

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
кафедра інжинірингу машинобудівних технологій
(повна назва кафедри)

на тему: **Розроблення технології виготовлення підвісної**
кран-балки з дослідженням його НДС

Тернопіль
2025

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра на тему: " Розроблення технології виготовлення підвісної кран-балки з дослідженням його НДС " складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини.

У роботі здійснено комплексне науково-технічне обґрунтування технології виготовлення підвісної кран-балки як відповідальної зварної металоконструкції вантажопідіймального обладнання. Проведено аналіз умов експлуатації та нормативних вимог до подібних конструкцій, виконано обґрунтований вибір конструкційних матеріалів з урахуванням їх міцнісних характеристик, зварюваності та довговічності. Розглянуто особливості формування балкових елементів, вибір і послідовність технологічних операцій, методи автоматизованого зварювання, а також способи підготовки поверхонь і неруйнівного контролю якості зварних з'єднань.

Значна увага приділена впровадженню сучасних технологій зварювання та обладнання для їх реалізації. Використання зазначеного обладнання дозволяє забезпечити стабільність зварювального процесу, оптимізувати тепловкладення, зменшити залишкові напруження та деформації, а також підвищити якість і відтворюваність зварних швів. Запропоновані технологічні рішення спрямовані на зниження трудомісткості виготовлення, підвищення продуктивності та надійності процесу виробництва.

У дослідницькій частині роботи виконано чисельний аналіз напружено-деформованого стану підвісної кран-балки з використанням методу скінченних елементів у програмному середовищі SolidWorks Simulation. Досліджено розподіл еквівалентних напружень, переміщень і деформацій за дії розрахункових експлуатаційних навантажень. Отримані результати підтвердили відповідність розробленої конструкції вимогам міцності, жорсткості та експлуатаційної надійності, а також ефективність запропонованих конструктивно-технологічних рішень.

Розроблена технологія виготовлення підвісної кран-балки забезпечує підвищення якості зварних з'єднань, зменшення кількості технологічних дефектів, покращення експлуатаційних характеристик конструкції та може бути рекомендована для впровадження у серійному або дрібносерійному виробництві вантажопідіймального обладнання.

Ключові слова: АВТОМАТИЗОВАНЕ ЗВАРЮВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ, РЕЖИМИ ЗВАРЮВАННЯ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН, КРАН-БАЛКА.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	8
1.1. Опис конструкції виробу та умов його роботи	8
1.2 Технічні умови до конструкції виробу.....	16
1.3 Аналіз технологічного процесу	21
2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА	25
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	35
3.1 Технічне обґрунтування способу зварювання.....	35
3.2 Опис технологічного процесу	50
4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	63
4.1 Розрахунок сили притиску балки в кондукторі	63
4.2 Опис роботи запропонованих зварювальних пристосувань	66
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	69
5.1 Характеристика та аналіз потенційних небезпек і шкідливих виробничих чинників у цеху.....	69
5.2 Шляхи збереження працездатності та підвищення продуктивності праці	72
5.3 Підвищення стійкості інженерно-технічного комплексу до дії ударної хвилі...	74
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	79
ДОДАТКИ.....	82

ВСТУП

Сучасний розвиток промислового виробництва, машинобудування та складсько-логістичної інфраструктури супроводжується зростанням вимог до ефективності, надійності та безпеки вантажопідіймального обладнання. Одним із найбільш поширених і технологічно доцільних засобів механізації вантажно-розвантажувальних робіт у виробничих цехах, ремонтних майстернях, складських приміщеннях і допоміжних зонах промислових підприємств є підвісні кран-балки. Їх застосування дозволяє раціонально використовувати виробничий простір, зменшувати трудомісткість ручних операцій та підвищувати продуктивність праці.

Підвісні кран-балки широко використовуються в машинобудуванні, металургії, енергетиці, будівельній галузі, на підприємствах з виготовлення та ремонту металоконструкцій, а також у складських і логістичних комплексах. Завдяки конструктивним особливостям вони можуть бути інтегровані в несучі елементи будівель або підвішені до конструкцій перекриттів, що забезпечує гнучкість компоновки виробничих приміщень та можливість експлуатації у зонах з обмеженою площею. Застосування підвісних кран-балок сприяє оптимізації внутрішньоцехових транспортних потоків і скороченню часу виконання технологічних операцій [1].

В умовах зростання інтенсивності виробничих процесів та підвищення вимог до надійності обладнання особливого значення набуває забезпечення міцності, жорсткості та довговічності металоконструкцій підвісних кран-балок. Вантажопідіймальні системи зазнають дії змінних і циклічних навантажень, що зумовлює необхідність ретельного аналізу напружено-деформованого стану їх несучих елементів. Недостатнє врахування силових факторів, особливостей зварних з'єднань і технології виготовлення може призводити до виникнення залишкових напружень, локальних концентрацій напружень і передчасного пошкодження конструкції.

У зв'язку з цим актуальним є комплексний підхід до проєктування та виготовлення підвісних кран-балок, який поєднує раціональний вибір матеріалів, сучасні технології зварювання та чисельні методи аналізу напружено-деформованого стану. Використання комп'ютерного моделювання та методу скінченних елементів на етапі проєктування дозволяє підвищити точність розрахунків, оптимізувати конструктивні параметри та забезпечити відповідність виробу чинним нормативним вимогам з безпеки та надійності експлуатації.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Опис конструкції виробу та умов його роботи

Підвісні кран-балки (рис. 1.1) є вантажопідіймальними пристроями балочного типу, конструкція яких включає основну несучу балку 3, жорстко закріплену знизу до двох кінцевих балок 2. Для підвищення загальної жорсткості та зменшення прогинів у процесі експлуатації головна балка з бічної сторони додатково підсилюється ферменним елементом 6. Кінцеві балки, у свою чергу, з'єднані з ходовими візками 7, які здійснюють переміщення по нижніх полицях двотаврових балок 1, змонтованих на несучих конструкціях будівлі виробничого або складського призначення [1-5].

