

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

(nidnuc)

Розроблення технологічного процесу виконання складальних і зварювальних робіт при виготовленні мостової балки

**за освітньо-професійною програмою підготовки бакалаврів
“Інжиніринг зварювальних технологій”
спеціальності 131 “Прикладна механіка”**

Керівник: <u>к.т.н., доц.</u> <u>Панчук М.В.</u> _____ підпис	Завідувач кафедри будівництва: <u>к.т.н., доц.</u> <u>Андрусяк А.В.</u> _____ підпис
---	--

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ

Інститут архітектури та будівництва Кафедра будівництва
"ІФНТУНГ-ДонНАБА"

ОПП "Інжиніринг зварювальних технологій"

Спеціальність 131 "Прикладна механіка"

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри Будівництва
А.В. Андрусяк
(ініціали, прізвище)

(підпис)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на випускню кваліфікаційну роботу бакалавра
студента Зятика Юрія Ігорович

1. Тема роботи Розроблення технологічного процесу виконання складальних і зварювальних робіт при виготовленні мостової балки.

Затверджена наказом по університету № 219/7 від "15" 05. 2026 р.

2. Термін здачі закінченої роботи _____

3. Вихідні дані до роботи

Технічні умови на виготовлення мостової балки, креслення виробу, умови експлуатації мостової балки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити 1 Загальний розділ. 1.1 Загальна характеристика зварного виробу та оцінка його технологічності. 1.2 Характеристика матеріалів зварної конструкції та визначення їх зварюваності. 1.3 Аналіз чинного технологічного процесу. 2 Технологічний розділ. 2.1 Вибір способів зварювання і зварювального устаткування. 2.1.1 Обґрунтування способу зварювання. 2.1.2 Вибір зварювальних матеріалів. 2.1.3 Визначення та розрахунок режимів зварювання. 2.1.4 Вибір основного та допоміжного зварювального устаткування. 2.2 Розроблення технологічного процесу виготовлення зварної конструкції. 2.2.1 Заготівельні операції. 2.2.2 Розроблення складально-зварювальних операцій. 2.2.3 Процес нанесення захисного покриття. 2.2.4 Виконання зварних швів після з нанесенням захисним покриттям 2.3 Вибір заходів боротьби із зварювальними напруженнями 2.4 Технічний контроль якості та виправлення браку. 3. Конструкторський розділ. 3.1 Компонування складальних та зварювальних установок. 3.2 Розробка плану цеху. 4. Безпека праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Креслення мостової колони. 2. Схема технологічного процесу виготовлення мостової БАЛКИ. 3. Стенд для збирання для зварювання поздовжніх та поперечних швів. 4. Приварювання вставок. 5. План дільниці цеху.

6. Дата видачі завдання _____

Керівник _____

Панчук М.В.

Завдання прийняв до виконання _____

Зятник Ю.І.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Найменування роботи	Термін виконання	Фактичне виконання
1.	Вибір теми, її затвердження		
2.	Ознайомлення з рекомендованою літературою		
3.	Загальний розділ		
4.	Технологічний розділ		
5.	Конструкторський розділ		
6.	Безпека праці		
7.	Виконання розрахунково-графічної частини, додатків та ілюстрацій до роботи		
8.	Ознайомлення керівника з чорновим варіантом роботи		
9.	Оформлення роботи		
10.	Представлення роботи на кафедрі		
11.	Направлення на рецензування		

Студент _____ Зятник Ю.І.

Керівник _____ Панчук М.В.

РЕФЕРАТ

Робота бакалавра складається з 5 креслень А 1, та 62 сторінок пояснюючої записки, 14 рисунків, 13 таблиць, посилань 15 на використану літературу.

Об'єктом роботи є: технологія виконання складально-зварювальних робіт при виготовленні мостової балки.

Мета роботи: удосконалення технології складальних та зварювальних робіт при виготовленні мостової балки.

В бакалаврській роботі розроблено технологічний процес виконання складальних та зварювальних робіт при виготовленні мостової балки.

Проведений аналіз способів, що використовуються на даний час показав неефективність зварювання під шаром флюсу. Для виготовлення мостової балки запропоновано гібридне лазерно-дугове зварювання. Використання лазерно-дугового способу дозволяє збільшити швидкість зварювання в шість разів та час проведення процесу на 98%, зменшити підведення теплоти та зменшити споживання енергії для виконання процесу, а також отримувати зварні шви високої якості та надійності.

Для виконання технологічного процесу підібрано комплект обладнання, що дозволяє автоматизувати виробництво мостових балок. Результати роботи можуть бути впроваджені в індустрії мостобудування, а також в навчальному процесі.

Ключові слова: Мостова балка, лазерно-дугове зварювання, технологічний процес, сталий розвиток

ABSTRACT

The bachelor's work consists of 5 presentation slides, an explanatory note of 62 sheets, 14 figures, 13 tables and 17 references to the literature used.

The subject of this thesis is: the technology for carrying out assembly and welding operations in the manufacture of bridge girders.

The aim of the work is to improve the technology of assembly and welding operations in the manufacture of bridge girders.

This bachelor's thesis develops a technological process for carrying out assembly and welding operations in the manufacture of bridge girders. An analysis of the methods currently in use has shown the inefficiency of submerged arc welding. Hybrid laser-arc welding is proposed for the manufacture of bridge girders. The use of the laser-arc method allows the welding speed to be increased sixfold and the process time reduced by 98%, reduces heat input and energy consumption for the process, and produces high-quality, reliable welds.

A set of equipment has been selected to carry out the manufacturing process, enabling the automation of bridge girder production. The results of this work can be applied in the bridge construction industry, as well as in the educational process.

Keywords: Bridge girder, laser-arc welding, manufacturing process, sustainable development

ЗМІСТ

Зміст	5
Вступ	7
1 Загальний розділ.....	9
1.1 Характеристика зварного виробу і оцінка його технологічності. . .	9
1.2 Характеристика матеріалу конструкції та його зварюваність	13
1.3 Аналіз чинного технологічного процесу	15
2. Технологічний розділ	19
2.1 Вибір способу зварювання і зварювального обладнання	19
2.1.1 Обґрунтування вибору способу зварювання	19
2.1.2 Вибір зварювальних матеріалів	22
2.1.3 Визначення та розрахунок режимів зварювання	24
2.1.4 Вибір основного та допоміжного зварювального обладнання	26
2.2 Розроблення технологічного процесу	30
2.2.1 Заготівельні операції.	30
2.2.2 Складально-зварювальні операції..	36
2.2.5 Вибір заходів боротьби із зварювальними напруженнями	38
2.3 Технічний контроль та виправлення браку	42
2.3.1 Дефекти, що виникають при зварюванні конструкції	42
2.3.2 Візуальний метод контролю.	44
2.3.3 Радіографічні методи контролю	48
3 Конструкторський розділ	54
3.1 Конструювання мостової балки за допомогою програми Solidworks	51

					КРБ. ЗТ - 15. 00. 00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Зяттик Ю				Розроблення технологічного процесу виконання складальних і зварювальних робіт при виготовленні мостової балки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив	Панчук М.В.						5	62
Рецензент	Матвієнків О					ІФНТУНГ ЗТ- 23-1-К		
Н.Контроль	Матвієнків О							
Затверд.	Андрусак А.В							

4. Охорона праці	56
4.1 Аналіз небезпек та шкідливих чинників виробничого середовища	56
Висновки	59
Перелік використаної літератури	60

					КБР. ЗТ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Зі постійним розвитком технологій будівництва мостів, сталеві конструкції стали основним рішенням у сучасному мостобудуванні завдяки своїй високій міцності, легкості та високому ступеню автоматизації.

Під час виготовлення та складання сталевих конструкцій зварювання, як основний виробничий процес, широко використовується у виробництві ключових компонентів, таких як сталеві балки, ферми та фасонки.

Як ефективність, так і якість зварювання критично визначають графік виробництва, виробничі витрати, а також довгострокові витрати на обслуговування та термін служби всієї конструкції мосту.

Сталеві мости, відомі своєю легкою конструкцією та високою міцністю, зазнали значного зростання, що також підтримувалося сприятливою політикою. Навіть за глобальних викликів, пов'язаних з економічним тиском, галузь сталевих мостів зберігає стабільну траєкторію зростання, збільшуючи виробництво та маючи багатообіцяючі перспективи розвитку.

Зварювання є фундаментальним виробничим процесом, важливим для різних промислових секторів, включаючи будівництво, транспорт та аерокосмічну галузь. Воно сприяє ефективному та адаптивному з'єднанню матеріалів, пропонуючи особливі переваги, такі як оптимальне використання матеріалу, адаптованість до автоматизації, підвищена структурна цілісність та чудове збереження міцності з'єднань.

Глобальний попит на конструкції з вуглецевої сталі підкреслює необхідність розуміння та вирішення металургійних та механічних проблем, пов'язаних із процесами зварювання.

Виготовлення мостових балок є важливим стратегічним та високорентабельним напрямком. Попит на різні конструкції балок стимулюється критичною потребою необхідності у відновленні інфраструктури. За цього вартість балок досягає рівня 60% від бюджету

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

будівництва. Цей сегмент постійно зростає дякуючи високій маржинальності і довготерміновим державним інвестиціям

Бакалаврська робота присвячена актуальній темі - розробленню технологічного процесу виконання складально-зварювальних робіт при виробництві мостової балки.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Характеристика зварного виробу і оцінка його технологічності

Мости – це тихі артерії сучасного суспільства, що з'єднують громади та сприяють торгівлі. Однак інженерні дива, які дозволяють їм витримувати величезні навантаження та випробування часом, часто залишаються непоміченими.

Оскільки 36% усіх мостів у США це понад 222 000 прольотів потребують капітального ремонту або заміни, розуміння їхніх фундаментальних компонентів ще ніколи не було таким важливим.

В основі багатьох із цих конструкцій лежить балка, потужний опорний елемент, який служить фундаментальним компонентом у незліченних мостах по всьому світу.

Мости зазвичай будуються, коли потрібно перетнути дорогу, залізницю або водний канал. Протягом історії було побудовано багато великих і малих мостів для подолання бар'єрів та перешкод.

Тип мосту, який будується, залежить від конкретних фізичних вимог та вимог до проектування. Отже, міст може бути найменшою дошкою, яка використовується для перетину струмка, або великим прольотом, побудованим для руху транспорту по широкій річці.

Основними компонентами мосту є фундамент, підконструкція та прогонова будова. Кожна з цих основних областей має інші частини всередині себе. Палі та оголовки паль будуються як фундамент мосту. Підконструкція включає опори та устілки, тоді як прогонова будова включає балки, опори та прокладку.

Вибір основної опорної системи мосту є одним із найважливіших рішень у цивільному будівництві. Цей вибір визначає не лише остаточний вигляд мосту, але й його пролітну здатність, несучу здатність, терміни будівництва та довгострокові вимоги до обслуговування.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Рішення, прийняте на етапі розробки, безпосередньо впливає на громадську безпеку, економічну ефективність та стійкість інфраструктури протягом десятиліть. Зі зростанням інвестицій, коли державні та місцеві органи влади укладають контракти на будівництво доріг, прийняття обґрунтованих рішень щодо конструкції має першочергове значення.

Балки є наріжним каменем сучасного будівництва, утворюючи основну опорну систему для величезної кількості мостів та будівель. Їхнє поєднання міцності, універсальності та відносної простоти виготовлення робить їх незамінним інструментом для інженерів.

Балка збирає навантаження з мостового полотна та передає їх на несучу конструкцію, таку як опори та опори.

Балка мосту (рис.1.1) це великий горизонтальний конструктивний елемент, який служить основною опорою для мостового полотна — поверхні, по якій рухається транспорт. По суті, це дуже велика балка, яка призначена для перекриття значних відстаней між опорами, такими як пілони та устілки.



Рисунок 1.1 – Мостова двотаврова балка

Її основна роль полягає в тому, щоб збирати навантаження з полотна (включаючи вагу транспортних засобів, пішоходів та самого полотна) та ефективно передавати ці сили на підконструкцію мосту. Балки є основними

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

несучими компонентами прольотної конструкції багатьох поширених типів мостів.

Різні проекти мостів вимагають різних конструкцій балок. Довжина прольоту, ширина полотна, транспортні навантаження, геометрія ділянки та вимоги до монтажу – все це впливає на те, який варіант є найбільш доцільним. Найпоширеніші типи балок вирішують певну структурну проблему, від ефективного опору вигину до додаткової міцності на кручення або продуктивності збільшеного прольоту.

