.

Регресії, нелінійні по оцінюваним параметрам:

- степенева $y = a \cdot x^b \cdot \varepsilon$
- показова $y = a \cdot b^x \cdot \varepsilon$
- експоненціальна $y = e^{a+bx} \cdot \varepsilon$

Побудова рівняння регресії зводиться до оцінки її параметрів. Для оцінки параметрів регресій, лінійних за параметрами, використовують метод найменших квадратів (МНК). МНК дозволяє отримати такі оцінки параметрів, при яких сума квадратів відхилень фактичних значень результативної ознаки у від теоретичних y_x мінімальна.

2.3. Розробка зразка для проведення експерименту

Експериментальне дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на стрілку прогину під час лазерного зварювання внахлест таврових з'єднань здійснювали на лабораторній роботизованій установці. Конструкція та компонування даної установки, що забезпечують стабільність параметрів процесу й можливість високоточної зміни режимів обробки, наведені на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 Роботизована установка для лазерного зварювання

Зразок для проведення експериментальних досліджень (рис. 2.4) було спроектовано з урахуванням наявного обладнання та допоміжних пристосувань. Оскільки згідно з методикою визначення стрілки прогину необхідно виконувати вимірювання на одній і тій самій базі — як до зварювання, так і після нього — конструкцію зразка було адаптовано для забезпечення точної та повторюваної установки деформометра. З цією метою з одного боку зразка просвердлено отвори діаметром 1 мм, а з протилежного нанесено контрольну лінію.

Зразки виготовляли зі сталі Ст3 товщиною 3 мм. Їхні габаритні розміри становили: $150 \times 150 \times 3$ мм — для полиці, та $150 \times 60 \times 3$ мм — для стінки зразка.

					МП 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

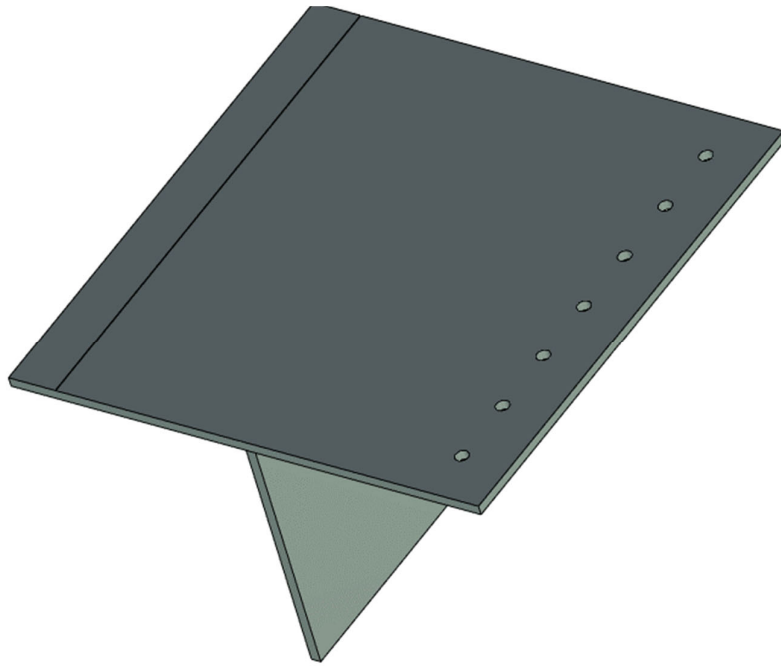


Рисунок 2.4. Зразок для дослідження кутових деформацій

Стрілку прогину вимірювали **до та після зварювання** за допомогою деформометра, зображеного на рис. 2.5. Конструкція деформометра передбачає наявність спеціальних конусних опорних ніжок, що забезпечують фіксацію приладу у визначеному положенні. Для цього ніжки встановлюються у спеціально підготовлені отвори на поверхні металевих елементів. Отвори мають діаметр приблизно 1 мм та глибину 2–3 мм, що гарантує стабільність контакту та повторюваність вимірювань.

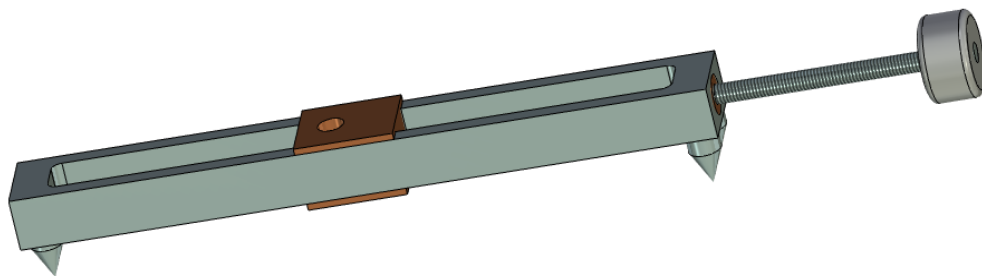


Рисунок 2.5. – Деформометр для вимірювання стрілки прогину

З кожного зразка вимірювання стрілки прогину виконували у семи поперечних перетинах. Схему розташування точок вимірювання наведено на рис. 2.6. Базова відстань для фіксації деформацій становила 120 мм.

					МР 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимірювання стрілки прогину вздовж зварного шва проводили з інтервалом у 20 мм.

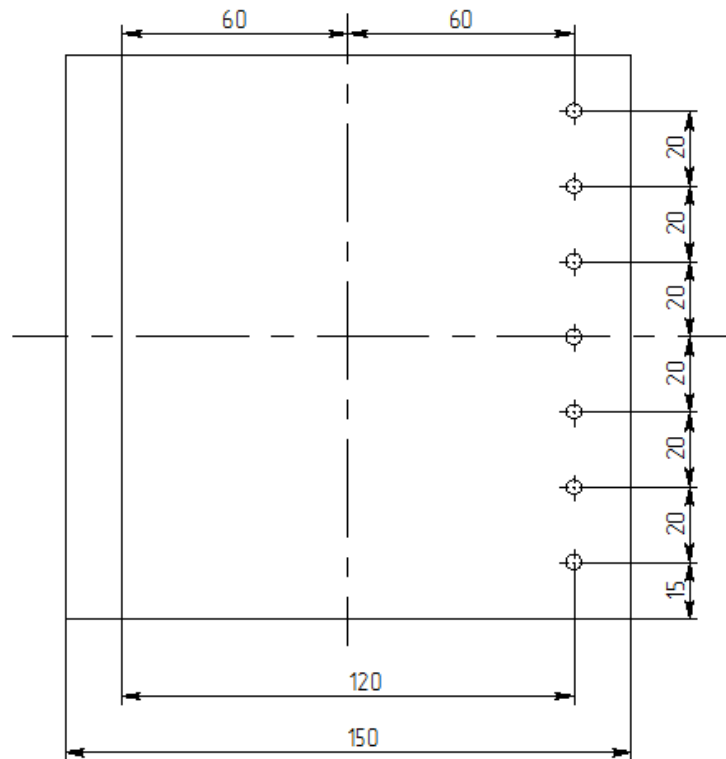


Рисунок 2.6 Схема виміру кутових деформацій

Перед проведенням першого вимірювання стрілки прогину полицю зразка фіксують до стінки шляхом виконання прихоплювання у спеціальному кондукторі (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 Кондуктор для виконання прихоплювань

					МР 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після виконання прихоплювань та проведення початкового вимірювання стрілки прогину здійснювали приварювання полки до стінки у вільному стані (рис. 2.8).

Подальші вимірювання стрілки прогину виконували за допомогою електронного індикатора годинникового типу (рис. 2.9). Обраний індикатор має діапазон вимірювань 0...12,7 мм та ціну поділки 0,01 мм, що забезпечує достатню точність для визначення зміни деформацій після зварювання.

Кутова деформація розраховувалася за формулою:

$$\beta = \frac{4 \cdot (f_k - f_n)}{L} \quad 2.8$$

де f_n - виміряна стрілка прогину до зварювання, f_k - виміряна стрілка прогину після зварювання, L - база виміру.

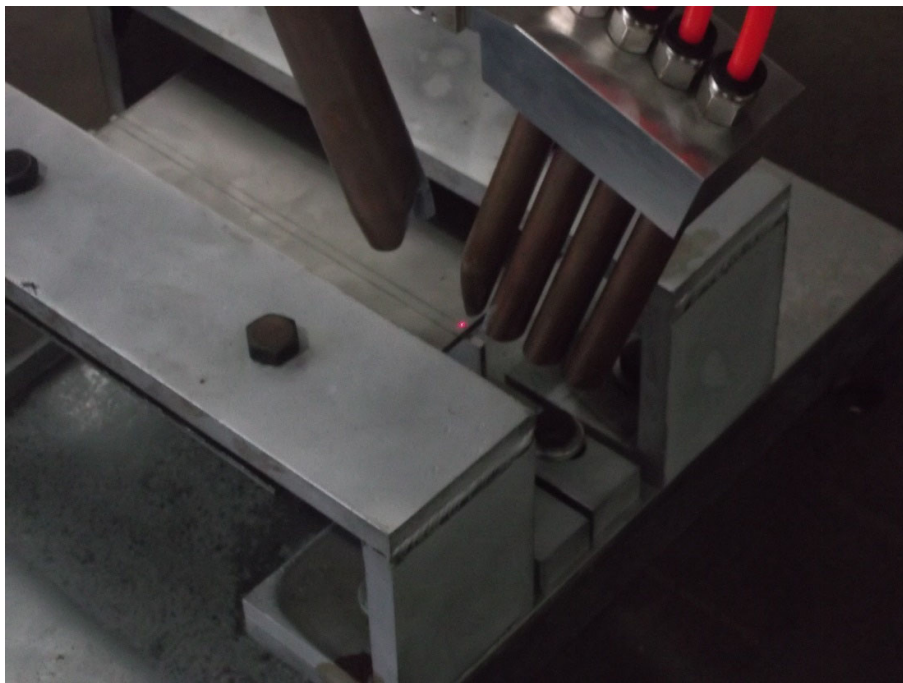


Рисунок 2.8 Приварювання полки до стінки



Рисунок 2.9 Зовнішній вигляд електронного індикатора годинникового типу

2.4. Визначення мінімальної кількості вимірювань

Визначення мінімальної кількості вимірів на кожній базі зробимо за формулою:

$$N \geq \left(\frac{w}{\delta} \right)^2 \cdot t^2,$$

де N – мінімальна кількість вимірювань, δ – відносна помилка, задається відносною помилкою $\delta = \pm 0,005$ мм, w – коефіцієнт варіації, s – середньквадратичне стандартне відхилення за формулою (2.3).

$$w = \frac{s}{x_{\text{cp}}}$$

При нормальному законі розподілу x_{cp} знаходимо за формулою (2.1).

Для визначення w проводили попередній експеримент при $N = 3$. При цьому отримали наступні значення $x_{\text{cp}} = 5,161$; $s = 0,0139$.

$$w = \frac{0,0139}{5,161} = 0,002693$$

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Критерій Стюдента виберемо для довірчої ймовірності $\alpha=0,95$ при цьому $t=3,18$

$$N \geq \left(\frac{0,002693}{0,005} \right)^2 \cdot 3,18^2 = 2,93$$

Таким чином мінімальна кількість вимірювань для отримання даних з довірчою ймовірністю $\alpha=0,95$ дорівнює $N=3$.

Проведені вимірювання заносилися в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 - Таблиця для запису експериментальних даних

N_i База	f_n – до зварювання			f_k – після зварювання			f_n^{cp}	f_k^{cp}	$\beta, рад$	$Y, мм$
	1	2	3	1	2	3				
1										

Висновки

1. Виконано планування експерименту та визначено мінімально необхідну кількість вимірювань для отримання даних із довірчою ймовірністю $\alpha = 0,95$.

