

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА
ХЕРСОНСЬКИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



к.т.н., проф. НУК Г.В. Єрмолаєв

«__» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістра»

на тему: Експериментальні дослідження впливу режимів лазерного зварювання
таврових з'єднань на залишкові деформації

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

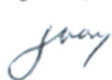
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Керівник

Фесенко Сергій Сергійович

(прізвище та ініціали)



Рецензент

Матвієнко Максим Валентинович

(прізвище та ініціали)

Єрмолаєв Геннадій Володимирович

(прізвище та ініціали)

Миколаїв-Херсон - 2023 р.

**Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут**

Факультет суднобудівний

Кафедра зварювання

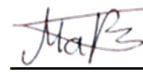
Освітній рівень магістр

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.

“ ” _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Фесенко Сергій Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Експериментальні дослідження впливу режимів лазерного зварювання таврових з'єднань на залишкові деформації

керівник проекту Матвієнко Максим Валентинович, доцент, к.т.н.

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

затверджені розпорядженням ХННІ НУК від 10.10.2023 року №19

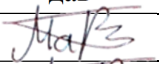
2. Строк подання студентом проекту 14.12 2023 р.

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 ви- дав	завдання прийняв
1	к.т.н., доцент Матвієнко М.В.		
2	к.т.н., доцент Матвієнко М.В.		
3	к.т.н., доцент Матвієнко М.В.		
4	к.т.н., доцент Матвієнко М.В.		
5	к.т.н., доцент Матвієнко М.В.		

7. Дата видачі завдання 12.10.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз використання лазерного зварювання	28.10.2023р.	
2	Методика проведення експерименту	11.11.2023р.	
3	Проведення експерименту і обробка результатів	18.11.2023р.	
4	Комп'ютерне моделювання деформованого стану при лазерному зварюванні	25.11.2023р.	
5	Охорона праці і техніка безпеки	28.11.2023р.	
6	Графічна частина	04.12.2023р.	
7	Оформлення пояснювальної записки	05.12.2023р.	

Студент

(підпис)

Фесенко С.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Матвієнко М.В.

(прізвище та ініціали)

Анотація

Магістерська робота присвячена дослідженню деформацій при лазерному зварюванні таврових з'єднань із сталі Ст3. Розроблено експериментальну методику визначення кутових деформацій та стрілки прогину із використанням деформометра. Проведено серію вимірювань у характерних перерізах зразка до та після зварювання.

Встановлено вплив потужності лазерного випромінювання на величину деформацій. Показано, що кутова деформація зростає вздовж довжини зразка та стабілізується на певній відстані від краю. Аналіз макрошліфів дозволив визначити геометричні особливості зварного шва та їх залежність від режимів зварювання.

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування деформацій та оптимізації параметрів лазерного зварювання тонколистових конструкцій.

Ключові слова: лазерне зварювання, таврове з'єднання, деформації, кутова деформація, стрілка прогину, залишкові напруження, Ст3, макрошліф, експериментальні дослідження, параметри зварювання.

Abstract

The master's thesis is devoted to the study of deformations during laser welding of T-joints made of St3 steel. An experimental methodology for determining angular deformations and deflection using a deformometer was developed. A series of measurements was carried out in characteristic sections of the specimen before and after welding.

The influence of laser power on deformation values was established. It was shown that angular deformation increases along the length of the specimen and stabilizes at a certain distance from the edge. The analysis of macrosections made it possible to determine the geometric features of the weld and their dependence on welding parameters.

The obtained results can be used to predict deformations and optimize laser welding parameters for thin-walled structures.

Keywords: laser welding, T-joint, deformation, angular distortion, deflection, residual stresses, St3 steel, macrostructure, experimental study, welding parameters.

Зміст

1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ.....	6
1.1. Сутність лазерного зварювання.....	6
1.2. Лазерне зварювання твердотілим лазером.....	8
1.3. Зварювання газовим лазером.....	9
1.4. Промислове застосування лазерного зварювання.....	11
1.5. Переваги та недоліки лазерного зварювання.....	15
1.6. Методи вимірювання деформацій.....	16
Висновки, постановка мети і завдання досліджень	17
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	21
2.1. Планування експерименту	21
2.2. Регресійний аналіз	29
2.3. Розробка зразка для проведення експерименту.....	30
2.4. Визначення мінімальної кількості вимірювань	35
Висновки	36
3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ І ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ	38
3.1. Зварювання експериментальних зразків	38
3.2. Вплив режимів на величину зони нагріву.....	44
Висновки	53
4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТОНКИХ ПЛАСТИН.....	56
4.1. Вибір комп'ютерного методу моделювання деформованого стану	56
4.2. Методика комп'ютерного моделювання напружено- деформованого стану	58
4.3. Комп'ютерне моделювання деформованого стану при лазерному зварюванні.....	60
Висновки	61
5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	63
5.1. Загальні заходи безпеки	65

					МР 8.132.6121м.03.05 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.2. Вимоги безпеки перед початком роботи	65
5.3. Вимоги безпеки під час роботи	66
5.4. Вимоги безпеки після закінчення робіт.....	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	69

					МР 8.132.6121м.03.05 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

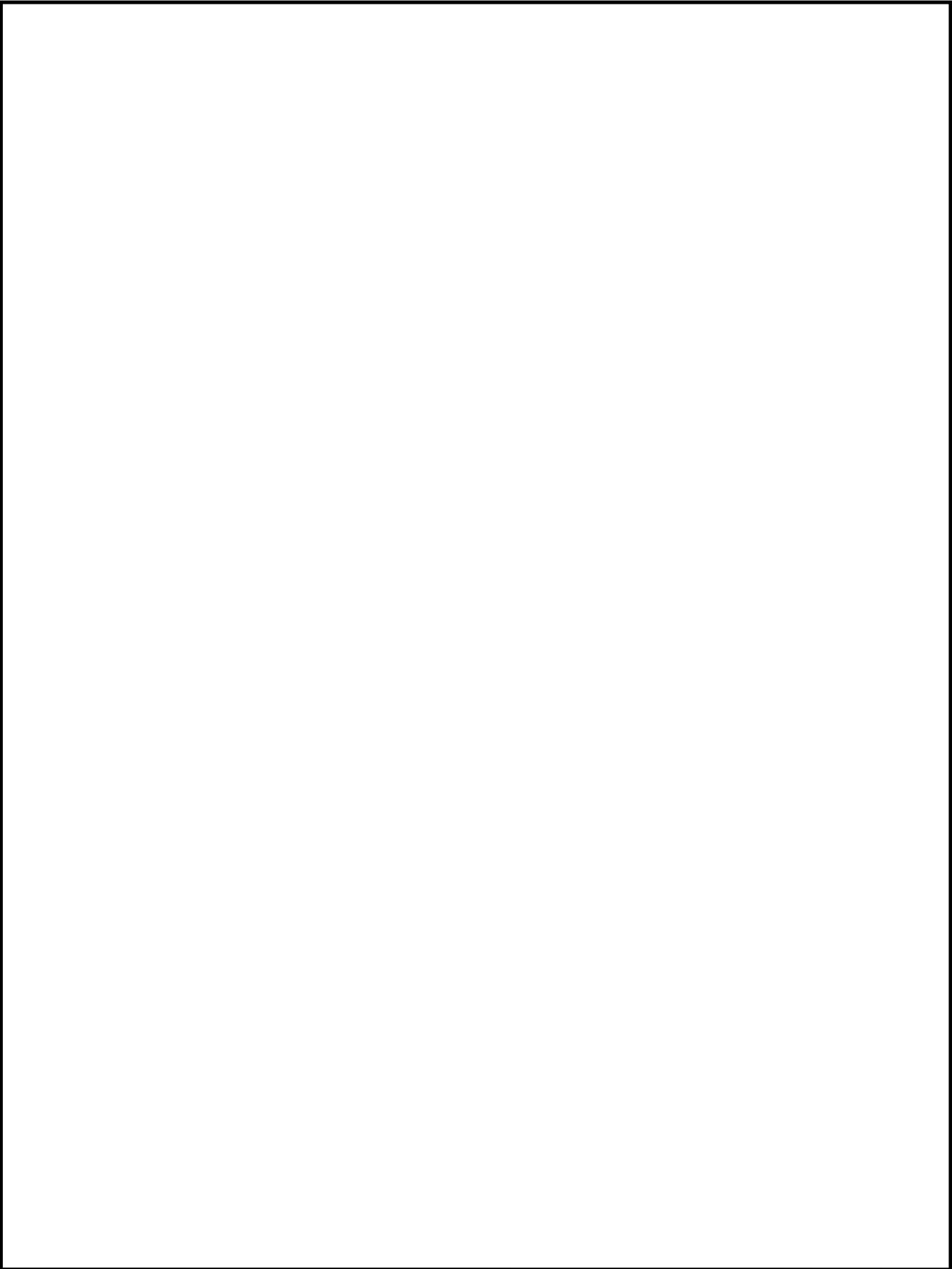
Вступ

Лазерне зварювання є сучасним високоефективним способом з'єднання матеріалів, який характеризується високою концентрацією енергії, малою зоною термічного впливу та зниженим рівнем деформацій. Воно широко застосовується в машинобудуванні, суднобудуванні та інших галузях промисловості завдяки можливості отримання якісних зварних з'єднань при високих швидкостях процесу .

Незважаючи на переваги, при лазерному зварюванні виникають залишкові напруження та деформації, які можуть впливати на точність і працездатність конструкцій. На відміну від дугових методів, питання прогнозування деформацій при лазерному зварюванні досліджене недостатньо, що обумовлює актуальність даної роботи.

Метою роботи є дослідження впливу режимів лазерного зварювання на деформації таврових з'єднань тонколистових конструкцій. Для досягнення поставленої мети вирішено задачі планування експерименту, розробки зразків та оснастки, проведення експериментальних досліджень і аналізу отриманих результатів.

					МР 8.132.6121м.03.05 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					MP 8.131.6121м.03.05.02. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Фесенко С.С..				Аналіз використання лазерного зварювання	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Матвієнко М.В.						5	
Рецензент						ХННІ НУК 3		
Н. Контр.								
Зав. каф.	В.							

1. Аналіз використання лазерного зварювання

1.1. Сутність лазерного зварювання

Лазерний промінь в порівнянні зі звичайним світловим променем володіє рядом властивостей - спрямованістю, монохроматичністю і когерентністю. Завдяки спрямованості лазерного променя його енергія концентрується на порівняно невеликій ділянці. Наприклад, спрямованість лазерного променя може в кілька тисяч разів перевищувати спрямованість променя прожектора. Якщо звичайне «біле» світло складається з променів з різними частотами, то лазерний промінь є монохроматичності - має певну частоту і довжину хвилі. За рахунок цього він відмінно фокусується і оптично постійний. Когерентність - це узгоджений перебіг у часі декількох хвильових процесів. Некогерентні коливання світлового променя володіють різними фазами, в результаті чого можуть погасити один одного. Когерентні ж коливання викликають резонанс, який посилює потужність випромінювання. Завдяки вищепереліченим властивостям [23-24] лазерний промінь може бути сфокусований на дуже маленьку поверхню металу і створити на ній щільність енергії порядку 10^8Вт/см^2 – достатню для плавлення металу і, отже, зварювання.

Лазерне зварювання проводиться в атмосферних умовах, без створення вакууму, необхідний захист розплавленого металу від повітря. Зазвичай для захисту використовуються гази, зокрема аргон. Особливістю процесу лазерного зварювання є те, що внаслідок високої теплової потужності променя на поверхні зварюваного виробу відбувається інтенсивне випаровування металу. Пари іонізуються, що призводить до розсіювання і екранування променя лазера. У зв'язку з цим при використанні лазерів великої потужності в зону зварювання необхідно подавати, крім захисного, так званий плазмоподавляючий газ. В якості плазмоподавляючого газу зазвичай використовують гелій, який значно легше аргону і не розсіює промінь лазера. Для спрощення процесу доцільне застосування сумішей 50% Аг + 50% Не, які

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконують плазмоподавляючу і захисну функції. В цьому випадку зварювальний пальник повинен забезпечувати подачу газу таким чином, щоб він здував іонізований пар.

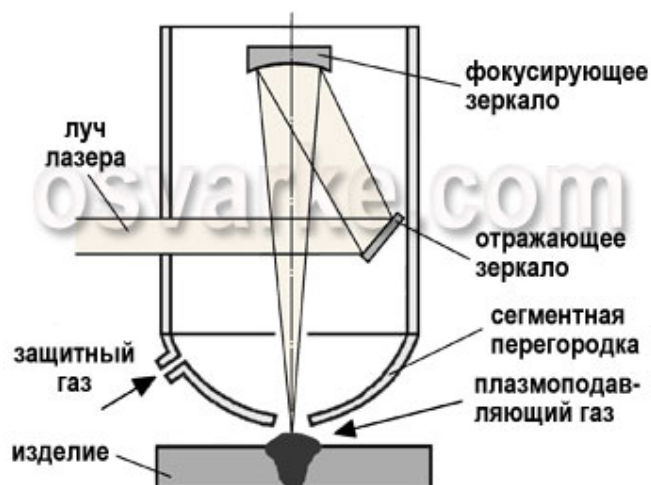


Рисунок 1.1 Схема процесу лазерного зварювання

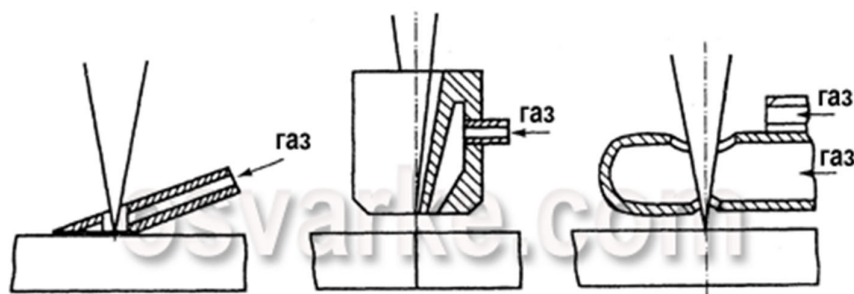


Рисунок 1.2. Конструкції сопел пальників для лазерного зварювання

При лазерному зварюванні промінь поступово поглиблюється в деталь, відтісняючи рідкий метал зварювальної ванни на задню стінку кратера. Це дозволяє отримати «кинджальне» проплавлення при великій глибині і малій ширині шва. Висока концентрація енергії в лазерному промені дозволяє досягати високих швидкостей зварювання, забезпечуючи одночасно сприятливий термічний цикл і високу технологічну міцність металу шва. Для лазерного зварювання зазвичай використовуються наступні типи лазерів:

- твердотільні;
- газові - з поздовжньою або поперечною прокачкою газу;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ

Арк.
7

- газодинамічні.