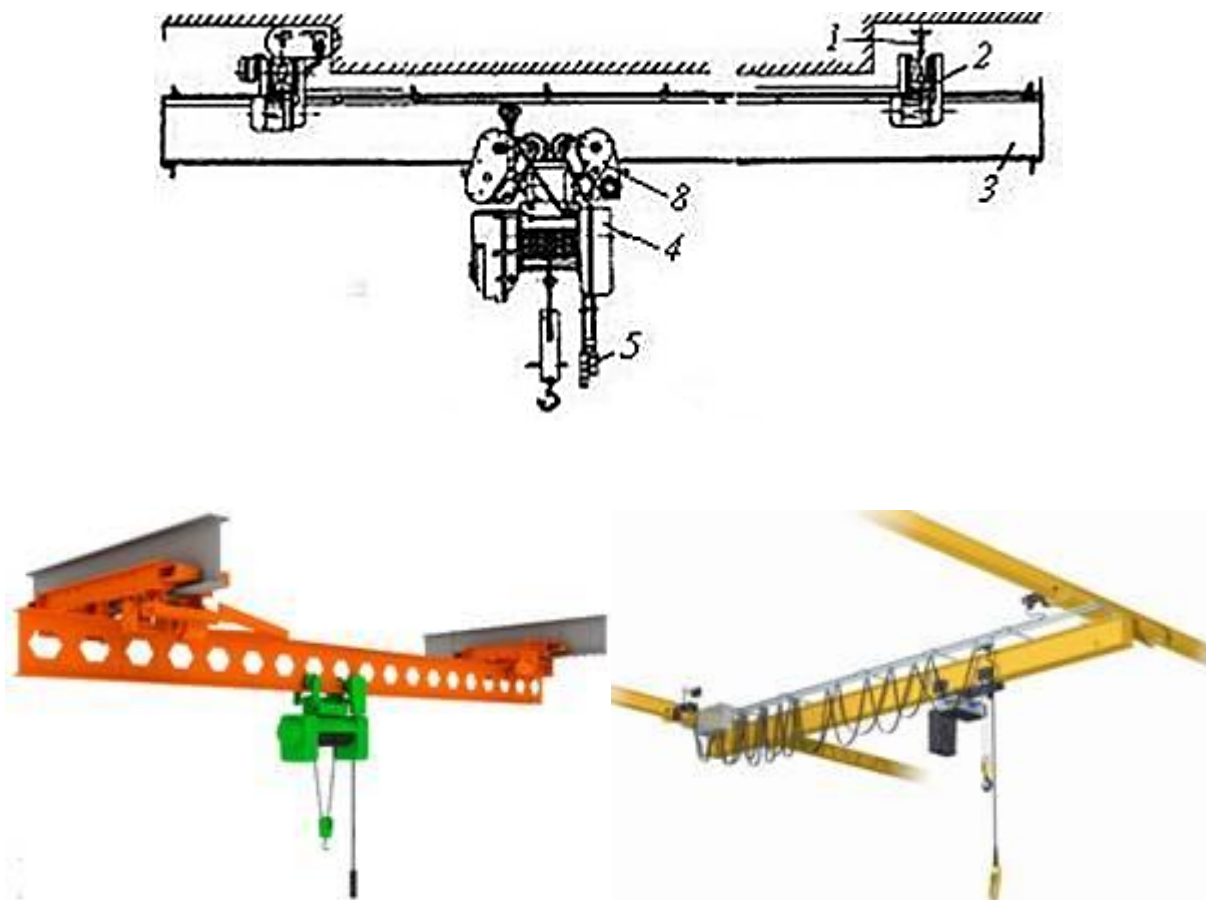


Рис. 1.1 Підвісні кран-балки [3]

По нижньому поясу головної балки пересувається вантажний візок 8, на якому встановлена електрична таль 4. Така компоновка забезпечує ефективне переміщення вантажу в межах зони обслуговування кран-балки та дозволяє реалізувати необхідні технологічні операції з підйому і транспортування.

Електрична система керування кран-балкою забезпечує узгоджену та синхронну роботу приводів механізмів пересування, що сприяє плавності ходу і підвищенню експлуатаційної надійності обладнання. Керування роботою підвісної кран-балки може здійснюватися як з підлоги за допомогою пульта керування, так і з кабіни оператора, залежно від конструктивного виконання та умов експлуатації.

До основних переваг підвісних кран-балок належить їх порівняно мала конструктивна висота, що дозволяє ефективно використовувати внутрішній простір приміщення. Крім того, конструкція забезпечує можливість безперешкодного переходу візка електричної талі на сусідню кран-балку без виконання операцій перевантаження, оскільки торці головної балки не мають бічних обмежень. Це суттєво розширює площу обслуговування вантажопідіймальної системи та підвищує її функціональність.

Стикування головних балок для забезпечення переходу між ними реалізується за допомогою спеціального замкового фіксатора, обладнаного електричним блокуванням. У разі незастопореного фіксатора система автоматично вимикає живлення механізмів пересування крана та вантажного візка, що підвищує рівень безпеки під час експлуатації. Для кран-балок з великими прогонами застосовують багатоопорні схеми з використанням проміжних ходових опор, які зменшують навантаження на основні несучі елементи.

Висота підйому вантажу та межі переміщення кран-балки регламентуються кінцевими вимикачами, принцип дії яких аналогічний застосуванню в опорних кран-балках. Це забезпечує надійний захист обладнання від перевантажень і виходу рухомих елементів за допустимі межі.

Підвісна кран-балка вантажопідйомністю 2 т є елементом внутрішньо-цехової підйомно-транспортної системи, призначеної для переміщення вантажів у межах виробничого прольоту. Конструкція кран-балки розрахована на сприйняття

вертикальних навантажень від вантажопідіймального механізму та передачу їх через підвісні вузли на несучі елементи будівлі. Особливістю такої схеми є робота балки в умовах підвісу, що формує специфічний напружено-деформівний стан і потребує підвищеної жорсткості та надійності конструкції.

Розвиток підвісних кран-балок як окремого класу металоконструкцій став можливим завдяки вдосконаленню зварювальних технологій і застосуванню конструкційних сталей із прогнозованими механічними властивостями. Це дозволило перейти від масивних клепаних або болтових систем до зварних балкових елементів із раціональним розподілом матеріалу по перерізу. У сучасній практиці підвісні кран-балки вантажопідйомністю до 5 т широко застосовуються в умовах обмеженого простору, де необхідно мінімізувати масу конструкції та навантаження на будівельні конструкції [1].

Конструктивно підвісна кран-балка (рис. 1.2) виконана у вигляді зварної сталевий балки з суцільною стінкою, що працює переважно на згин у вертикальній площині. Основним несучим елементом є балковий профіль, у якому верхній і нижній пояси сприймають згинальні моменти, а стінка забезпечує передачу поперечних сил і стабільність форми перерізу. Такий конструктивний підхід забезпечує ефективне використання матеріалу при збереженні необхідної несучої здатності та жорсткості.

Передача навантаження від вантажопідіймального механізму до балки здійснюється через підвісні вузли, які формують локальні зони підвищених напружень. Саме ці ділянки є найбільш відповідальними з точки зору міцності й довговічності, що було враховано під час проведення комп'ютерного моделювання напружено-деформівного стану. Робота кран-балки супроводжується дією не лише статичних навантажень від маси вантажу, але й додаткових зусиль, пов'язаних з розгоном, гальмуванням і можливими незначними перекосами під час руху вантажу.

Умови експлуатації підвісної кран-балки передбачають багаторазове циклічне навантаження, що накладає вимоги не лише до статичної міцності, але й до втомної витривалості зварних з'єднань і основного металу. У зв'язку з цим при

проектуванні та розрахунку конструкції закладається нормативний запас міцності, який забезпечує безпечну роботу кран-балки протягом усього розрахункового терміну служби без виникнення небезпечних деформацій або руйнування.



Рис. 1.2 Загальний вигляд підвісної кран-балки малої тоннажності[5]

Таблиця 1.1 – Технічні дані підвісної кран-балки вантажопідйомністю 2 т [5]

Показник	Одиниця виміру	Значення
Вантажопідйомність, не більше	т	2,0
Проліт кран-балки L	мм	4500 ± 5 / 7500 ± 5 / 10500 ± 5
Висота підйому вантажу h	мм	від 2000 до 12000
Будівельна висота талі	мм	600–1200
Висота кран-балки H	мм	505 / 635
База кран-балки B	мм	1200 / 1600
Максимальне навантаження на крановий рейок	кН	3,0–3,3
Споряджена маса кран-балки, не більше	кг	800–1200
Довжина консолі L_k	мм	від 300 до 1600
Тип виконання	—	підвісна
Тип приводу	—	електричний (таль)
Режим роботи	—	легкий / середній
Температурний діапазон експлуатації	°C	від –20 до +40
Тип матеріалу балки	—	конструкційна сталь

Матеріалом несучих елементів підвісної кран-балки обрано конструкційну вуглецеву сталь, властивості якої забезпечують необхідне поєднання міцності, пластичності та зварюваності. Застосування зварних з'єднань дозволяє формувати суцільну жорстку конструкцію та реалізувати раціональну конструктивну схему без використання надлишкових елементів. Водночас вибір матеріалу та технології виготовлення забезпечує стабільність механічних властивостей у зоні термічного впливу зварних швів.