2. Розроблено зразок для проведення експериментального дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на кутові деформації під час лазерного зварювання таврових з'єднань.

3. Створено та виготовлено комплект необхідної оснастки для виконання експериментальних досліджень.

					MP 8.131.6121м.03.05.03. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Гулько В.В.				Проведення експерименту і обробка результатів	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Ярос Ю.О.						49	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.								
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

3. Проведення експерименту і обробка результатів

3.1. Зварювання експериментальних зразків

Для дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на кутові деформації таврових зварних з'єднань було виконано зварювання експериментальних зразків на обладнанні, представленому на рис. 3.1. Експеримент проводився за умов змінної потужності лазера в діапазоні $P = 3750...4500 \text{ Вт}$ з кроком 250 Вт , при цьому швидкість зварювання залишалася сталою та становила $V_{зв} = 30 \text{ мм/с}$.



Рисунок 3.1. Устаткування для проведення лазерного зварювання

Попередньо, перед виконанням операції зварювання, проводили вимірювання стрілки прогину в перетинах, наведених на рис. 2.6. Після завершення зварювання стрілку прогину повторно визначали в тих самих перетинах. На основі отриманих результатів кутову деформацію обчислювали

					MP 8.132.6121м.03.05.03. ПЗ	Арк. 50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

за формулою 2.8. Узагальнені результати вимірювань подано в таблицях 3.1–3.4.

Таблиця 3.1 - Результати вимірювання стрілки прогину при $P=3750$ Вт,
 $V_{св}=30$ мм/с

N_i База	f_n – до зварювання			f_k – після зварювання			$f_n^{ср}$	$f_k^{ср}$	$\beta \cdot 10^{-3}$, рад	Y , мм
	1	2	3	1	2	3				
1	5,148	5,148	5,15	5,108	5,107	5,108	5,149	5,108	-1,37	15
2	5,169	5,178	5,18	5,141	5,141	5,146	5,176	5,143	-1,10	35
3	5,162	5,162	5,168	5,158	5,157	5,152	5,164	5,156	-0,28	55
4	5,242	5,235	5,238	5,239	5,229	5,232	5,238	5,233	-0,17	75
5	5,232	5,232	5,233	5,239	5,24	5,241	5,232	5,240	0,26	95
6	5,292	5,296	5,294	5,293	5,292	5,29	5,294	5,292	-0,08	115
7	5,427	5,435	5,44	5,437	5,439	5,442	5,434	5,439	0,18	135

Таблиця 3.2 - Результати вимірювання стрілки прогину при $P=4000$ Вт,
 $V_{св}=30$ мм/с

N_i База	f_n – до зварювання			f_k – після зварювання			$f_n^{ср}$	$f_k^{ср}$	$\beta \cdot 10^{-3}$, рад	Y , мм
	1	2	3	1	2	3				
1	5,145	5,17	5,168	5,137	5,14	5,138	5,161	5,138	-0,76	15
2	5,11	5,113	5,106	5,117	5,109	5,111	5,110	5,112	0,09	35
3	5,032	5,048	5,048	5,058	5,059	5,059	5,043	5,059	0,53	55
4	5,023	5,028	5,025	5,052	5,05	5,052	5,025	5,051	0,87	75
5	5,03	5,03	5,032	5,062	5,062	5,072	5,031	5,065	1,16	95
6	5,038	5,04	5,038	5,054	5,052	5,058	5,039	5,055	0,53	115
7	5,067	5,078	5,075	5,078	5,079	5,082	5,073	5,080	0,21	135

Таблиця 3.3 - Результати вимірювання стрілки прогину при $P=4250$ Вт,
 $V_{св}=30$ мм/с

	f_n – до зварювання			f_k – після зварювання			$f_n^{ср}$	$f_k^{ср}$	$\beta \cdot 10^{-3}$, рад	Y , мм
N_i База	1	2	3	1	2	3				
1	5,4	5,4	5,402	5,414	5,415	5,415	5,401	5,415	0,47	15
2	5,428	5,44	5,438	5,437	5,46	5,463	5,435	5,453	0,6	35
3	5,46	5,462	5,468	5,504	5,501	5,506	5,463	5,504	1,34	55
4	5,486	5,491	5,496	5,522	5,52	5,525	5,491	5,522	1,8	75
5	5,51	5,518	5,521	5,551	5,549	5,551	5,516	5,550	1,8	95
6	5,55	5,552	5,545	5,582	5,59	5,591	5,549	5,588	1,8	115
7	5,601	5,605	5,608	5,61	5,62	5,63	5,605	5,620	0,51	135

Таблиця 3.4 - Результати вимірювання стрілки прогину при $P=4500$ Вт,
 $V_{св}=30$ мм/с

	f_n – до зварювання			f_k – після зварювання			$f_n^{ср}$	$f_k^{ср}$	$\beta \cdot 10^{-3}$, рад	Y , мм
N_i База	1	2	3	1	2	3				
1	6,01	6,002	6,002	6,025	6,027	6,028	6,005	6,027	0,73	15
2	5,52	5,532	5,533	5,535	5,556	5,557	5,528	5,549	0,7	35
3	5,554	5,555	5,557	5,592	5,595	5,596	5,555	5,594	1,3	55
4	5,537	5,541	5,547	5,585	5,593	5,586	5,542	5,588	1,54	75
5	5,55	5,549	5,554	5,59	5,59	5,591	5,551	5,590	1,31	95
6	5,529	5,532	5,533	5,57	5,571	5,572	5,531	5,571	1,32	115
7	5,505	5,505	5,504	5,5	5,497	5,498	5,505	5,498	-0,21	135

За формулами (2.2–2.4) виконано оцінювання випадкових похибок окремих вимірювань, визначено їхні відхилення, середньоквадратичне стандартне відхилення та похибку вимірювання Δx . Отримані результати наведено у таблицях 3.5–3.8.

Таблиця 3.5. Результати розрахунку середньоквадратичного відхилення і помилки виміру при $P=3750$ Вт, $V_{CB}=30$ мм/с.

N_i Баз а	до зварювання			після зварювання		
	Дисперсія s^2	Стандартне відхилення s , мм	Похибка Δx , мм	Дисперсія s^2	Стандартне відхилення s , мм	Похибка Δx , мм
1	1,33E-06	1,15E-03	2,12E-03	3,33E-07	5,77E-04	1,06E-03
2	3,43E-05	5,86E-03	1,08E-02	8,33E-06	2,89E-03	5,30E-03
3	1,20E-05	3,46E-03	6,36E-03	1,03E-05	3,21E-03	5,90E-03
4	1,23E-05	3,51E-03	6,45E-03	2,63E-05	5,13E-03	9,42E-03
5	3,33E-07	5,77E-04	1,06E-03	1,00E-06	1,00E-03	1,84E-03
6	4,00E-06	2,00E-03	3,67E-03	2,33E-06	1,53E-03	2,80E-03
7	4,30E-05	6,56E-03	1,20E-02	6,33E-06	2,52E-03	4,62E-03

Таблиця 3.6. Результати розрахунку середньоквадратичного відхилення і помилки виміру при $P=4000$ Вт, $V_{CB}=30$ мм/с.

N_i Баз а	до зварювання			після зварювання		
	Дисперсія s^2	Стандартне відхилення s , мм	Похибка Δx , мм	Дисперсія s^2	Стандартне відхилення s , мм	Похибка Δx , мм
1	1,93E-04	1,39E-02	2,55E-02	2,33E-06	1,53E-03	2,80E-03
2	1,23E-05	3,51E-03	6,45E-03	1,73E-05	4,16E-03	7,64E-03
3	8,53E-05	9,24E-03	1,70E-02	3,33E-07	5,77E-04	1,06E-03
4	6,33E-06	2,52E-03	4,62E-03	1,33E-06	1,15E-03	2,12E-03
5	1,33E-06	1,15E-03	2,12E-03	3,33E-05	5,77E-03	1,06E-02
6	1,33E-06	1,15E-03	2,12E-03	9,33E-06	3,06E-03	5,61E-03
7	3,23E-05	5,69E-03	1,04E-02	4,33E-06	2,08E-03	3,82E-03

Таблиця 3.7. Результати розрахунку середньоквадратичного відхилення і помилки виміру при $P=4250$ Вт, $V_{CB}=30$ мм/с.

N_i База	до зварювання			після зварювання		
	Дисперсія s^2	Стандартне відхилення s , мм	Похибка Δx , мм	Дисперсія s^2	Стандартне відхилення s , мм	Похибка Δx , мм
1	1,33E-06	1,15E-03	2,12E-03	3,33E-07	5,77E-04	1,06E-03
2	4,13E-05	6,43E-03	1,18E-02	2,02E-04	1,42E-02	2,61E-02
3	1,73E-05	4,16E-03	7,64E-03	6,33E-06	2,52E-03	4,62E-03
4	2,50E-05	5,00E-03	9,18E-03	6,33E-06	2,52E-03	4,62E-03
5	3,23E-05	5,69E-03	1,04E-02	1,33E-06	1,15E-03	2,12E-03
6	1,30E-05	3,61E-03	6,62E-03	2,43E-05	4,93E-03	9,06E-03
7	1,23E-05	3,51E-03	6,45E-03	1,00E-04	1,00E-02	1,84E-02

Таблиця 3.8. Результати розрахунку середньоквадратичного відхилення і помилки виміру при $P=4500$ Вт, $V_{CB}=30$ мм/с.

N_i База а	до зварювання			після зварювання		
	Дисперсія s^2	Стандартне відхилення s , мм	Похибка Δx , мм	Дисперсія s^2	Стандартне відхилення s , мм	Похибка Δx , мм
1	1,63E-05	4,04E-03	7,42E-03	2,80E-05	5,29E-03	9,72E-03
2	4,33E-06	2,08E-03	3,82E-03	9,33E-06	3,06E-03	5,61E-03
3	2,33E-06	1,53E-03	2,80E-03	1,00E-06	1,00E-03	1,84E-03
4	8,33E-06	2,89E-03	5,30E-03	3,33E-07	5,77E-04	1,06E-03
5	1,00E-06	1,00E-03	1,84E-03	1,03E-05	3,21E-03	5,90E-03
6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,70E-05	5,20E-03	9,54E-03
7	1,43E-05	3,79E-03	6,95E-03	8,13E-05	9,02E-03	1,66E-02

За даними таблиць 3.1–3.4 побудовано графіки залежності кутової деформації від довжини зразка (рис. 3.2).

Аналіз отриманих даних (рис. 3.2) показує, що зі збільшенням відстані від краю зразка кутова деформація поступово зростає, а починаючи з позначки приблизно 75 мм — стабілізується. Такий характер зміни деформацій повністю узгоджується з класичною теорією кутових деформацій, характерних для процесів дугового зварювання.