Для спорудження мостів застосовують спеціальні балки з маркуванням "М" та широкополочні балки з маркуванням Б1, Б2, виготовлені з високоміцних низьколегованих сталей, що можуть витримувати інтенсивний транспортний рух, екстремальні вібрації, а також значні перепади температур

Зварні двотаврові балки – це конструкційні сталеві компоненти, виготовлені шляхом зварювання трьох окремих сталевих пластин: однієї стінки та двох фланців, для утворення поперечного перерізу у формі букви Н.

На відміну від гарячекатаних балок, розміри яких обмежені стандартними, зварні двотаврові балки можна налаштовувати за висотою, шириною та товщиною, що забезпечує гнучкість, яку не можуть забезпечити стани гарячої прокатки.

Ця адаптивність робить зварні балки надійним вибором для морських та шельфових конструкцій, глибоких фундаментів, утримуючих систем, мостів та важких промислових каркасів, де велика несуча здатність та індивідуальні розміри є критично важливими.

Зварні двотаврові балки (рис.1.2) пропонують найкраще рішення, коли стандартних профілів недостатньо. Незалежно від того, чи ви проектуєте міст у сейсмічній зоні, стіну причалу для розширення порту чи складну раму морської підстанції, зварні балки забезпечують:

- Налаштовувані розміри для оптимізованої міцності та ваги одиниці;
- Відповідність суворим інженерним вимогам;
- Сумісність зі світовими проектними стандартами;

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- Стійкість до суворих морських та промислових умов.

Завдяки можливості проектування кожної секції відповідно до унікальних вимог до навантаження, зварні двотаврові балки пропонують неперевершену продуктивність та цінність, гарантуючи безпеку та економічну оптимізацію ваших конструкцій.

Для розроблення проекту застосовуємо балку у вигляді зварного двотавра (рис.1.2) постійного перерізу.

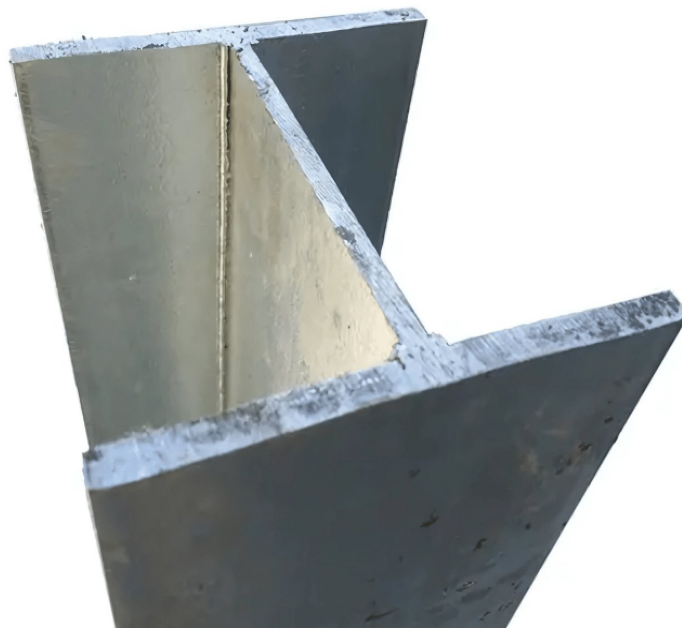


Рисунок 1.2 – Зварна двутаврова балка

Зварні двотаврові балки можуть бути використані:

- В балках мостів та опорах віадуків, де потрібні нестандартні прольоти;
- Конструкціях підкранових шляхів та пальових оголовках з високою концентрацією навантаження;
- Підходять для сейсмічних зон завдяки спеціально розробленим співвідношенням жорсткості до ваги.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.2 Характеристика матеріалу зварної конструкції та її зварюваність

Для мостових балок зазвичай використовуються високоміцні низьколеговані вуглецеві сталі, такі як ASTM A709. Конкретні марки сталі вибирають на основі необхідної межі текучості, в'язкості на розрив при екстремальних температурах та стійкості до корозії.

Поширеною маркою для автомобільних мостів є атмосферостійка сталь, ASTM A709 клас 50W. Цей матеріал розвиває самозахисну патину від іржі, що усуває потребу у фарбуванні та значно знижує витрати на обслуговування.

Високоміцна загартована та відпущена сталь (наприклад, ASTM A709 клас 100) використовується для мостів великого прольоту або зон з високими навантаженнями, де мінімізація ваги конструкції є критично важливою.

Вуглецева та високоміцна сталь (наприклад, ASTM A709 клас 36 або 50), часто оцинковуються гарячим способом або фарбуються багат шаровими системами для захисту від корозії в агресивних середовищах.

Конструкції балок зазвичай використовують І-подібну форму (пластинчаста балка) або форму порожнистої коробки. Їх часто будують як сталобетонні композитні мости, де сталева балка підтримує бетонну основу, максимізуючи міцність і зменшуючи прогин.

Для виготовлення балки моста вибираємо низьколеговану вуглецеву сталь (HSLA) - ASTM A709 класу 36. Хімічний склад сталі ASTM A709 представлено в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 Хімічний склад сталі ASTM A709, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	V
≤ 0,19	0,3-0,65	0,8-1,25	0,4	≤ 0,03	≤ 0,03	0,4-0,65	≤ 0,4	0,1

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					13

Сталі HSLA мають вищу границю міцності у порівнянні зі звичайними вуглецевими сталями. Цей ефект досягається за рахунок добавляння легуючих елементів таких як ніобій та ванадій, які покращують структуру зерна та сприяють підвищенню міцності.

Так само сталі HSLA зберігають високу ударну в'язкість, за рахунок якої вони можуть поглинати енергію та деформуватися без руйнування. Ця властивість є важливою для структурних використань, де удароміцність має вирішальне значення. Механічні властивості сталі наведені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 - Механічні властивості сталі ASTM A709, %

Товщина листа, мм	Механічні властивості		
	Тимчасовий опір розриву σ_b , МПа	Межа текучості σ_t , МПа	Відносне видовження δ_b , % (не менше)
10	400...550	250	18

Для оцінювання зварюваності сталі ASTM A709 розраховуємо еквівалентний вміст вуглецю. Для цього використовуємо формулу 1.1.

$$C_e = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr+V+Mo}{10} \quad (1.1)$$

Підставивши масові частки хімічних елементів отримуємо:

$$C_e = 0,10 + \frac{1,0}{20} + \frac{0,4}{15} + \frac{0,5}{10} = 0.22$$

Розрахунковий еквівалентний вміст вуглецю для сталі ASTM A709 клас 36 складає 0.22 %. За цим показником сталь відноситься до добре зварюваних.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Аналіз чинного технологічного процесу

Технологія з'єднання сталевих конструкційних елементів мосту еволюціонувала від заклепкових з'єднань до болтових, а потім до зварних. Зварні з'єднання пропонують численні переваги, такі як гнучкість конструкції та легкість, і широко використовуються поряд з болтовими з'єднаннями для з'єднання сталевих компонентів мосту.

Доступні різні методи зварювання, включаючи дугове зварювання, газове зварювання та електронно-променеве зварювання. Серед них дугове зварювання є найбільш поширеним завдяки своєму тривалому технічному розвитку та високій надійності.

Для зварювання мостової балки у більшості випадків використовуються дугові способи зварювання, зокрема автоматичне зварювання під шаром флюсу (SAW).

Процес SAW полягає у плавленні витратного дроту під порошкоподібним флюсом. Флюс для даного способу виконує ряд функцій серед яких має сприяння у формуванні зварного шва, захист його від впливу атмосфери, а також легування зварного шва.

Під час контакту зі зварною деталлю утворюється дуга, яка створює достатньо тепла для розплавлення дроту та зварного деталі. Порошкоподібний гранульований флюс, що подається перед зварюванням, захищає область дуги (рис.1.2). Процес проходить внаслідок пропускання електричного струму, через електродний дріт, що подається в зону зварювання.

Серед дугових способів даний спосіб є досить якісним та повторюваним. Він є стабільним як за властивостями, так і за зовнішнім виглядом шва. Якщо робота, яку необхідно виконати, кваліфікується за цим процесом, він також дуже продуктивний та простий в експлуатації.

Деякі недоліки способу включають: використання лише в нижньому положенні. Обмеження його використання в застосуваннях для зварювання в

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

нестандартних положеннях. Порівняно з іншими процесами дугового зварювання, дугове зварювання під флюсом вимагає більше обладнання.

Результати наукових та промислових досліджень показали, що хоча дугове зварювання може створювати міцні та надійні з'єднання, воно також має обмеження. Особливо щодо якості зварних швів та виникнення дефектів, які можуть ініціювати утворення тріщин від втоми.

Удосконалення методів зварювання та післязварювальної термічної обробки пом'якшило деякі з цих проблем, але пошуки кращої продуктивності та ефективності тривають. Саме для зменшення впливу названих проблем ми використовуємо лазерно-дугове гібридне зварювання.

При порівнянні способів зварювання під шаром флюсу та гібридного лазерно-дугового зварювання встановлено, що гібридне зварювання може досягати значно вищих швидкостей порівняно зі звичайним дуговим зварюванням.

Так для зварювання стикових з'єднань швидкість дугового зварювання коливалася від 0,15 м/хв до 0,25 м/хв, тоді як гібридне зварювання досягало швидкості до 1,6 м/хв, тим самим скорочуючи час зварювання стикових з'єднань більш ніж на 98%.

Для зварювання кутових з'єднань швидкість збільшилася з 0,20 м/хв до 0,35 м/хв при дуговому зварюванні до 1,2 м/хв при гібридному зварюванні, що досягло скорочення часу більш ніж на 94%.

Крім того, використання однопрохідного проплавлення при гібридному зварюванні усуває необхідність міжпрохідного охолодження, необхідного при дуговому зварюванні, що ще більше скорочує загальний час будівництва.

При виконанні зварного шва пластин, довжиною 3500 міліметрів та товщиною 15 мм за допомогою способу під шаром флюсу час виконання робіт, включаючи кількість проходів та міжпрохідне охолодження склав 5500 секунд, в той час, як при виконання гібридним лазерно-дуговим способом 131 секунду.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Таким чином, використання гібридного зварювання суттєво скорочує час виконання робіт, зменшує кількість виконаних технологічних операцій, в тому числі міжпрохідне охолодження швів, та необхідність виконання робіт з зовнішньої сторони шва.

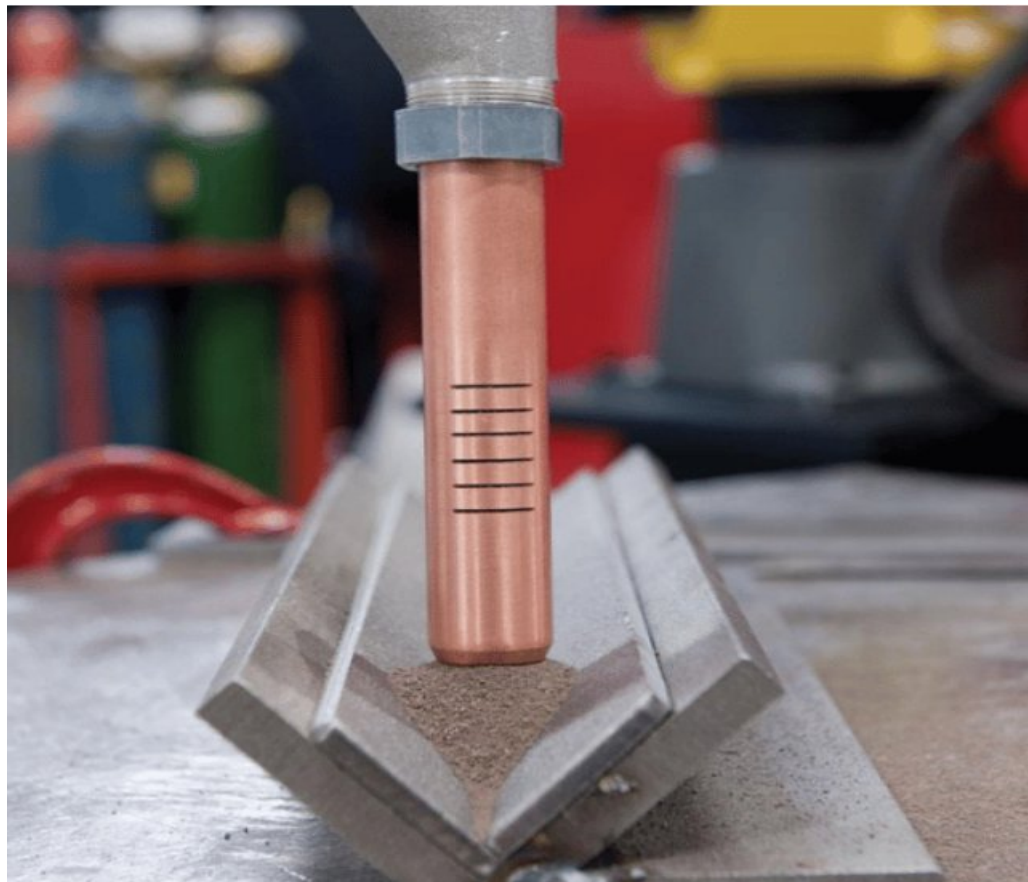


Рисунок 1.2 - Процес зварювання під шаром флюсу

У контексті Цілей Сталого Розвитку, які наголошують на ефективному розвитку промисловості, інноваціях та інфраструктурі, порівняння підведення тепла між гібридним зварюванням та традиційними технологіями дугового зварювання стає особливо актуальним.