Підвісна кран-балка вантажопідйомністю 2 т призначена для роботи в закритих виробничих приміщеннях при нормальних кліматичних умовах та неагресивному середовищі. Температурний режим експлуатації не перевищує значень, за яких можливе істотне зниження міцності матеріалу. Антикорозійний захист конструкції забезпечується захисними покриттями, що запобігають корозійному зношуванню в процесі тривалої експлуатації.

Конструктивне виконання підвісної кран-балки вантажопідйомністю 2 т визначається вимогами до забезпечення її міцності, жорсткості та експлуатаційної надійності в умовах циклічного навантаження. Особливу роль у роботі такої конструкції відіграють вузли підвісу, через які здійснюється передача навантаження від кран-балки до несучих елементів будівлі та формується характер напружено-деформівного стану.

Несуча частина кран-балки виконана у вигляді зварної балкової конструкції зі сталевого прокату, у якій верхній і нижній пояси з'єднані суцільною стінкою. Така схема забезпечує ефективне сприйняття згинальних моментів і поперечних сил, а також дозволяє рівномірно розподіляти навантаження вздовж прольоту. Геометричні параметри перерізу балки обрані з урахуванням вимог до обмеження прогинів і забезпечення нормативного запасу міцності.

Вузли підвісу розташовані в зонах, де конструкція взаємодіє з підкрановими елементами або підвісними візками. Конструктивно вони виконані у вигляді зварних або болтово-зварних з'єднань, які забезпечують надійне закріплення балки та можливість компенсації незначних переміщень, що виникають під час

роботи. Застосування комбінованих з'єднань дозволяє зменшити концентрацію напружень і підвищити довговічність вузлів.

Особливістю вузлів підвісу є наявність локальних підсилень у вигляді накладок або ребер жорсткості, які зменшують рівень напружень у зоні прикладання зосереджених сил. Такі елементи підсилення виконують функцію перерозподілу навантаження між основними елементами балки та запобігають розвитку місцевих деформацій і тріщин у зоні зварних швів. Доцільність їх застосування підтверджена результатами комп'ютерного моделювання напружено-деформівного стану, де саме вузли підвісу визначені як найбільш навантажені ділянки конструкції.

Зварні з'єднання у вузлах підвісу виконуються з урахуванням вимог до втомної міцності, оскільки ці ділянки піддаються багаторазовому циклічному навантаженню. Конфігурація зварних швів обирається таким чином, щоб забезпечити плавний перехід напружень і мінімізувати різкі зміни жорсткості. У місцях примикання підсилювальних елементів застосовуються кутові або таврові зварні з'єднання з раціональним підбором катета шва.

Конструкція вузлів підвісу передбачає можливість монтажу та демонтажу кран-балки без порушення цілісності основних елементів. Це досягається завдяки використанню стандартних кріпильних елементів і уніфікованих конструктивних рішень, що спрощує процес встановлення та технічного обслуговування. Крім того, така конструктивна схема дозволяє компенсувати технологічні допуски та неточності монтажу без створення додаткових напружень у балці.

З точки зору експлуатації вузли підвісу виконують також функцію часткового гасіння динамічних впливів, що виникають під час пуску та зупинки вантажопідіймального механізму. Наявність певної конструктивної гнучкості в цих вузлах зменшує рівень пікових напружень і сприяє підвищенню загальної довговічності конструкції.

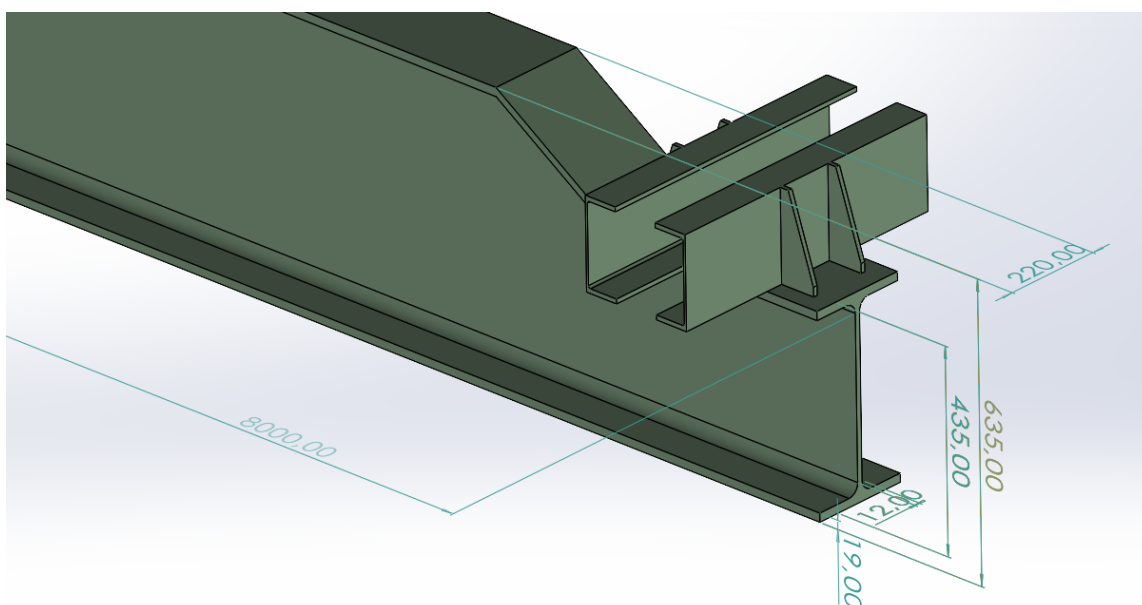
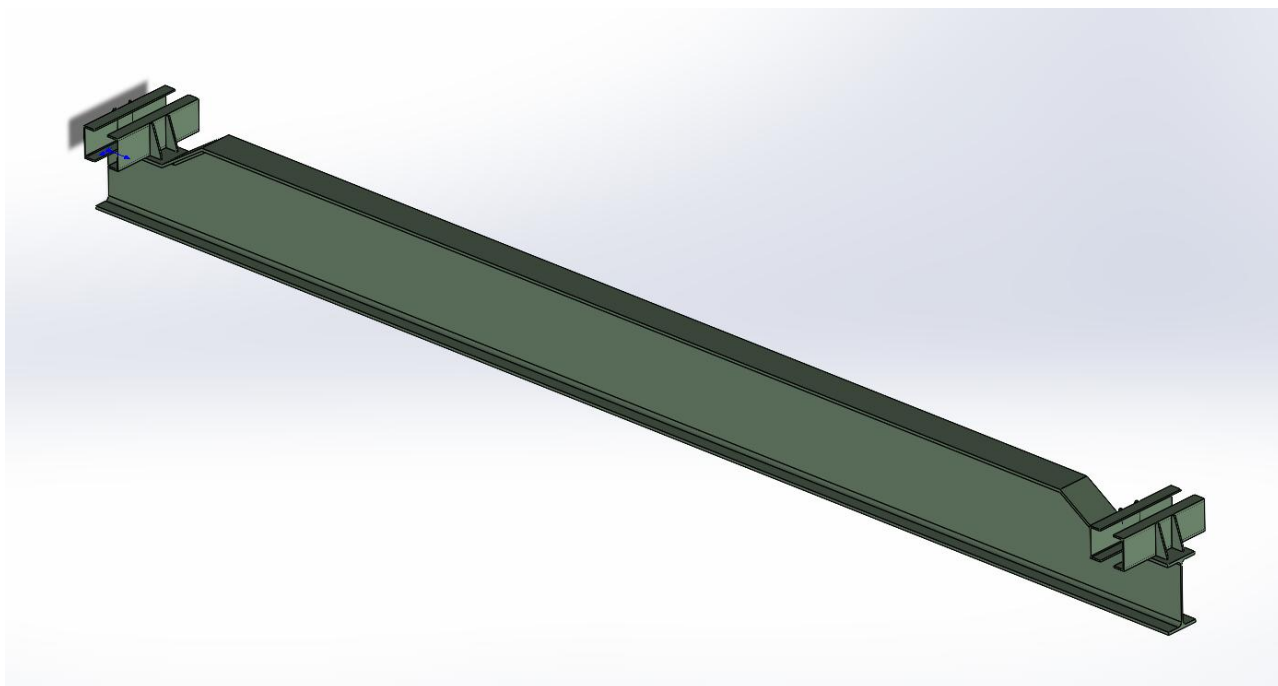


Рис. 1.3 – 3D-модель кран-балка

Для виготовлення несучих елементів підвісної кран-балки вантажопідйомністю 2 т застосовується конструкційна низьковуглецева сталь підвищеної міцності S355 (аналог 09Г2С / 16Г2АФ), яка широко використовується у вантажопідіймальних і зварних металоконструкціях [6].