1.2. Лазерне зварювання твердотілим лазером

Схема твердотілого лазера наведена на рисунку 1.3. В якості активного тіла використовується стрижень з рубіна, скла з домішкою неодиму (Nd-Glass) або алюмо-ітрієвого граната, легованого неодимом (Nd-YAG) або ітербієм (Yb-YAG). Він розміщується в освітлювальній камері. Для збудження атомів активного тіла використовується лампа накачування, що створює потужні спалахи світла.

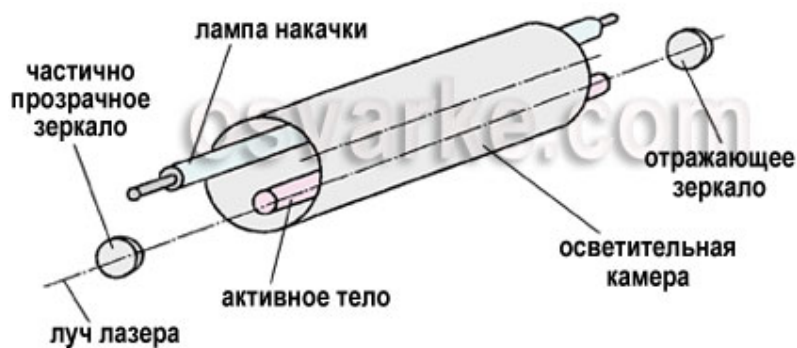


Рисунок.1.3. Схема твердотілого лазера

По торцях активного тіла розміщені дзеркала - що відображають і частково прозорі. Промінь лазера виходить через частково прозоре дзеркало, попередньо багаторазово відбиваючись всередині рубінового стрижня і таким чином посилюючись. Потужність твердотілих лазерів відносно невелика. Твердотілими лазерами в зв'язку з їх невеликою потужністю зварюються тільки дрібні деталі невеликої товщини, зазвичай об'єкти мікроелектроніки. Наприклад, привариваються найтонші виводи з дротів діаметром 0,01-0,1 мм, виготовлені з танталу, золота, ніхром. Можливе точкове зварювання виробів з фольги з діаметром точки 0,5-0,9 мм. Лазерним зварюванням виконується герметичний шов катодів кінескопів. Катод являє собою трубку завдовжки 2 мм, діаметром 1,8 мм, товщиною стінки 0,04 мм. До трубки приварюється денце

					МР 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк. 8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

товщиною 0,12 мм, матеріал виробу - хромонікелевий сплав. Зварювання таких дрібних деталей можливе за рахунок високого ступеня фокусування променя і точного дозування енергії шляхом регулювання тривалості імпульсу в межах 10^{-2} - 10^{-7} с.

1.3. Зварювання газовим лазером

Більш потужними є газові лазери, в яких в якості активного тіла використовують суміш газів, зазвичай $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$. Схема газового лазера з подовжньою прокачуванням газу приведена на рисунку 1.4. Газ з балонів прокачується насосом через газорозрядну трубку. Для енергетичного збудження газу використовується електричний розряд між електродами. По торцях газорозрядної трубки розташовані дзеркала. Електроди підключені до джерела живлення. Лазер охолоджується водяною системою.

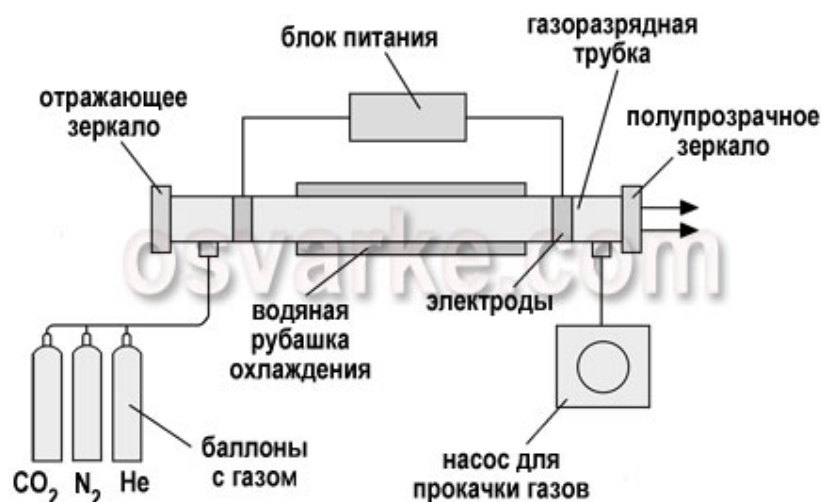


Рисунок 1.4 Газовий лазер з подовжнім прокачуванням газу

Недоліком лазерів з подовжнім прокачуванням газу є їх великі габаритні розміри. Більш компактні лазери з поперечним прокачуванням газу (рис. 1.5). Вони дозволяють досягти загальної потужності 20 кВт і більше.

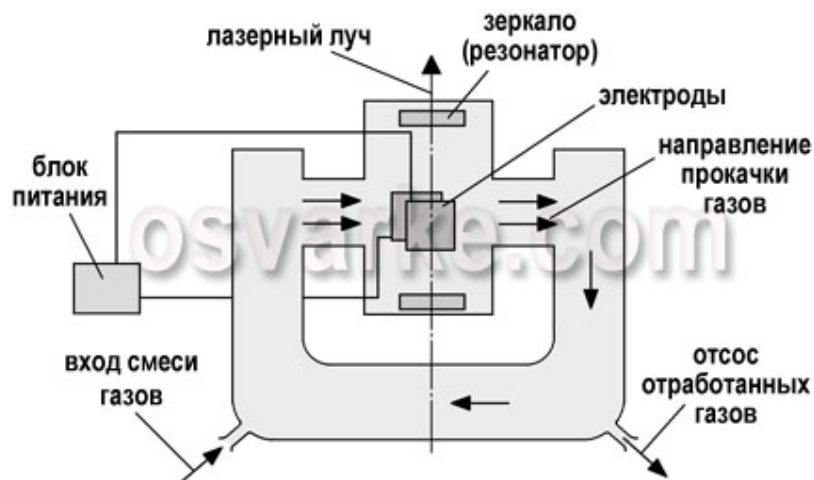


Рисунок.1.5 Газовий лазер з поперечним прокачуванням газу

Найбільш потужними є газодинамічні лазери (рис. 1.6).

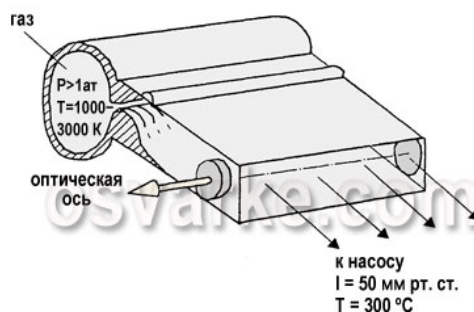


Рисунок.1.6 Газодинамічний лазер

Для роботи використовуються гази, нагріті до температури 1000-3000 К. Газ витікає з надзвуковою швидкістю через сопло Лавалю, в результаті чого відбувається його адіабатичне розширення і охолодження в зоні резонатора. При охолодженні збуджених молекул CO_2 відбувається перехід їх на більш низький енергетичний рівень з випусканням когерентного випромінювання. Для накачування може використовуватися інший лазер або інші потужні джерела енергії. Такий лазер потужністю $N = 100$ кВт дозволяє, наприклад, зварювати сталь товщиною 35 мм з дуже високою швидкістю, близько 200 м/год [25].

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4. Промислове застосування лазерного зварювання

З кінця 1970-х і 1980-х років в автомобільній промисловості почалося застосування CO₂-лазерного зварювання. Різні частини силових агрегатів, включаючи елементи коробки передач, ступиці і вали, були зварені CO₂-лазером (Petring, 2004). Висока продуктивність, низький приплив тепла і низький рівень деформацій є основними перевагами лазерного зварювання в порівнянні з іншими процесами. І до сих пір CO₂-лазери використовуються для цих завдань.

Лазерне зварювання широко впроваджена у виробництво таких частин кузова автомобіля, як двері, передні і бічні панелі, бічні балки і арки коліс. Плоскі металеві листи, що відрізняються товщиною, міцністю і різницею покриттів, з'єднують лазерним зварюванням перед формуванням і обрізанням. Композиція з варіації листових металів дозволяє знизити вагу автомобіля і зменшити кількість використовуваних компонентів. Як наслідок, загальна вартість виробництва знижується, і підвищується безпека експлуатації автомобіля за рахунок поліпшення управління енергією удару при аварії.

Ця техніка отримала індустріальне поширення з середини 1980-х років. Більшість зварювальних ліній для лінійної зварювання оснащені CO₂-лазерами потужністю 5-10 кВт. Nd: YAG, волоконні або дискові лазери використовуються головним чином для нелінійного зварювання. Застосування лазерного зварювання в кузовних цехах почалося в середині 1980-х. Тоді деякі автомобільні компанії встановили 5 кіловатні CO₂-лазери, щоб зварювати елементи кузова, готові до фарбування, наприклад, для приєднання даху до бічних рам. Проте, в кінці 1990-х років рівень використання CO₂-лазерів знизився. Це було пов'язано з установкою на конвеєрних лініях промислових роботів з Nd: YAG-лазерами, які були пристосовані для проведення тривимірного лазерного зварювання.

Використання дистанційного лазерного зварювання почалося з 2000-х років для виробництва компонентів кузова автомобіля. Лазерний модуль,

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

забезпечений швидкісними сканіруючими дзеркалами, формує лазерну пляму, яке швидко переміщається по оброблюваній поверхні, покриваючи необхідну область, і швидко зварює окремі ділянки.

У таких модулях встановлені лазери з високою якістю променя і великою фокусною відстанню, зазвичай більшим одного метра. Slab CO₂-лазери були вперше використані для отримання лазерних пучків високої якості. Їх основні переваги - зменшення тактового часу і висока продуктивність завдяки прогресу в розробці і створенні потужних дискових і волоконних лазерів з високою якістю пучка з'явилася нова система дистанційної зварювання як частини роботизованого зварювання. Використання волоконних і дискових лазерів робить дистанційне зварювання більш гнучким і швидким, завдяки цьому його використання розширюється.

В авіаційній промисловості CO₂-лазери почали використовувати для зварювання стрингера і обшивки фюзеляжу на панелях літаків на початку 2000. Це було досягнуто завдяки розвитку лазерних зварювальних модулів, а також завдяки створенню сплаву Al-Mg-Si-Cu. Замість звичайної клепки стрингери з'єднують з обшивкою шляхом одночасної лазерного зварювання з обох сторін. Щоб уникнути утворення гарячих тріщин, використовується зварювальний дріт Al-12% Si. Зниження ваги, висока продуктивність, поліпшення корозійної стійкості і хороші економічні характеристики є основними перевагами заміни традиційного процесу клепки лазерним зварюванням.

Першим застосуванням лазерного зварювання в суднобудуванні стало виробництво тришарових панелей на верфі Meyer Werft в середині 1990-х (Roland et al., 2004). Тоді проводилася зварювання плоских панелей до 10 мм в товщину до балок за допомогою CO₂-лазера потужністю 12 кВт. Із застосуванням нової технології були досягнуті високі показники: зниження ваги при високій міцності, підвищення твердості і зменшення рівня деформацій. Також лазерне зварювання успішно застосовується при зварюванні стільникових панелей і з'єднанні тонколистових конструкцій з масивними деталями (рис.1.7, рис.1.8).

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



Рисунок.1.7 Тонкостінна сотова панель

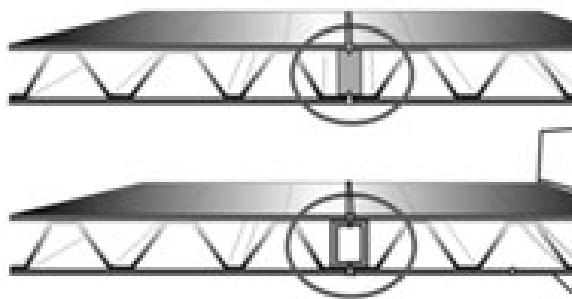


Рисунок.1.8 Сполучення тонкостінних елементів з масивними силовими елементами суднових конструкцій

У Європі в середині 1990-х років був розроблений ряд національних проектів з використанням основних принципів лазерного зварювання в середовищі CO₂. Це форсувало застосування лазерного зварювання в галузі суднобудування. Сварка довгих прямих стикових швів і кутове зварювання товстих сталевих пластин були впроваджені в компаніях Odense Steel Shipyard (Sellerup, 1999), Fincantieri (Manzon, 1998) і Blohm & Boss (Kahl, 1998) в кінці 1990-х років. Використовувана ними лінія складається з платформи, оснащеної потужними CO₂-лазерами від 12 до 18 кВт. Лінія включає в себе системи контролю та управління зі зворотним зв'язком, підготовку країв і систему обробки і систему подачі дроту. Найбільш привабливою перевагою установки лазера високої потужності є зменшення деформацій, це значно знижує загальні трудовитрати на додаткові операції правки. Поліпшення механічної точності дозволило автоматизувати виробничу лінію і досягти високого рівня продуктивності. У компанії Meyer Werft були встановлені чотири лазера GMA

гібридних зварювальних установки з кінця 1990-х до початку 2000-х років (Roland et al., 2004). І в даний час частка гібридних зварних швів на великому круїзному судні наближається до 50% від загальної довжини всіх швів. Завдяки гнучкості систем подачі волокна на деяких суднобудівних підприємствах були встановлені волоконні і дискові лазери. Проте, від CO₂-лазерів вважають за краще не відмовлятися, тому що вони забезпечують стабільність зварювального процесу. Ці лазери також встановлені на нових лініях.