Гібридне зварювання пропонує значне зниження підведення тепла порівняно зі звичайним дуговим зварюванням. Це зниження підведення тепла не лише мінімізує теплову деформацію та залишкові напруження в зварних

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

компонентах, але й підвищує загальну енергоефективність виробничого процесу.

З точки зору промислових інновацій, нижче підведення тепла, пов'язане з гібридним зварюванням, призводить до покращення структурної цілісності та експлуатаційних характеристик зварних компонентів.

Це має вирішальне значення для проектів критичної інфраструктури, де довговічність та безпека сталевих конструкцій, таких як мости та будівлі, є надзвичайно важливими.

Крім того, точність та контроль, що забезпечуються технологією гібридного зварювання, дозволяють виконувати складніші та тонко налаштовані зварювальні операції, розширюючи межі можливостей сучасного будівництва та виробництва.

Тому на нашу думку спосіб зварювання під шаром флюсу, який використовується для виробництва мостових балок вже не може задовільняти зростаючих потреб сучасного мостобудування.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір способу зварювання та зварювального обладнання

2.1.1 Обґрунтування вибору способу зварювання

В останні роки лазерне зварювання привернуло значну увагу як метод зварювання металевих компонентів. Використовуючи теплову енергію лазерного випромінювання, лазерне зварювання пропонує значно вищу щільність енергії порівняно з дуговим зварюванням.

Ця можливість дозволила виконувати високошвидкісне зварювання з глибоким проплавленням та низьким тепловкладенням, що є складним для традиційного дугового зварювання.

Характеристика глибокого проплавленням зменшує кількість зварювальних проходів, необхідних для досягнення необхідної товщини зварного шва, а низьке підведення тепла ефективно мінімізує деформацію зварювання, тим самим скорочуючи процес корекції деформації після зварювання.

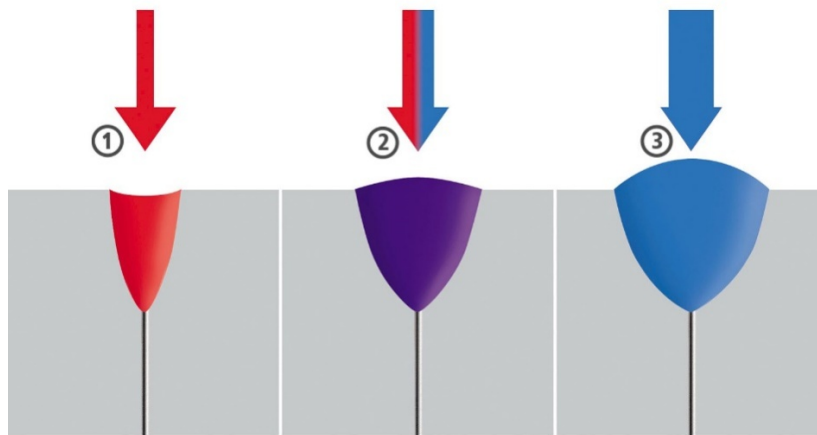
Лазерне зварювання все частіше використовується у виробництві високоточних компонентів з низьким спотворенням та низьким підведенням тепла, особливо в промисловості та будівництві.

Досягнення в збільшенні потужності, ефективності та продуктивності лазерного обладнання ще більше підвищили можливості лазерного зварювання товстих сталевих пластин у конструкційних застосуваннях.

На відміну від традиційних методів зварювання, які вимагають обробки кромки для з'єднання товстих пластин, лазерне зварювання усуває цю вимогу. Однак цей вид зварювання вимагає ретельного управління зазором між сталевими пластинами, щоб запобігти таким дефектам, як зміщення фокуса лазера, недостатнього проникнення, підрізання, недоповнення та інших дефектів зварювання.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Для вирішення цих проблем у різних промислових секторах досліджуються та впроваджуються методи лазерно-дугового зварювання, яке називають гібридним зварюванням. Техніка лазерно-дугового зварювання синергетично поєднує переваги лазерного та дугового зварювання (рис.2.1)



1 – лазерне зварювання; 2 - лазерно-гібридне зварювання; 3 – MIG зварювання;

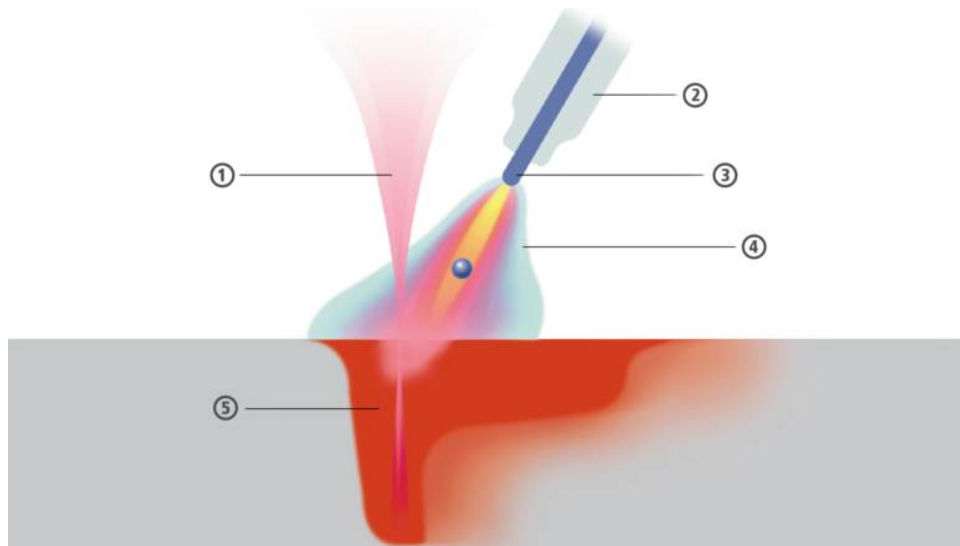
Рисунок 2.1 – Геометрія зварних швів, отриманих різними способами

У гібридному зварюванні використовується висока швидкість та глибоке проникнення лазерного зварювання. Одночасно дріт для дугового зварювання подає присадний метал, тим самим збільшуючи допустимий зазор порівняно з лазерним зварюванням та зменшуючи виникнення дефектів зварювання. Зварювання може проходити за один прохід (рис.2.2).

Хоча в даному випадку підведення тепла вище, ніж при лазерному зварюванні, його величина залишається значно нижчою, ніж при звичайному дуговому зварюванні, що є перспективним рішенням для застосування у сталевих конструкціях.

Цей метод не тільки підвищує ефективність зварювання, але й покращує загальну структурну цілісність зварних швів, що робить його життєздатним варіантом для критично важливих інженерних проектів.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20



1 - лазерний промінь; 2- газове сопло; 3 –електрод; 4 -імпульсна зварювальна дуга; 5- проплавлення.

Рисунок 2.2 - Лазерно-гібридний процес зварювання

Здатність досягати високоякісних зварних швів зі зменшеною деформацією та підвищеною міцністю підкреслює потенціал гібридного зварювання у розвитку сучасних будівельних технік. Отже, гібридне зварювання набуває популярності як кращий метод для виготовлення та складання великогабаритних сталевих конструкцій, задовольняючи як вимоги до продуктивності, так і до надійності в сучасній інженерії.

Для структурної цілісності та довговічності сталевих мостів вирішальне значення мають втомні характеристики. Мости піддаються повторюваним циклічним навантаженням від транспорту, вітру та змін навколишнього середовища, що робить втому матеріалу суттєвою проблемою.

Розуміння втомних характеристик зварних з'єднань є важливим для забезпечення безпеки та довговічності цих конструкцій. Більшість існуючих досліджень зосереджені на втомних характеристиках з'єднань, створених за допомогою традиційних методів дугового зварювання, що забезпечує міцну основу знань у цій галузі.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

У контексті Цілей Сталого Розвитку, які наголошують на ефективному розвитку промисловості, інноваціях та інфраструктурі, порівняння підведення тепла між гібридним зварюванням та традиційними технологіями дугового зварювання стає особливо актуальним.

Гібридне зварювання пропонує значне зниження підведення тепла порівняно зі звичайним дуговим зварюванням. Це зниження підведення тепла не лише мінімізує теплову деформацію та залишкові напруження в зварних компонентах, але й підвищує загальну енергоефективність виробничого процесу.

З точки зору промислових інновацій, нижче підведення тепла, пов'язане з гібридним зварюванням, призводить до покращення структурної цілісності та експлуатаційних характеристик зварних компонентів.

Це має вирішальне значення для проектів критичної інфраструктури, де довговічність та безпека сталевих конструкцій, таких як мости та будівлі, є надзвичайно важливими. Крім того, точність та контроль, що забезпечуються технологією гібридного зварювання, дозволяють виконувати складніші та тонко налаштовані зварювальні операції, розширюючи межі можливостей сучасного будівництва та виробництва.

2.1.2 Вибір зварювальних матеріалів.

Згідно з даними Міжнародного інституту зварювання та за підтримки таких стандартів, як AWS (Американське зварювальне товариство), зварювання залишається невід'ємною частиною інфраструктури вартістю в трильйони доларів у всьому світі.

Прогнозується, що світовий ринок зварювальних витратних матеріалів до 2027 року перевищить 25 мільярдів доларів США, що відображає величезний попит на якісні електроди,

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Промислове розширення в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні, оновлення інфраструктури в США та Європі, а також зростання енергетичних проєктів у всьому світі значною мірою залежать від надійної роботи зварювання.

Для виконання зварювального процесу вибираємо присадний дріт марки ER70S-3. Дріт марки ER70S-3 (рис.2.1) виготовлений з вуглецевої сталі, та має мідне покриття для захисту від газів. Він володіє відмінними характеристиками зварювального процесу – стабільним горінням дуги, невеликим розбризкуванням та високою стійкістю до утворення тріщин.

Маючи невеликий вміст розкислювача, ER70S-3 добре підходить для зварювання чистих поверхонь. Хоча він добре працює в умовах блискучого, полірованого металу, він демонструє більше шлакоутворення та пористості при використанні на іржавих або брудних основних металах. Нижчий вміст розкислювача призводить до вищої концентрації кисню у зварювальній ванні, що може вплинути на проплавлення та ширину шва.

Одним і найважливіших факторів, що впливають на якість зварювання, є поведінка зварювальної ванни, на яку безпосередньо впливає наявність розкислювачів. Розкислювачі, такі як Zr, Al, Ti та Mn, додаються для зменшення вмісту кисню в розплавленій зварювальній ванні, запобігаючи таким дефектам, як пористість та захоплення шлаку. Саме тут значну роль відіграє ефект Марангоні.



Рисунок 2.2 – Зварювальний дріт ER70S-3.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Ефект Марангоні описує потік рідини у відповідь на градієнт поверхневого натягу, на який впливають температура та концентрація розкислювачів. Наприклад, коли область під дугою нагрівається, поверхневий натяг зменшується в центрі зварювальної ванни, що призводить до течії рідини до країв. Вища концентрація розкислювачів у зварювальній ванні може посилити цей ефект, що потенційно може призвести до захоплення шлаку, особливо під час зварювання без продувки газом.

Електрод ER70S-3, з відносно невеликою кількістю розкислювачів, пропускає велику кількість кисню у зварювальну ванну, що може збільшити проплавлення та створити вужчі валики. Хімічний склад зварювального дроту наведений в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Хімічний склад зварювального дроту ER70S-3.

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
≤0,07	≤0,95	1,75	≤0,15	<0.15	≤0,25	≤0,30

Механічні властивості наплавленого металу наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Механічні властивості зварювального дроту ER70S-3.