Вибір даної сталі обумовлений оптимальним поєднанням міцності, пластичності, втомної витривалості та доброї зварюваності, що є визначальними факторами для конструкцій, які працюють у режимі циклічних навантажень.

Таблиця 1.2 - Хімічний склад сталі S355 (09Г2С), % [7]

Елемент	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
Вміст, %	≤ 0,18	1,20–1,60	≤ 0,55	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30

Низький вміст вуглецю та контрольована кількість легувальних елементів забезпечують стійку структуру металу та низьку схильність до утворення холодних тріщин у зоні термічного впливу.

Таблиця 1.3 - Механічні властивості сталі [7]

Показник	Позначення	Значення
Границя текучості	$\sigma_{0.2}$	≥ 355 МПа
Тимчасовий опір розриву	σ_v	470–630 МПа
Відносне подовження	δ_5	≥ 20 %
Модуль пружності	E	$2,0 \cdot 10^{11}$ Па
Коефіцієнт Пуассона	ν	0,3
Густина	ρ	7850 кг/м ³
Ударна в'язкість (–20 °С)	KCU	≥ 27 Дж

Зазначені механічні характеристики забезпечують пружну роботу балки без розвитку пластичних деформацій при нормативних навантаженнях та гарантують необхідний запас міцності.

Для кількісної оцінки зварюваності конструкційних сталей застосовують розрахунок еквівалента вуглецю C_e , який враховує сумарний вплив вуглецю та легувальних елементів на формування структури металу в зоні термічного впливу під час зварювання. Розрахунок дозволяє прогнозувати схильність сталі до утворення гартівних структур і холодних тріщин.

Еквівалент вуглецю [6]:

$$C_e = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{S}{600} + \frac{H}{60} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} C_e &= 0,12 + \frac{0,50}{30} + \frac{1,60 + 0,30 + 0,30}{20} + \frac{0,30}{60} + \frac{0,05}{15} + \frac{0,05}{10} + 5 \cdot 0,0005 + \frac{0,025}{600} \\ &= 0,262 \end{aligned}$$

Отримане значення еквівалента вуглецю $C_e \approx 0,26$ є суттєво меншим за граничне значення 0,45, що приймається як межа доброї зварюваності конструкційних сталей. Це свідчить про те, що сталь 09Г2С:

- має високу технологічну зварюваність;
- не схильна до утворення холодних тріщин;
- може зварюватися без обов'язкового попереднього підігріву при товщинах, характерних для підвісних кран-балок;
- забезпечує стабільні механічні властивості зварних з'єднань.

Результати розрахунку еквівалента вуглецю показали, що сталь 09Г2С, застосована для виготовлення підвісної кран-балки вантажопідйомністю 2 т, характеризується відмінною зварюваністю. Це підтверджує доцільність її використання у зварних вантажопідіймальних металоконструкціях і забезпечує високу надійність зварних з'єднань у процесі експлуатації.

1.2 Технічні умови до конструкції виробу.

Конструкція підвісної кран-балки вантажопідйомністю 2 т повинна забезпечувати надійне сприйняття робочих, динамічних та інерційних навантажень, що виникають під час підйому, переміщення та гальмування вантажу. Конструктивні рішення мають відповідати результатам розрахунків напружено-деформівного стану та забезпечувати нормативний запас міцності відповідно до чинних стандартів [1-2].

Несучі елементи кран-балки повинні працювати переважно в пружній області деформацій за всіх допустимих режимів експлуатації. Утворення пластичних деформацій, локальних втрат стійкості або прогресуючого руйнування конструкції не допускається.

Балковий елемент кран-балки повинен мати замкнений або відкритий зварний профіль (двотавровий або коробчастий), який забезпечує необхідну згинальну та крутильну жорсткість. Геометричні параметри балки мають відповідати проєктній документації та результатам комп'ютерного моделювання.

Стінка балки повинна забезпечувати стійкість при сприйнятті поперечних сил, а пояси — сприйняття згинальних моментів. У зонах прикладання концентрованих навантажень допускається передбачати локальні підсилення або елементи жорсткості.

Вузли підвісу підвісної кран-балки повинні забезпечувати рівномірну передачу навантаження від балки на підкранові шляхи або несучі елементи будівлі. Конструкція вузлів підвісу має виключати перекоси, заклинювання та нерівномірний розподіл зусиль між підвісами.

Кріпильні елементи вузлів підвісу повинні бути розраховані на дію статичних і циклічних навантажень з урахуванням динамічних коефіцієнтів. Усі різьбові з'єднання мають бути захищені від самовідгвинчування.

Прогини кран-балки під дією номінального навантаження не повинні перевищувати значень, встановлених нормативною документацією та проєктом. Граничні прогини повинні забезпечувати нормальну роботу вантажопідіймального механізму та виключати контакт рухомих елементів з конструкціями будівлі.

Жорсткість балки має забезпечувати стабільне положення талі та плавність переміщення вантажу без виникнення коливань, що можуть призвести до втомного пошкодження металу.

Конструкція підвісної кран-балки повинна бути розрахована на роботу в умовах багатоциклового навантаження. Зварні з'єднання, особливо у зонах концентрації напружень, мають бути спроєктовані з урахуванням вимог до втомної міцності [2].

Геометрія зварних швів повинна забезпечувати плавний перехід до основного металу, мінімізуючи концентрацію напружень. Наявність різких переходів перерізу або гострих кутів у конструкції не допускається.

Конструкція підвісної кран-балки повинна передбачати можливість виконання технічного обслуговування та ремонтних робіт без повного демонтажу виробу. Доступ до основних зварних з'єднань, вузлів підвісу та місць контролю повинен бути забезпечений конструктивно.

Елементи, що піддаються найбільшим навантаженням або зносу, мають бути доступними для візуального огляду та неруйнівного контролю в процесі експлуатації.

Конструкція кран-балки повинна відповідати вимогам безпеки вантажопідіймальних механізмів і виключати можливість самовільного сходження з підкранових шляхів, перекосу балки або руйнування вузлів кріплення.

Усі гострі кромки та елементи, що можуть створювати небезпеку для персоналу, повинні бути притуплені або захищені.

Підвісна кран-балка належить до відповідальних вантажопідіймальних металоконструкцій, тому всі технологічні операції повинні виконуватися відповідно до чинних нормативних документів і затвердженої технологічної документації.

Для виготовлення несучих елементів підвісної кран-балки застосовується конструкційна сталь класу міцності не нижче S355 (09Г2С, С345), що відповідає вимогам чинних стандартів на сталеві конструкції.

Матеріал повинен:

- мати сертифікат якості виробника;
- не містити тріщин, розшарувань, підповерхневих дефектів;
- відповідати розрахунковим характеристикам міцності та зварюваності.

Застосування інших марок сталей допускається лише за умови їх відповідності проєктній документації та технічному обґрунтуванню.