З початку 1980-х років в металургії почали використовувати 5-10 кВт CO₂-лазери для зварювання листів гарячого або холодного прокату на лініях безперервного зварювання. Заміна стикового зварювання на лазерне зварювання привела до того, що якість сполучення аркушів було значно покращено. На початку 2000-х років для зварювання гарячих сталевих стрижнів товщиною 30 мм на безперервній лінії чистової прокатки були застосовані два 45 кВт CO₂-лазера.

На лінії чистової прокатки були застосовані два 45 кВт CO₂-лазера (Minamida, 2002). На початку 1980-х років для підвищення продуктивності CO₂-лазери стали використовувати для виготовлення зварних труб малого діаметра з нержавіючої сталі. І до сих пір в цій області застосовуються CO₂-лазери. В середині 1990-х років для виготовлення труб із середнім діаметром і товстостінних труб було застосовано зварювання CO₂-лазером потужністю 25 кВт в поєднанні з високочастотної індукційної котушкою підігріву (Hayashi et al., 1996, Ono et al., 2001).

Високопотужні CO₂-лазери виявилися затребуваними при виготовленні виробів на замовлення деяких хімічних заводів, наприклад, заводів з переробки нафти, огорож з товстих листів нержавіючої сталі, виготовлених за допомогою CO₂-лазера. Таврові профілі також можуть бути виготовлені за допомогою CO₂-лазерів, 25 мм стрінгер приварений до балки. Компоненти плазмового реактора, використовуваного для виробництва таких складних напівпровідникових матеріалів, як вуглецеві нанотрубки, виготовляються також методом лазерного зварювання в середовищі CO₂, тому що CO₂-лазерне

зварювання забезпечує низький рівень деформацій. З цієї ж причини зварювання за допомогою CO₂-лазерів є однією з технологічних операцій при виробництві конькової спортивного взуття.

1.5. Переваги та недоліки лазерного зварювання

Найважливішою перевагою лазерного зварювання твердотільними лазерами є можливість дуже точного дозування енергії, тому вдається забезпечити отримання якісних з'єднань при виготовленні дуже дрібних деталей. Для потужних газових лазерів перевагою є отримання великої глибини проплавлення при малій ширині шва. Це дозволяє зменшити зону термічного впливу, скоротити зварювальні деформації і напруження. Крім того, лазерне зварювання має ряд переваг, які не властивих іншим способам зварювання. Лазер може бути розташований на досить великій відстані від місця зварювання, що в ряді випадків дає суттєвий економічний ефект. Легкість керування лазерним променем за допомогою дзеркал і волоконної оптики дозволяє здійснювати зварювання у важкодоступних, що іноді знаходяться не в межах прямої видимості місцях. Можливе також лазерне зварювання декількох деталей від одного лазера розщепленим за допомогою призм променем.

До недоліків лазерного зварювання відносяться висока складність і вартість обладнання, низький ККД лазерів. Персонал повинен мати високу кваліфікацію. Необхідно використовувати платформи, стійкі до вібрації.

Незважаючи на те, що застосування лазерного зварювання дозволяє зменшити зварювальні деформації в порівнянні з дуговими способами зварювання, їх не вдається усунути повністю. При цьому для дугових способів зварювання проведені дослідження, що дозволяють оцінити рівень зварювальних деформацій ще на етапі проектування вузлів, в залежності від режимів зварювання. Однак для лазерного зварювання таких даних практично немає [23].

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

1.6. Методи вимірювання деформацій

При зварюванні металів в результаті нерівномірного нагрівання і розширення його виникають зварювальні напруження і деформації, які спотворюють проектну форму і розміри елементів, що зварюються і знижують якість зварної конструкції.

Залишкові напруження і пластичні деформації в металі знижують міцність, жорсткість і корозійну стійкість зварних конструкцій при їх експлуатації.

Для визначення напружень встановлюють залежність границі плинності і модуля пружності від температури нагріву. Однак при короткочасному нагріванні і підвищених швидкостях деформації така залежність є досить умовною і може бути використана лише для наближених розрахунків. Найбільший інтерес представляють експериментальні методи визначення зварювальних напружень і деформацій. До цих методів належать методи моделювання, методи визначення деформацій в процесі зварювання, а також методи визначення залишкових напружень і переміщень. Методи моделювання засновані на аналогії диференціальних рівнянь процесів і об'єднують всі електричні, гідравлічні і комплексні методи, а також прийоми моделювання, засновані на масштабній зміні моделі.

Методи моделювання, пов'язані з масштабною зміною розмірів елементів, що зварюються, дозволяють в лабораторних умовах відтворювати і досліджувати процеси утворення напружень і деформацій, які виникають під час зварювання металоконструкцій на будівельному майданчику.

Визначення деформацій в процесі зварювання виробляється в зонах високих температур і тому вимагає додаткових заходів при проведенні випробувань. В якості вимірювальних приладів використовують термостійкі електричні тензометри або механічні тензометри з охолоджуваними ніжками.

При випробуваннях, крім вимірювання деформацій металу, знаходять переміщення окремих точок щодо будь-якої точки, розташованої поза зоною значних переміщень, тобто. холодному металі елемента. Реєстрація переміщень

					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здійснюється механічними пристроями, а також з використанням електричних приладів. Замір зварювальних деформацій і переміщень виробляють в поздовжньому і в поперечному напрямках, а також з верхньої та нижньої сторони елементів, що зварюються.

Визначення залишкових напружень здійснюють фізичними і механічними методами. При використанні механічних методів для повного або часткового звільнення металу від напружень, що утворилися під час зварювання, зразки піддають розрізанні. Спосіб розрізання і вибір вимірюваної бази провадяться в залежності від очікуваного характеру розподілу залишкових напружень в елементах, що зварюють, виду вимірювання (одноосьових, двовісних і тривісних напружень) та інших факторів. Замір баз ведуть тензометрами з двох сторін зразка до і після розрізання металу.

Тензометри можуть бути електричні та механічні, хоча і ті, і інші не позбавлені деяких недоліків. Електричні (дротові) тензометри незнімні і вимагають захисту від механічних пошкоджень, а механічні - володіють недостатньою точністю.

Деформометр зазвичай складається з двох ніжок - шарнірно закріпленої і нерухомою, штока і індикатора годинного типу. Прилад встановлюють на метал, в якому заздалегідь роблять базові конусні поглиблення для фіксації ніжок приладу, після чого шток приладу переміщують гвинтом до упору на шарнірно закріпленої ніжці і проводять виміри.

Вимірювання повторюють кілька разів до отримання рівнозначних відкликів. Двовісні залишкові напруження визначають на пластинах або на смужках, отриманих після розрізання зразка. Вимірювання напружень здійснюють тензометрами так само, як і при одноосьових з двох сторін пластини. [28]

Висновки, постановка мети і завдання досліджень

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

1. Для лазерного зварювання зазвичай використовуються наступні типи лазерів: твердотільні; газові - з поздовжньою або поперечною прокачкою газу; газодинамічні.

2. Найважливішою перевагою лазерного зварювання твердотільними лазерами є можливість дуже точного дозування енергії, тому вдається забезпечити отримання якісних з'єднань при виготовленні дуже дрібних деталей.

3. Для потужних газових лазерів перевагою є отримання великої глибини проплавлення при малій ширині шва. Це дозволяє зменшити зону термічного впливу, скоротити зварювальні деформації і напруження.

4. До недоліків лазерного зварювання відносяться висока складність і вартість обладнання, низький ККД лазерів. Персонал повинен мати високу кваліфікацію. Необхідно використовувати платформи, стійкі до вібрації.

5. Незважаючи на те, що застосування лазерного зварювання дозволяє зменшити зварювальні деформації в порівнянні з дуговими способами зварювання, їх не вдається усунути повністю. При цьому для дугових способів зварювання проведені дослідження, що дозволяють оцінити рівень зварювальних деформацій ще на етапі проектування вузлів, в залежності від режимів зварювання. Однак для лазерного зварювання таких даних практично немає.

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 зразок для проведення експериментального дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на кутові деформації при лазерному зварюванні таврових з'єднань.

3. Розробити та виготовити необхідну оснастку для проведення експерименту.

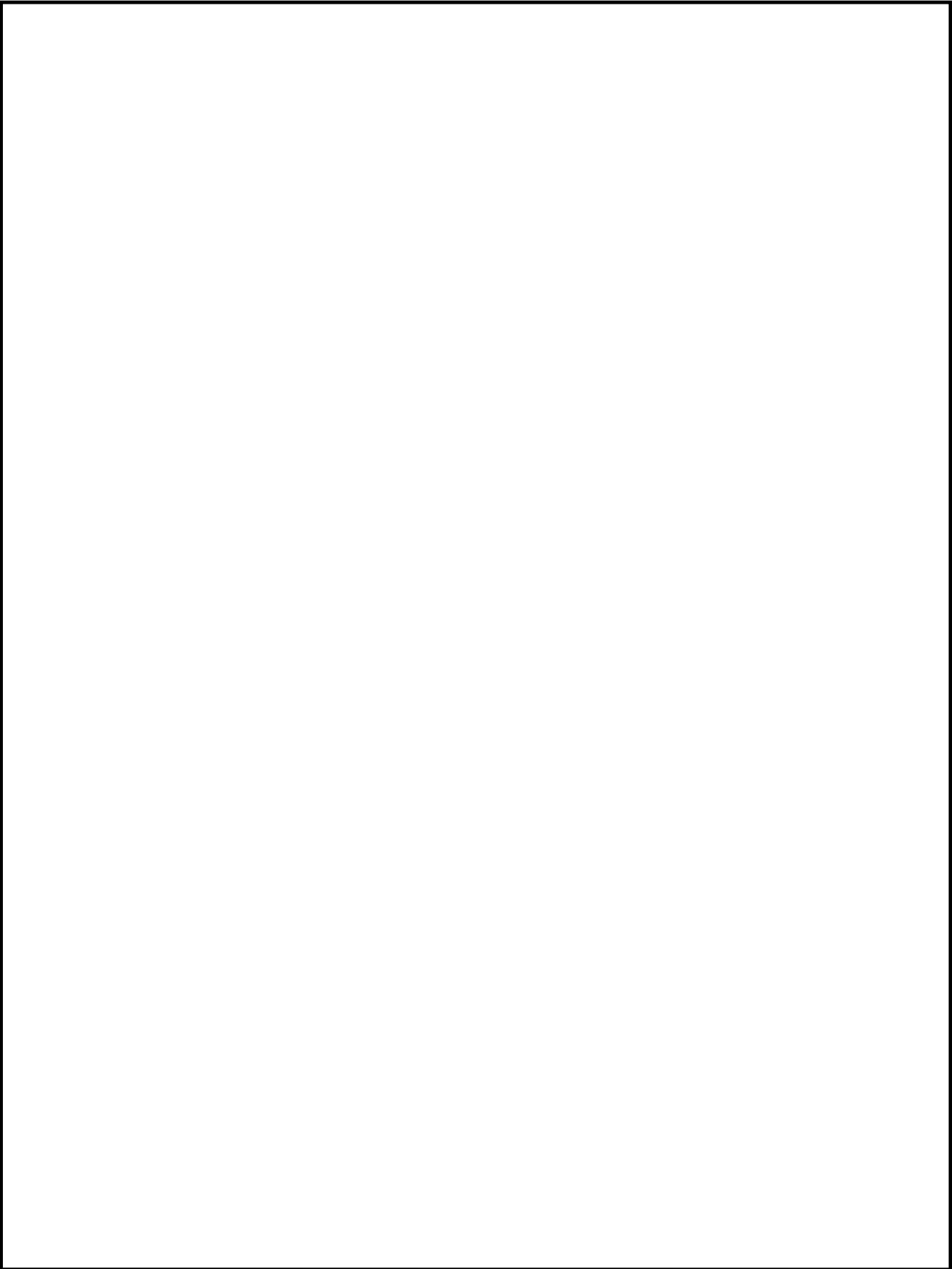
					MP 8.132.6121м.03.05.01. ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Провести дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на стрілку прогину і кутові деформації при лазерному зварюванні таврових з'єднань внахлест.

5. Встановити кутові деформації по довжині зразка та провести розрахунки середньоквадратичного відхилення і похибки вимірювань.

6. Дослідити макрошліфи зварних з'єднань.

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



					МР 8.131.6121м.03.05.02. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Фесенко С.С..				Методика проведення експерименту	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Матвієнко М.В.						20	
Рецензент						ХННІ НУК 20		
Н. Контр.								
Зав. каф.	Єрмолаєв Г.В..							

2. Методика проведення експерименту

2.1. Планування експерименту

Мета експерименту визначає вибір методу. Для того щоб експеримент був дійсно перспективним необхідно вибрати відповідний метод дослідження. Неправильний вибір призводить до отримання надлишкової або недостатньої інформації, подорожчання і ускладнення експерименту, а іноді і до помилкових результатів. Наприклад, задачі про поширення пластичних деформацій, форми і розміри фактичного осередку деформацій, нерівномірності їх поширення і тому подібне, вирішуються із застосуванням методу безпосереднього визначення деформації (поляризаційно-оптичним, тензометрії).