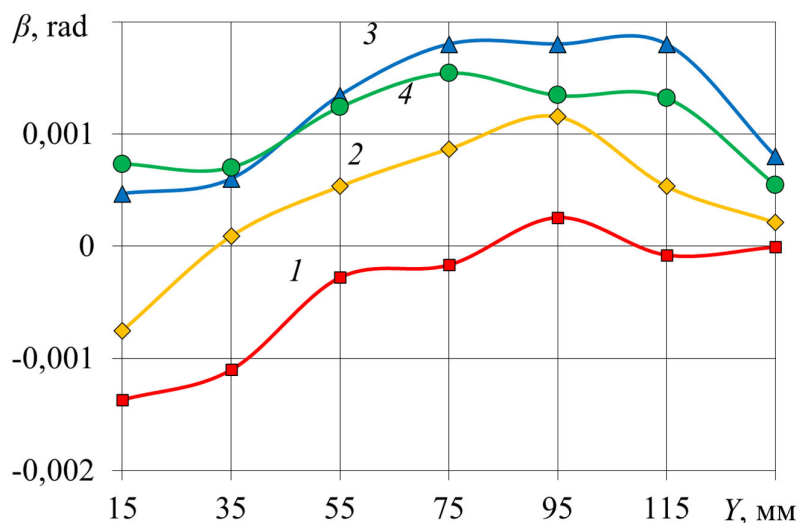


Рисунок 3.2 Графік залежності кутової деформації по довжині зразка при різних потужностях лазера, $P = 3750$ Вт (1), $P = 4000$ Вт (2), $P = 4250$ Вт (3), $P = 4500$ Вт (4),

Зі збільшенням потужності лазерного випромінювання від $P = 3750$ Вт до $P = 4250$ Вт спостерігається зростання кутових деформацій. Однак подальше підвищення потужності призводить до їх зменшення. Отримані експериментальні дані добре корелюють між собою. Тому для подальшого аналізу впливу параметрів лазерного зварювання на кутові деформації приймаємо значення, виміряні на базі **75 мм** (табл. 3.5).

Для оцінювання впливу потужності лазерного випромінювання на стрілку прогину та кутові деформації побудовано графіки залежності цих параметрів від потужності лазера у перерізі $Y = 75$ мм (рис. 3.3).

Із графіка видно, що зі збільшенням потужності лазерного випромінювання до **4250 Вт** стрілка прогину зростає майже лінійно. Подальше підвищення потужності призводить до стабілізації стрілки прогину, тобто її значення більше не збільшується.

Під час зварювання відбувається поздовжня та поперечна усадки. Якщо центр ваги поперечного перерізу шва не збігається з центром ваги перерізу

зварюваного елемента, то внаслідок поперечної усадки виникає викривлення листів у бік більшого об'єму наплавленого металу, що й проявляється у вигляді кутових деформацій.

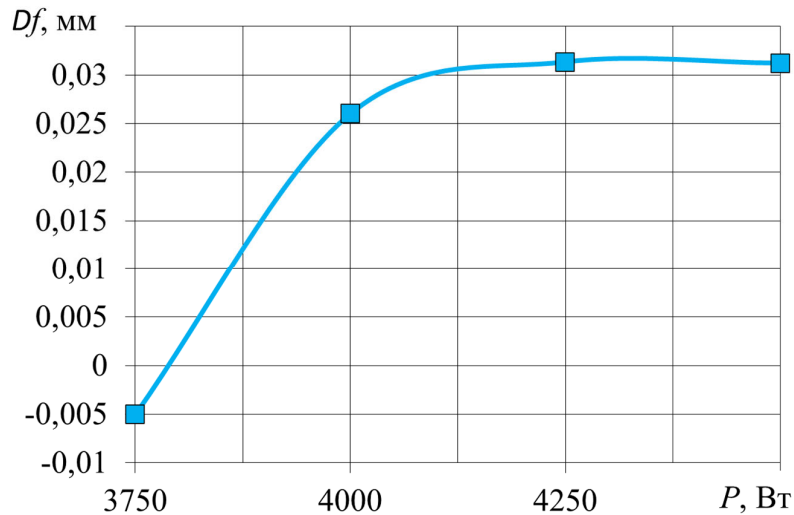


Рисунок 3.3. Залежність стрілки прогину від потужності лазерного випромінювання в перетині $Y=75$ мм

Величина деформацій та відповідних напружень визначається розмірами зони теплового впливу. Чим більший обсяг металу піддається нагріванню, тим інтенсивніше проявляються деформаційні процеси. Відповідно, різні режими зварювання формують різні за величиною деформації, оскільки характеризуються різною концентрацією теплового впливу та різною кількістю введеної теплової енергії.

3.2. Вплив режимів на величину зони нагріву

Експериментальне дослідження впливу режимів лазерного зварювання на величину зони нагріву виконували шляхом аналізу макроструктури отриманих зварних з'єднань. Із кожного експериментального зразка вирізали три

макрошліфи (рис. 3.4), що дозволяло врахувати можливу неоднорідність шва по довжині.

Проведений аналіз макрошліфів показав, що поперечний переріз зварного шва умовно поділяється на дві основні зони: трапецеїдальну та прямокутну (рис. 3.9). Основними геометричними характеристиками шва є:

- висота трапецеїдальної частини h ;
- висота прямокутної частини h_1 ;
- ширина шва e ;
- ширина прямокутної зони e_1 .

Встановлено, що зі збільшенням потужності лазерного випромінювання відбувається зростання трапецеїдальної зони шва. Це пояснюється збільшенням глибини проплавлення та розширенням області термічного впливу при підвищенні тепловкладення, що узгоджується з відомими закономірностями формування швів під дією концентрованих джерел нагріву.

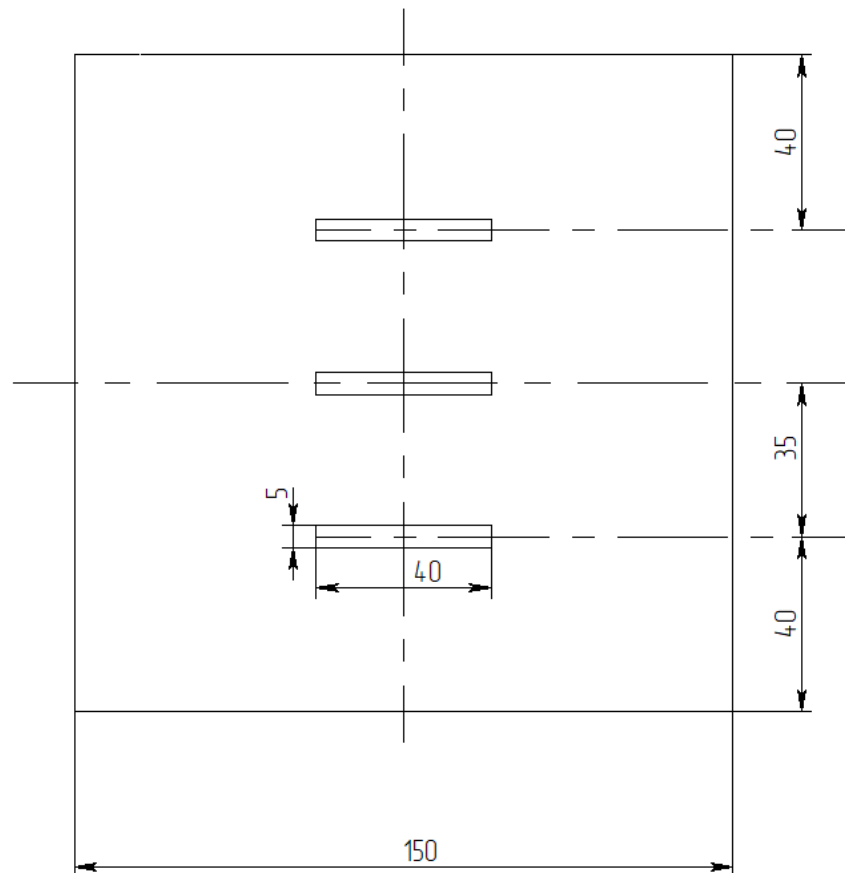
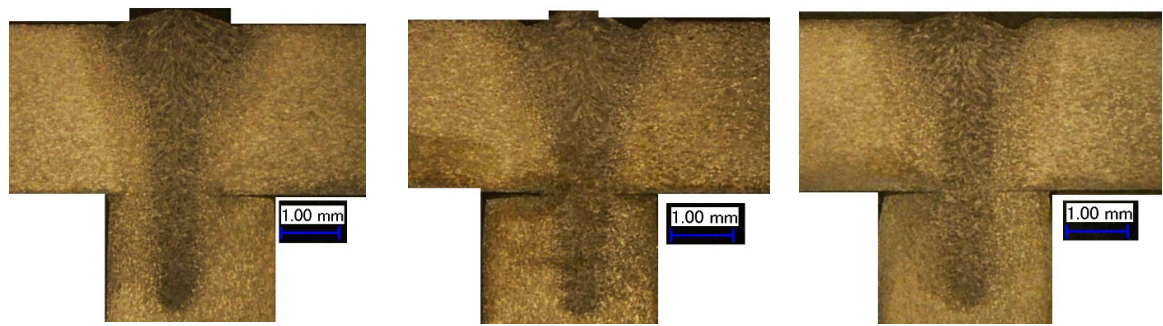


Рисунок 3.4 Схема вирізки макрошліфів

Зовнішній вигляд макрошліфів показаний на рис.3.5–3.8.