Перед виконанням зварювальних робіт кромки деталей, що з'єднуються, а також прилеглі до них поверхні основного металу повинні бути очищені від окалини, корозійних нашарувань, мастил і забруднень.

Очищення проводиться:

- до чистого металу;
- на ширину не менше 20 мм з кожного боку від лінії шва.

Наявність вологи, масла або сторонніх включень у зоні зварювання не допускається.

Складання елементів підвісної кран-балки під зварювання необхідно виконувати в складально-зварювальних пристосуваннях, які забезпечують точне взаємне розташування деталей згідно з кресленнями.

При складанні забороняється примусове припасування елементів шляхом:

- ударних дій;
- підтискання з надмірними зусиллями;
- локального деформування металу.

Такі дії можуть викликати наклеп і додаткові залишкові напруження, що негативно впливають на довговічність конструкції.

Закріплення деталей у складеному положенні перед основним зварюванням виконується прихватками [2, 8-10].

Для підвісної кран-балки встановлюються такі вимоги до прихваток:

- висота прихватки — не більше 6 мм;
- довжина прихватки — приблизно 36 мм;
- відстань між прихватками — 400–500 мм.

Прихватки повинні бути виконані без тріщин, пор та непроварів і забезпечувати стабільну фіксацію деталей.

У складених під зварювання елементах допускаються такі відхилення:

- зміщення зварювальних кромок не більше 3 мм для елементів товщиною до 30 мм;
- зазор між кромками у стикових і напускних з'єднаннях — не більше 1 мм.

Перевищення зазначених допусків не допускається.

Для виготовлення підвісної кран-балки допускається застосування напіваавтоматичного дугового зварювання в захисних газах або інших технологій, передбачених проектом, які забезпечують:

- суцільний провар по всій довжині шва;
- стабільну геометрію зварного з'єднання;
- механічні властивості шва не нижчі за властивості основного металу.

Для зварювання повинні використовуватися зварювальні матеріали, що відповідають чинним стандартам.

Зварні шви повинні бути неперервними по всій довжині.

Контроль якості зварних швів виконується відповідно до вимог і включає візуальний та вимірювальний контроль, а за необхідності — неруйнівні методи контролю.

Зварні шви повинні [8-10]:

- мати рівномірну, гладку поверхню;
- не мати напливів, прожогів, підрізів, перерв;
- забезпечувати плавний перехід до основного металу;
- не містити тріщин і поверхневих пор.

Усі кратери повинні бути повністю заварені.

У зварних з'єднаннях допускаються:

- непровари глибиною до 1 мм для товщини металу до 20 мм при довжині окремого дефекту не більше 50 мм;
- сумарна величина окремо розташованих непроварів, пор і шлакових включень — не більше 2 мм.
- Не допускаються:
- тріщини будь-якого характеру;
- шлакові включення або пори, що утворюють суцільну лінію вздовж шва.

Після завершення виготовлення підвісна кран-балка повинна бути захищена від корозії відповідно до умов експлуатації.

Допускається застосування:

- лакофарбових покриттів;

- полімерних систем захисту;
- гарячого цинкування.

Товщина заводського захисного покриття повинна бути не менше 40 мкм.

- Фактичні геометричні параметри кран-балки не повинні перевищувати таких відхилень:
- відхилення довжини — $0...+5$ мм;
- відхилення висоти балки — ± 3 мм;
- зміщення осі стінки відносно осі поясів — не більше 5 мм;
- відхилення ширини поясів — ± 5 мм.

Дотримання наведених технічних умов забезпечує виготовлення підвісної кран-балки вантажопідйомністю 2 т з прогнозованими механічними характеристиками, нормативним запасом міцності та необхідною експлуатаційною надійністю.

1.3 Аналіз технологічного процесу

Технологічний процес виготовлення підвісних кран-балок, незважаючи на його відпрацьованість і широку промислову апробацію, характеризується низкою конструктивно-технологічних обмежень, що можуть впливати на якість готового виробу, його експлуатаційну надійність та економічну ефективність виробництва. Особливу складність становить поєднання високих вимог до точності геометрії, якості зварних з'єднань і втомної міцності при відносно простій з погляду конструкції формі балки.

Однією з ключових проблем є те, що традиційні технологічні рішення часто орієнтовані на забезпечення статичної міцності конструкції, тоді як умови експлуатації кран-балок визначаються переважно багаточисловими навантаженнями, динамічними впливами та локальними концентраціями напружень.

На етапі підготовки та розкрою металопрокату основним обмежуючим фактором є якість кромки та допуски геометричних розмірів. Використання

термічних методів різання без подальшої механічної обробки кромek може призводити до локального перегріву металу, формування загартованих зон і появи мікротріщин, які в подальшому стають концентраторами напружень у зоні зварювання.

Недостатній контроль геометрії заготовок на цьому етапі ускладнює складання та призводить до необхідності примусового припасування деталей, що є технологічно небажаним явищем і негативно впливає на втомну довговічність конструкції.

Стадія складання під зварювання є критичною з точки зору формування залишкових напружень. Навіть незначні перекося або нерівномірність зазорів між елементами можуть спричинити:

- нерівномірне проплавлення;
- асиметричний розподіл напружень;
- локальні деформації балки після зварювання.

Застосування універсальних складальних пристосувань без адаптації до конкретної геометрії кран-балки обмежує точність складання та підвищує ймовірність виникнення дефектів. Це свідчить про необхідність ширшого використання спеціалізованих або модульних пристосувань.

Зварювання є найбільш відповідальною та водночас найбільш уразливою стадією технологічного процесу. Основні проблеми, що виникають на цьому етапі, пов'язані з:

- формуванням залишкових напружень;
- виникненням зварювальних деформацій;
- неоднорідністю структури металу в зоні термічного впливу.

Навіть за дотримання оптимальних режимів зварювання у зонах підвісу та прикладання навантаження можуть формуватися локальні концентрації напружень, які суттєво знижують втомну міцність балки. Використання напівавтоматичного зварювання без елементів адаптивного керування параметрами дуги обмежує можливість компенсації технологічних коливань і людського фактора.

Після зварювальні операції, зокрема виправлення деформацій і механічна обробка швів, часто розглядаються як допоміжні, однак їх роль у забезпеченні довговічності конструкції є визначальною. Недостатньо контрольоване виправлення деформацій може призводити до:

- локального перевищення межі текучості металу;
- накопичення прихованих пластичних деформацій;
- зниження опору втомі.

Відсутність систематичного контролю залишкових напружень після зварювання є одним із слабких місць традиційної технології виготовлення кран-балок.

Застосування переважно візуального та вимірювального контролю не завжди дозволяє виявити внутрішні дефекти зварних з'єднань, які можуть розвиватися в процесі експлуатації. Обмежене використання методів ультразвукового або магнітопорошкового контролю знижує достовірність оцінки фактичного стану конструкції.

З огляду на відповідальність підвісних кран-балок доцільним є розширення обсягу неруйнівного контролю саме у зонах з підвищеною концентрацією напружень.

Застосування лакофарбових покриттів без урахування реальних умов експлуатації (вологість, агресивне середовище, температурні коливання) може призводити до передчасного руйнування захисного шару. Недостатня товщина або нерівномірність покриття створює передумови для локальної корозії, яка у поєднанні з циклічними навантаженнями істотно знижує ресурс кран-балки.

Критичний аналіз технологічного процесу виготовлення підвісних кран-балок показує, що основними проблемними аспектами є:

- залежність якості зварних з'єднань від людського фактора;
- недостатня глибина неруйнівного контролю.

Удосконалення технологічного процесу доцільно здійснювати шляхом:

- впровадження автоматизованих або роботизованих зварювальних систем;
- оптимізації послідовності зварювання з урахуванням НДС;

- розширення застосування неруйнівних методів контролю;
- підвищення вимог до після зварювальних операцій і корозійного захисту.