Експериментальні методи дозволяють отримати інформацію, як в дискретної формі, так і у вигляді безперервних полів. Дослідні дані в дискретної формі реєструються з великою точністю, але не дають наочного уявлення про розподіл шуканих величин. Тому необхідно проводити велику кількість вимірювань, а значить, такі методи доцільно застосовувати в разі прецизійних одиничних досліджень. При постановці масового експерименту бажано мати дослідні дані у вигляді безперервних полів, так як вони дозволяють провести попередній якісний аналіз процесу, не вдаючись до обробки вихідних даних [17-22].

Більшість досліджень пов'язано з експериментом. Експеримент може бути фізичним, психологічним або модельним. Експеримент може проводитися безпосередньо на об'єкті або на його моделі. Модель відрізняється від об'єкта не тільки масштабом, а іноді природою. Якщо модель досить точно описує об'єкт, то експеримент на об'єкті може бути перенесений на модель.

Для опису поняття "об'єкт дослідження" можна використовувати уявлення про кібернетичну систему, яка носить назву чорний ящик. Таким чином, будь-який об'єкт дослідження можна представити у вигляді "чорного ящика" з певною кількістю входів і виходів. На рис.2.1 й рис.2.2 показані структурні схеми об'єкта дослідження з адитивною помилкою ϵ .

					МР 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1 "Чорний ящик" Модель досліджуваного процесу

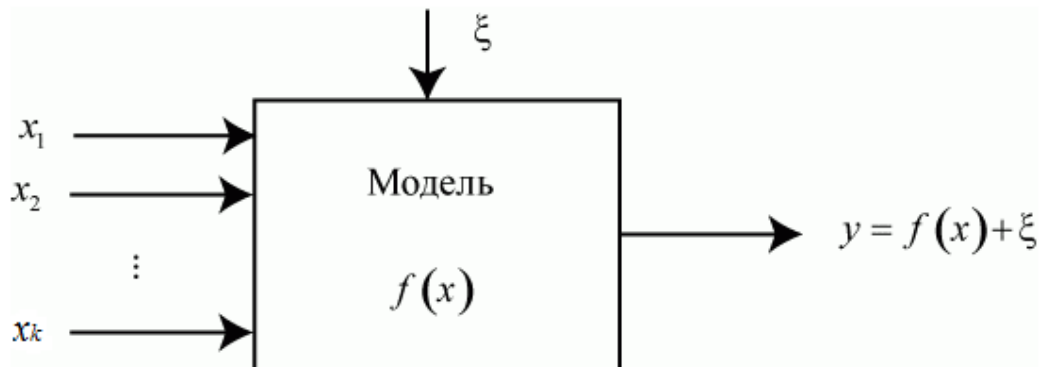


Рисунок 2.2 Кібернетичне уявлення експерименту

Стрілки праворуч зображують чисельні характеристики цілей дослідження і називаються вихідними параметрами (y) або параметрами оптимізації. Їх називають також критерій оптимізації, цільова функція, вихід "чорного ящика" і т.д.

Для проведення експерименту необхідно впливати на поведінку чорного ящика. Всі способи впливу позначаються через x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ і називаються вхідними параметрами або факторами (керуючі параметри). Їх називають також незалежними змінними і входами "чорного ящика".

Кожен фактор може приймати в досвіді одне з декількох значень, і такі значення називаються рівнями. Фіксований набір рівнів і факторів визначає одне з можливих станів чорного ящика, одночасно вони є умовами проведення одного з можливих дослідів. Результати експерименту використовуються для отримання математичної моделі об'єкта дослідження. Використання для об'єкта всіх можливих дослідів призводить до абсурдно великій кількості експериментів. У зв'язку з цим експеримент необхідно планувати.

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. При виборі вимірювальних приладів необхідно враховувати наступні фактори:

- Точність вимірювань, діапазон значень, характер і форма отримання досвідчених даних;
- При виконанні вимірювань можуть виникати помилки, внаслідок додаткових навантажень, створюваних вимірювальними приладами: електричних, теплових і. т.д .;
- Слід віддавати перевагу приладам, що серійно випускаються, періодично порівнюючи вимірювання з еталонами, для виявлення систематичних помилок, пов'язаних з несправністю приладів, відхиленнями і т.д .;
- Завжди перед вимірами уважно уточнити клас точності приладів або іншими словами похибку вимірювання;
- Не рекомендується застосовувати прилади з різною точністю;
- Будь-який вимір не можна виконати абсолютно точно, а похибку вимірювання не можна зробити менше похибки (точності) вимірювального приладу.

Послідовність проведення експерименту. Перед проведенням експерименту необхідно провести інформаційний пошук оглядових матеріалів по шуканій проблемі. Далі необхідно визначити обсяг експериментальної роботи. Дослідник завжди вирішує проблему отримання максимально достовірних даних з мінімальними економічними і тимчасовими витратами, тобто задачу оптимізації експерименту. Необхідно, щоб число дослідних даних

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не було недостатнім або надмірно великим. 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.

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 вимірювальної операції наступає інша стадія експериментальної роботи - математична обробка результатів вимірювань. Всі числа, одержувані при вимірах, є наближеними. Точність вимірювань не можна підвищити математичними діями над отриманими результатами вимірювань. Облік великого числа значущих цифр без оцінки їх достовірності ускладнює обчислення і виявляється марним. Як зазначалося вище, ніяке вимірювання не можна виконати абсолютно точно [17-22]. Обмежені можливості вимірювальних обладнання призводять до приладових помилок, недосконалість органів почуттів, неоднорідність вимірювальних об'єктів, зовнішні і внутрішні чинники, що впливають на об'єкти й тощо. - ось основні причини недосконалості абсолютного значення вимірюваної величини. Залежно від причин, що породжують помилки, розрізняють приладові систематичні, випадкові помилки. До них не відносять грубі помилки, викликані неухважністю при знятті показань приладів, неправильним записом вимірюваних даних,

					МР 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

помилками при обчисленнях і т. п. Такі помилки не підкоряються будь-якого закону і усуваються при проміжній оцінці результатів вимірювань. Приладні помилки обумовлюються конструктивними особливостями вимірювальних приладів і не усуваються. Приладову помилку іноді називають точністю вимірювального приладу.

Систематичні помилки виникають при багаторазовому повторенні вимірювань і обумовлюються несправністю вимірювальних приладів, неточністю методів вимірювань і використанням для розрахунків неточних даних. Для усунення систематичної помилки, викликані несправністю приладу, необхідно ввести відповідні поправки, отримані при порівнянні показань несправного і справного приладів. Систематична помилка завжди збільшує або зменшує результат вимірювань на одну і ту ж величину. Отже, навіть повний збіг ряду вимірюваних величин не є ознакою відсутності систематичної помилки - її не можна виявити при повторних вимірах. Для усунення систематичних помилок потрібні ретельна перевірка всіх вимірювальних приладів і ретельний аналіз методів вимірювань.

Випадкові помилки виникають в будь-якому ретельно спланованому експерименті від сукупної дії багатьох чинників і залишаються при усуненні грубих і систематичних помилок. Внаслідок непередбачуваних обставин випадкові помилки можуть як збільшувати, так і зменшувати значення вимірюваної величини. Випадкові помилки підкоряються законам теорії ймовірностей, встановленим для випадкових явищ. За допомогою методів теорії ймовірностей можна зменшити вплив випадкових помилок на результат експерименту. Широко відомий нормальний закон розподілу випадкових помилок (закон Гаусса - нормальний закон розподілу), з якого випливають важливі висновки:

- малі по модулю помилки зустрічаються частіше;
- рівні по модулю випадкові помилки різних знаків зустрічаються однаково часто;
- зі збільшенням точності (зменшенням інтервалу розкиду виміряних значень) щільність випадкових помилок зростає.

					МР 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Теорія випадкових помилок дозволяє визначити найбільш імовірні значення вимірюваних величин і можливі відхилення від них. Однак слід зазначити, що висновки теорії ймовірностей справедливі тільки для досить великого числа випадкових подій. Тому, строго кажучи, застосування теорії випадкових помилок доцільно тільки до порівняно великого числа вимірювань. Слід пам'ятати, що збільшення числа вимірювань зменшує вплив випадкових помилок. У кожному конкретному випадку для отримання заданої точності встановлюється необхідне число вимірювань. З урахуванням вище наведених похибок експерименту розраховуються абсолютні, відносні і середньоквадратичні похибки.

Результати зазвичай представляють у вигляді емпіричних формул, таблиць або графіків. Таблична форма подання дозволяє в компактному вигляді записати велику кількість даних. Ця форма менш наочна в порівнянні, наприклад, з графічною, проте більшої точності. При складанні таблиць необхідно звернути увагу на значущі цифри, так як вони не несуть інформації про точність вимірюваних величин. Тому необхідно обмежувати кількість значущих цифр. Графічний матеріал володіє наочністю. Однак отримані дискретні експериментальні дані вимагають додаткової обробки. У цьому випадку застосовують різні методи апроксимації.

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 [17-22].

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 :

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

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:

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

					МР 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Математичне планування експерименту. Одне з основних завдань планування експерименту - визначення числа експериментів, необхідних для встановлення залежності між досліджуваними змінними величинами. Змінні параметри, що змінюються в процесі випробувань, називають факторами, а параметри, які вивчаються або оптимізуються - виходами або відгуками системи. Найпростіший метод планування експерименту - це проведення випробувань при різних поєднаннях факторів (спосіб перебору), проте, вже при двократному експерименті для отримання повної картини необхідно проведення великого числа випробувань. Інший спосіб: змінюється тільки один фактор (інші постійні) знаходять приватний екстремум з даного фактору, потім повторюють процедуру з іншими факторами. Така схема значно скорочує кількість експериментів, але не завжди оптимальна. Тому застосовують методи математичного планування експерименту, де передбачається, що існує деякий аналітичний зв'язок між факторами і відгуком процесу, і потрібно вибрати мінімальне число умов проведення експериментів, що дозволяють знайти область оптимальних значень параметрів. Або іншими словами, знайти наближену залежність вихідного параметра від факторів.

Планування однофакторного експерименту. У класичній теорії експерименту розглядаються плани, складені з метою проведення дисперсійного аналізу певного виду. Тому природно, що вихідною посилкою служить мета дослідження. Виходячи з неї, формується уявлення про вигляді передбачуваної математичної моделі явища, зокрема досліджуваних факторів і їх рівнях.

Найпростішим в цьому контексті слід вважати однофакторний експеримент, який покликаний встановити факт залежності результату експерименту від значення досліджуваного єдиного чинника, тобто вплив інших факторів передбачається несуттєвим. Розглянемо докладно послідовність дій для побудови плану такого експерименту на конкретному прикладі.

У нашому випадку мається на увазі існування такого єдиного вимірною параметра Y (стрілка прогину), який характеризує рівень кутових деформацій і який може залежати від деяких вхідних факторів X . Так як вимірювальна

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

апаратура має похибку, то для дослідження впливу потужності лазерного променя при лазерному зварюванні на параметр Y необхідно виробляти багаторазові рандомізовані його виміри. Задавшись певними вимогами до достовірності висновків можна визначити необхідний обсяг експерименту.

Планування, проведення та обробка результатів ПФЕ складаються з наступних обов'язкових етапів:

1. кодування факторів;
2. складання плану матриці експерименту;
3. реалізація плану експерименту;
4. перевірка відтворюваності дослідів;
5. оцінка значимості коефіцієнтів регресії;
6. перевірка адекватності лінійної моделі.

Кодування факторів необхідно для перекладу натуральних факторів в безрозмірні величини, щоб мати можливість побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту.

Після вибору факторів для кожного з них встановлюється основний рівень (тобто вихідне значення) і інтервал варіювання (зміни). Додаток інтервалу варіювання до основного рівню дає верхній, а віднімання - нижній рівень фактора. Зручно, щоб верхній рівень відповідав $+1$, нижній -1 , а основний 0 .

У нашому випадку стоїть завдання дослідити вплив потужності лазерного променя на стрілку прогину при постійній швидкості зварювання. Попередніми дослідженнями було встановлено діапазон потужності в якому виходять якісні зварні з'єднання при швидкості $V_{\text{св}} = 30 \text{ мм / с}$. Цей діапазон знаходиться в інтервалі $P = 3750 \dots 4500 \text{ Вт}$.

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.

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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.

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

Нелінійні регресії діляться на два класи: регресії, нелінійні щодо включених в аналіз пояснюючих змінних, але лінійні по оцінюваним параметрам, 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 y від теоретичних y_x мінімальна.

2.3. Розробка зразка для проведення експерименту

Експериментальне дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на стрілку прогину при лазерному зварюванні внахлест таврових з'єднань будемо здійснювати на лабораторній роботизированій установці, зображеній на рис.2.3.

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.3 Роботизована установка для лазерного зварювання

Зразок для проведення експерименту (рис.2.4) розроблявся виходячи з наявного в наявності обладнання та допоміжних пристосувань. Так як, за методикою вимірювання стрілки прогину необхідно на одній базі проводити вимірювання до зварювання і після зварювання, то для полегшення установки деформометра в одному положенні з одного боку зразка висвердлюється отвори діаметром 1 мм, а з іншого боку наносили лінію. Зразки виготовлялися з матеріалу Ст3, товщиною 3 мм. Габаритні розміри: 150x150x3 мм (полка), і 150x60x3 мм стінка зразка.