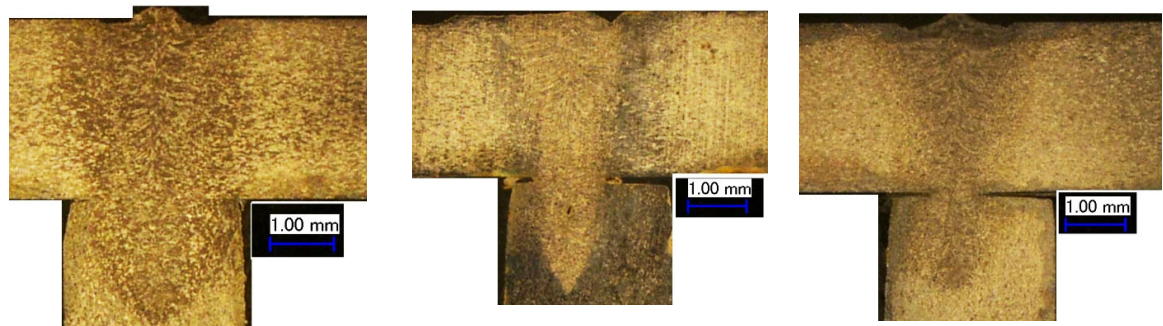


1-1

2-2

3-3

Рисунок 3.5 Макрошліфи з'єднання при $P=3750$ Вт

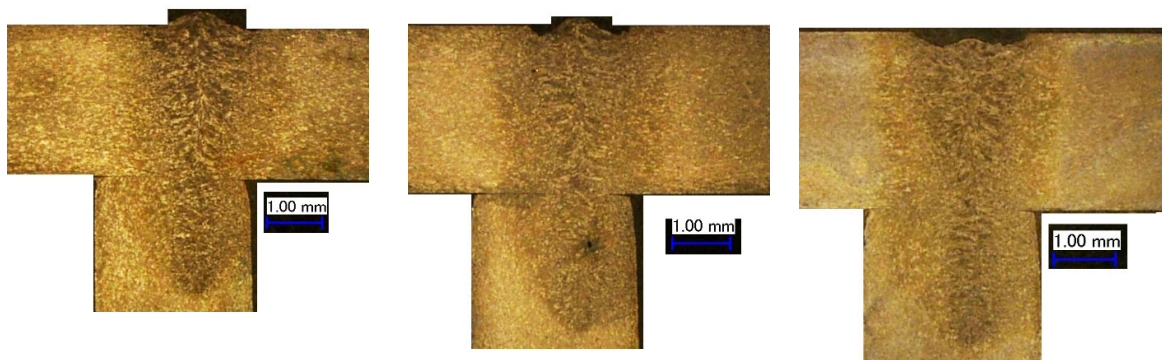


1-1

2-2

3-3

Рисунок 3.6 Макрошліфи з'єднання при $P=4000$ Вт



1-1

2-2

3-3

Рисунок 3.7 Макрошліфи з'єднання при $P=4250$ Вт



Рисунок 3.8 Макрошліфи з'єднання при $P=4500$ Вт

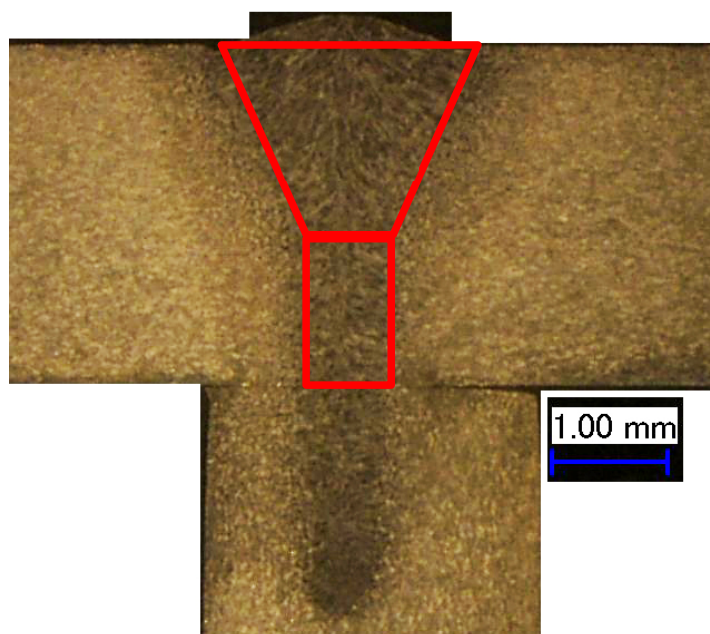


Рисунок 3.9 Основні зони зварного шва

Зазначені параметри шва (h , h_1 , e , e_1) визначалися для кожного макрошліфа. Кількість повторних вимірювань для одного макрошліфа становила від 8 до 30, залежно від його якості. Після отримання результатів вимірювань відповідних величин (h , h_1 , e , e_1) обчислювали середнє арифметичне значення за формулою (2.1). Середньоквадратичне відхилення s_n (sample standard deviation) визначали відповідно до формули (2.3), а середню квадратичну похибку середнього арифметичного m — за формулою (2.5).

Двостороннє критичне значення t -розподілу Стюдента $t_{a,n}$ (квантиль t -розподілу) обчислювали для довірчої ймовірності 0,95. Довірчий інтервал

визначали згідно з формулою (2.6), а відносну похибку Δ , % — за формулою (2.7).

Отримані результати вимірювань наведено в таблицях 3.9–3.12.

Проведений аналіз параметрів зварних швів показав, що середня похибка вимірювань у більшості випадків становить близько 5%. Підвищені значення похибки — у діапазоні від 8% до 13% для окремих перетинів — пов'язані з недостатньою якістю окремих макрошліфів.

Таблиця 3.9. - Геометричні розміри зварювального шва при Р=3750 Вт.

n	Перетин 1–1				Перетин 1–2				Перетин 1–3			
	e	e_I	h	h_I	e	e_I	h	h_I	e	e_I	h	h_I
1	2,45	0,84	1,43	1,57	2,27	0,80	1,60	1,40	2,13	0,91	1,33	1,67
2	2,49	0,82	1,50	1,50	2,37	0,84	1,74	1,26	2,37	0,84	1,33	1,67
3	2,47	0,85	1,39	1,61	2,43	0,93	1,86	1,14	2,30	0,84	1,67	1,33
4	2,43	0,77	1,44	1,56	2,50	1,00	2,07	0,93	2,18	0,89	1,50	1,50
5	2,42	0,77	1,31	1,69	2,50	0,86	1,71	1,29	2,32	0,89	1,64	1,36
6	2,45	0,82	1,36	1,64	2,57	0,93	1,93	1,07	2,45	0,89	1,84	1,16
7	2,46	0,84	1,25	1,75	2,43	0,86	1,57	1,43	2,37	0,77	1,53	1,47
8	2,42	0,79	1,27	1,73	2,32	0,68	1,91	1,09	2,18	0,95	1,33	1,67
9	–	–	–	–	2,31	0,99	2,18	0,82	2,25	0,82	1,50	1,50
10	–	–	–	–	2,05	1,16	1,57	1,43	2,20	0,87	1,50	1,50
11	–	–	–	–	2,34	0,79	1,61	1,39	2,12	0,77	1,32	1,68
12	–	–	–	–	2,37	0,86	1,95	1,05	2,21	0,71	1,56	1,44
13	–	–	–	–	2,15	0,81	1,72	1,28	2,12	0,75	1,41	1,59
14	–	–	–	–	2,30	0,83	1,52	1,48	2,18	0,81	1,23	1,77
15	–	–	–	–	2,25	0,72	1,85	1,15	2,16	0,71	1,64	1,36
16	–	–	–	–	2,31	0,79	1,90	1,10	2,18	0,71	1,60	1,40
17	–	–	–	–	2,70	0,90	1,59	1,41	2,28	0,83	1,48	1,52
18	–	–	–	–	1,92	0,77	1,53	1,47	2,21	0,68	1,32	1,68
19	–	–	–	–	2,43	0,79	1,64	1,36	2,29	0,70	1,30	1,70
20	–	–	–	–	2,50	1,00	1,79	1,21	–	–	–	–
21	–	–	–	–	2,37	0,98	1,95	1,05	–	–	–	–
22	–	–	–	–	2,37	0,84	1,67	1,33	–	–	–	–
23	–	–	–	–	2,64	0,86	1,86	1,14	–	–	–	–
24	–	–	–	–	2,36	0,79	1,36	1,64	–	–	–	–
25	–	–	–	–	2,11	0,92	1,98	1,02	–	–	–	–
26	–	–	–	–	2,25	0,95	1,77	1,23	–	–	–	–

27	—	—	—	—	2,11	1,02	1,98	1,02	—	—	—	—
28	—	—	—	—	2,36	0,96	1,99	1,01	—	—	—	—
29	—	—	—	—	2,19	0,78	2,06	0,94	—	—	—	—
30	—	—	—	—	2,27	0,87	2,02	0,98	—	—	—	—
x_{av}	2,45	0,81	1,37	1,63	2,33	0,87	1,77	1,23	2,24	0,81	1,48	1,52
s_n	0,0259	0,0310	0,0886	0,0886	0,1650	0,1028	0,2132	0,2132	0,0951	0,0809	0,1611	0,1611
m	0,0091	0,0110	0,0313	0,0313	0,0292	0,0182	0,0377	0,0377	0,0218	0,0186	0,0370	0,0370
$t_{a,n}$	2,3646	2,3646	2,3646	2,3646	2,0395	2,0395	2,0395	2,0395	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009
ΔX	0,0216	0,0259	0,0741	0,0741	0,0595	0,0371	0,0769	0,0769	0,0458	0,0390	0,0776	0,0776
$\Delta, \%$	0,88	3,19	5,42	4,54	2,55	4,27	4,34	6,27	2,05	4,84	5,26	5,09

Таблиця 3.10 - Геометричні розміри зварювального шва при Р=4000 Вт.

n	Перетин 1-1				Перетин 1-2				Перетин 1-3			
	e	e_1	h	h_1	e	e_1	h	h_1	e	e_1	h	h_1
1	2,22	1,08	1,96	1,04	2,20	1,10	1,68	1,32	2,50	0,86	2,00	1,00
2	2,27	1,13	1,93	1,07	2,41	1,17	1,61	1,39	2,72	0,91	1,67	1,33
3	2,40	1,00	1,93	1,07	2,49	1,02	1,83	1,17	2,39	0,89	1,84	1,16
4	1,96	0,85	1,89	1,11	2,50	1,00	1,71	1,29	2,65	0,91	1,81	1,19
5	2,35	0,91	1,89	1,11	2,78	1,17	1,83	1,17	2,52	0,89	1,84	1,16
6	2,40	0,93	2,00	1,00	2,93	1,17	1,68	1,32	2,80	0,89	1,84	1,16
7	2,35	0,98	1,63	1,37	2,64	1,07	1,71	1,29	2,64	0,93	1,79	1,21
8	1,91	0,89	2,32	0,82	2,20	1,21	1,76	1,24	2,43	0,89	2,14	0,86
9	2,04	1,12	1,91	1,09	2,21	1,21	1,64	1,36	1,76	0,99	1,87	1,13
10	1,94	1,16	1,94	1,06	2,12	1,13	1,94	1,06	2,23	1,05	1,78	1,22
11	2,40	0,83	1,54	1,46	2,16	0,70	1,45	1,55	2,25	0,72	1,75	1,25
12	2,05	0,93	2,27	0,73	1,93	0,89	1,96	1,04	2,00	0,77	2,02	0,98
13	2,06	0,75	1,85	1,15	1,92	0,82	1,28	1,72	2,17	0,77	1,97	1,03
14	2,12	0,83	1,52	1,48	2,33	0,94	1,56	1,44	2,43	0,80	1,60	1,40
15	2,02	1,13	2,19	0,81	2,01	0,96	1,99	1,01	2,21	0,83	2,13	0,87
16	2,04	1,03	2,23	0,77	1,97	0,92	1,98	1,02	2,03	0,80	2,08	0,92
17	2,07	0,81	1,59	1,41	2,07	0,80	1,47	1,53	2,16	0,62	1,73	1,27
18	2,01	0,74	1,52	1,48	2,34	0,78	1,51	1,49	2,18	0,76	1,68	1,32
19	2,03	0,73	1,67	1,33	2,18	0,73	1,74	1,26	2,10	0,75	1,65	1,35
x_{av}	2,14	0,94	1,88	1,12	2,28	0,99	1,70	1,30	2,32	0,84	1,85	1,15
s_n	0,1702	0,1407	0,2541	0,2428	0,2832	0,1689	0,1951	0,1951	0,2728	0,1003	0,1629	0,1629
m	0,0391	0,0323	0,0583	0,0557	0,0650	0,0387	0,0448	0,0448	0,0626	0,0230	0,0374	0,0374
$t_{a,n}$	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009
ΔX	0,0821	0,0678	0,1225	0,1170	0,1365	0,0814	0,0940	0,0940	0,1315	0,0484	0,0785	0,0785
$\Delta, \%$	3,84	7,23	6,50	10,41	5,98	8,23	5,52	7,25	5,66	5,74	4,24	6,84

Таблиця 3.11 - Геометричні розміри зварювального шва при Р=4250 Вт.