Такий підхід дозволить підвищити експлуатаційну надійність підвісних кран-балок і забезпечити прогнозований ресурс їх роботи в умовах інтенсивної експлуатації.

2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

Підвісні кран-балки широко застосовуються в підйомно-транспортних системах промислових підприємств для переміщення вантажів у межах виробничих прольотів. На відміну від класичних опорних балок, підвісні конструкції характеризуються специфічними умовами закріплення та сприйняття навантажень, що зумовлює нерівномірний розподіл напружень і підвищені локальні силові ефекти в зонах підвісу та передачі навантаження.

У процесі експлуатації підвісна кран-балка зазнає дії значних вертикальних сил від маси вантажу, а також додаткових напружень, викликаних жорсткістю опор, ексцентриситетами прикладання навантаження та особливостями геометрії. У зв'язку з цим класичні аналітичні методи розрахунку, що базуються на теорії опору матеріалів і спрощених балкових схемах, не завжди дозволяють достовірно оцінити напружено-деформівний стан конструкції [11-14].

Саме тому застосування комп'ютерного моделювання на основі методу скінченних елементів є доцільним інструментом інженерного аналізу, який дозволяє:

- врахувати реальну просторову геометрію кран-балки;
- дослідити локальні концентрації напружень;
- оцінити переміщення та деформації з урахуванням реальних граничних умов;
- визначити запас міцності конструкції при заданому навантаженні.

Об'єктом чисельного аналізу є підвісна кран-балка, виконана у вигляді просторової металевої конструкції зі змінним перерізом та елементами локального підсилення. Конструкція призначена для роботи в складі підвісної кранової системи та забезпечує передавання вертикального навантаження від вантажопідіймального механізму до несучих елементів будівлі.

Геометрична модель кран-балки створена в CAD-середовищі з урахуванням усіх конструктивних особливостей і без геометричних спрощень. Загальний вигляд тривимірної моделі підвісної кран-балки наведено на рис. 2.1.

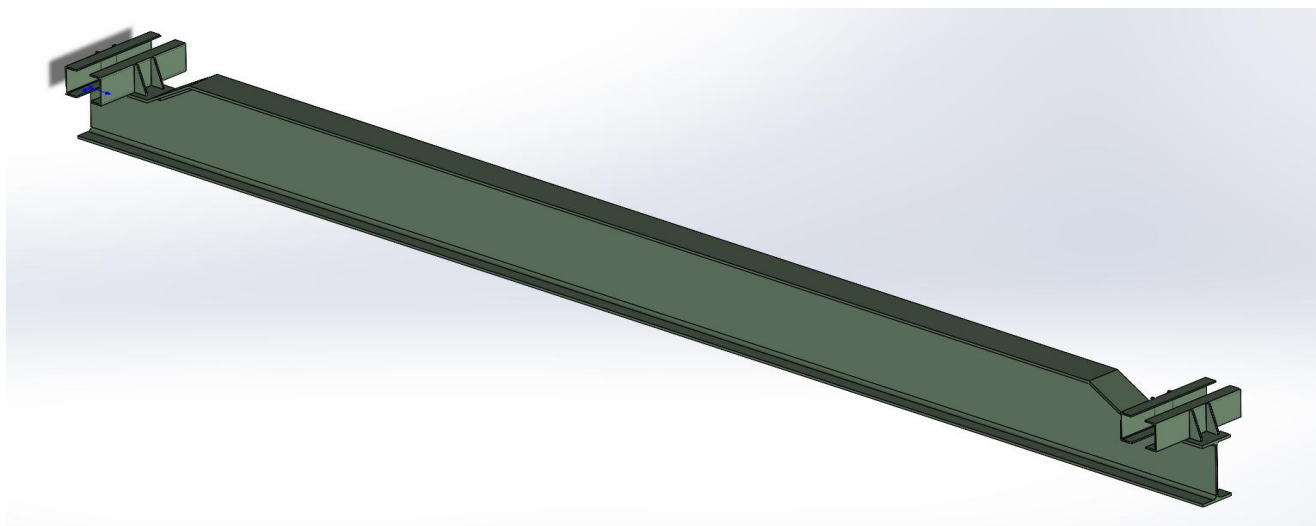


Рис. 2.1 - Тривимірної моделі підвісної кран-балки

Як видно з рис. 2.1, модель містить усі характерні елементи реальної конструкції, включаючи переходи перерізів, місця кріплення та зони взаємодії з підвісними вузлами.

На основі побудованої геометричної моделі програмним комплексом автоматично визначено масово-інерційні характеристики підвісної кран-балки. Згідно з результатами аналізу, маса конструкції становить 1040,77 кг, а об'єм — 0,132246 м³, що відповідає густині матеріалу 7870 кг/м³. Власна вага кран-балки, яка враховується у розрахунку, дорівнює 10 199,6 Н.

Урахування власної ваги конструкції є важливим аспектом моделювання, оскільки вона формує початковий напружений стан та впливає на величину опорних реакцій. Отримані масові параметри свідчать про коректність геометричної моделі та її відповідність реальному виробу.

Комп'ютерне моделювання виконано в постановці лінійного статичного аналізу, який передбачає дослідження рівноважного стану конструкції під дією прикладених сил без урахування динамічних ефектів. Такий підхід є доцільним для оцінки працездатності кран-балки в умовах номінального режиму експлуатації.

У межах аналізу прийнято такі припущення:

- матеріал вважається однорідним та ізотропним;
- деформації є малими та не впливають на геометрію конструкції;

- поведінка матеріалу описується лінійно-пружною моделлю;
- контактні та температурні ефекти не враховуються.

Зазначені припущення відповідають загальноприйнятій інженерній практиці та дозволяють зосередитися на аналізі основних силових факторів.

У розрахунковій моделі підвісна кран-балка виконана з конструкційної вуглецевої сталі 09Г2С (S355). Поведінка матеріалу описана за допомогою лінійно-пружної ізотропної моделі з використанням критерію міцності за Мізесом.

Для адекватного відтворення умов експлуатації підвісної кран-балки у моделі було задано систему граничних умов. Частина поверхонь була жорстко зафіксована, що моделює нерухоме закріплення в несучій конструкції будівлі. Інша частина поверхонь задана у вигляді ковзної опори, яка обмежує переміщення в нормальному напрямку, але допускає поздовжнє зміщення.

Схема прикладення зовнішнього навантаження та розташування граничних умов наведені на рис. 2.2.