					МР 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

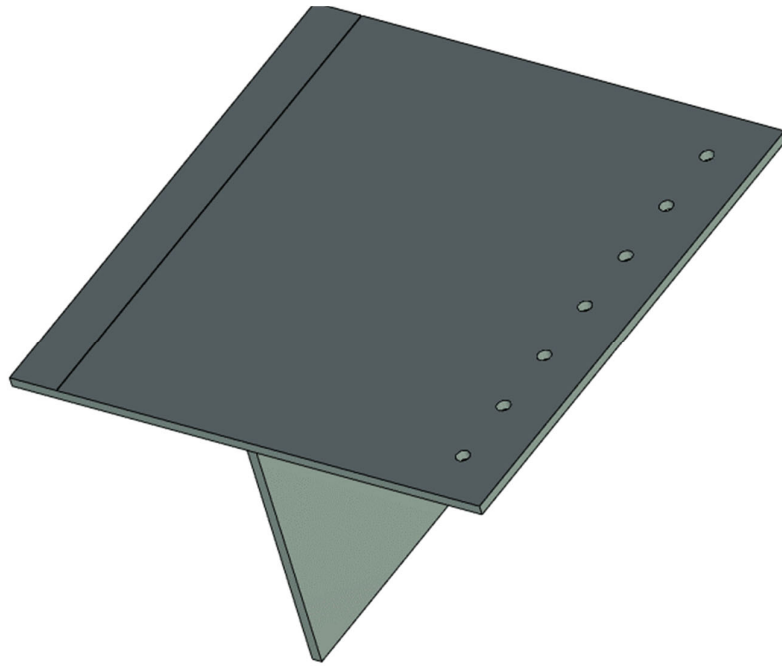


Рисунок 2.4. Зразок для дослідження кутових деформацій

Стрілка прогину замірялася до зварювання і після зварювання приладом (деформометром), зображеним на рис.2.5. Деформометр має спеціальні конусні ніжки. Цими ніжками прилад встановлюють в спеціально просвердлені на металевих конструкціях отвори діаметром близько 1 мм і глибиною 2...3 мм.

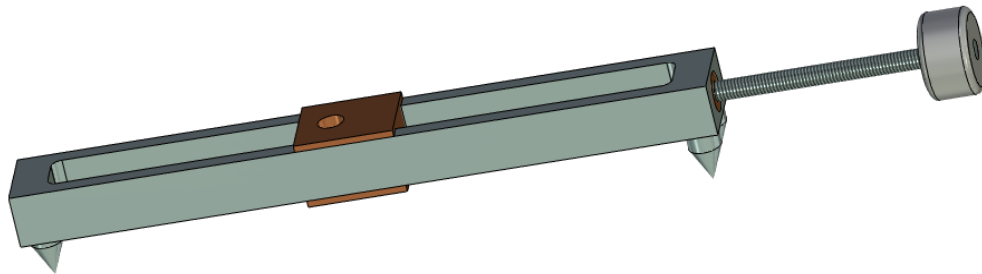


Рисунок 2.5. – Деформометр для вимірювання стрілки прогину

З кожного зразка стрілка прогину знімалися в 7 перетинах. Схема зняття даних показана на рис.2.6. База виміру деформацій становила 120 мм. Стрілка прогину вздовж шва знімалася через кожні 20 мм.

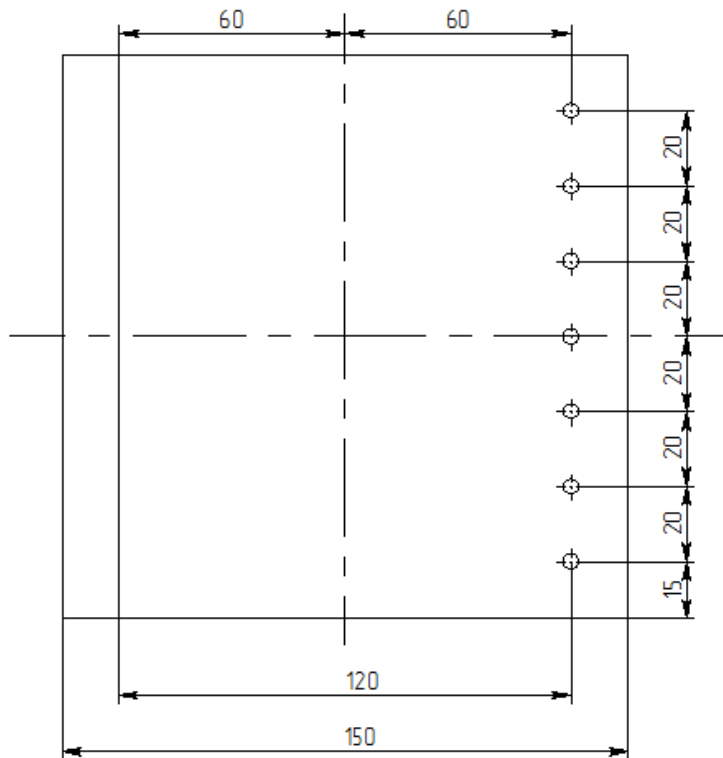


Рисунок 2.6 Схема виміру кутових деформацій

Перед першим виміром стрілки прогину полку зразка прихоплюємо до стінки в спеціальному кондукторі (рис.2.7).



Рисунок 2.7 Кондуктор для виконання прихоплювань

Після виконання прихоплювань і початкового виміру стрілки прогину виконувалася приварювання полки до стінки у вільному стані (рис.2.8).

Вимірювання стрілки прогину вироблялося електронним індикатором годинникового типу (рис.2.9.). Діапазон вимірювання обраного індикатора 0 ... 12,7 мм. Ціна ділення 0,01 мм.

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.

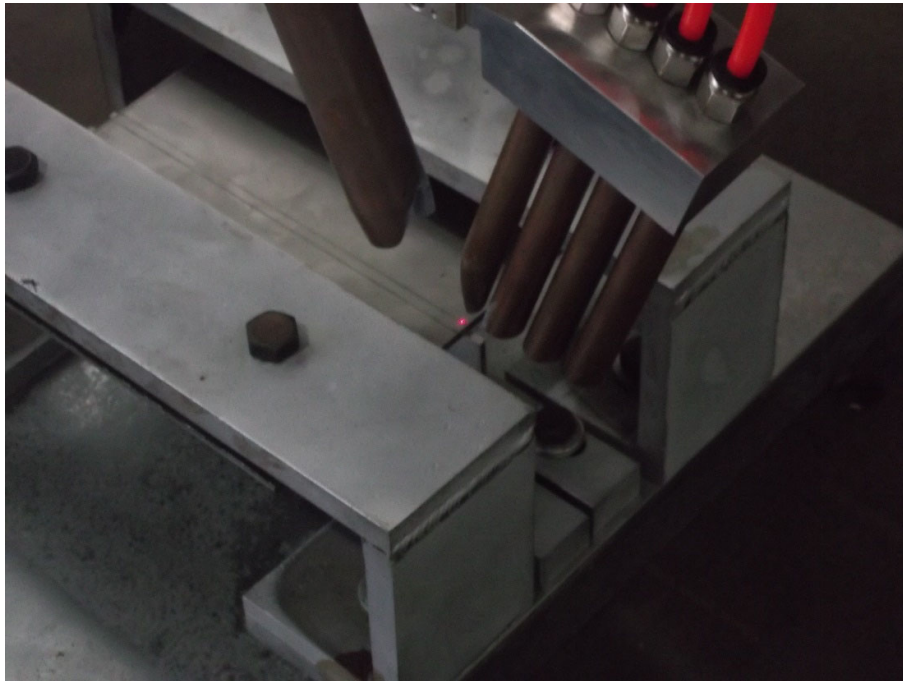


Рисунок 2.8 Приварювання полки до стінки



Рисунок 2.9 Зовнішній вигляд електронного індикатора годинникового типу

					MP 8.132.6121м.03.05.02. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 – середньквдратичне стандартне відхилення за формулою (2.3).

$$w = \frac{s}{x_{\text{ср}}}$$

При нормальному законі розподілу $x_{\text{ср}}$ знаходимо за формулою (2.1).

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

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

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.

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

Таблиця 2.1 - Таблиця для запису експериментальних даних

База N_i	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. Проведено планування експерименту, розраховане мінімальна кількість вимірювань для отримання даних з довірчою ймовірністю $\alpha=0,95$.
2. Розроблено зразок для проведення експериментального дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на кутові деформації при лазерному зварюванні таврових з'єднань.
3. Розроблено та виготовлено необхідну оснастку для проведення експерименту.

					МР 8.131.6121м.03.05.02. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Фесенко С.С.			Проведення експерименту і обробка результатів	Літ.	Арк.	Аркуші
Перевірів		Матвієнко М.В.					37	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.								
Зав. каф.		Єрмолаєв Г.В.						

3. Проведення експерименту і обробка результатів

3.1. Зварювання експериментальних зразків

Для проведення експерименту по встановленню впливу потужності лазера на кутові деформації таврових зварних з'єднань виконували зварювання експериментальних зразків на обладнанні, показаному на рис.3.1. Зварювання виконували при зміні потужності лазера $P = 3750 \dots 4500$ Вт з кроком 250 Вт на постійній швидкості $V_{зв} = 30$ мм / с.



Рисунок 3.1. Устаткування для проведення лазерного зварювання

Попередньо, перед проведенням зварювання, знімалася стрілка прогину в перетинах на рис. 2.6. У тих же перетинах знімалася стрілка прогину після проведення зварювання. Кутова деформація розраховувалася за формулою 2.8. Результати вимірювань наведені в таблицях 3.1-3.4.

					MP 8.132.6121м.03.05.03. ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 проведемо оцінювання випадкових помилок окремих вимірювань оцінюючи їх відхилення середньоквадратичного стандартного відхилень і помилку вимірювання Δx табл.3.5–3.8.

Таблиця 3.5. Результати розрахунку середньоквадратичного відхилення і помилки виміру при $P=3750$ Вт, $V_{\text{св}}=30$ 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, $V_{\text{св}}=30$ 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.

База N_i	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.

База N_i 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 побудовані графіки залежності кутової деформації від довжини зразка (рис.3.2).

Аналіз рис.3.2 показав, що при видаленні від краю зразка кутова деформація збільшується і з відстані 75 мм стабілізується, що відповідає класичній теорії кутових деформацій при дугового зварювання.

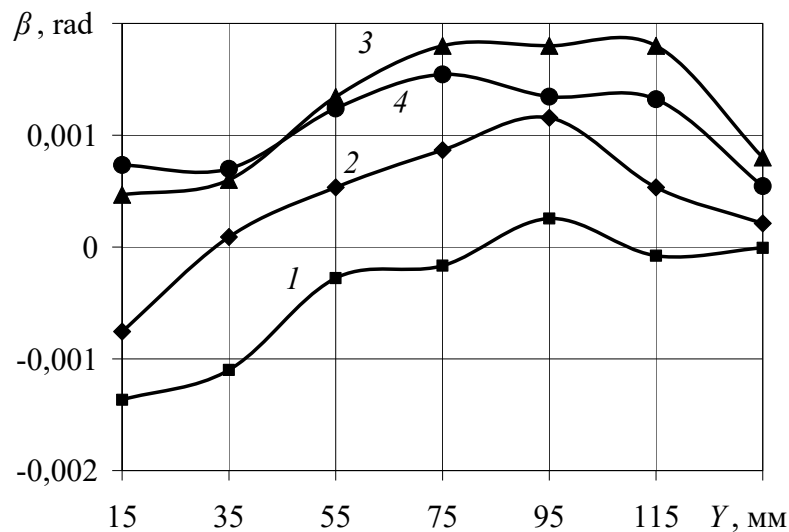


Рисунок 3.2 Графік залежності кутової деформації по довжині зразка при різних потужностях лазера, $P = 3750$ Вт (1), $P = 4000$ Вт (2), $P = 4250$ Вт (3), $P = 4500$ Вт (4),

Зі збільшенням потужності лазерного випромінювання з $P = 3750$ Вт до $P = 4250$ Вт кутова деформація зростає, а при подальшому збільшенні потужності відбувається зменшення кутових деформацій.

Всі дані добре корелюють між собою. Надалі при аналізі впливу параметрів лазерного зварювання на кутові деформації будемо брати кутові деформації на базі 75 мм (табл.3.5.).

Для аналізу впливу потужності лазерного випромінювання на стрілку прогину і кутові деформації побудований графіки залежності стрілки прогину і кутових деформацій від потужності лазерного випромінювання в перерізі $Y = 75$ мм рис.3.3.

З графіка видно, що при збільшенні потужності лазерного випромінювання до 4250 Вт стрілка прогину лінійно зростає. При подальшому зростанні потужності лазерного випромінювання стрілка прогину стабілізується і її рівень не зростає.

При зварюванні відбувається поздовжня і поперечна усадки. Якщо центр ваги поперечного перерізу шва не збігається з центром ваги перерізу

зварюваного елемента, то в результаті поперечної усадки виникає викривлення листів в сторону більшого обсягу наплавленого металу - кутові деформації.

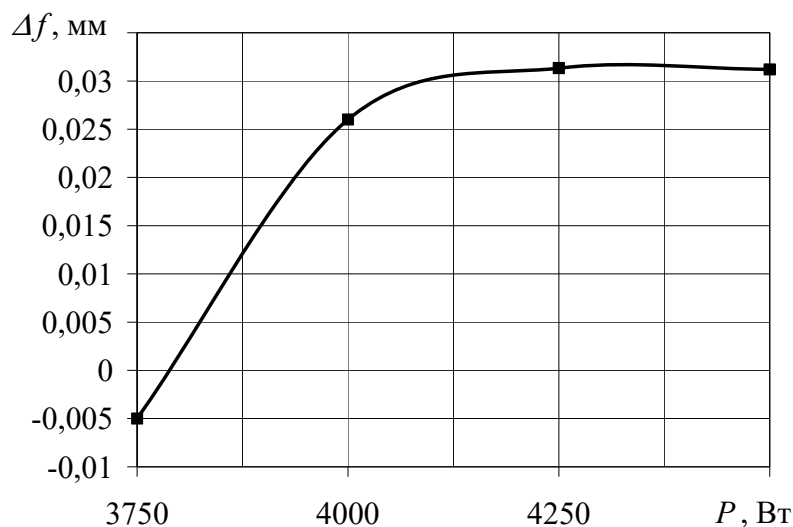


Рисунок 3.3. Залежність стрілки прогину від потужності лазерного випромінювання в перетині $Y=75$ мм

Величина деформації і пов'язаних з нею напружень залежить від величини зони нагріву. Чим більший обсяг металу нагрівається, тим сильніше будуть деформації. Тому різні способи зварювання дають різну величину деформацій.