Механічні властивості	Одиниці	Значення
Границя міцності	МПа	540
Відносне видовження,	%	29
Границя текучості,	МПа	435
Ударна в'язкість, Дж/ см2 (KCV) (-20)	Дж/ см2 (KCV) (-20)	120

2.1.3 Визначення та розрахунок технологічних параметрів

Для реалізації переваг гібридного лазерного дугового зварювання необхідний правильний вибір технологічних параметрів:

- Потужність лазера;

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

- Швидкість зварювання;
- Відстань між віссю лазерного випромінювання і кінцем дроту;
- Положення фокусу;
- Кут нахилу електрода;
- Потік газу;
- Склад захисного газу;
- Модуляція потужності дугової складової;
- Стикування зварювальних кромок;
- Підготовка кромок.

Під час розроблення технологічного процесу параметри зварювання вибирають за довідниковими таблицями або виконують розрахунковим шляхом.

Підібрані технологічні параметри процесу представлені в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 - Технологічні параметри процесу зварювання

№	Показники	Одиниці	Значення
1	Сила струму	В	230 ...260
2	Потужність лазера	кВт	10
3	Положення фокуса	мм	1,53,0
4	Напруга	В	24...28
5	Витрати плазмоутворюючого газу	л/хв	0,1...0,5
6	Захисний газ	вид	гелій
7	Витрати захисного газу	л/хв	25 ...30
8	Виліт електрода	мм	12 ...15
9	Швидкість подачі дроту	м/хв	5,5...6,5
10	Діаметр присадкового дроту	мм	1,2
11	Відстань між лазером і дугою	мм	1,5 ...2,0

2.1.4 Вибір основного та допоміжного зварювального обладнання

Для виконання зварювальних робіт, як у комплекті з іншими машинами так і самостійно застосуємо зварювальний апарат серії Fortis 500 (рис. 2.3).

Концепція апаратів Fortis побудована на використанні компактної системи струмом 500А. Конструкція агрегату передбачає місце для розміщення ще одного контуру рідини для охолодження. Таке виконання дозволяє використовувати обладнання у тісних приміщеннях. Передбачено можливість зовнішнього подавання дроту, що значно розширює робочий діапазон.



Рисунок 2.3 - Зварювальний апарат серії Fortis 500

Перевагами зварювальної установки є :

- Висока гнучкість, що дозволя часто змінювати застосування або діаметр дроту;
- Можливість обробляти два різні матеріали;
- Займає мало місця;

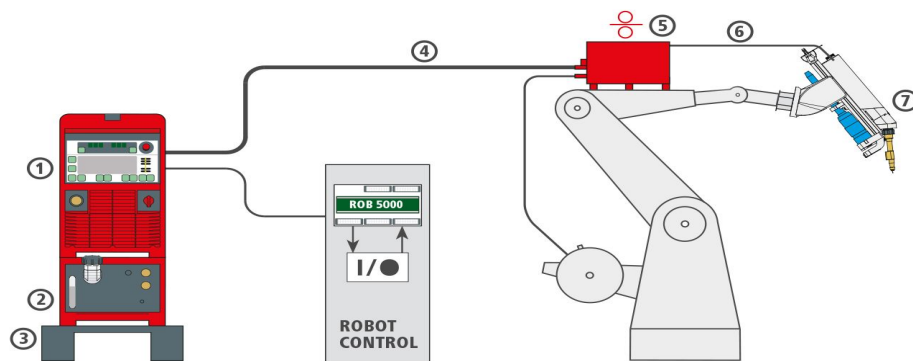
					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- Швидка зміна процесу;
- Має широке коло застосувань.

Технічні характеристики обладнання представлено в таблиці

Технічні параметри	Одиниці	Значення
Максимальний зварювальний струм, при ПВ 100%,	А	500
Діаметр електродного дроту	мм	0,8 ... 1,6
Швидкість подачі електродного дроту,	м/хв	6,0
Маса базової версії	кг	53

Лазерно-дугова технологія фірми Fronius забезпечує задовільне перекривання зазорів та легку підготовку стику, властивостям процесу в захисних газах, а також незначний термічний вплив, високу швидкість зварювання, а також глибоке проплавлення. Завдяки цій технології можна зварювати різноманітні вироби з швидкістю до восьми метрів на хвилину і якнайвищою якістю. Лазерно-гібридна система представлена на рисунку 2.4



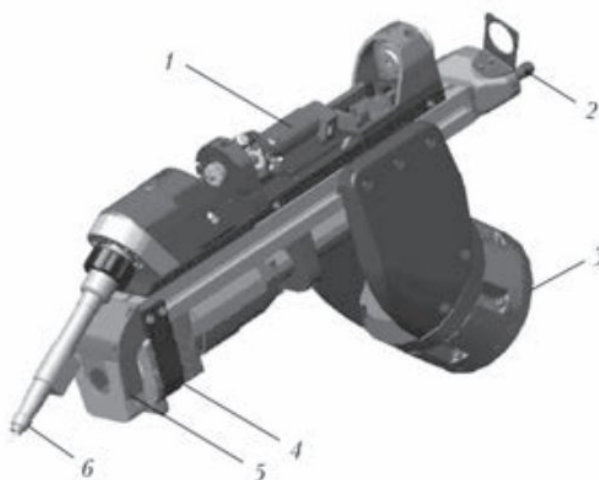
1- TransPulsSynergic; 2 - охолоджувальний модуль; 3 - вертикальна консоль; 4 - з'єднувальний шланговий пакет; 5- механізм подачі дроту для роботизованої системи; 6- шланговий пакет зварювального пальника; 7 - лазерно-гібридна зварювальна головка.

Рисунок 2.4 - Лазерно-гібридна система

Основною ланкою системи лазерно-дугового зварювання є компактна лазерно-гібридна головка (рис.2.5) укомплектована інтегрованим зварювальним пальником MIG/MAG та лазерною оптикою.

Тримач робота об'єднує головку з стандартною роботизованою системою. Завдяки цьому головка має необхідну гнучкість для роботи у важкодоступних ділянках виробу.

Присадковий дріт можна розмістити у довільному положенні відносно лазерного променя, що дає змогу точно адаптувати процес до різних способів підготовки та зварювальних завдань.



1- пристрій подачі дроту; 2 – забір повітря; 3 – фіксатор на рукаві робота; 4 – захисне скло; 5 – Crossjet; 6 – водоохолоджуваний монштурк.

Рисунок 2.5 – Лазерно-гібридна головка

Лазерно-гібридна головка укомплектована модулем Crossjet, який забезпечує чистоту і прозорість захисного скла. Струмінь повітря швидко та ефективно відводить бризки у відповідний канал. Зона оброблення також залишається вільною від забруднень і зварювальних випарів.

Вбудований пальник MIG/MAG має двохконтурну систему охолодження. Подавання струму на нього здійснюється з цифрового

інверторного джерела струму Fortis 500, яке таксамо керує механізмом подачі дроту.

Верстат для складання та зварювання двотаврової балки KR-ZL-0818 (рис.2.6) в основному складається з головної машини, вхідного роликового конвеєра, вихідного роликового конвеєра, гідравлічної системи та електричної системи керування. Він характеризується точним позиціонуванням заготовки, стабільною та безпечною роботою, а також значно підвищує ефективність виробництва.

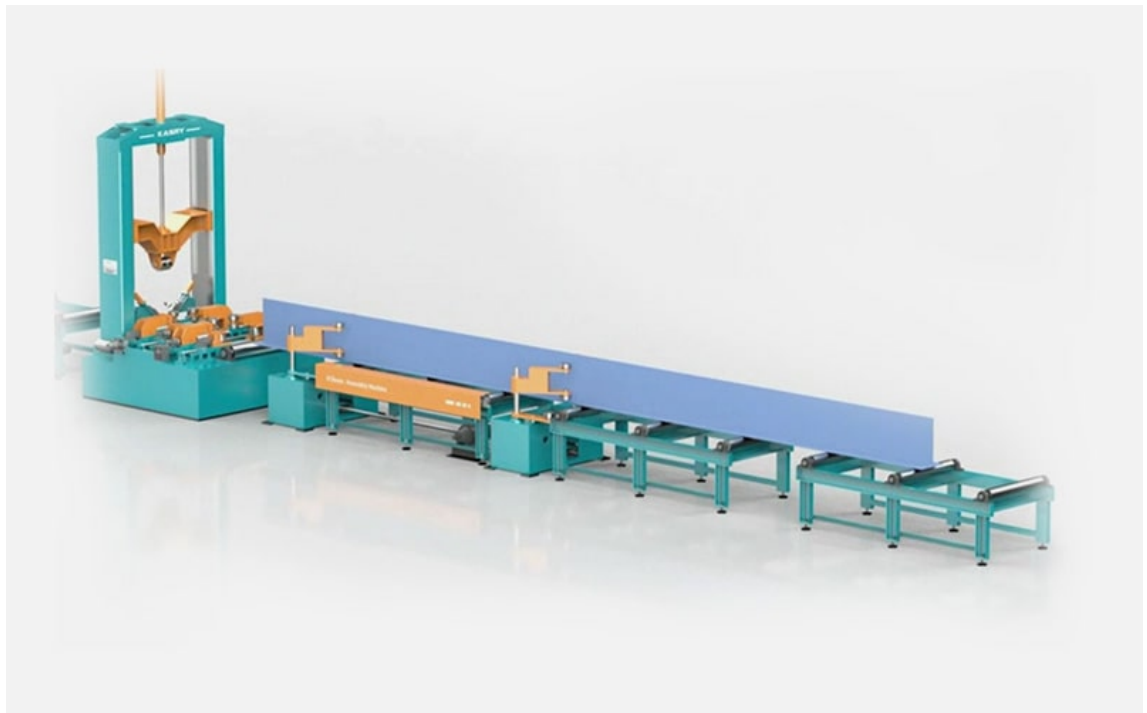


Рисунок 2.6 Верстат для складання та зварювання двотаврової балки KR-ZL-0818

Всі основні компоненти є зварними конструкційними деталями з високою міцністю та легкою конструкцією. Ключові деталі проходять обробку для зняття напруги, щоб забезпечити довговічність та запобігти деформації.

Верстат використовує синхронну систему затискання, що дозволяє автоматично вирівнювати фланцеві пластини та стінкові пластини, що ефективно запобігає коливанню та зміщенню під час процесу складання двотаврової балки.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Головне передавальне колесо виготовлено з використанням технології інтегрального кування, що забезпечує відмінну стійкість до стиску та зносостійкість, гарантуючи довготривалу стабільну роботу.

Портальний зварювальний апарат для двотаврової балки – це спеціалізоване обладнання, призначене для ефективного та точного зварювання двотаврової балки. Він складається з портальної рами, механізму направляючої дуги, автоматичного апарата для дугового зварювання, електричної системи керування процесом. Портальний зварювальний апарат комплектується лазерно-гібридною системою Фроніус, в тому числі зварювальним апаратом Fortis 500.

Машина має портальну конструкцію з подвійною системою приводу та регулюванням швидкості зі змінною частотою, що забезпечує плавну, стабільну та надійну роботу.

Здатний до двонаправленого зварювання (зварювання вперед і назад), апарат усуває простої на зворотний рух, значно підвищуючи ефективність роботи.

Оснащений автоматичним механізмом відстеження та центрування направляючої дуги, він забезпечує точне вирівнювання зварювального пальника, покращуючи якість продукції та якість зварювання.

2.2 Розроблення технологічного процесу

2.2.1 Заготівельні операції

Листовий метал та плита, що надходять на підприємство з обробки металу, виглядають досить плоскими. Але це тільки на перший погляд.

Листи та плити надходять від поставщиків у рулонах. У сервісних центрах металу ці рулони розмотуються, вирівнюються та, нарешті, ріжуться на потрібну довжину. Хоча листи здаються плоскими, всередині них все ще є напруга.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коли ці матеріали ріжуться за допомогою джерела теплової енергії, такого як лазерний або плазмовий різальний верстат, напруга знімається, і результати очевидні. Деталі стають нерівними. Це стосується як тонких, так і товстих металевих деталей.

Це стосується як деталей, виготовлених з чорних, так і з кольорових деталей. Використання допоміжного газу під час різання насправді відіграє значну роль у цьому процесі. Наприклад, коли кисень використовується для різання вуглецевої сталі, кисень реагує з металом в екзотермічній реакції. Це вводить велику кількість тепла в зону різання, що дозволяє процесу різання відбуватися швидко.