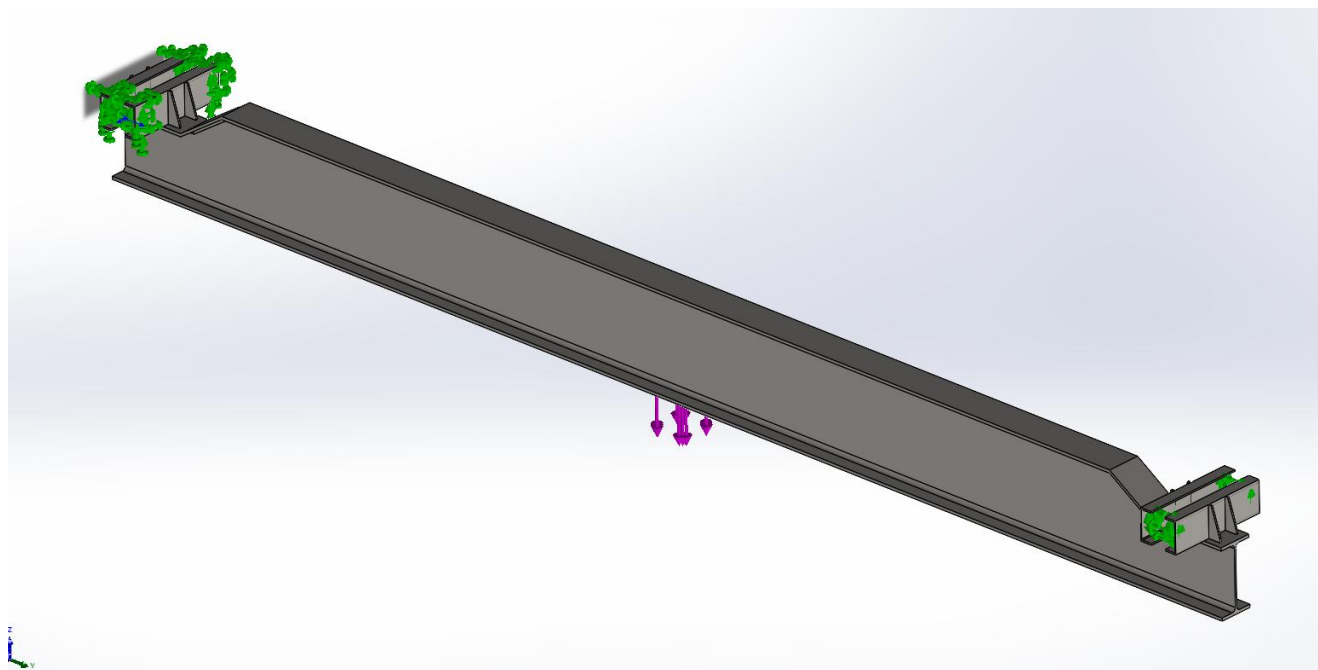


Рис. 2.2. Схема закріплення балки і прикладання навантаження

Як видно з рис. 2.2, навантаження прикладене у вигляді зосередженої сили величиною 20 кН, що імітує дію вантажу на робочу частину підвісної кран-балки.

Для чисельної реалізації задачі використано об'ємну скінчено-елементну сітку з адаптацією до геометрії конструкції. Скінчено-елементна дискретизація моделі наведена на рис. 2.3.

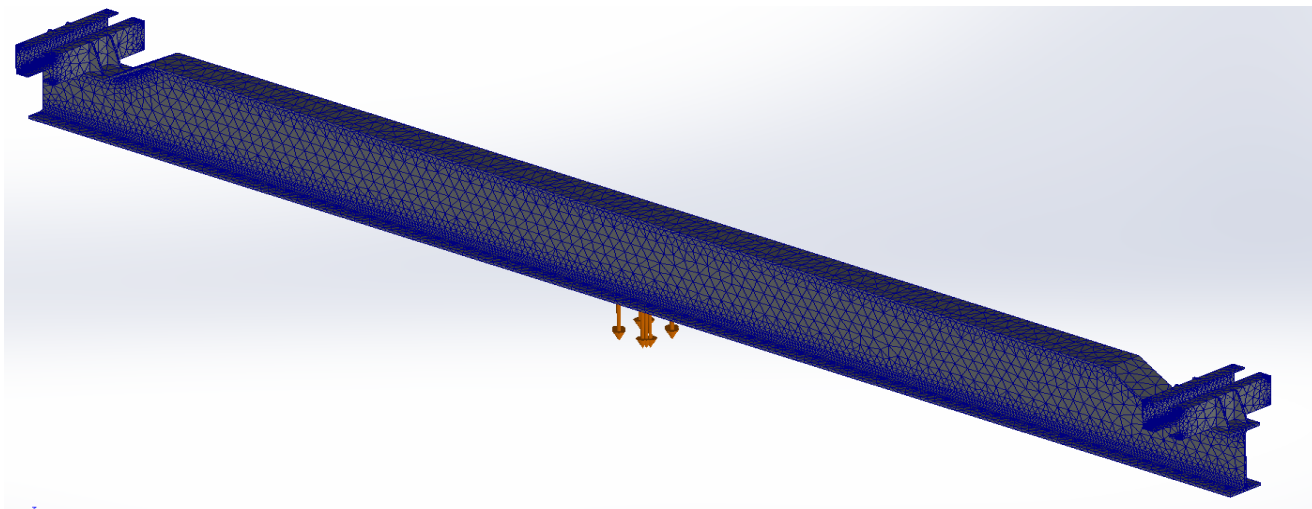


Рис. 2.3 . Скінчено-елементна дискретизація моделі

Аналіз рис. 2.3 свідчить, що в зонах можливих концентрацій напружень використано ущільнену сітку з меншим розміром елементів, тоді як у менш навантажених ділянках застосовано укрупнену дискретизацію. Загальна кількість вузлів становить 176 309, а кількість елементів — 91 283, що забезпечує достатню точність і збіжність результатів.

Поле еквівалентних напружень за Мізесом у підвісній кран-балці наведено на рис. 2.4.

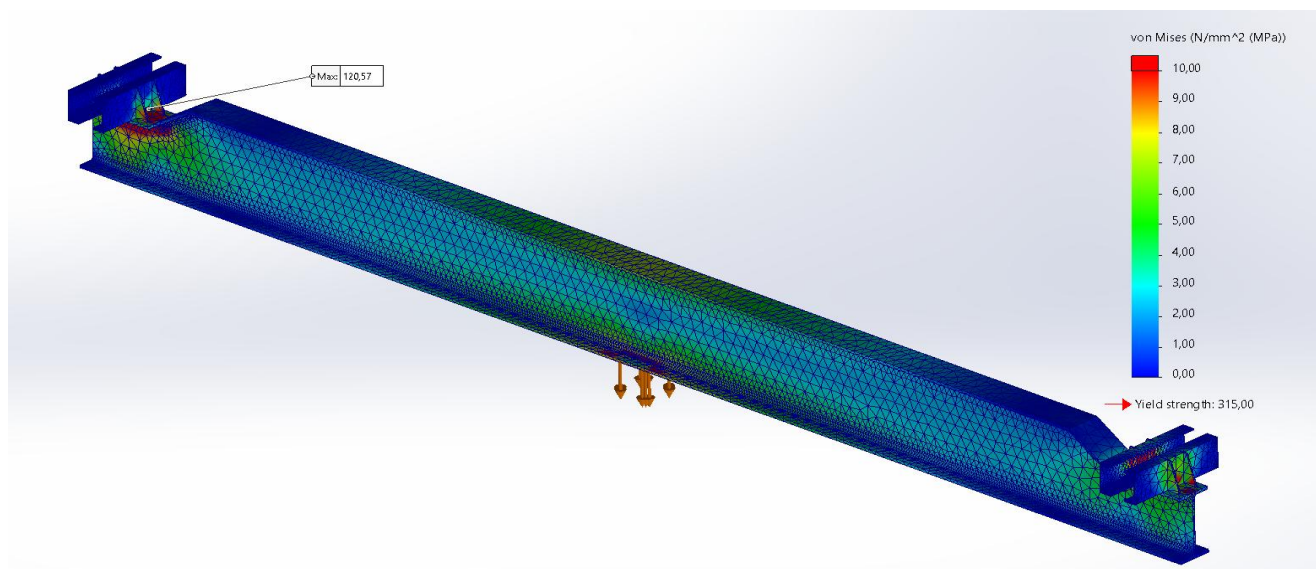


Рис. 2.4 - Поле еквівалентних напружень

З аналізу рис. 2.4 встановлено, що максимальні напруження локалізуються в зонах передачі навантаження та поблизу опорних вузлів.

Деталізований вигляд зон концентрації напружень показано на рис. 2.5.