3.2. Вплив режимів на величину зони нагріву

Для визначення впливу режимів лазерного зварювання на величину зони нагріву проводили дослідження макроструктури зварних з'єднань. З кожного зразка вирізувалося три макрошліфа (рис.3.4).

Аналіз макрошліфів показав, що зварний шов умовно можна розділити на дві зони: трапецеїдальну і прямокутну (рис.3.9). Основними параметрами шва є висота трапецеїдальної частини h , висота прямокутної частини h_1 , ширина шва e й ширина прямокутної частини e_1 . Зі збільшенням потужності лазера збільшується трапецеїдальна зона.

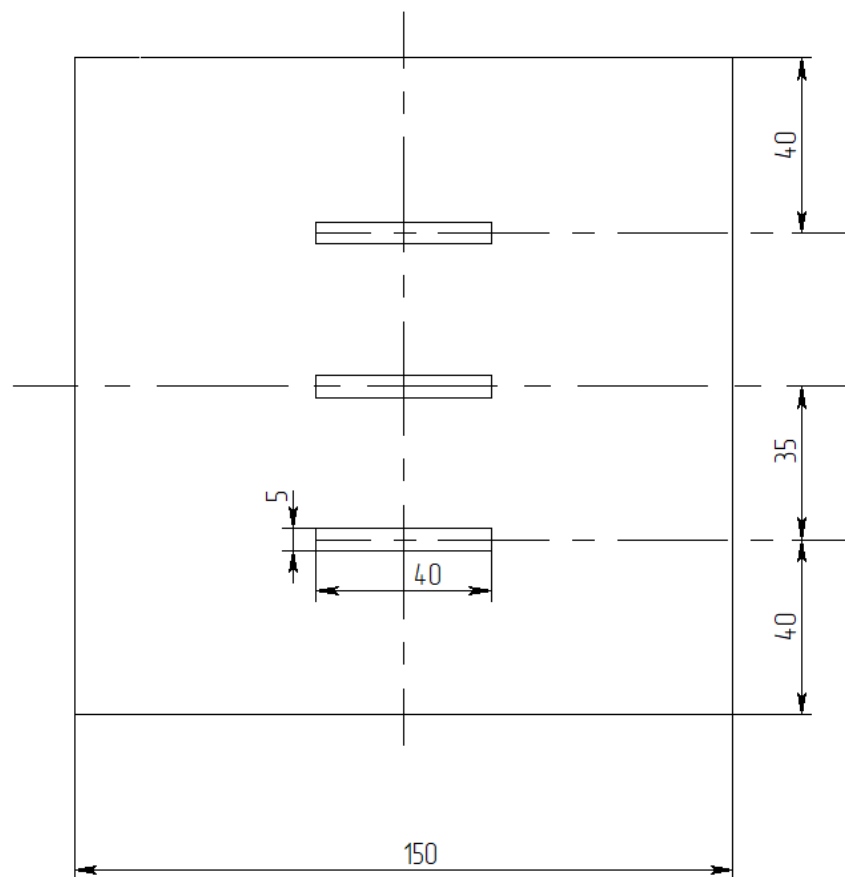


Рисунок 3.4 Схема вирізки макрошліфів

Зовнішній вигляд макрошліфів показаний на рис.3.5–3.8.

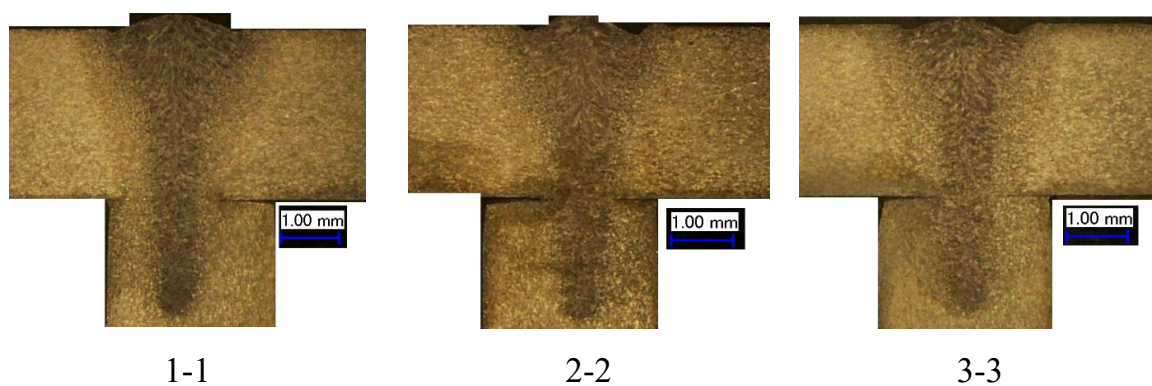
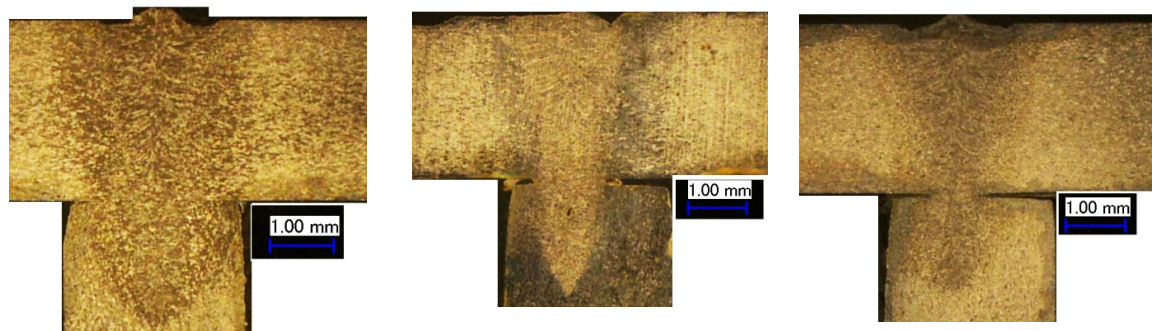


Рисунок 3.5 Макрошліфи з'єднання при $P=3750$ Вт

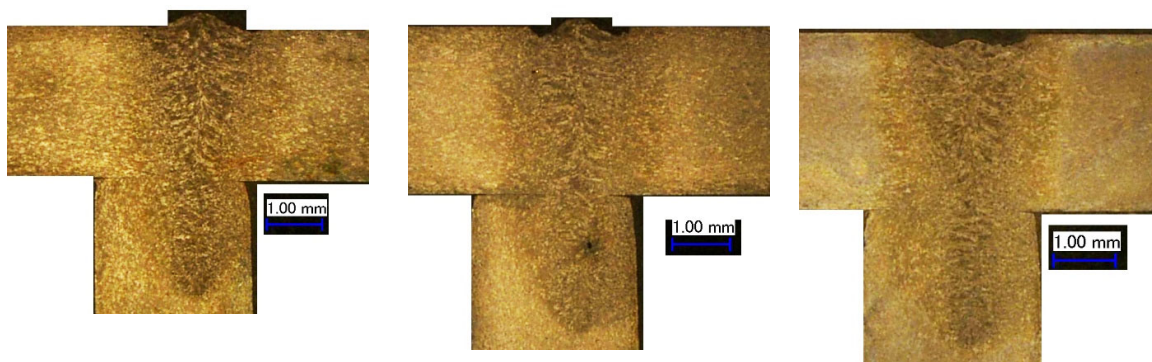


1-1

2-2

3-3

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

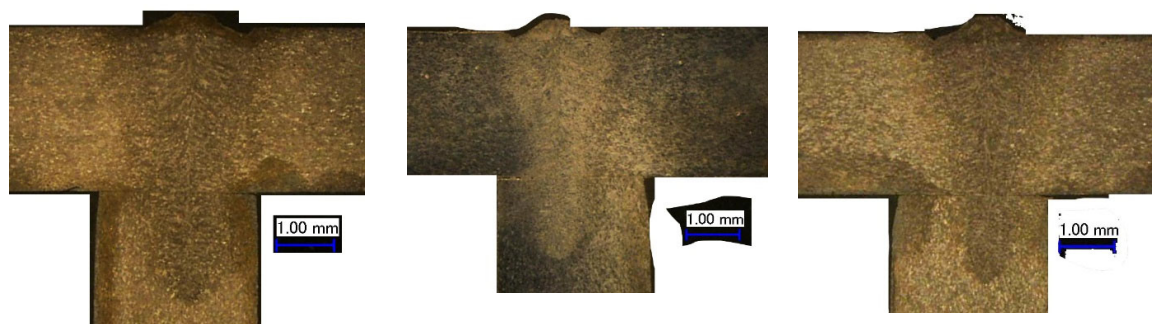


1-1

2-2

3-3

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



1-1

2-2

3-3

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

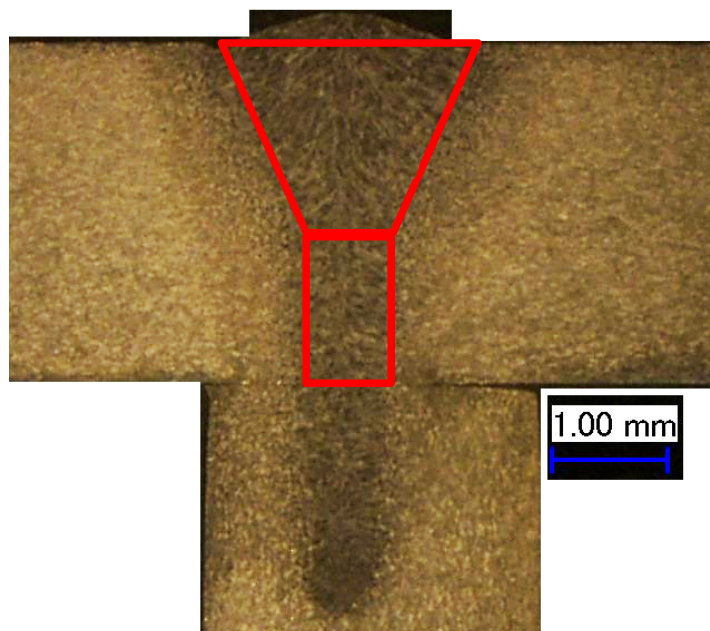


Рисунок 3.9 Основні зони зварного шва

Зазначені параметри (h , h_l , e , e_l) знімалися з кожного мікрошліфа. Кількість повторень для кожного макрошліфов від 8 до 30 в залежності від якості шліфа. Після вимірювання зазначених величин (h , h_l , e , e_l) розраховували середнє значення (arithmetic mean) вимірюваної величини за формулою 2.1. Середньоквадратичне відхилення sn (Sample Standard Deviation) розраховували за формулою 2.3. Середню похибку вибірки (середня квадратична похибка середнього арифметичного) (m) визначали за формулою 2.5.

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

Довірчий інтервал визначали за формулою 2.6. відносну помилку $\Delta, \%$ розраховували за формулою 2.7.

Результати вимірювань занесені в таблиці 3.9-3.12.

Аналіз результатів вимірювання параметрів швів показує, що середня похибка вимірювання знаходиться в районі 5%. Більш висока похибка від 8% до 13%, для деяких перетинів, пояснюється низькою якістю макрошліфів.

Таблиця 3.9. - Геометричні розміри зварювального шва при Р=3750 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	2,45	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
Δ, %	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_I	h	h_I	e	e_I	h	h_I	e	e_I	h	h_I
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 P=4250 Вт.

<i>n</i>	<i>Перетин 1–1</i>				<i>Перетин 1–2</i>				<i>Перетин 1–3</i>			
	<i>e</i>	<i>e_l</i>	<i>h</i>	<i>h_l</i>	<i>e</i>	<i>e_l</i>	<i>h</i>	<i>h_l</i>	<i>e</i>	<i>e_l</i>	<i>h</i>	<i>h_l</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

Продовження таблиці 3.11

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 P=4500 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	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

Продовження таблиці 3.12

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_I , e , e_I) 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_I	h	h_I
$I-I$	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_I	h	h_I
$I-I$	2,14	0,94	1,88	1,12
$I-2$	2,28	0,99	1,70	1,30
$I-3$	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

Продовження таблиці 3.14

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.

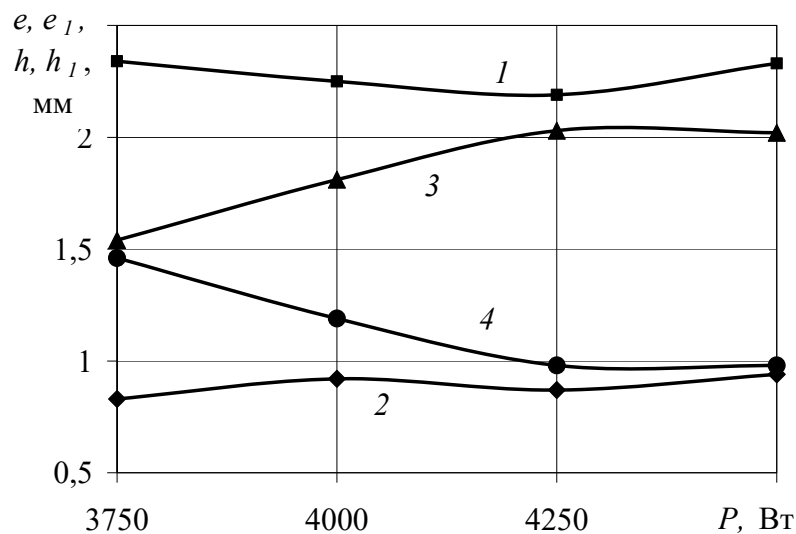


Рисунок 3.10 Залежність параметрів шва e (1), e_1 (2), h (3), h_1 (4) від потужності лазерного випромінювання

Аналіз рисунка 3.10 показує, що при збільшенні потужності лазерного випромінювання до 4250 Вт висота трапецеїдальної частини шва h лінійно зростає від 1,55 до 2,00 мм, а при подальшому збільшенні потужності до 4500 Вт практично не змінюється. Висота прямокутної частини h_1 при збільшенні потужності до 4250 Вт лінійно зменшується від 1,48 мм до 1,00 мм, при подальшому збільшенні потужності лазерного випромінювання практично не змінюється. Ширина прямокутної частини e_1 при збільшенні потужності лазерного випромінювання практично не змінюється і лежить в межах 0,85-0,94 мм. Однак ширина трапецеїдальної частини e при збільшенні потужності до 4250 Вт незначно зменшується від 2,35 мм до 2,20 мм, а в подальшому незначно збільшується до значення 2,33 мм.