Побічним продуктом цієї хімічної реакції є окислена кромка, яку необхідно очистити, щоб забезпечити адгезію фарби.

Однак додаткове тепло також вивільняє більше напруги в металі. Різання азотом, інертним газом, зменшує підведення тепла порівняно з киснем, але навіть при більш щадному процесі напруги все одно вивільняються.

Це може стати особливо проблематичним для виробничого цеху з новою технологією лазерного різання, оскільки деякі деталі можуть нахилитися на планках після лазерного різання та ставати перешкодою для ріжучої головки, особливо коли швидкість різання досягає 30 м/хв. Дуже дорога технологія виготовлення ризикує бути пошкодженою нерівною деталлю на ріжучому столі.

Досить ефективним засобом для усунення напружень є верстат для вирівнювання деталей. Він може виготовляти плоскі деталі для застосувань, де для подальших процесів виготовлення абсолютно необхідно отримувати рівні деталі, щоб забезпечити вищу продуктивність та меншу кількість браку під час гнуття та зварювання.

Верстат для вирівнювання деталей забезпечує площинність за допомогою серії роликів, які чинять тиск на листовий метал або пластинчасту деталь (рис. 2.8). Ролики обробляють матеріал, коли він проходить через

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

верстат. Інтенсивність тиску, що прикладається до матеріалу, зменшує та зрештою усуває напруження, що виникають у центрі обслуговування металу.

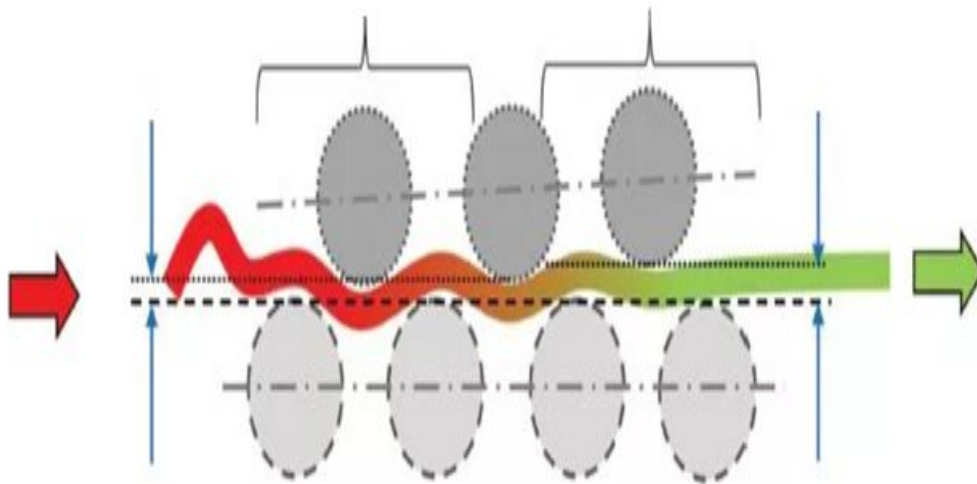


Рисунок 2.8 – Схема процесу усунення напружень та вирівнювання деталей

Що стосується розміру деталей, що підлягають вирівнюванню, все залежить від діаметра ролика. Кожен діаметр ролика в поєднанні з відстанню між роликами та конструкцією рами ролика, опорного ролика та рами машини має свій специфічний діапазон операцій. Загалом, ролики малого діаметра використовуються для тонкого матеріалу, а більші ролики - для товстішого матеріалу. Вирівнювальні машини зазвичай можуть вирівнювати деталі від 0,2 мм до майже 70 мм.

Для використання у технологічному процесі виробництва балки підберм листопрвилну машину KOHLER типу 130P.900. Модель Peak Performer 130P.2000 має перспективні характеристики та гарантує оптимальні результати вирівнювання, а також гнучкість, надійність та низькі експлуатаційні витрати. Одним із вирішальних факторів тут є надсучасна сервоелектронна концепція машини та повна відсутність будь-якої гідравліки.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32



Рисунок 2.8 – Листопрвильна машина KOHLER 130P.900

Конструкція має низку позитивних технічних особливостей: наприклад, вирівнювальні ролики приводяться в рух прямим приводом, що підвищує енергоефективність, зменшує знос і дозволяє вирівнювати більші поперечні перерізи. Це означає, що вирівнювання проходить ефективно, привід не є чутливим до коливань температури, а нижче споживання енергії також робить її надзвичайно екологічно чистою.

Машина оснащена удосконаленою системою очищення вирівнювальних роликів та опорних роликів, а також електромеханічним керуванням зазором вирівнювання. Для ефективної роботи передбачено інтелектуальний захист від перевантаження та реверсивні вирівнювальні

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

ролики. Опорні ролики є досить широкими і шлях складає відповідно 6000 мм. Технічні параметри машини листопрямлячої машини KOHLER 130P.900 представлені в таблиці 2.8

Таблиця 2.8 Технічні параметри листопрямлячої машини KOHLER 130P.900

Найменування параметра	Одиниці	Значення
Ширина металопрокату, мм	мм	До 2000
Товщина металопрокату, мм	мм	До 40
Вимога рівності	мм /метр	1
Кількість роликів	шт	21
Діаметр роликів	мм	18...30

Полуменеве різання є стандартним процесом різання для більшості сталевих мостів (рис. 2.9). Киснево-паливне різання, по суті, спалює сталь, тому процес дещо повільніший, ніж плазмове.

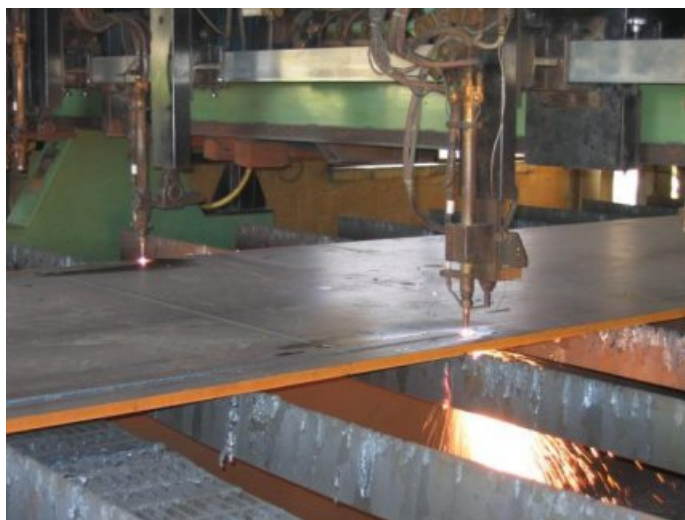


Рисунок 2.9 - Полуменеве різання

Через збільшення тривалості високих температур, що виникають під час операції випалювання, може знадобитися деяке шліфування обпалених країв для зчеплення покриттів.

Плазмове різання є одним із найефективніших способів різання сталі. Електрична дуга, яка розріджує сталь, перегріває потік газу під високим тиском, і тиск газу «ріже» сталь. Завдяки збільшеній швидкості, менше тепла передається сталі, що призводить до меншої деформації, що виникає протягом усього процесу виготовлення.

Для отримання заготовок заданої форми застосуємо універсальну плазмово-полуменеву машину з ЧПК серії PCL .

Плазмові різальні машини з ЧПК серії PCL (рис.2.9) розроблені для високопродуктивного промислового виробництва. Завдяки інтеграції надміцного порталу зі зняттям напруги з прецизійним керуванням рухом, створена стабільна платформа, яка гарантує точність і довговічність навіть у цілодобовому виробництві.

Високоточні верстати плазмового різання з ЧПК від PCL Group – це промислові системи, розроблені для забезпечення жорстких допусків та чистих країв. Вони спеціалізуються на виготовленні важких конструкцій, оснащені інтелектуальним керуванням висотою пальника (THC) та багатоосьовим профілюванням для пластин, труб та двотаврових балок.



Рисунок 2.9 – Машина для плазмового різання PCL

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Технічні параметри установки для плазмового різання PCL представлено в таблиці 2.9.

Перевагами установки є:

- Повністю автоматична система контролю висоти пальника (THC);
- Високоточні лінійні напрямні та рейковий привід;
- Промислова система керування ЧПУ Starfire/Fangling;
- Двопривідні серводвигуни змінного струму/крокові двигуни для високошвидкісного руху;
- Універсальна підтримка як плазмового, так і киснево-кисневого різання.

Таблиця 2.9 Технічні характеристики установки для різання PCL

Найменування параметра	Одиниці	Значення
Розміри робочої зони	мм	3000×6000mm
Товщина заготовки	мм	0,530,0
Швидкість різу	мм/хв	12000...15000
Потужність	W	3000...6000
Повторюваність	мм на 1000мм	±0.05
Товщина кисневого різання	мм	6...150
Габаритні характеристики,	мм	4600*2260*1750mm
Вага,	кг	2000

2.2.2 Складально-зварювальні операції

Після виконання підготовчих робіт, правильність виконання, яких має критичне значення для якості готової конструкції, деталі збираються в пристосуваннях та виконуються прихвачення.

Операція складання балки призначена для правильного розташування збірних елементів та надійної їх фіксації. Для цього використовується відповідне обладнання. Як відмічено вище складання вузлів завершується виконанням прихвачень.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Обсяг зварювальних робіт у цеху для виготовлення зварного мосту варіюватиметься від зварювання кількох ребер жорсткості балок, розширювальних пристроїв перекриття та дрібних деталей для прольотів прокатних балок до повного виготовлення балок та ферм з листового матеріалу та профілів.

Проектом передбачено для з'єднання елементів застосувати гібридне лазерно-дугове зварювання (Laser-Arc Hybrid). Цей спосіб є високопродуктивним процесом, що об'єднує глибоке проплавлення за допомогою лазера та стабільність процесу за допомогою електричної дуги (MIG/MAG) в одній зварювальній ванні. Такий підхід забезпечує високу швидкість процесу (8-10 м/хв) та необхідну якість шва.

Лазерно-дугове гібридне зварювання (ЛАДЗ) – це передова технологія зварювання, яка інтегрує як лазерні, так і дугові джерела тепла в одній розплавленій ванні, досягаючи синергетичних переваг, що перевищують суму їхніх окремих внесків. Цей метод підвищує швидкість зварювання та глибину плавлення, стабілізує процес та мінімізує дефекти зварювання

Дватаврові балки несуть значні навантаження в мостобудуванні, оскільки їхня геометрія ефективно розподіляє навантаження по поперечному перерізу.

Правильність їх виготовлення має критичне значення. Зварювання має повністю пронизувати метал, не створюючи деформації, яка б спотворювала кінцеві розміри.

Сучасні зварювальні лінії дватаврових балок виконують це за допомогою автоматизованих послідовностей, які точно контролюють введення тепла та швидкість руху.

Під час будівництва мостових балок процес виготовлення конструкційної сталі безпосередньо визначає, яке навантаження може витримати готова балка та як довго вона прослужить.

Комплектація обладнанням для виконання технологічного процесу визначається способом зварювання. Виходячи з особливостей гібридного

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

способу ми застосуємо автоматизовані порталні системи - порталні роботи. Використання порталних робіт є ключовим елементом промислової автоматизації.

Автоматизовані порталні системи виробництва двотаврових балок інтегрують обробку матеріалів зі зварювальними операціями в безперервний процес. За цього автоматизація усуває мінливість, яка є притаманна для ручних процесів. Якість зварювання залишається незмінною від першої балки до тисячної. Це є важливим для виробництва мостових балок, оскільки інспектори перевірятимуть кожен критичний зварний шов, а повторна обробка коштує значних часових та фінансових затрат.

2.2.4 Вибір заходів боротьби із зварювальними напруженнями

Під час виготовлення та складання сталевих конструкцій зварювання, як основний виробничий процес, широко використовується у виробництві ключових компонентів, таких як сталеві балки, ферми та фасонки.

Як ефективність, так і якість зварювання критично визначають графік виробництва, виробничі витрати, а також довгострокові витрати на обслуговування та термін служби всієї конструкції мосту.

Однак високі температури, що виникають під час зварювання, та вплив навколишнього середовища на швидкість охолодження неминуче призводять до виникнення зварювальних напружень та деформацій.

Зварювальні напруження – це внутрішня напруга, спричинена тепловим розширенням та стисненням у зварному шві та навколишній зоні термічного впливу. Зварювальна деформація виникає, коли різні фактори під час зварювання не повністю відповідають виробничим стандартам, що проявляється у відхиленнях від зовнішнього вигляду спроектованого конструктивного елемента.