n	Перетин 1–1				Перетин 1–2				Перетин 1–3			
	e	e_I	h	h_I	e	e_I	h	h_I	e	e_I	h	h_I
1	2,15	1,00	1,85	1,23	1,76	0,80	1,90	1,17	2,11	0,75	2,22	0,78
2	2,38	1,08	1,92	1,08	2,07	1,00	1,79	1,21	2,39	1,02	1,98	1,02
3	2,45	1,03	1,97	1,03	2,41	1,02	1,76	1,24	2,51	1,05	1,81	1,19
4	2,37	1,11	1,74	1,26	2,20	0,88	1,90	1,17	2,25	0,89	1,91	1,09
5	2,68	1,14	1,95	1,05	2,43	0,93	1,93	1,07	2,52	0,89	1,98	1,02
6	2,76	1,03	1,89	1,11	2,56	1,02	1,90	1,10	2,59	0,95	1,98	1,02
7	2,68	1,11	1,82	1,18	2,41	0,88	1,90	1,10	2,45	0,82	1,98	1,02
8	2,08	0,69	2,23	0,77	2,12	1,17	1,90	1,10	2,05	0,82	2,39	0,61
9	1,97	1,14	1,82	1,18	1,95	1,01	1,92	1,08	1,85	0,92	2,14	0,86
10	2,08	0,85	2,08	0,92	1,79	0,96	2,07	0,93	1,96	0,84	2,12	0,88
11	2,22	0,70	1,76	1,24	2,16	0,82	2,08	0,92	2,16	0,68	1,91	1,09
12	2,20	0,81	2,18	0,82	1,88	0,94	2,11	0,89	1,99	0,67	2,25	0,75
13	2,31	0,75	2,18	0,82	1,88	0,80	2,11	0,89	2,20	0,64	2,09	0,91
14	2,24	0,76	2,22	0,78	2,04	0,79	2,27	0,73	2,23	0,77	2,23	0,77
15	2,03	0,88	2,14	0,86	1,80	0,83	1,99	1,01	1,93	0,60	2,32	0,68
16	2,11	0,84	2,16	0,84	1,84	0,89	2,05	0,95	1,96	0,64	2,28	0,72
17	2,24	0,83	2,01	0,99	2,18	0,71	2,13	0,87	2,08	0,62	2,13	0,87
18	2,22	0,84	2,03	0,97	2,15	0,74	1,95	1,05	2,16	0,82	1,94	1,06
19	2,19	0,79	2,07	0,93	2,14	0,72	2,05	0,95	2,16	0,67	2,16	0,84
x_{av}	2,28	0,91	2,00	1,00	2,09	0,89	1,98	1,02	2,19	0,79	2,10	0,90
s_n	0,2249	0,1546	0,1601	0,1651	0,2400	0,1224	0,1272	0,1343	0,2192	0,1380	0,1602	0,1602
m	0,0516	0,0355	0,0367	0,0379	0,0551	0,0281	0,0292	0,0308	0,0503	0,0317	0,0367	0,0367
$t_{a,n}$	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009
ΔX	0,1084	0,0745	0,0772	0,0796	0,1157	0,0590	0,0613	0,0647	0,1057	0,0665	0,0772	0,0772
$\Delta, \%$	4,75	8,15	3,86	7,92	5,53	6,62	3,09	6,33	4,83	8,40	3,68	8,54

Таблиця 3.12 - Геометричні розміри зварювального шва при Р=4500 Вт.

<i>n</i>	<i>Перетин 1–1</i>				<i>Перетин 1–2</i>				<i>Перетин 1–3</i>			
	<i>e</i>	<i>e</i> ₁	<i>h</i>	<i>h</i> ₁	<i>e</i>	<i>e</i> ₁	<i>h</i>	<i>h</i> ₁	<i>e</i>	<i>e</i> ₁	<i>h</i>	<i>h</i> ₁
1	1,93	0,93	2,43	0,57	1,89	0,87	1,97	1,03	1,85	0,77	2,23	0,77
2	2,64	1,14	1,79	1,21	2,92	1,18	2,05	0,95	2,40	0,98	1,88	1,13
3	2,56	0,95	1,90	1,10	2,37	1,11	1,97	1,03	2,33	1,13	1,88	1,13
4	2,50	1,00	1,93	1,07	2,59	1,14	2,03	0,97	2,25	0,90	1,88	1,13
5	2,43	1,00	2,07	0,93	2,68	1,03	2,13	0,87	2,63	0,90	1,88	1,13
6	2,57	1,00	1,64	1,36	2,84	1,11	1,89	1,11	2,62	1,00	1,85	1,15
7	2,56	1,02	1,98	1,02	2,92	1,05	1,95	1,05	2,62	0,92	1,77	1,23

8	1,93	0,86	2,18	0,82	2,54	1,23	1,77	1,23	2,48	1,09	2,18	0,83
9	2,89	1,70	1,88	1,12	2,19	1,22	2,03	0,97	2,34	1,25	1,95	1,05
10	2,29	1,71	1,64	1,36	2,84	1,07	2,05	0,95	2,21	1,18	1,97	1,03
11	2,37	0,85	1,93	1,07	2,34	0,83	2,01	0,99	2,22	0,79	2,18	0,82
12	2,45	1,07	1,69	1,31	2,07	0,93	2,09	0,91	2,24	0,80	2,25	0,75
13	2,15	0,87	2,00	1,00	1,91	0,72	1,76	1,24	2,08	0,67	1,88	1,12
14	2,17	0,74	2,22	0,78	2,07	0,78	2,04	0,96	2,16	0,78	2,29	0,71
15	2,48	0,99	1,80	1,20	1,96	0,82	2,19	0,81	2,30	0,73	2,24	0,76
16	2,47	1,03	1,70	1,30	2,05	0,88	2,16	0,84	2,27	0,79	2,24	0,76
17	2,19	0,80	2,09	0,91	2,13	0,77	1,88	1,12	2,11	0,59	2,37	0,63
18	2,20	0,76	2,14	0,86	2,17	0,72	2,13	0,87	2,31	0,68	2,47	0,53
19	2,13	0,61	2,12	0,88	2,17	0,68	2,10	0,90	2,03	0,64	2,36	0,64
x_{av}	2,36	1,00	1,95	1,05	2,35	0,95	2,01	0,99	2,29	0,87	2,09	0,91
s_n	0,2489	0,2804	0,2154	0,2154	0,3564	0,1826	0,1208	0,1208	0,2034	0,1893	0,2193	0,2193
m	0,0571	0,0643	0,0494	0,0494	0,0818	0,0419	0,0277	0,0277	0,0467	0,0434	0,0503	0,0503
$t_{a,n}$	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009	2,1009
ΔX	0,1200	0,1351	0,1038	0,1038	0,1718	0,0880	0,0582	0,0582	0,0980	0,0912	0,1057	0,1057
$\Delta, \%$	5,08	13,49	5,31	9,93	7,31	9,23	2,90	5,89	4,29	10,45	5,06	11,62

Для подальшого аналізу параметри швів (h , h_l , e , e_l) усереднювати за трьома перетинах одного зразка. Результати наведені в табл. 3.13- 3.16.

Таблиця 3.13 - Усереднені розміри зварювального шва при $P=3750$ Вт

Перетин	Параметр			
	e	e_l	h	h_l
$I-I$	2,45	0,81	1,37	1,63
$I-2$	2,33	0,87	1,77	1,23
$I-3$	2,24	0,81	1,48	1,52
x_{av}	2,34	0,83	1,54	1,46
s_n	0,1055	0,0344	0,2104	0,2104
m	0,0609	0,0199	0,1215	0,1215
$t_{a,n}$	4,3027	4,3027	4,3027	4,3027
ΔX	0,2622	0,0854	0,5228	0,5228
$\Delta, \%$	11,21	10,31	33,98	35,77

Таблиця 3.14 - Усереднені розміри зварювального шва при P=4000 Вт

Перетин	Параметр			
	e	e_l	h	h_l
$l-l$	2,14	0,94	1,88	1,12
$l-2$	2,28	0,99	1,70	1,30
$l-3$	2,32	0,84	1,85	1,15
x_{av}	2,25	0,92	1,81	1,19
s_n	0,0983	0,0745	0,0967	0,0941
m	0,0567	0,0430	0,0558	0,0543
$t_{a,n}$	4,3027	4,3027	4,3027	4,3027
ΔX	0,2441	0,1850	0,2402	0,2338
$\Delta, \%$	10,85	20,03	13,25	19,65

Таблиця 3.15 - Усереднені розміри зварювального шва при P=4250 Вт

Перетин	Параметр			
	e	e_l	h	h_l
$l-l$	2,28	0,91	2,00	1,00
$l-2$	2,09	0,89	1,98	1,02
$l-3$	2,19	0,79	2,10	0,90
x_{av}	2,19	0,87	2,03	0,98
s_n	0,0946	0,0646	0,0603	0,0639
m	0,0546	0,0373	0,0348	0,0369
$t_{a,n}$	4,3027	4,3027	4,3027	4,3027
ΔX	0,2350	0,1606	0,1497	0,1587
$\Delta, \%$	10,74	18,55	7,39	16,23

Таблиця 3.16 - Усереднені розміри зварювального шва при P=4500 Вт

Перетин	Параметр			
	e	e_l	h	h_l
$l-l$	2,36	1,00	1,95	1,05
$l-2$	2,35	0,95	2,01	0,99
$l-3$	2,29	0,87	2,09	0,91
x_{av}	2,33	0,94	2,02	0,98
s_n	0,0416	0,0648	0,0685	0,0685
m	0,0240	0,0374	0,0395	0,0395

$t_{a,n}$	4,3027	4,3027	4,3027	4,3027
ΔX	0,1032	0,1610	0,1701	0,1701
$\Delta, \%$	4,42	17,07	8,43	17,33

За даними таблиць 3.13 - 3.16 побудовані графіки залежності параметрів шва від потужності лазерного випромінювання рис.3.10.

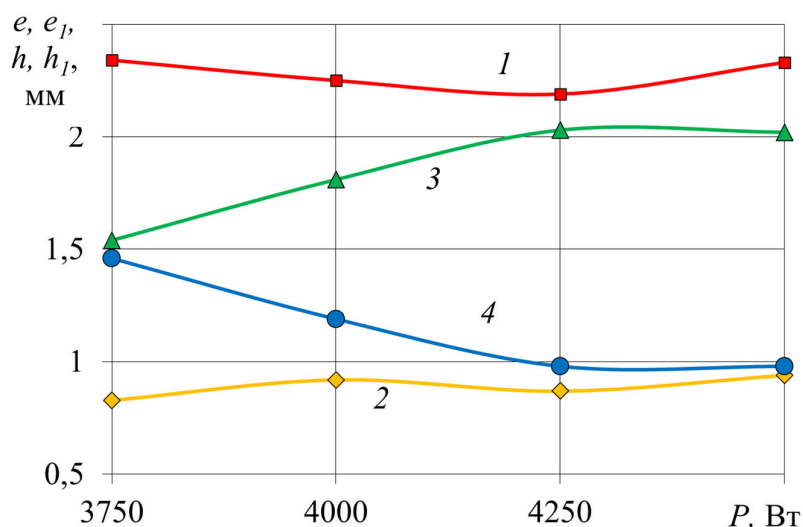


Рисунок 3.10 Залежність параметрів шва e (1), e_l (2), h (3), h_l (4) від потужності лазерного випромінювання

Аналіз рисунка 3.10 свідчить, що зі зростанням потужності лазерного випромінювання до 4250 Вт висота трапецеїдальної частини шва h збільшується практично лінійно — від 1,55 мм до 2,00 мм. При подальшому підвищенні потужності до 4500 Вт цей параметр залишається майже незмінним. Висота прямокутної частини h_l зі збільшенням потужності до 4250 Вт закономірно зменшується від 1,48 мм до 1,00 мм, після чого також стабілізується й суттєво не змінюється при подальшому зростанні потужності. Ширина прямокутної частини e_l за всіх досліджених режимів практично залишається сталою й перебуває в межах 0,85–0,94 мм. Разом з тим ширина трапецеїдальної частини e при збільшенні потужності до 4250 Вт дещо зменшується — від 2,35 мм до 2,20 мм, а надалі плавно зростає до приблизно 2,33 мм.

Висновки

1. Проведено експериментальне дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на стрілку прогину та кутові деформації при лазерному зварюванні таврових з'єднань унахлест. Експерименти виконувалися в діапазоні потужності 3750...4500 Вт.