Висновки

1. Проведено дослідження впливу потужності лазерного випромінювання на стрілку прогину і кутові деформації при лазерному зварюванні таврових

з'єднань внахлест. Дослідження проводилися при зміні потужності від 3750 ... 4500 Вт.

2. Встановлено, що кутові деформації по довжині зразка, спочатку зростають, а потім стабілізуються. Проведено розрахунки середньоквадратичного відхилення і похибки вимірювань.

3. Дослідженнями макрошліфів зварних з'єднань встановлено, що по висоті зразка макрошліф має дві яскраво виражені області трикутну і прямокутну, на ширину шва зміна потужності джерела практично не впливає.

					MP 8.132.6121м.03.05.03. ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					МР 8.131.6121м.03.05.02. ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розробив		Фесенко С.С..			Охорона праці і техніка безпеки				Літ.		Арк.	Аркушів
Перевірів		Матвієнко М.В.									62	
Рецензент									ХННІ НУК			
Н. Контр.												
Зав. каф.		Єрмолаєв Г.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 центральне місце займають програми моделювання полів фізичних величин, перш за все це програми аналізу міцності і деформування за методом скінченних елементів (МСЕ) [1 – 4].

Метод скінченних елементів розроблено до 1950 р фахівцями, які працюють в областях будівельної механіки і теорії пружності. Сам термін "кінцеві елементи" був введений в 1960 р Клаф (R.Clough). У 1963 р був запропонований порівняно простий спосіб застосування МСЕ для аналізу міцності шляхом мінімізації потенційної енергії. З'явилися програмно-методичні комплекси для аналізу і моделювання на основі МСЕ [5].

У 1970 році з'явився скінчено-елементний програмний пакет під назвою NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis), який далі розвивався компанією MSC (MacNeal-Schwendler Corporation). Програма Nastran забезпечує виконання повного набору інженерних розрахунків, включаючи розрахунок напружено-деформованого стану, власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, рішення задач теплопередачі, дослідження сталих і несталих процесів, нелінійних статичних процесів, нелінійних динамічних перехідних процесів, аналіз частотних характеристик, відгуку на динамічні і випадкові впливи.

У 1976 р розроблений комплекс DYNA3D (пізніше названий LS DYNA). Програма призначена для розв'язання тривимірних динамічних нелінійних задач механіки деформованого твердого тіла, механіки рідини і газу, теплопереносу, а також пов'язаних задач. У LS DYNA реалізовані явний і неявний метод скінченних елементів з можливістю побудови лагранжевої, ейлерову і гібридної сітки. Програма має вбудовані процедури автоматичної перебудови і згладжування скінчено-елементної сітки при виродження

					MP 8.132.6121м.03.05.04. ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

елементів, високоефективні алгоритми розв'язання контактних задач, широкий набір моделей матеріалів, можливості для користувача програмування. З 1996 р. вирішувач LS DYNA вбудований в пакет програм ANSYS, де використовується для вирішення завдань динамічного аналізу. У 2006 р вирішувач LS DYNA також увійшов до складу пакету програм NASTRAN.

Лідером серед програм аналізу на макрорівні вважається комплекс Adams, розроблений і розвивається компанією Mechanical Dynamics Inc. (MDI). Компанія створена в 1977 р. Основне призначення Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) кінематичний і динамічний аналіз механічних систем з автоматичним формуванням і вирішенням рівнянь руху.

До числа лідерів програм, що використовують МСЕ, відноситься також програмний комплекс ANSYS, який є скінчено-елементною системою, яка охоплює такі різні напрямки, як міцність, теплофізика, гідрогазодинаміка і електромагнетизм; має можливість вирішення пов'язаних задач, по всіх перерахованих напрямках, а також має високий показник «ефективність / вартість». Серед безлічі скінчено-елементних програмних комплексів ANSYS був першим сертифікований за міжнародними стандартами ISO 9000 та ISO 9001 [6 - 8].

Комп'ютерне моделювання НД стану в процесі ДС циліндричних вузлів з різнорідних матеріалів почалося в 2006 р в НУК із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ) і використанням програмного комплексу ANSYS [9 - 12]. Раннє МСЕ використовувався в НУК для моделювання залишкових напружень при зварюванні і паянні конструкцій з різнорідних матеріалів за власними комп'ютерним програмам [13-14]. Виходячи з викладеного та власного досвіду в цій роботі для моделювання залишкових деформацій при лазерному зварюванні тонких пластин обраний МСЕ і комплекс ANSYS, що дозволяє враховувати нелінійні зміни властивостей матеріалів при структурних перетвореннях.

З урахуванням того, що при зварюванні відбувається пластичне деформування металу, розрахунки, проводилися з урахуванням деформацій

					MP 8.132.6121м.03.05.04. ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

миттєвої пластичності [15]. 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 Мизесу для осесиметричної задачі за рівнянням:

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

4.2 Методика комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану

Після аналізу існуючих чисельних методів і програм їх що використовують для моделювання деформованого стану обраний метод скінченних елементів, реалізований в комп'ютерному комплексі ANSYS. Враховуючи, що всі вузли даної конструкції мають прямокутну форму і симетричні щодо поздовжньої осі, при побудові їх моделей в роботі, обраний двомірний елемент напружено-деформованого стану Plane 183 чотирикутного профілю, близького до квадрату. Заміна тривимірних моделей еквівалентними симетричними дозволила зменшити час моделювання при збереженні частоти розбивки, а квадратний профіль забезпечив досить високу точність, що особливо важливо в місцях великих градієнтів полів напружень, в яких частота розбивки збільшувалася.

Елемент PLANE183 є восьми вузовим двомірним елементом. Він має квадратичне уявлення переміщень і з його допомогою можна моделювати нерегулярні сітки.

Вісім вузлів в цьому елементі мають два ступені свободи в кожному вузлі: переміщення в напрямку осей X і Y вузловий системи координат. Даний елемент може застосовуватися для моделювання осесиметричного напруженого стану або для моделювання плоского деформованого стану, плоского напруженого стану і узагальненого плоского деформованого стану. Елемент має властивості гіперпружності, пластичності, повзучості, збільшення

					MP 8.132.6121м.03.05.04. ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

жорсткості при наявності навантажень, великих деформацій і великих переміщень. Геометрія, розташування вузлів і система координат перетину кінцевого елемента показані на рис. 4.1.

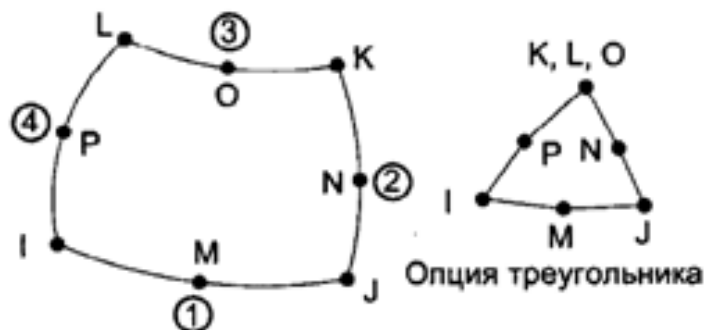


Рисунок 4.1 Геометрія, розташування вузлів і систем координат кінцевого елемента Plane 183

Елемент, що має трикутну форму, створюється визначенням однакових номерів для вузлів K, L і O. Вихідні дані елемента крім вузлів включають товщину тільки при властивості ортотропного матеріалу і використанні опції плоского напруженого стану, при цьому у ортотропного матеріалу напрямки осей відповідають напрямкам системи координат елемента.

В елементі напрямки напруг паралельні осям системи координат елемента. На поверхнях напруги визначаються перпендикулярно і паралельно лінії поверхні IJ і KL і паралельні осі Z при використанні плоского деформованого стану і плоско напруженого стану або окружному напрямку для осесиметричної задачі.

Адекватність результатів моделювання із застосуванням програмного комплексу ANSYS і прийнятих моделей наведена в роботі [16] шляхом зіставлення цих результатів з даними аналітичних розрахунків і з експериментальними даними, отриманими методом спекл-інтерферометрії.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

4.3. Комп'ютерне моделювання деформованого стану при лазерному зварюванні

При моделюванні деформованого стану необхідно використовувати фізико-механічні властивості матеріалів. Для моделювання рівня залишкових деформацій комп'ютерна модель будувалася з урахуванням симетрії зразка з використанням SE типу PLANE 183, властивості матеріалу застосовувалися середніми в інтервалі температур 20 ... 700 °С. Модуль пружності $E = 177$ ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,3, коефіцієнт термічного розширення $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Границя плинності зони в якій відбуваються пружнопластичні деформації приймався рівним $\sigma_m = 70$ МПа.

Фізична і SE моделі показані на рис. 4.2.

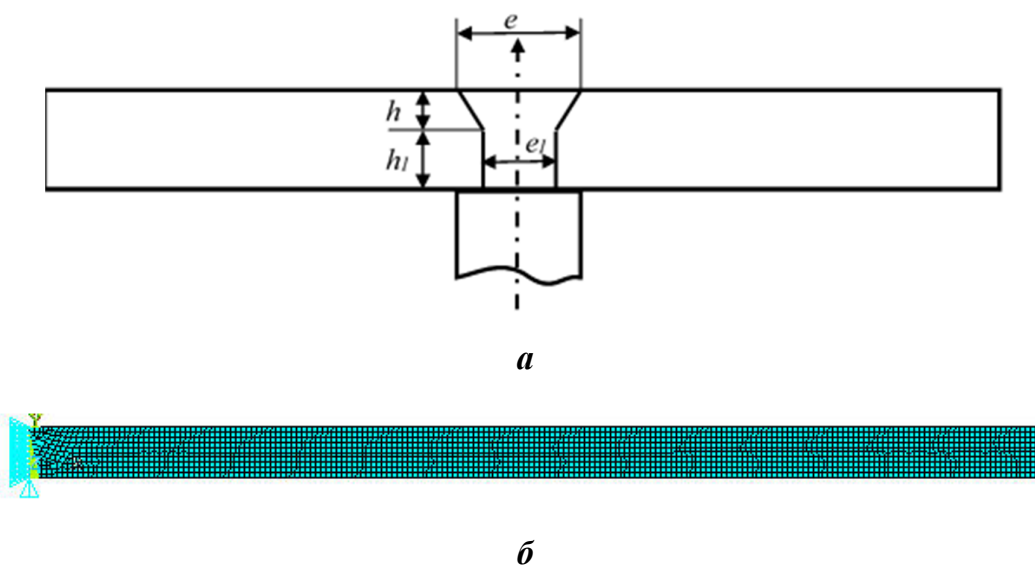


Рисунок 4.2 Фізична (а) і скінчено-елементна модель (б)

При моделюванні, зварний шов, який складається з двох зон зони: трапецеїдальною і прямокутної (рис.3.9) охолоджувався від температури початку пружно-пластичних деформацій до кімнатної температури. При моделюванні розміри зони зварного шва (h , h_1 , e , e_1) задавалися для всіх чотирьох параметрів потужності лазерного випромінювання.

За результатами моделювання побудована залежність стрілки прогину від потужності лазерного випромінювання.

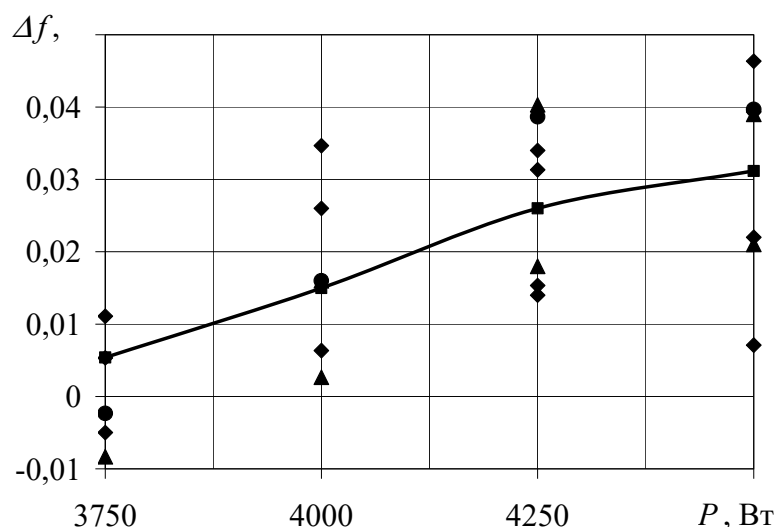


Рисунок 4.3 Залежність стрілки прогину від потужності лазерного випромінювання

На рис.4.3. показана залежність стрілки прогину від потужності лазерного випромінювання, суцільною лінією показані результати моделювання, а точками експериментальні дані. Порівняння результатів моделювання стрілки прогину, з експериментальними даними (рис.4.3) показало достатню точність розробленої моделі.

Висновки

1. Розроблено математичну модель моделювання стрілки прогину з використанням методу скінченних елементів.
2. Модель розроблена з урахуванням симетрії зразка і фізико-механічних властивостей матеріалу.
3. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показало достатню адекватність розробленої моделі.