Під час виготовлення та встановлення великогабаритних сталевих компонентів мосту ці проблеми можуть серйозно вплинути на точність

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

розмірів та структурну стійкість компонентів, що призведе до різних негативних наслідків, таких як зниження економічної віддачі.

Після зварювання сталеві конструкції потребують процесу механічного оброблення та при необхідності виправлення геометричних розмірів викривлених зварювальними напруженнями та деформаціями.

Для мінімізації впливу зварювальних напружень та деформацій нами передбачено заходи для запобігання утворенню негативних явищ, спричинених зварювальними напруженнями та деформаціями.

Передусім це заходи конструкторського характеру, які передбачають максимальну технологічність конструкції. Конструкція установки для газифікації змодельована з використанням програми Solidworks, де щонайбільше врахували її технологічність.

Наступним кроком була вдало підібрана технологія виконання збиральних та зварювальних робіт на всіх її стадіях.

Встановлено, що час та економічні витрати, пов'язані з процесом усунення нерівностей пов'язаних з залишковими напруженнями та деформаціями під час цехового виробництва складає від 2 до 9% від загальної кількості.

Через мінливість процесів вирівнювання для різних компаній та різноманітність розмірів сталевих конструкційних елементів, узагальнити загальний час виробництва або витрати складно.

Однак було підраховано, що для мосту класу 500 тонн процес вирівнювання, при використанні дугового зварювання під шаром флюсу складає приблизно 225 годин.

При використанні гібридного лазерно-дугового зварювання наведені показники значно нищі. Тому, застосування гібридного лазерного зварювання для реальних виробничих умов призведе до суттєвого зменшення часу та витрачених ресурсів на процес вирівнювання, що в свою чергу дозволить зменшити економічні витрати, що потенційно значно вплине на економічну ефективність виготовлення сталевих компонентів мосту.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Сталеві мости часто піддаються повторюваним транспортним навантаженням, що робить втомну міцність критичним чинником при оцінці їхньої довгострокової структурної безпеки. Мости з високою втомною міцністю можуть витримувати частіші та триваліші цикли навантаження, не піддаючись пошкодженню від втоми матеріалу або розтріскуванню.

За результатами аналізу наукових досліджень встановлено, що за номінальних діапазонів напружень, які перевищують 250 Н/мм², гібридно-зварні з'єднання продемонстрували еквівалентну або вищу втомну міцність, порівняно зі з'єднаннями, отриманими дуговим зварюванням.

У відповідності до рекомендацій міжнародних організацій, зокрема Японського товариства сталевих конструкцій (JSSC) та застосовуючи коефіцієнт перетворення 4/5, гібридно-зварні з'єднання відповідали стандартам кривої проектування класу D, тоді як дугово-зварні з'єднання показали гірші результати при вищих рівнях напруження.

Отже, компоненти мосту, виготовлені за допомогою технології гібридного зварювання, менш схильні до розтріскування від втоми під час повторюваних навантажень, що значно підвищує надійність та термін служби мосту.

Поглинена енергія Шарпі служить важливим показником для оцінки стійкості матеріалів до руйнування під ударними навантаженнями. Цей параметр особливо важливий у низькотемпературних середовищах, де сталь стає все більш крихкою та схильною до руйнування.

Проведені дослідження оцінки поглиненої енергії Шарпі в зоні термічного впливу (ЗТВ) гібридно-зварних з'єднань за допомогою імітованих термоциклічних випробувань, показали, що значення енергії досягає необхідних 47 Дж, що дозволяє ефективно запобігати крихкому руйнуванню.

Такий результат підкреслює, що для холодного клімату або для умов низьких температур взимку використання гібридних методів зварювання для спорудження сталевих мостів значно підвищує структурну цілісність та безпеку.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Крім того, ця технологія зварювання не тільки покращує механічні властивості матеріалів, але й підвищує надійність та довговічність сталевих мостів в екстремальних погодних умовах.

Вантажопідйомність сталевих мостів безпосередньо визначає максимально допустиме навантаження на конструкції, що має вирішальне значення для забезпечення безпеки руху та підтримки функціональності мосту.

Завдяки застосуванню гібридної технології зварювання, деформація матеріалу та залишкові напруження, викликані зварювальними процесами, можуть бути значно зменшені. Крім того, підвищення міцності на втому та поглиненої енергії за Шарпі сприяє покращенню структурної цілісності та безпеки.

Це збільшення не тільки покращує стійкість конструкції, але й дозволяє проектувати легші мостові конструкції, тим самим заощаджуючи матеріали та кошти. Крім того, вища вантажопідйомність дозволяє мостам краще витримувати несподівані перевантаження, зменшуючи ймовірність пошкодження конструкції внаслідок таких інцидентів.

У контексті цілей сталого розвитку, які наголошують на ефективному розвитку промисловості, інноваціях та інфраструктурі, порівняння підведення тепла між гібридним зварюванням та традиційними технологіями дугового зварювання стає особливо актуальним.

Гібридне зварювання пропонує значне зниження підведення тепла порівняно зі звичайним дуговим зварюванням. Це зниження підведення тепла не лише мінімізує теплову деформацію та залишкові напруження в зварних компонентах, але й підвищує загальну енергоефективність виробничого процесу.

З точки зору промислових інновацій, нижче підведення тепла, пов'язане з гібридним зварюванням, призводить до покращення структурної цілісності та експлуатаційних характеристик зварних компонентів.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Це має вирішальне значення для проектів критичної інфраструктури, де довговічність та безпека сталевих конструкцій, таких як мости та будівлі, є надзвичайно важливими.

Крім того, точність та контроль, що забезпечуються технологією гібридного зварювання, дозволяють виконувати складніші та тонко налаштовані зварювальні операції, розширюючи межі можливостей сучасного будівництва та виробництва.

2.3. Технічний контроль та виправлення браку

2.3.1 Дефекти , що виникають при зварюванні конструкції

Дефекти зварювання – це різноманітні недосконалості, які погіршують якість, структурні характеристики, надійність та якість зварного шва.

Дефекти можуть бути поверхневими і видимими неозброєним оком, або внутрішніми та виявлятися лише за допомогою механічного або неруйнівного контролю - рентгенографії (RT), ультразвукового контролю (UT) та інших способів.

Дефекти зварювання є серйозною проблемою для промислового виробництва оскільки вони впливають на цілісність конструкції, безпеку та її експлуатаційні характеристики. Розуміння причин виникнення, типів та методів запобігання дефектам зварювання має вирішальне значення для забезпечення отримання високоякісних зварних швів.

Навіть дрібні несуцільності зварного шва можуть знизити термін служби, герметичність або корозійну стійкість під час експлуатації. Профілактика виникнення дефектів залежить від правильного проектування конструкції, вдалого вибору технології зварювання, дотримання параметрів технологічного режиму та кваліфікації операторів.

У стандарті зварювання ISO 6520 виконана класифікація різних типів невідповідностей при зварюванні та дефектів швів. Розпізнавання цих

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

проблем допомагає підтримувати контроль якості та запобігати структурним руйнуванням.

Під дефектом зварного шва розуміється будь-яке порушення у зварному з'єднанні, яке порушує цілісність зварного шва (рис. 2.8) Не всі дефекти впливають на функціональність зварної деталі, але вони все одно можуть вказувати на можливі проблеми в процесі зварювання.

Дефекти та несучільності можуть проявлятися у вигляді:

- утворення різних видів пор;
- неповного сплавлення або проплавлення;
- неприйнятних профілів;
- тріщин та розривів.

Прийняття або відхилення зварного шва зазвичай визначається межами, зазначеними в кожній з цих категорій.

Дефекти зварювання можуть бути спричинені різними факторами, включаючи неправильну техніку зварювання, неправильні параметри, низьку кваліфікацію або підготовку зварювальника, проблеми з матеріалами, недостатню підготовку основного металу, фактори навколишнього середовища, несправність або неправильне обслуговування зварювального обладнання, залишкові напруження та деформацію, а також недостатній контроль та перевірку якості.



Рисунок 2.8 – Тріщина у зварному шві

Неадекватні методи зварювання можуть призвести до неповного проплавлення, надмірного підведення тепла та деформації. Неправильні параметри можуть призвести до недостатнього проплавлення, неповного проплавлення або надмірного розбризкування. Недостатня підготовка або досвід зварювальників також можуть сприяти дефектам шва.

Проблеми з матеріалами, такі як домішки, забруднення або неправильний склад, також можуть впливати на якість зварювання.

Фактори навколишнього середовища, такі як вологість, температура та вітер, також можуть впливати на процес зварювання. Недостатні заходи контролю та контролю якості можуть призвести до невиявлених дефектів. Вирішення цих проблем має вирішальне значення для отримання високоякісних зварних швів та надійних зварних конструкцій.

2.3.2 Візуальний метод контролю

Зварювання є критично важливим процесом у виготовленні сталевих мостів. Зварювання використовується, як під час виготовлення елементів конструкцій в цехових умовах та і під час виконання монтажних робіт для встановлення виробів у проектне положення.

Якість зварного шва безпосередньо пов'язана з безпекою конструкції та терміном служби. Такі фактори, як налаштування параметрів зварювання, коливання зовнішнього середовища та складність середовища будівництва сталевого мосту, можуть сприяти дефектам зварного шва, погіршуючи зовнішній вигляд зварного шва та потенційно призводячи до проблем із безпекою конструкції.

Традиційне проведення контролю якості зварювання при виготовленні елементів мостів у великій мірі спирається на візуальну оцінку операторів, що використовують для цього калібри та інших допоміжні вимірювальні

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

інструменти інструментів, за допомогою яких встановлюють геометричні характеристики зварного шва.

Візуальний контроль, який використовує обробку зображень для виявлення дефектів, став поширеним методом інтелектуального визначення якості зварного шва. Порівняно з іншими, візуальний контроль є особливо вигідним у випадках великих обсягів зварювання та обмеженого робочого простору.

Крім того, він забезпечує зворотний зв'язок щодо якості зварного шва в режимі реального часу. Використовуючи активне бачення для визначення формуючих розмірів зварного шва та розпізнавання цілей для виявлення дефектів зовнішнього вигляду, можна досягти більш повної оцінки якості зварного шва.

Через витрати та необхідний час, як правило, неможливо ретельно дослідити внутрішній та зовнішній стан кожного зварного шва в мостовій конструкції. Тому необхідно мати комплексний метод візуального огляду під час та після завершення зварювання. Оскільки єдиним обладнанням, яке зазвичай використовується для візуального огляду, є легкий вимірювач розміру зварного шва та лупа, вартість повної програми візуального огляду зазвичай обмежується вартістю затрат на утримання персоналу, який проводить огляд. Існує безліч посібників, які допомагають інспектору приймати рішення щодо надійності або якості зварного шва .

Візуальний огляд слід починати з компонентів - і виконувати на різних етапах під час виготовлення. Знаючи якість зварного шва на різних етапах виготовлення, рішення про прийняття або відхилення зварного шва може ґрунтуватися на низці факторів.

Під час виконання складальних робіт матеріал слід оглянути. Слід перевірити розмір та форму деталей, а також видалити всю важку окалину, мастило, фарбу та олію. Після строжки кореня шва рекомендується проводити огляд через важливість початкового зварного проходу для загальної поведінки зварного виробу.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Перший прохід має тенденцію до дуже швидкого охолодження, тим самим затримуючи газ. Також через швидке охолодження цей прохід дуже схильний до розтріскування.

Після цього слід перевіряти кожен етап зварювання, оскільки після завершення зварювання лише поверхню можна оглянути візуально. Під час нанесення кожного шару присадного металу інспектор повинен, якщо можливо, перевірити шар на наявність дефектів. Перед нанесенням наступного шару видимі дефекти, такі як тріщини, доступні та можуть бути виправлені.

Після завершення зварювання слід провести візуальний огляд, щоб визначити відповідність технічним умовам, зовнішній вигляд зварного виробу, зовнішні дефекти (тріщини, тріщини кратерів, перекриття, підрізи тощо) та точність розмірів зварного виробу. У багатьох випадках візуальний огляд кожного шару присадного металу неможливий. Однак у цьому випадку уявлення про внутрішній стан можна отримати за зовнішнім виглядом зварного шва.

Хоча остаточне прийняття більшості конструкційних зварних швів визначається головним чином за зовнішнім виглядом та візуальним оглядом зварного шва, критичні зварні шви потребують додаткового внутрішнього та зовнішнього огляду в поєднанні з ретельним візуальним оглядом.

Слід підкреслити, однак, що хоча в багатьох випадках ці інші методи є необхідними, вони використовуються переважно для доповнення добре проведеної програми візуального огляду.