2. Встановлено, що кутові деформації вздовж довжини зразка спочатку збільшуються, а починаючи приблизно з відстані 75 мм – стабілізуються. Виконано обчислення середньоквадратичного відхилення та похибок вимірювань, що підтвердило достовірність отриманих даних.

3. За результатами аналізу макрошліфів зварних з'єднань встановлено, що в поперечному перерізі шов має дві виражені зони – трикутну та прямокутну. Встановлено, що висотні параметри шва суттєво залежать від потужності лазерного випромінювання, тоді як вплив на ширину шва є мінімальним.

					MP 8.132.6121м.03.05.03. ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					МР 8.131.6121м.03.05.04. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Комп'ютерне моделювання деформованого стану при лазерному зварюванні тонких пластин	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	Гулько В.В.						67	
Перевірів	Ярос Ю.О.							
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.								
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

4. Комп'ютерне моделювання деформованого стану при лазерному зварюванні тонких пластин

4.1. Вибір комп'ютерного методу моделювання деформованого стану

У системах інженерних розрахунків і аналізу значну роль відіграють програмні комплекси моделювання полів фізичних величин. Насамперед це стосується програм для аналізу міцності та деформування, які базуються на методі скінченних елементів (МСЕ). Метод скінченних елементів був сформований до 1950 р. фахівцями у галузях будівельної механіки та теорії пружності, а термін *finite elements* уперше запропонував Р. Клаф у 1960 р. У 1963 р. було подано порівняно просту методику застосування МСЕ для задач міцності, основу на мінімізації потенційної енергії, що сприяло появі ранніх програмно-методичних комплексів моделювання [77].

У 1970 р. було створено один із найвідоміших скінченно-елементних програмних пакетів — **NASTRAN** (NAsa STRuctural ANalysis), який надалі розвивала корпорація MSC. Пакет забезпечує повний спектр інженерного аналізу: моделювання напружено-деформованого стану, визначення власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, теплопередачі та нелінійних процесів — як статичних, так і динамічних [78].

У 1976 р. було розроблено програмний комплекс **DYNA3D** (пізніше — LS-DYNA), призначений для розв'язання тривимірних динамічних нелінійних задач механіки твердого тіла, рідин, газів, задач теплопереносу та пов'язаних процесів. У LS-DYNA реалізовано як явну, так і неявну постановки МСЕ, підтримку лагранжових, ейлерових та гібридних сіток, а також сучасні алгоритми контактної взаємодії. Починаючи з 1996 р., вирішувач LS-DYNA інтегрований у пакет **ANSYS**, а у 2006 р. також включений до складу **NASTRAN** [79].

Серед лідерів у сфері макромоделювання виділяється програмний комплекс **Adams**, розроблений компанією Mechanical Dynamics Inc. (MDI) у

					MP 8.132.6121м.03.05.04. ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1977 р. Програма призначена для кінематичного і динамічного аналізу механічних систем з автоматичним формуванням і розв'язанням рівнянь руху [80].

Програмний комплекс **ANSYS** є одним із найпотужніших скінченно-елементних пакетів, що охоплює аналіз міцності, теплофізики, гідрогазодинаміки, електромагнетизму та дозволяє моделювати пов'язані фізичні процеси. ANSYS став одним із перших програмних продуктів, сертифікованих за ISO 9000 та ISO 9001, що підкреслює його надійність та відповідність міжнародним вимогам [81].

Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) при деформувальному зміцненні циліндричних вузлів з різномірних матеріалів у Національному університеті кораблебудування (НУК) розпочалося у 2006 р. на основі комплексу ANSYS з використанням MCE. Раніше MCE застосовували у НУК для моделювання залишкових напружень при зварюванні та паянні конструкцій з різномірних матеріалів на основі власних програмних розробок. Враховуючи накопичений досвід і специфіку задач, у цій роботі для моделювання залишкових деформацій тонких пластин при лазерному зварюванні використано MCE та комплекс ANSYS, що дозволяє враховувати нелінійну зміну властивостей матеріалу під час структурних перетворень [82].

Оскільки під час зварювання відбувається інтенсивне пластичне деформування металу, розрахунки виконували з урахуванням деформацій миттєвої пластичності, що забезпечує підвищену точність і фізичну коректність моделі [83].

Як умова появи пластичних деформацій прийнято умова Мізеса $\sigma_{екв} = \sigma_m$, де σ_m - границя плинності (умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$); $\sigma_{екв}$ - еквівалентні напруження, що визначаються за Мізесу для осесиметричної задачі за рівнянням:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y - \sigma_y \cdot \sigma_z - \sigma_z \cdot \sigma_x + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (4.1)$$

					MP 8.132.6121м.03.05.04. ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Методика комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану

Після опрацювання наявних чисельних методів та програмних засобів, призначених для моделювання напружено-деформованого стану, для даного дослідження було обрано **метод скінченних елементів**, реалізований у програмному комплексі **ANSYS**. Оскільки всі вузли конструкції мають прямокутну форму та є симетричними відносно поздовжньої осі, при побудові розрахункових моделей було прийнято рішення використовувати **двовимірний скінчений елемент PLANE183**, який має чотирикутний профіль, близький до квадратного.

Застосування плоских еквівалентних симетричних моделей замість повноцінних тривимірних дозволило суттєво скоротити час моделювання за умови збереження необхідної густоти сітки. Використання елемента з профілем, наближеним до квадратного, забезпечило високу точність розрахунків, що особливо важливо у зонах зі значними градієнтами напружень, де локально згущувалася сітка.

Елемент **PLANE183** є восьмивузловим двовимірним елементом із квадратичною апроксимацією переміщень, що дозволяє ефективно моделювати нерегулярні скінченно-елементні сітки. Кожен із восьми вузлів має **два ступені свободи**: переміщення за осями **X** і **Y** у вузловій системі координат.

Елемент може використовуватися для моделювання:

- осесиметричного напружено-деформованого стану;
- плоского деформованого стану;
- плоского напруженого стану;
- узагальненого плоского деформованого стану.

PLANE183 підтримує моделювання матеріалів із властивостями гіперпружності, пластичності, повзучості, ураховує явища зміцнення під навантаженням, великі деформації та значні переміщення. Геометрія елемента, розташування його вузлів та система координат наведені на рис. 4.1.

					MP 8.132.6121м.03.05.04. ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

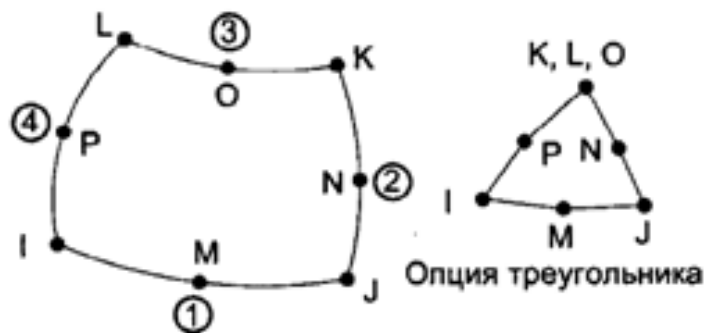


Рисунок 4.1 Геометрія, розташування вузлів і систем координат кінцевого елемента Plane 183

Елемент трикутної форми формується шляхом задання однакових номерів для вузлів **K, L та O**. Крім координат вузлів, вихідні дані елемента можуть включати значення товщини, але лише у випадку використання **ортотропного матеріалу** та режиму **плоского напруженого стану**. У такій постановці напрямки ортотропії збігаються з осями локальної системи координат елемента.

У межах елемента напрямки головних напружень орієнтовані паралельно осям локальної системи координат. На поверхнях елемента напруження визначаються перпендикулярно та паралельно лініям поверхонь **IJ** і **KL**, а також паралельно осі **Z** — для випадків плоского деформованого та плоского напруженого стану. Для осесиметричних задач ці напруження відповідно орієнтовані у коловому напрямку.

4.3. Комп'ютерне моделювання деформованого стану при лазерному зварюванні

При моделюванні деформованого стану необхідно враховувати фізико-механічні властивості матеріалів. Для прогнозування рівня залишкових деформацій комп'ютерна модель будувалася з урахуванням симетрії зразка із застосуванням скінчено-елементів типу **PLANE183**. Значення властивостей

матеріалу приймалися усередненими в інтервалі температур **20...700 °С**. У розрахунках використовували такі параметри: модуль пружності **$E = 177 \text{ ГПа}$** , коефіцієнт Пуассона **$\nu = 0,3$** , коефіцієнт лінійного термічного розширення **$\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°С}$** . Границю плинності матеріалу в області пружнопластичних деформацій задавали на рівні **$\sigma_t = 70 \text{ МПа}$** .

Фізична та скінчено-елементна моделі наведені на рис. 4.2.

При моделюванні зварний шов, що складається з двох зон — трапецеїдальної та прямокутної (рис. 3.9), — охолоджувався від температури початку пружно-пластичних деформацій до кімнатної. Геометричні параметри шва (h , h_1 , e , e_1) задавалися відповідно до експериментально визначених значень для всіх чотирьох режимів потужності лазерного випромінювання.

На основі результатів чисельного моделювання побудовано залежність стрілки прогину від потужності лазерного випромінювання (рис. 4.3).

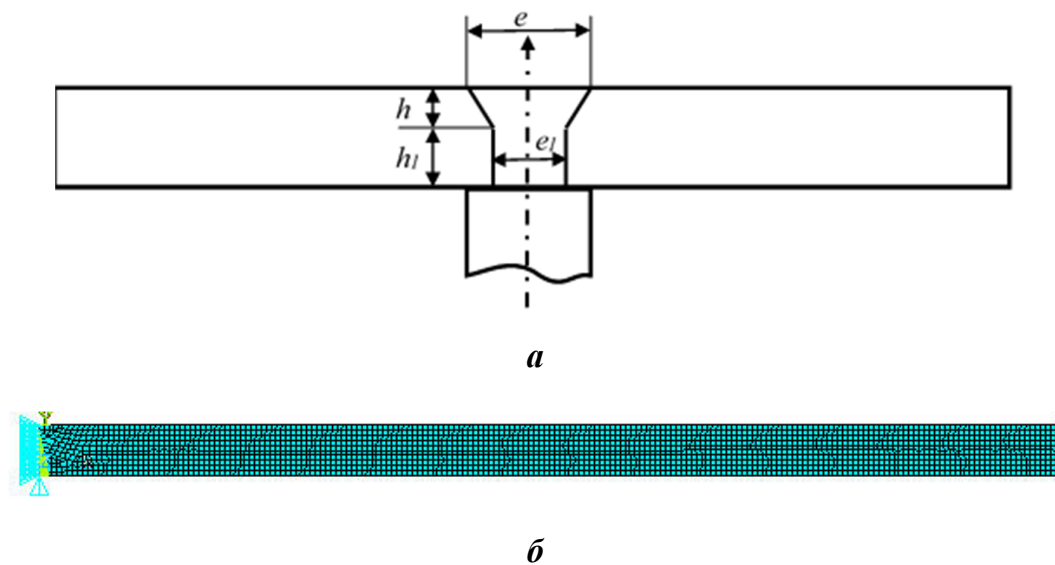


Рисунок 4.2 Фізична (а) і скінчено-елементна модель (б)

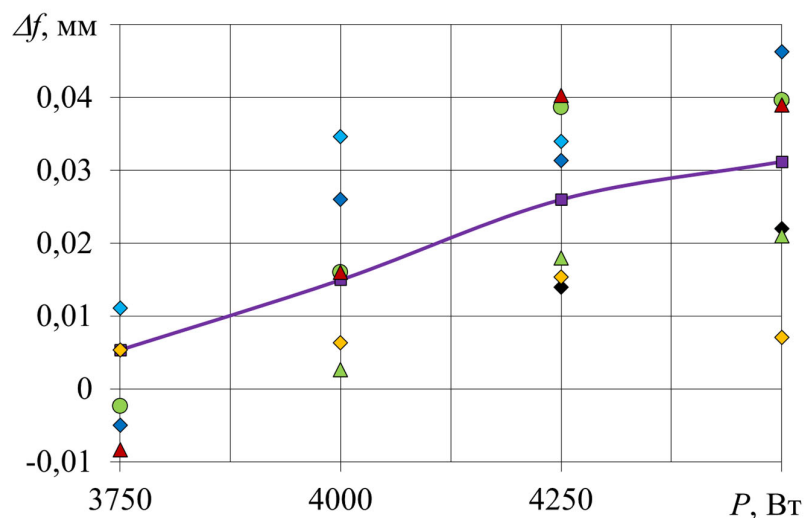


Рисунок 4.3 Залежність стрілки прогину від потужності лазерного випромінювання

На **рис. 4.3** подано залежність стрілки прогину від потужності лазерного випромінювання. Суцільною лінією позначено результати чисельного моделювання, тоді як експериментальні дані наведені у вигляді точок. Порівняння результатів моделювання зі значеннями, отриманими під час експерименту, свідчить про достатньо високу точність розробленої моделі та її здатність адекватно відтворювати реальні фізичні процеси.