					МР 8.131.6121м.03.05.02. ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розробив		Фесенко С.С..			Охорона праці і техніка безпеки				Літ.		Арк.	Аркушів
Перевірів		Матвієнко М.В.									62	
Рецензент									ХННІ НУК			
Н. Контр.												
Зав. каф.		Єрмолаєв Г.В.										

5. Охорона праці і техніка безпеки

Охорона праці - це система правових, соціально - економічних, організаційно - технічних, соціально - гігієнічних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини.

Завдання охорони праці - звести до мінімальної ймовірності поразки або захворювання працюючих з одночасним забезпеченням комфорту максимальний виробничий праці.

Основним законодавчим актом з охорони праці є Закон України "Про охорону праці" прийнятий Верховною Радою від 14.10.2002 року.

Держава повинна дбати про поліпшення умов і охорони праці, його організації про скорочення важкої фізичної праці за рахунок удосконалення та впровадження механізації і автоматизації в промисловості.

Охорона здоров'я трудящих, забезпечення безпеки умов праці, лікування професійних захворювань і виробничого травматизму складає одну з головних турбот держави.

За кожною людиною закріплено право на охорону здоров'я. Це правило забезпечувати розвитком техніки безпеки і виробничої санітарією, безкоштовною медичною допомогою, заходами по оздоровленню, попередження і зниження професійних захворювань.

У наш час впроваджується багато нових складальних пристроїв і механізмів. У зв'язку з цим зростає роль охорони праці, ка повинна не тільки забезпечувати безпеку праці людини, а й покращувати її умови.

З метою забезпечення безпечних умов праці персоналу встановлені гранично допустимі рівні лазерного випромінювання, тобто рівні лазерного випромінювання, які при щоденному впливі на людину не викликають в процесі роботи або у віддалені терміни відхилень у стані здоров'я, які виявляються сучасними методами медичних досліджень. Існують формули розрахунку ПДУ лазерного випромінювання з урахуванням додаткових факторів. Освоєння

					MP 8.132.6121м.03.05.05. ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунків ПДУ, при необхідності, доцільно виконати на лабораторно-практичній роботі.

Прийняття тих чи інших заходів лазерної безпеки, перш за все, залежить від класу лазерів. Клас небезпеки лазера встановлюється підприємством-виробником. Всі лазери повинні бути марковані знаком лазерної небезпеки з написом: "Обережно! Лазерне випромінювання! ".

Розміщують лазери в спеціально обладнаних приміщеннях. Лазери 4 класу повинні розміщуватися в окремих приміщеннях. Стіни і стеля повинні мати матову поверхню. Вхідні двері приміщень для лазерів 3 і 4 класу обладнуються внутрішніми замками, знаком лазерної небезпеки і табло: "Стороннім вхід заборонено".

Розміщувати обладнання необхідно досить вільно. Для лазерів 2, 3 і 4 класів з лицьового боку пультів і панелей управління необхідно залишати вільний простір шириною 1,5 метра при однорядному розташуванні лазерів і 2,0 метра - при двухрядном.

Управління лазерами 4 класу повинно бути дистанційним, а двері приміщення, де вони встановлені, мати блокування. Відповідно до "ГОСТ 12.1.031-81 ССБТ. Лазери. Методи дозиметричного контролю лазерного випромінювання "при використанні лазерів 2, 3 і 4 класів не рідше одного разу на рік проводиться дозиметричний контроль. У тих випадках, коли лазерна безпека колективними засобами захисту не забезпечується, повинні застосовуватися індивідуальні засоби захисту - окуляри і маски (останні - при роботі з лазерами 4 класу). Залежно від довжини хвилі лазерного випромінювання в протіволазерних окулярах використовуються помаранчеві, синьо-зелені або безбарвні стекла.

До обслуговування лазерів допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд і не мають медичних протипоказань.

					МР 8.132.6121м.03.05.05. ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.1. Загальні заходи безпеки

1.1. До самостійної роботи на лазерному обладнанні допускаються особи, які мають спеціальну освіту або пройшли навчання для роботи з обладнанням, що пройшли інструктажі з техніки безпеки, пожежної безпеки, стажування на робочому місці, перевірку знань вимог охорони праці.

1.2. Не допускати роботи з відбивають металами, а також матеріалами, чутливими до високої температури і виділяють токсичні речовини (наприклад, ПВХ, тефлон, АБС-смоли, поліхлоропрен).

1.3. Не зберігати легкозаймисті речовини (спиртовмісні, бензин) поблизу обладнання.

1.4. Забезпечити наявність вогнегасника CO₂. Чи не використовувати порошкові вогнегасники, тому що вони можуть пошкодити деталей лазера.

1.5. Небезпечними факторами для працюючого на устаткуванні можуть бути:

- прямий промінь лазера;
- відбитий промінь лазера;
- невидимий лазерний пучок, що випускається лазерної трубкою;
- струмопровідні дроти з порушеною ізоляцією.

1.6. Працівник-свідок події повинен негайно повідомити своєму безпосередньому керівнику про будь-який нещасний випадок, що трапився на виробництві, ситуації, яка створює загрозу життю і здоров'ю людей.

1.7. У разі порушення вимог цієї інструкції працівник притягується до дисциплінарної, а у відповідних випадках - до матеріальної та кримінальної відповідальності в порядку, встановленому законодавством.

5.2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Провірити приміщення.

					MP 8.132.6121м.03.05.05. ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1. Переконатися у відсутності поблизу установки легкозаймистих речовин.

2.2. Переконатися в готовності робочого місця до початку роботи - робоча поверхня установки очищена від забруднень і сторонніх предметів.

2.3. Переконатися в готовності установки до запуску - бічні панелі і задня панель установки повинні бути закріплені на корпусі, пускова ап-паратура і індикатор роботи лазера в справності.

2.4. Переконатися в справності вентиляційної системи обладнання та відсутності перешкод для виходу повітря.

2.5. Переконатися в наявності води в системі охолодження.

2.6. Одягати захисні окуляри.

5.3. Вимоги безпеки під час роботи

3.1. Уникати попадання рук і інших частин тіла в зону робочої поверхні лазера, щоб уникнути опіків.

3.2. Працювати тільки в захисних окулярах, оскільки попадання лазерного променя може зруйнувати роговицю ока.

3.3. При роботі не дивитися на промінь лазера.

3.4. Роботу з відбивають матеріалами виробляти тільки при закритій кришці установки, так як відбитий промінь не менш небезпечний, ніж основний.

3.5. Роботу з матеріалами, що виділяють їдкі речовини (акрил, пластик і т.д.) виробляти із закритою кришкою і використовувати засоби захисту дихальних шляхів, щоб уникнути отруєння.

3.6. Не відкривати задню кришку установки, якщо обладнання підключено до електромережі. Висока напруга, що використовується для живлення лазера, може призвести до ураження електричним струмом.

					MP 8.132.6121м.03.05.05. ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.7. Не допускати роботи при знятих бічних панелях установки, щоб уникнути контакту з прямим або розсіяним лазерним пучком, що є травмонебезпечним.

3.8. Під час роботи забезпечити вентиляцію приміщення.

3.9. Не залишати працююче обладнання без нагляду.

3.10. У разі виявлення несправності, відключити устаткування і довести до відома фахівців. Не допускати самостійного ремонту обладнання.

3.11. Відключати електроживлення під час грози або якщо обладнання довгий час не використовується.

5.4. Вимоги безпеки після закінчення робіт

4.1. Відключити обладнання від електроживлення.

4.2. Очистити робочу поверхню і спрямовуючу від частинок матеріалів.

4.3. Провітрити приміщення. [26-27]

					MP 8.132.6121м.03.05.05. ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні висновки

У магістерській роботі було досліджено деформації при лазерному зварюванні таврового з'єднання.

Зразок для проведення експерименту було взято з матеріалу Ст3 товщиною 3 мм з розміри 150x150x3 мм полку, і 150x60x3 мм стінка зразка. Для полегшення установки деформометра в одному положенні з одного боку зразка висвердлюється отвори діаметром 1 мм, а з іншого боку чертилкою наносили лінію.

Стрілка прогину замірялась до зварювання і після зварювання приладом (деформометром). З кожного зразка стрілка прогину знімалися в 7 перетинах. База виміру деформацій становила 120 мм. Стрілка прогину вздовж шва знімалася через кожні 20 мм.

Перед першим виміром стрілки прогину полку зразка прихоплювали до стінки прихватками в спеціальному кондукторі. Після виконання прихваток і початкового виміру стрілки прогину виконувалася приварка полки до стінки у вільному стані. Вимірювання стрілки прогину здійснювалося електронним індикатором годинникового типу. Весь експеримент проводився з дотриманням правил техніки безпеки.

За результатами експерименту були побудовані графіки кутової деформації від довжини зразка при різних потужностях лазера, аналіз яких показав, що при видаленні від краю зразка кутова деформація збільшується, а на відстані 75мм стабілізується. Що підтверджується теорії кутових деформації при дугового зварювання.

Аналіз макрошліфів показав, що заварений шов умовно можна розділити на дві зони: трапецеїдальних і прямокутну. Основними параметрами шва є висота трапецеїдальною частини h , висота прямокутної частини h_1 , ширина шва e і ширина прямокутної частини e_1 . Зі збільшенням потужності лазера збільшується трапецеїдальних зона.

					МР 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список літератури

1. Постнов, В.А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций [Текст] / В.А. Постнов, И.Я. Хархурим.– Л.: Судостроение, 1974. – 344с.
2. Справочник по строительной механике корабля [Текст] / Под. ред. В.А. Постнова. – Л.: Судостроение, 1982, Т.2. – 462с.
3. Справочник по теории упругости [Текст] / Под ред. П.М. Варвака.– Киев: Будівельник, 1971.– 420с.
4. Стренг, Г. Теория методов конечных элементов [Текст] / Г. Стренг, Дж. Фикс.– М.: Мир, 1977. – 332с.
5. Норенков, И.П. Краткая история вычислительной техники и информационных технологий [Текст] / И.П. Норенков // Наука и образование: Приложение к журналу „Информационные технологии”. – 2005. – № 9.
6. Чигарёв, А.В. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. [Текст] / А.В. Чигарёв, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
7. Басов, К.А. ANSYS: Справочник пользователя [Текст] / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
8. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. [Текст] / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
9. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке [Текст] / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко и [др.] // Быстрозакаленные материалы и покрытия: Сб. тр. 5-й Всероссийской с междунар. участ. Научно-технич. конф. 12-13 дек. 2006 г. Научно-техн. семинар «Диффузионная сварка и ее роль в современной технике», посв. 100-летию Н.Ф. Казакова.– М.: „МАТИ” – РГТУ им. К.Э. Циолковского. – 2006. – С. 24 – 28.

					МР 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Совершенствование технологии диффузионной сварки корпусов электромагнитных клапанов [Текст] / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко и [др.] // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ. – 2006, Вип. 9. – С. 178 – 183.
11. Моделирование напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке электромагнитных клапанов [Текст] / В.В. Квасницкий, М.В. Матвиенко, Ал.В. Лабарткава и др. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал Одеського національного морського ун-ту. – Одеса: ОНМУ. – 2007, №1.– С. 87 – 96.
12. Квасницький, В.В. Моделювання напружено-деформованого стану при дифузійному зварюванні матеріалів з різними фізико-механічними властивостями [Текст] / В.В. Квасницький, Г.В. Єрмолаєв, М.В. Матвієнко // Машинознавство: Всеукраїнський щомісячний науково-технічний журнал.– 2007, № 7.– С. 30 – 39.
13. Исследование напряженного состояния при пайке узлов из разнородных материалов [Текст] / К.А. Ющенко, В.Ф. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, В.Н. Марунич // Автоматическая сварка, 1987, № 5.– С. 50 – 54.
14. Анализ напряженного состояния в полученных пайкой и диффузионной сваркой узлах из разнородных материалов [Текст] / Г.В. Ермолаев, В.М. Заболотский, В.А. Игнатов, В.Ф. Квасницкий, В.Н. Марунич // Судостроительная промышленность. Сер. Сварка. – 1988. вып. 6.– С. 45 – 50.
15. Махненко, В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций [Текст] / В.И. Махненко.– К.: Наукова думка, 1976. – 320 с.
16. Актуальные проблемы исследования физико-механических свойств материалов для сварных и паяных конструкций [Текст] / Г.М. Григоренко, В.В. Квасницкий, С.Г. Григоренко и др. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 5. – С. 78–85.

					МР 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Шашков В.Б. Ш 12 Обработка экспериментальных данных и построение эмпирических формул. Курс лекций.: Учебное пособие.- Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 150 с.
18. Князев Б.А., Черкасский В.С. Начала обработки экспериментальных данных. Электронный учебник и программа обработки данных для начинающих: Учебное пособие // Новосиб. ун-т. Новосибирск, 1996. 93 с.
19. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Под ред. Э.К.Лецкого. - М.: Мир, 1977.
20. Математическая статистика с элементами теории планирования эксперимента: учеб. пособие: Л.В. Горская, В.Н. Пиунова, В.С. Смирнова. Саратовский политех. институт, 1975, 103 с.
21. Математическая теория планирования эксперимента./ Под ред. С.М. Ермакова.- М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 392 с.
22. Надёжность технических систем: Справочник/ Ю.К. Беляев, В.А. Богатырёв и др. Под ред. И.А. Ушакова М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
23. Allmen. M. von and Blatter A. (1995), Laser Beam Interaction with Materials, 2nd edn. Berlin: Springer.
24. Лазерная сварка металлов / А. А. Малащенко - М.: Машиностроение 1984
25. Взято из сайта osvarke.com
26. ГОСТ 12.1.040-83 ССБТ. Лазерная безопасность. Общие положения.
27. САНПИН 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.
28. взято з сайту bisalmaz.ru

					МР 8.132.6121м.03.05. ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		