Слід зазначити, що візуальний огляд обмежується дефектами поверхні, а чутливість залежить від ширини дефекту, відбиття світла, ступеня гладкості поверхні та, перш за все, від майстерності та судження інспектора. Однак, наступне:

Фактори якості зазвичай можна визначити візуально:

- Точність розмірів зварного шва (включаючи деформацію);
- Відповідність готового зварного шва вимогам специфікації щодо ступеня, розподілу, розміру, контуру та безперервності зварних швів;

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

- Однорідність зовнішнього вигляду зварного шва;
- Поверхневі дефекти, такі як тріщини, перекриття, піднутрення, пористість поверхні та незаповнені кратери.

Слід наголосити, що правильна оцінка та інтерпретація будь-яких розбіжностей у зовнішньому вигляді зварної конструкції є важливою частиною візуального огляду.

Для проведення належної оцінки необхідно мати ґрунтовні знання про вимоги до експлуатації зварної конструкції та зварювальні процеси, що використовуються для її виготовлення, а також судження та досвід, необхідні для оцінки якості зварної конструкції.

Візуальний ручний метод контролю зварних швів пов'язаний з низкою проблем. Однією з головних причин є послідовність. Кожен оператор з ручного візуального контролю зварних швів оцінює зварний шов по-різному. Хоча існує стандарт, все одно оператори бачать зварні шви кожний по своєму.

Варто відзначити, що будівництво сталевих мостів залежить від складного будівельного середовища, яке характеризується впливом навколишнього середовища та просторовими обмеженнями, що потенційно може поставити під загрозу якість зварювання.

Крім того, оскільки довжина прольоту та багатогранність сталевих мостів продовжують розвиватися, робоче навантаження та складність проведення контролю якості зварних швів також значно зросли.

В результаті традиційні методи визначення якості зварювання більше не є достатніми для задоволення вимог сучасного будівництва сталевих мостів. Тому існує нагальна потреба в удосконаленні процесу визначення якості зварювання шляхом впровадження інтелектуальної автоматизації.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

2.3.3 Радіографічні методи контролю

Радіографія включає низку методів контролю для визначення внутрішньої якості зварного шва. Три основні методи використовують рентгенівські промені, гамма-промені або флюороскопію.

Хоча для цілей контролю використовуються варіації всіх трьох методів, ми розглянемо рентгенівською та гамма-радіографією через їх широке використання. Використання флюороскопії для дослідження зварних швів у зварній мостів зазвичай неможливе.

По суті, радіографія - це проходження променів через об'єкт; промені потрапляють на плівку або екран, виявляючи або реєструючи внутрішню структуру досліджуваного об'єкта.

Рентгенівські та гамма-промені - це електромагнітні хвилі короткої довжини хвилі, здатні проникати через матеріали, непрозорі для довгих світлових хвиль. Деяка частина випромінювання, що проходить через об'єкт, поглинається залежно від довжини хвилі, щільності матеріалу та його товщини.

Однак через порожнину в однорідній товщині матеріалу проходить більше випромінювання, ніж через сам матеріал. Оскільки випромінювання впливає на фотоплівку пропорційно до інтенсивності та часу, площа плівки під порожниною отримує більше випромінювання та виглядає темнішою, як тіньове зображення.

Основна робота обох радіографічних методів по суті однакова; однак, експлуатація, вартість та конструкція обладнання значно різняться. Рентгенівські промені виробляються електричним шляхом, зазвичай обмежуються одним напрямком і виникають лише коли працює джерело живлення; гамма-промені випромінюються з ізотопів і безперервно пропускаються в усіх напрямках.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Оскільки кожен з них може найкраще підходити для різних застосувань, порівняти їхні переваги нелегко. Більша довжина хвилі рентгенівських променів призводить до отримання рентгенограм з вищою контрастністю; тому, де потрібна висока контрастність, більш доцільна рентгенографія.

Ізотопи випромінюють гамма-промені в усіх напрямках і дозволяють одночасно перевіряти кілька зразків. Однак, головною перевагою ізотопного випромінювання є те, що воно дуже портативне та не потребує додаткового джерела живлення, але під час експлуатації необхідно бути надзвичайно обережним, щоб захиститися від радіаційної небезпеки.

Деякі з численних факторів, що впливають на вибір типу рентгенографії, це щільність матеріалу, товщина матеріалу, доступний час, доступність та економічність. Наприклад, початкова вартість рентгенівського обладнання є відносно великою, тоді як початкова вартість джерела гамма-випромінювання менша, але через його розпад необхідна повторна заміна.

Рентгенівські апарати доступні в розмірах від 10 до 1000 кв або більше. Однак, інспекція дорожніх конструкцій зазвичай обмежується апаратами 200 кв, оскільки установки більшої потужності дуже важко транспортувати.

У гамма-радіографії зазвичай використовуються чотири радіоактивні джерела: кобальт-60, іридій-192, тулій-170 та цезій-137. Вибір джерела зазвичай залежить від типу та товщини матеріалу, що підлягає інспекції, максимально допустимого часу експозиції, вартості, чутливості та частоти експозиції. Для товщини більше приблизно 2 дюймів (приблизно 5 см) використання ізотопного джерела є майже необхідністю, оскільки необхідний розмір рентгенівського апарата є великим і його важко транспортувати, тоді як для ізотопного випромінювання достатньо невеликої зміни розміру радіоактивного джерела.

Після вибору радіографічного джерела, яке буде використовуватися, зразок опромінюється цим джерелом. Радіографічна плівка, яка попередньо була розміщена навпроти зразка з боку, віддаленого від джерела, також опромінюється. Кількість випромінювання, що отримується плівкою, залежить

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

від щільності матеріалу зразка. Дефект у матеріалі призведе до збільшення або зменшення, залежно від типу дефекту, випромінювання, що досягає плівки. Наприклад, шлакове включення у зварному шві виглядатиме на рентгенограмі як нерівномірна світлова тінь. Цей дефект легко відрізнити від пористості та тріщин, які виглядають як округлі темні тіні різних розмірів та як тонка пряма або блукаюча темна лінія відповідно.

Визначаючи відносну цінність переваг або недоліків, слід враховувати тип конструкції, що підлягає інспекції. Численні недоліки, як правило, виключають використання радіографії для 100-відсоткової інспекції частини конструкції, якщо тільки експлуатаційний збій цієї частини не поставить під загрозу термін служби конструкції та життя людей. Слід пам'ятати, що радіографія не є остаточною відповіддю на питання методів інспекції, а радше допоміжним засобом для контролю якості зварних швів.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Конструювання мостової балки за допомогою програми Solidworks

На даний час актуальним питанням для інженерів є оволодіння комп'ютерних технологій проектування та розрахунку металевих конструкцій.

Solidworks — це 3D-програмне забезпечення CAD на базі Windows, яке використовує методи параметричного моделювання, виконує моделювання деталей, моделювання, складання та автоматичну генерацію 2D-інженерних креслень та інші функції. Більше того, воно має не тільки потужні можливості моделювання, але й високу ефективність моделювання. Воно також може легко створювати будь-які об'єкти складної форми.

Крім того, Solidworks має потужну інтелектуальну функцію складання. Люди можуть просто використовувати мишу для емуляції ручного складання, не натискаючи жодної команди.

3D-модель повністю пов'язана з інженерним кресленням та моделлю складання. Коли модель змінюється, відповідне інженерне креслення та модель складання автоматично змінюються. Відповідно, конструктор також може внести зміни до інженерного креслення або моделі складання, тоді модифікація відображається і на моделі.

Крім того, використання менеджера ознак може відображати характеристичну структуру моделі. Менеджер ознак може не тільки відображати порядок створення характеристик, але й спростувати доступ користувачів до відповідної інформації про всі характеристики.

В Сполучених Штатах Америки багато відомих університетів, включаючи Стенфордський університет, викладають SolidWorks як обов'язковий курс.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Solidworks втілює ідеал створення 3D-параметричних моделей деталей шляхом проектування етапів деталей. Він не тільки може легко побудувати 3D-модель, але й може забезпечити правильну модель для подальшого спрощення подальших модифікацій, налаштувань та складання. Крім того, він може відповідно коригувати ірраціональні структури, а також виконувати параметризовану підготовку для обробки числовим програмним керуванням.

Проектування конструкцій мостових балок є комплексним інженерним процесом, що ускладнюється дією змінних динамічних навантажень, складними умовами експлуатації і високими вимогами щодо безпеки самої конструкції.

Solidworks має багато застосувань у машинобудуванні і кресленні. Практика довела, що Solidworks може перетворити абстрактну та статичну теорію на образну та динамічну демонстрацію, де можуть спостерігати внутрішню структуру твердотільної моделі та створювати процес побудови.

Solidworks може безпосередньо моделювати складання деталей, і інженери отримують інтуїтивне розуміння принципу роботи складання, взаємного розташування деталей та зв'язку між ними, а також структури деталей та складання.

Такий підхід робить досліджуваний матеріал більш візуальним та допомагає інженерам розвивати просторову уяву та можливості конфігураційного проектування. Solidworks може створювати яскраві 3D-моделі, динамічно показувати процес різання, зварювання та отримувати як віртуальну збірку так і розібраний вигляд збірки.

На рисунку 3.1 показана конструкція мостової балки з привареними ребрами жорсткості та опорами виконана в програмі Solidworks.

Зварна мостова балка представлена у вигляді зварного двутавра. Найбільшою перевагою зварних балок Н-подібної форми є їхня гнучкість проектування.

Інженери можуть вказувати висоту балки, ширину полиці, а також товщину стінки та полиці відповідно до вимог проекту.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Це дозволяє створювати балки з високою несучою здатністю або меншою кількістю сировини для економії коштів. Зварювання балок Н-подібної форми забезпечує гнучкість, що перевершує ту, що доступна у гарячекатаних сталевих балок Н-подібної форми.

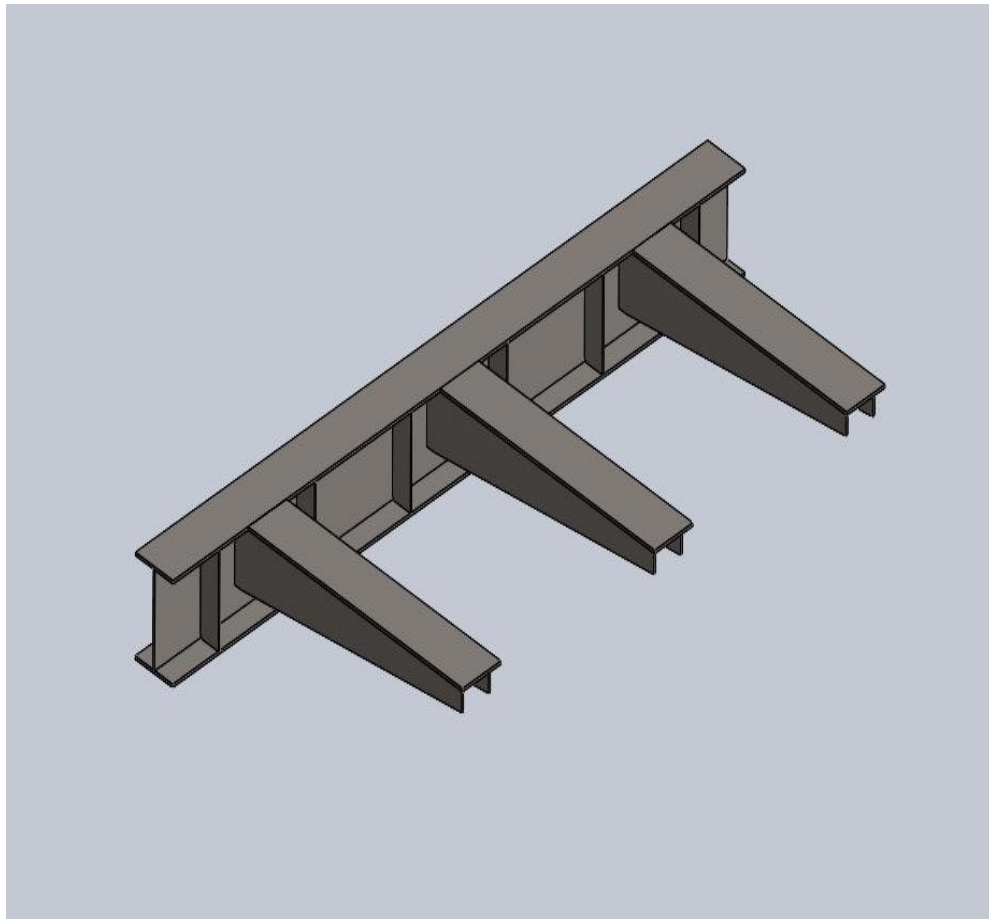


Рисунок 3.1 Мостова балка

Завдяки регулюванню товщини та ширини пластини, специфікації зварних двотаврових балок можуть бути розроблені для витримування значних вертикальних та поперечних навантажень, що робить їх придатними для складних проектів. Зварювання дозволяє виготовляти надвеликі балки без необхідності спеціалізованих прокатних станів. Це робить зварні балки кращим рішенням для негабаритних розмірів.