Висновки

1. Розроблено математичну модель визначення стрілки прогину на основі методу скінченних елементів.
2. Модель побудована з урахуванням геометричної симетрії зразка та температурно залежних фізико-механічних властивостей матеріалу.
3. Порівняльний аналіз результатів моделювання та експериментальних даних підтвердив адекватність і достовірність запропонованої моделі.

					МР 8.131.6121м.03.05.05. ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Охорона праці і техніка безпеки при лазерному зварюванні				Літ.		Арк.	Аркушів		
Розробив	Гулько В.В.											74		
Перевірів	Ярос Ю.О.													
Рецензент												ХННІ НУК		
Н. Контр.														
Зав. каф.	Матвієнко М.В.													

5. Охорона праці і техніка безпеки при лазерному зварюванні

Лазерне зварювання належить до високотехнологічних процесів обробки матеріалів, які характеризуються концентрованим енергетичним впливом, присутністю оптичного випромінювання широкого спектра, наявністю небезпечних продуктів зварювання та підвищеними вимогами до техніки безпеки. Використання лазерних установок у виробничих умовах потребує впровадження комплексної системи охорони праці, що охоплює організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні, нормативні та навчально-профілактичні заходи, спрямовані на запобігання травматизму та професійним захворюванням.

Основною небезпекою лазерного зварювання є оптичне випромінювання, яке за біологічним впливом на організм людини значно перевищує традиційні джерела енергії. Лазерне випромінювання характеризується когерентністю, вузькою діаграмою спрямованості й високою щільністю потужності, що може спричинити термічні та фотохімічні ушкодження сітківки ока, рогівки, шкіри, а інколи — і внутрішніх тканин [84]. Застосування лазерів класів 3В і 4 згідно з міжнародною класифікацією ІЕС/EN 60825 потребує жорсткого контролю доступу, застосування захисних екранів, блокувальних систем та спеціалізованих засобів індивідуального захисту. При зварюванні у відкритих технологічних зонах необхідне використання захисних окулярів або щитків, спектрально адаптованих до довжини хвилі та потужності лазера, а також спецодягу, який захищає від відбитого або розсіяного випромінювання [85].

Важливою складовою безпеки лазерного зварювання є попередження пожеж та вибухів. Джерело лазерного випромінювання, допоміжні оптичні елементи та фокусувальні блоки можуть нагріватися до високих температур. Під дією лазерного променя відбувається інтенсивне плавлення і випаровування матеріалу, що здатне спричинити утворення гарячих частинок, бризок металу та світлових спалахів, які можуть бути джерелом займання [86]. Робоча зона повинна бути очищена від легкозаймистих матеріалів, а приміщення обладнане системами автоматичного пожежогасіння, придатними

					MP 8.132.6121м.03.05.05. ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для роботи з електронним обладнанням і високоточними оптичними системами. Повітряні та газові комунікації лазерних комплексів мають бути оснащені зворотними клапанами та вогнегасними бар'єрами, що дозволяють уникнути зворотного удару полум'я у систему подачі газу.

Суттєву небезпеку для працюючих становлять продукти металевої пари та дим, які утворюються при випаровуванні матеріалу у зоні зварювання. Високотемпературний вплив лазерного променя спричиняє інтенсивне утворення аерозолів, наночастинок та токсичних оксидів, що здатні проникати в легені та кровоносну систему людини [87]. До шкідливих компонентів відносять оксиди заліза, хрому, марганцю, нікелю, а також сполуки, що утворюються при обробці спеціальних сталей, титану або алюмінію. У деяких випадках в аерозолях присутні ультра-дисперсні частинки розміром менше 100 нм, які мають підвищену токсикологічну активність [88]. Для зниження концентрації шкідливих речовин необхідно застосовувати локальні відсмоктувачі, високоефективні системи вентиляції, фільтраційні установки та аспіраційні кожухи, що розташовуються безпосередньо біля зони плавлення.

Акустичний вплив також належить до значущих факторів небезпеки. Лазерне зварювання супроводжується інтенсивними ударними імпульсами, які утворюються під час мікровибухів парогазових каналів у ванні розплаву. Хоча рівень шуму лазерних процесів часто нижчий, ніж при дуговому зварюванні, у деяких режимах (імпульсне зварювання, глибоке проплавлення, робота з твердими хрупкими матеріалами) рівень шумового впливу може перевищувати санітарні норми, що вимагає застосування протишумових навушників або вкладишів [89].

У процесі роботи лазерного обладнання небезпеку можуть становити високовольтні системи живлення, блоки охолодження, системи керування та переміщення оптичних елементів. Оскільки більшість лазерних комплексів використовує високі значення напруги та струму, необхідно забезпечувати регулярну перевірку електричної ізоляції, справність заземлення, блокувальних механізмів і захисних запобіжників. Обслуговування електронних модулів

					MP 8.132.6121м.03.05.05. ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повинно здійснюватися виключно спеціально підготовленим персоналом відповідно до технічних регламентів виробника [90].

Ергономічні фактори і правильна організація робочого місця відіграють важливу роль у зниженні професійних ризиків. Оператор лазерного комплексу повинен мати зручний доступ до органів керування, засобів захисту, екранів і вимірювальної апаратури. Правильна організація робочої зони, підтримання достатнього освітлення та мінімізація незручних поз при роботі сприяють зменшенню втоми та ризику травмування. Важливо забезпечити зонування приміщення на безпечні та небезпечні ділянки відповідно до чинних норм, зокрема ДСТУ EN 60825 та стандартів охорони праці України [91].

Організація виробничого процесу повинна включати навчання персоналу, інструктаж з техніки безпеки, перевірку знань та постійний моніторинг дотримання правил експлуатації. Працівники, які допускаються до лазерних робіт, мають пройти спеціальну підготовку, що включає знання принципів роботи лазерів, засобів захисту, правил користування оптичними системами та дій у разі аварійних ситуацій [92]. Важливо також проводити регулярне технічне обслуговування обладнання, калібрування лазерів, оптичних систем та датчиків. Будь-які роботи зі зміною налаштувань оптики чи фокусувальних елементів повинні виконуватися лише при повному відключенні лазера та застосуванні блокувальних засобів.

Особливу увагу приділяють контролю небезпечного відбитого випромінювання. Лазерний промінь, взаємодіючи з металом, може відбиватися у непередбачуваних напрямках, що є потенційно небезпечним для очей і шкіри персоналу. Особливо небезпечним є дзеркальний та дзеркоподібний дифузний відблиск з поверхонь з нержавіючої сталі, алюмінію або оброблених оптичних елементів [93]. Для його мінімізації застосовують матове покриття поверхонь, використання поглинаючих матеріалів, захисних боксів і механічних ширм. У деяких виробничих середовищах використовуються повністю закриті лазерні камери або роботизовані комплекси, де оператор повністю ізольований від джерела випромінювання.

					MP 8.132.6121м.03.05.05. ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час експлуатації лазерного обладнання необхідно контролювати термодинамічні процеси, пов'язані з охолодженням лазера. Більшість промислових лазерів використовують водяне або комбіноване охолодження, порушення роботи якого може призвести до перегріву лазерного резонатора, руйнування оптичних елементів або витоку робочої рідини, що є додатковим фактором ризику [94]. Системи охолодження повинні бути оснащені датчиками температури, тиску та витрати охолоджувача, а також автоматичними блокуваннями, що відключають лазер у разі відхилень параметрів.

Усі лабораторії та виробничі приміщення, де застосовується лазерне зварювання, повинні відповідати вимогам протипожежних норм та санітарних регламентів. Необхідно забезпечити наявність евакуаційних виходів, планів евакуації, засобів первинного пожежогасіння, а також можливість негайного відключення лазера у разі аварії. До обов'язкових заходів відноситься періодичний контроль за рівнем шкідливих факторів — концентрацією аерозолів, газів, рівнем шуму, освітленості та температури повітря [95]. Нормативи їх гранично допустимих значень регламентуються державними санітарними правилами та рекомендаціями ISO, OSHA та EN.

Комплексний підхід до охорони праці при лазерному зварюванні дозволяє значно знизити ризик травмування персоналу і забезпечити безпечні умови праці. Ефективність системи безпеки визначається рівнем підготовки персоналу, дотриманням технологічних регламентів, застосуванням сучасних технічних засобів захисту та регулярним контролем параметрів технологічного процесу. Використання систем відеоспостереження, роботизація зварювальних комплексів та впровадження дистанційного керування лазерами додатково підвищує рівень безпеки і зменшує вплив людського фактора. Належна організація охорони праці є невід'ємною складовою високотехнологічних виробництв, що використовують лазерні технології, і визначає їх ефективність, надійність та конкурентоспроможність.

					MP 8.132.6121м.03.05.05. ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні висновки

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження деформацій, що виникають під час лазерного зварювання таврового з'єднання. Експериментальні дослідження виконувалися на зразках із конструкційної вуглецевої сталі Ст3 товщиною 3 мм. Геометрія зразків була задана розмірами $150 \times 150 \times 3$ мм для полиці та $150 \times 60 \times 3$ мм для стінки. Для забезпечення можливості багаторазового і точного встановлення деформометра на поверхні зразка було виконано технологічні підготовчі операції: на одній стороні висвердлено отвори діаметром 1 мм, а на протилежній — нанесено контрольну лінію.

Стрілка прогину вимірювалася до та після процесу зварювання за допомогою електронного індикатора годинникового типу. Вимірювання проводилися у семи характерних перетинах із базою контролю 120 мм та кроком 20 мм уздовж лінії шва. Перед початком експерименту полицю зразка фіксували на стінці за допомогою прихваток у спеціальному кондукторі, що забезпечувало повторюваність початкових умов. Після виконання прихваток та початкових вимірювань здійснювалося остаточне приварювання полиці у вільному стані. Усі експериментальні роботи проводилися з дотриманням вимог техніки безпеки.