Хоча виготовлення додає часу, зварні балки дозволяють уникнути обмежених графіків прокатки станів, особливо для негабаритних балок. Це

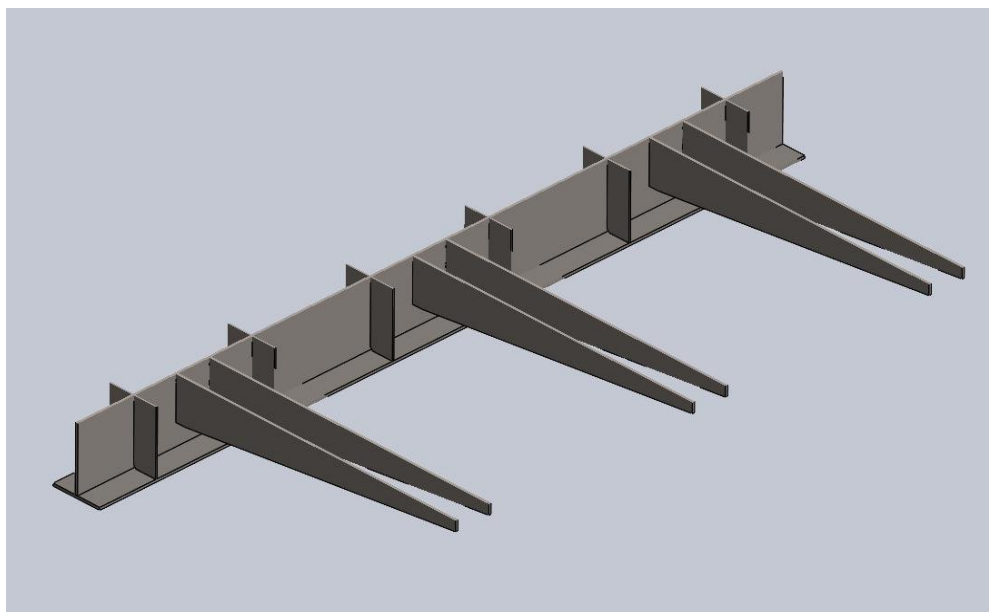
					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

робить їх практичним вибором, коли постачання гарячекатаного прокату обмежене або коли швидко потрібні нестандартні розміри.

Для збільшення степені технологічності встановлено геометричні розміри балки – довжина балки складає 3000 мм, товщина матеріалів 10 мм. Для виготовлення балки рекомендовано низьколеговану вуглецеву сталь (HSLA) - ASTM A709 класу 36.

Вказана марка сталі, була спеціально розроблена для спорудження мостів. Сталь A709 класу 36В має досить низьку границю текучості 250 МПа і забезпечує добрий баланс між такими характеристиками, як міцність, пластичність та зварюваність, що робить цей матеріал надійним вибором для мостових конструкцій, особливо для пішохідних переходів. Оксанометрія мостової балки показана на рисунку 3.2.

Особливістю мостових балок є те, що вони виготовляються за допомогою зварювання сталевих пластин, відповідних розмірів. Для збільшення міцності ми передбачили встановлення поперечних ребер жорсткості. Розроблена конструкція має високе співвідношення міцності до її ваги та є стійкою до вигину тому вона придатна до застосування у мостобудуванні.



					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Рисунок 3.3 Оксанометрія колони

Таким чином використовуючи, переваги програми Solidworks нам вдалося поєднати у конструкції мостової балки її мінімальні розміри, мультифункціональність і високу питому продуктивність

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпек та шкідливих чинників виробничого середовища

Зварювання – одна з найбільш фізично вимогливих та структурно важливих навичок у сучасній промисловості. Вона також одна з найнебезпечніших. На кожен добре виконаний зварний шов, що скріплює будівлю, припадає каталог небезпек – електричних, хімічних, термічних, механічних, радіологічних – які можуть покалічити або вбити за лічені секунди.

Таким чином процес зварювання можна віднести до небезпечної діяльності на робочому місці, яка щороку лише тільки в такій безпечній країні, як Сполучені Штати наражає понад півмільйона працівників на ризики для здоров'я та безпеки.

Зварювальна дуга працює, генеруючи надзвичайно високу теплову енергію, яка іонізує навколишні гази, створюючи плазмовий стан, здатний плавити та остаточно сплавляти базові метали та витратні присадні матеріали. Ця ж енергія одночасно виробляє інтенсивне видиме світло, ультрафіолетове випромінювання, інфрачервоне випромінювання, токсичні металеві пари, вибухонебезпечні бризки, електричний струм, що протікає через усе, до чого вона може дістатися, та достатньо тепла, щоб запалити матеріали на відстані дев'яти метрів.

Усі ці небезпеки діють одночасно, кожного разу, коли ви зварник збуджує дугу. Вони не чергуються, а діють постійно.

Міжнародна організація зі стандартизації публікує міжнародні стандарти, які впливають на роботу зварників щодо вибору обладнання та захисних виробів. Стандарт ISO 21904 охоплює вимоги до обладнання для

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

уловлювання зварювальних димів та його випробування. Стандарт ISO 25980 визначає вимоги безпеки до прозорих зварювальних штор та екранів. Стандарт ISO 11611 визначає захисний одяг, спеціально розроблений для зварювання та суміжних процесів. Ці критерії стають критеріями закупівлі: купуйте штори, що відповідають стандарту ISO 25980, віддавайте перевагу димососам, перевіреним за стандартом ISO 21904, та вибирайте вогнетривкий одяг, що відповідає концепціям експлуатаційних характеристик стандарту ISO 11611.

Враження електричним струмом є одним із найбезпосередніших, найсерйозніших та потенційно смертельних ризиків у зварюванні.

Джерела живлення для зварювання працюють у вторинному колі напруги, яка зазвичай коливається від 20 до 100 вольт. Небезпечна помилка полягає в тому, що низька напруга означає низьку небезпеку. Це не так. Вбиває не напруга, а електричний струм (сила струму), що протікає через тіло.

За умов низького опору – волога шкіра, просякнутий потом одяг, стояння у воді, гола шкіра, притиснута до заземленого металевого столу — навіть 50 вольт можуть пропустити через серце достатній струм, щоб спричинити фібриляцію шлуночків та смерть.

Ураження електричним струмом відбувається, коли оператор стає частиною електричного кола, перекриваючи проміжок між двома об'єктами за допомогою різниці напруг. Тіло зварника стає провідником. Струм протікає будь-яким шляхом, який має найменший опір, і якщо цей шлях перетинає серце, результатом може бути зупинка серця.

Фотокератит, відомий у професії як «дугове око» або «спалах зварника», анатомічно ідентичний сильному сонячному опіку — безпосередньо на рогівці ока. Інтенсивне ультрафіолетове випромінювання руйнує поверхневі епітеліальні клітини рогівки.

Ці мертві клітини відшаровуються, оголюючи щільно упаковані нервові закінчення під ними. Результатом є пекучий біль, неконтрольоване сльозотеча та відчуття піску в очах, яке зварювальники повсюдно описують як «жменю піску, кинути в очі».

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Найнебезпечнішою характеристикою дугового ока є його затримка початку дії. Зварник можете отримати сильний опік рогівки і абсолютно нічого не відчувати протягом 6–12 годин. До того часу, як біль розбудить вас о 3-й годині ночі, шкода вже завдана. Ця затримка є причиною того, що зварники часто недооцінюють небезпеку — «я почувався добре на той момент» не є доказом безпеки.

Заходи безпеки під час зварювання розроблені для захисту працівників від небезпек, пов'язаних зі самим процесом. Безпеку зварювання можна забезпечити шляхом проведення належного навчання, перевірки зварювального обладнання та забезпечення те, щоб працівники знали запобіжні заходи безпеки перед виконанням зварювальних робіт, щоб мінімізувати ризик травмування здоров'я та безпеки

Безпека праці під час зварювання залежить від складності конкретного завдання та умов робочого місця, серед інших факторів. Загалом, зварювальники повинні дотримуватися основних правил безпеки зварювання, заснованих на галузевих стандартах, і вони включають наступні заходи:

- Зварювальники повинні завжди носити респіратор, якщо оцінки впливу не нижчі за відповідні гранично допустимі значення впливу;
- Обов'язкова перевірка зварювального обладнання та електродотримача перед початком роботи.
- Зварювальники не повинні торкатися металевих частин електродотримача шкірою або мокрим одягом.
- Обов'язковим є носіння відповідних засобів індивідуального захисту, таких як зварювальні шоломи, та засобів захисту очей, таких як захисні окуляри, для захисту очей та голови працівників від гарячого шлаку, іскор, інтенсивного світла та хімічних опіків;
- Зварювальники повинні залишатися в робочій зоні щонайменше 30 хвилин після завершення зварювання, щоб переконатися у відсутності тліючого вогню

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

ВИСНОВКИ

В бакалаврській роботі розроблено технологічний процес виконання складальних та зварювальних робіт при виготовленні мостової балки.

Проведений аналіз способів, що використовуються на даний час показав неефективність зварювання під шаром флюсу. Для виготовлення мостової балки запропоновано гібридне лазерно-дугове зварювання. Використання лазерно-дугового способу дозволяє збільшити швидкість зварювання в шість разів та час проведення процесу на 98%, зменшити підведення теплоти та зменшити споживання енергії для виконання процесу, а також отримувати зварні шви високої якості та надійності.

Для виконання технологічного процесу підібрано комплект обладнання, що дозволяє автоматизувати виробництво мостових балок. Результати роботи можуть бути впроваджені в індустрії мостобудування, а також в навчальному процесі.

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шлапак Л. С., Панчук М. В., Матвієнків О.М., Біщак Р.Т., Сем'яник І. М. Методичні вказівки до виконання випускної кваліфікаційної роботи бакалавра за професійним спрямуванням «Зварювання». – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021– 60с.
2. J. Yan, M. Gao, X. Zeng. (2010) Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. Opt Laser Eng, 48 (4): 512- 517.
<https://10.1016/j.optlaseng.2009.08.009>
3. Yiyang Hu, Xiong Zhang, Zehui Liu, Fei Yan, Shenli Su, Chunming Wang. (2024) Investigation on the formation mechanism of collapse defects, microstructural evolution and mechanical properties in full penetration laser welding of thick-section steel. Journal of Manufacturing Processes 118: 341-356.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.060>
4. Reutzel EW, Sullivan MJ, Mikesic DA. (2006) Joining pipe with the hybrid laser-GMAW process: weld test results and cost analysis. Weld J 85:66–71.
5. Yuan D, Cui C, Zhang Q et al (2022) Fatigue damage evaluation of welded joints in steel bridge based on meso-damage mechanics. Int J Fatigue 161:106898. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106898>
6. Панчук, М. В. Зварювання плавленням [Текст] : конспект лекцій. Ч. 2 / М. В. Панчук, Л. С. Шлапак. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. – 109.
7. Li C, Ji B, Fu Z, Yao Y (2024) Stress concentration factor-based hot-spot stress prediction model for the web-gap weld of main girder in steel truss bridge. KSCE J Civ Eng 28(1):262–274. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0331-6>
8. Панчук М.В. Зварювання плавленням : конспект лекцій / М. В. Панчук. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2014. - 67 с.
9. Конструкції сталеві будівельні. Вимоги до виготовлення ДСТУ Б В.2.6-199:2014

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

10. Jiang X, Cao D, Qiang X, Xu C (2024) Study on fatigue performance of steel bridge welded joints considering initial defects. J Constr Steel Res 212:108369. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108309>
11. Jasiuniene E, Mazeika L, Samaitis V et al (2019) Ultrasonic non-destructive testing of complex titanium/carbon fibre composite joints. Ultrason 95:13–21. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.02.009>
12. Закон України «Про охорону праці» [Текст]: станом на 2 червня 2011р / Верховна Рада України – Офіційне видання – К.: Парлам. Ви-во, 2011 р – 18 с – (Серія «Закон України).

					КРБ. ПМ - 15. 00. 00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		