За результатами вимірювань побудовано графіки зміни кутової деформації вздовж довжини зразка для різних потужностей лазерного випромінювання. Аналіз кривих показав, що зі збільшенням відстані від краю зразка кутова деформація зростає і стабілізується приблизно на позначці 75 мм, що узгоджується з відомими закономірностями формування кутових деформацій при зварюванні плавленням.

Дослідження макрошліфів показало, що зварний шов має двозонну структуру і може бути умовно поділений на трапецеїдальну та прямокутну частини. Основними параметрами сформованого шва є висота трапецеїдальної частини h , висота прямокутної частини h_1 , ширина шва e та ширина

					МР 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прямокутної зони e_1 . Встановлено, що зі збільшенням потужності лазерного випромінювання зростає насамперед висота трапецеїдальної частини шва, що пов'язано з глибшим проплавленням металу та розширенням термічно вплинутої зони.

Отримані результати підтверджують характерні закономірності формування деформацій при лазерному зварюванні та можуть бути використані для оптимізації режимів зварювання з метою мінімізації залишкових деформацій.

Розроблено математичну модель моделювання стрілки прогину з використанням методу скінченних елементів. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показало достатню адекватність розробленої моделі.

					МП 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список літератури

1. Мовчан В. В., Семененко А. В. Лазерні технології в машинобудуванні. — Київ: КНУТД, 2020. — 312 с.
2. Бирон А. М., Креймер М. В. Фізика лазерної обробки матеріалів. — Київ: Наукова думка, 2018. — 284 с.
3. Steen W. M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. — 4th ed. — Springer, 2010. — 558 p.
4. Ready J. F. *Industrial Applications of Lasers*. — 2nd ed. — Academic Press, 1997. — 599 p.
5. Koji S. *Fiber Laser Welding Technologies*. — Elsevier, 2018. — 406 p.
6. Ion J. C. *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. — Butterworth-Heinemann, 2005. — 556 p.
7. Chen L., Zhang Y. *Keyhole Dynamics in High-Power Laser Welding*. — CRC Press, 2021. — 242 p.
8. Katayama S. *Handbook of Laser Welding Technologies*. — Woodhead Publishing, 2013. — 654 p.
9. Бережний М. М. Технології високоточного зварювання. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. — 228 с.
10. Kou S. *Welding Metallurgy*. — 2nd ed. — Wiley-Interscience, 2003. — 461 p.
11. Kim C., Nielsen S. *Hybrid Laser-Arc Welding Processes*. — Springer, 2017. — 319 p.
12. DebRoy T., Wei H. L. *Modelling of Laser Welding Processes*. — Oxford University Press, 2020. — 384 p.
13. Ion J. C. *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. — 556 p.
14. Steen W. M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. — 4th ed. — London: Springer, 2010. — 558 p.
15. Koji S. *Fiber Laser Welding Technologies*. — Amsterdam: Elsevier, 2018. — 406 p.

					MP 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Ready J. F. *Industrial Applications of Lasers*. — 2nd ed. — San Diego: Academic Press, 1997. — 599 p.
17. Kou S. *Welding Metallurgy*. — 2nd ed. — Hoboken: Wiley-Interscience, 2003. — 461 p.
18. Katayama S. *Handbook of Laser Welding Technologies*. — Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. — 654 p.
19. Мовчан В. В., Семененко А. В. Лазерні технології в машинобудуванні. — Київ: КНУТД, 2020. — 312 с.
20. Бережний М. М. Технології високоточного зварювання. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. — 228 с.
21. Мовчан В. В., Семененко А. В. Лазерні технології в машинобудуванні. Київ: КНУТД, 2020. 312 с.
22. Бирон А. М., Креймер М. В. Фізика лазерної обробки матеріалів. Київ: Наукова думка, 2018. 284 с.
23. Steen W. M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. 4th ed. Springer, 2010. 558 p.
24. Ready J. F. *Industrial Applications of Lasers*. 2nd ed. Academic Press, 1997. 599 p.
25. Koji S. *Fiber Laser Welding Technologies*. Elsevier, 2018. 406 p.
26. Ion J. C. *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. Butterworth-Heinemann, 2005. 556 p.
27. Chen L., Zhang Y. *Keyhole Dynamics in High-Power Laser Welding*. CRC Press, 2021. 242 p.
28. Katayama S. *Handbook of Laser Welding Technologies*. Woodhead Publishing, 2013. 654 p.
29. Бережний М. М. Технології високоточного зварювання. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 228 с.
30. Kou S. *Welding Metallurgy*. 2nd ed. Wiley-Interscience, 2003. 461 p.
31. Kim C., Nielsen S. *Hybrid Laser-Arc Welding Processes*. Springer, 2017. 319 p.

32. DebRoy T., Wei H. L. Modelling of Laser Welding Processes. Oxford University Press, 2020. 384 p.
33. Мовчан В. В., Семененко А. В. Лазерні технології в машинобудуванні. Київ: КНУТД, 2020. 312 с.
34. Steen W. M., Mazumder J. Laser Material Processing. 4th ed. Springer, 2010. 558 p.
35. Ready J. F. Industrial Applications of Lasers. 2nd ed. Academic Press, 1997. 599 p.
36. Katayama S. Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing, 2013. 654 p.
37. Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. Wiley-Interscience, 2003. 461 p.
38. Ion J. C. Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. Butterworth-Heinemann, 2005. 556 p.
39. Berenguer R., Rossi F. Laser Welding in Medical Device Manufacturing. Elsevier, 2018. 214 p.
40. Chen L., Zhang Y. Keyhole Dynamics in High-Power Laser Welding. CRC Press, 2021. 242 p.
41. Nielsen S., Kim C. Robotics and Laser Welding Automation in Industry. Springer, 2019. 298 p.
42. Koji S. Fiber Laser Welding Technologies. Elsevier, 2018. 406 p.
43. DebRoy T., Wei H. L. Modelling of Laser Welding Processes. Oxford University Press, 2020. 384 p.
44. Бережний М. М. Технології високоточного зварювання. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 228 с.
45. Рибак О. І. Лазерні технології у промисловості. Київ: Техніка, 2017. 265 с.
46. Мовчан В. В., Семененко А. В. Лазерні технології в машинобудуванні. Київ: КНУТД, 2020. 312 с.
47. Бирон А. М., Креймер М. В. Фізика лазерної обробки матеріалів. Київ: Наукова думка, 2018. 284 с.

					MP 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

48. Steen W. M., Mazumder J. Laser Material Processing. 4th ed. Springer, 2010. 558 p.
49. Ready J. F. Industrial Applications of Lasers. 2nd ed. Academic Press, 1997. 599 p.
50. Katayama S. Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing, 2013. 654 p.
51. Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. Wiley-Interscience, 2003. 461 p.
52. DebRoy T., Wei H. L. Modelling of Laser Welding Processes. Oxford University Press, 2020. 384 p.
53. Мовчан В. В., Семененко А. В. Лазерні технології в машинобудуванні. Київ: КНУТД, 2020. 312 с.
54. Бирон А. М., Креймер М. В. Фізика лазерної обробки матеріалів. Київ: Наукова думка, 2018. 284 с.
55. Lemaître A., Chaboche J. Mechanics of Solid Materials. Cambridge University Press, 1990. 556 p.
56. Sutton M. A., Orteu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Springer, 2009. 364 p.
57. Jones R., Wykes C. Holographic and Speckle Interferometry. 2nd ed. Cambridge University Press, 1989. 408 p.
58. Rastogi P. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques. Wiley, 2001. 472 p.
59. Luhmann T., Robson S., Kyle S. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. Walter de Gruyter, 2013. 702 p.
60. Chen L., Zhang Y. Keyhole Dynamics in High-Power Laser Welding. CRC Press, 2021. 242 p.
61. Becker W., Gaul L. Experimental and Numerical Methods in Engineering. — Berlin: Springer, 2013. — 321 p.
62. Rao S. S. Engineering Experimentation: Planning, Execution, Reporting. — 4th ed. — New York: Wiley, 2019. — 480 p.

63. Coleman H. W., Steele W. G. Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers. — 3rd ed. — Wiley, 2009. — 328 p.
64. Timoshenko S., Goodier J. Theory of Elasticity. — 3rd ed. — McGraw-Hill, 1987. — 608 p.
65. Fish J., Belytschko T. A First Course in Finite Elements. — Wiley, 2007. — 352 p.
66. Dally J. W., Riley W. F. Experimental Stress Analysis. — 4th ed. — McGraw-Hill, 2005. — 736 p.
67. Norton M. P., Karczub D. G. Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers. — Cambridge University Press, 2003. — 667 p.
68. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. — 9th ed. — Wiley, 2017. — 584 p.
69. Kutner M. H., Nachtsheim C., Neter J., Li W. Applied Linear Statistical Models. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2005. 1396 p.
70. Montgomery D. C., Runger G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 7th ed. Hoboken: Wiley, 2018. 912 p.
71. Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 10th ed. New York: Wiley, 2019. 656 p.
72. Fisher, R. A. *The Design of Experiments*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1971. 248 p.
73. Box, G. E. P., Hunter, J. S., Hunter, W. G. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. 2nd ed. New York: Wiley, 2005. 672 p.
74. Дрейпер, Н. Р., Сміт, Г. Прикладний регресійний аналіз. Київ: Наукова думка, 1986. 420 с.
75. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. New York: Springer, 2004. 442 p.
76. Joglekar, A. M. *Statistical Methods for Six Sigma: In R&D and Manufacturing*. New Jersey: Wiley, 2003. 312 p.
77. Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. 4th ed. New York: Wiley, 2002. 719 p.

					MP 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

78. MSC Software. *MSC Nastran 2012: Linear Static Analysis User's Guide*. Santa Ana, CA: MSC Software Corporation, 2012. 648 p.
79. Hallquist, J. O. *LS-DYNA Theory Manual*. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2006. 997 p.
80. Shabana, A. A. *Dynamics of Multibody Systems*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 382 p.
81. ANSYS Inc. *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference*. Release 15.0. Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2013. 1142 p.
82. Пасічник, В. Г., Ковальов, О. М. Методи моделювання напружено-деформованого стану зварних конструкцій. Миколаїв: НУК, 2010. 256 с.
83. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: Elsevier, 2013. 756 p.
84. Sliney, D., Trokel, S. *Medical Lasers and Their Safety*. Springer, 2012. 234 p.
85. IEC 60825-1:2014. *Safety of Laser Products – Part 1: Equipment Classification and Requirements*. Geneva: IEC, 2014. 221 p.
86. Koechner, W. *Solid-State Laser Engineering*. 6th ed. Springer, 2006. 795 p.
87. Plummer, E. et al. Laser Welding Fumes: Composition, Generation Mechanisms and Health Risks. *Journal of Occupational Safety*, 2019. P. 41–57.
88. Columbi, D. Nanoparticle Generation in Laser-Material Interaction Processes. *Applied Physics Journal*, 2020. P. 1–15.
89. Півторак, С. М. Акустичні впливи при лазерній обробці матеріалів. Київ: НТУУ «КПІ», 2021. 128 с.
90. Steen, W., Mazumder, J. *Laser Material Processing*. Springer, 2010. 558 p.
91. ДСТУ EN 60825-1:2016. Вироби лазерні. Частина 1. Класифікація устаткування та вимоги. Київ: УкрНДНЦ, 2017. 158 с.
92. OSHA 3151. *Laser Safety Guidelines*. U.S. Department of Labor, 2020. 67 p.
93. Ready, J. *Industrial Applications of Lasers*. Academic Press, 2018. 712 p.
94. Powell, J. *CO₂ and Fiber Laser Cutting*. Springer, 2020. 431 p.
95. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. 192 с.

					MP 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		