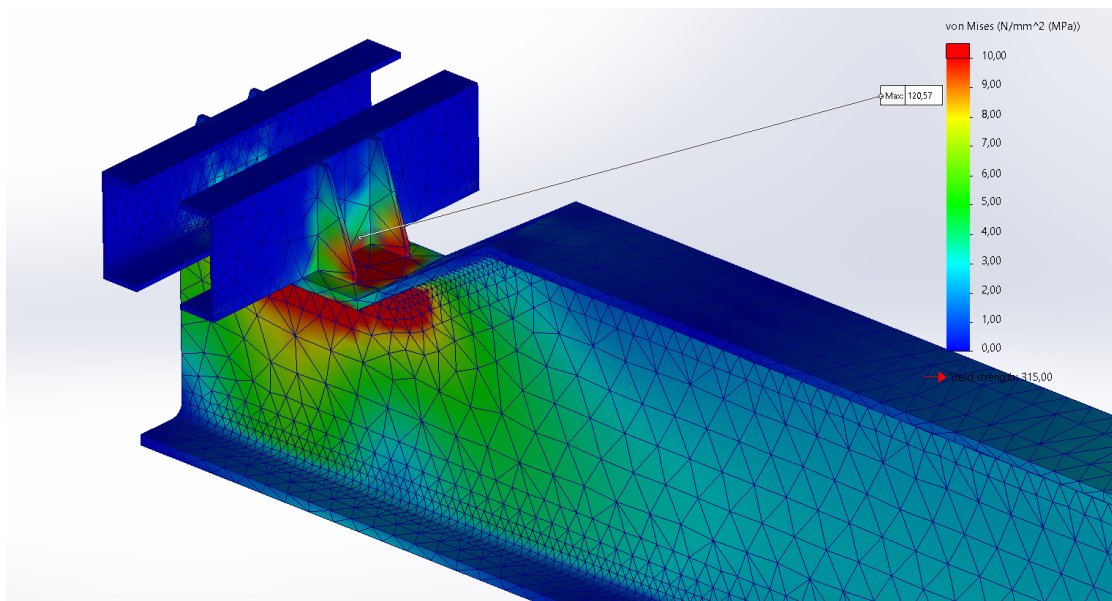


Рис. 2.5 Зона концентрації найбільших напружень

Як видно з рис. 2.5, підвищений рівень напружень зумовлений поєднанням геометричних переходів і локального силового впливу.

Максимальне значення еквівалентних напружень становить 120,57 МПа, що не перевищує границю текучості матеріалу.

Поле сумарних переміщень підвісної кран-балки наведено на рис. 2.6.

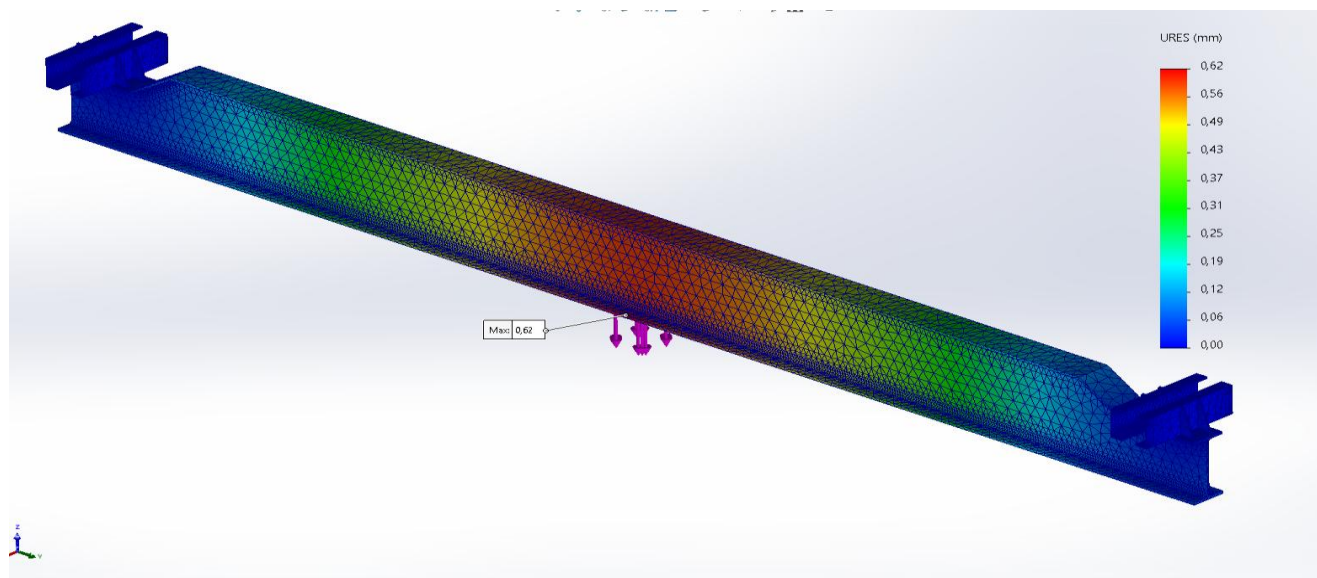


Рис. 2.6 Переміщення кран-балки

Згідно з рис. 2.6, максимальні переміщення спостерігаються в центральній частині балки та становлять 0,62 мм.

Розподіл еквівалентних деформацій показано на рис. 2.7. Аналіз рис. 2.7 свідчить про те, що деформації не виходять за межі, характерні для пружної роботи сталі.

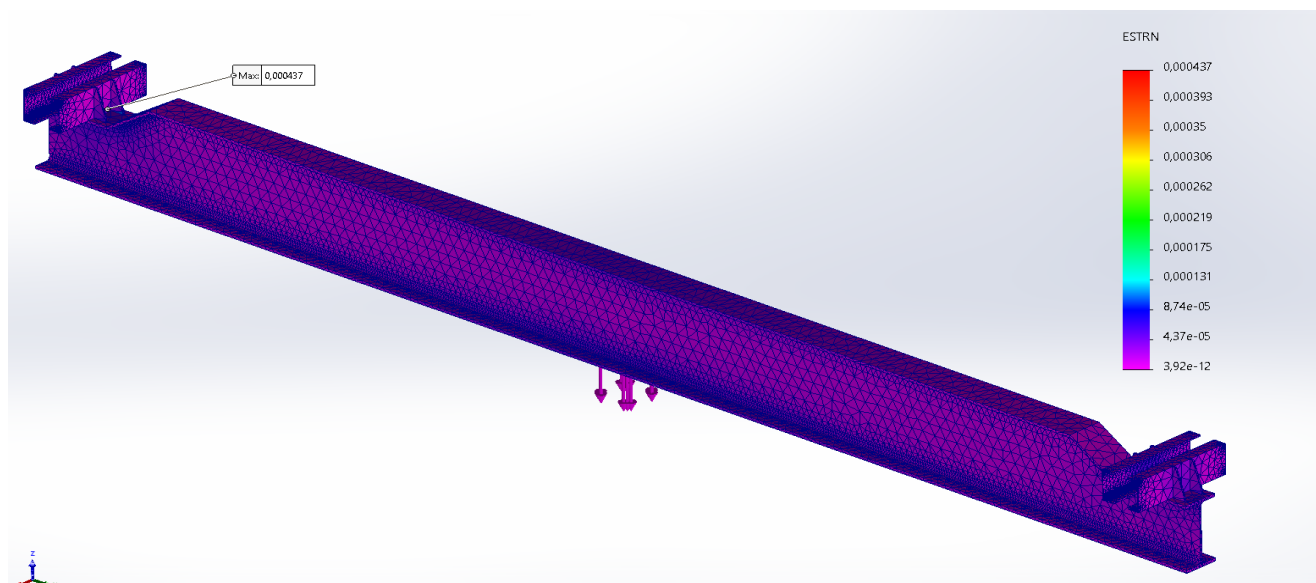


Рис. 2.7 - Розподіл еквівалентних деформацій

Поле коефіцієнта запасу міцності наведено на рис. 2.8.

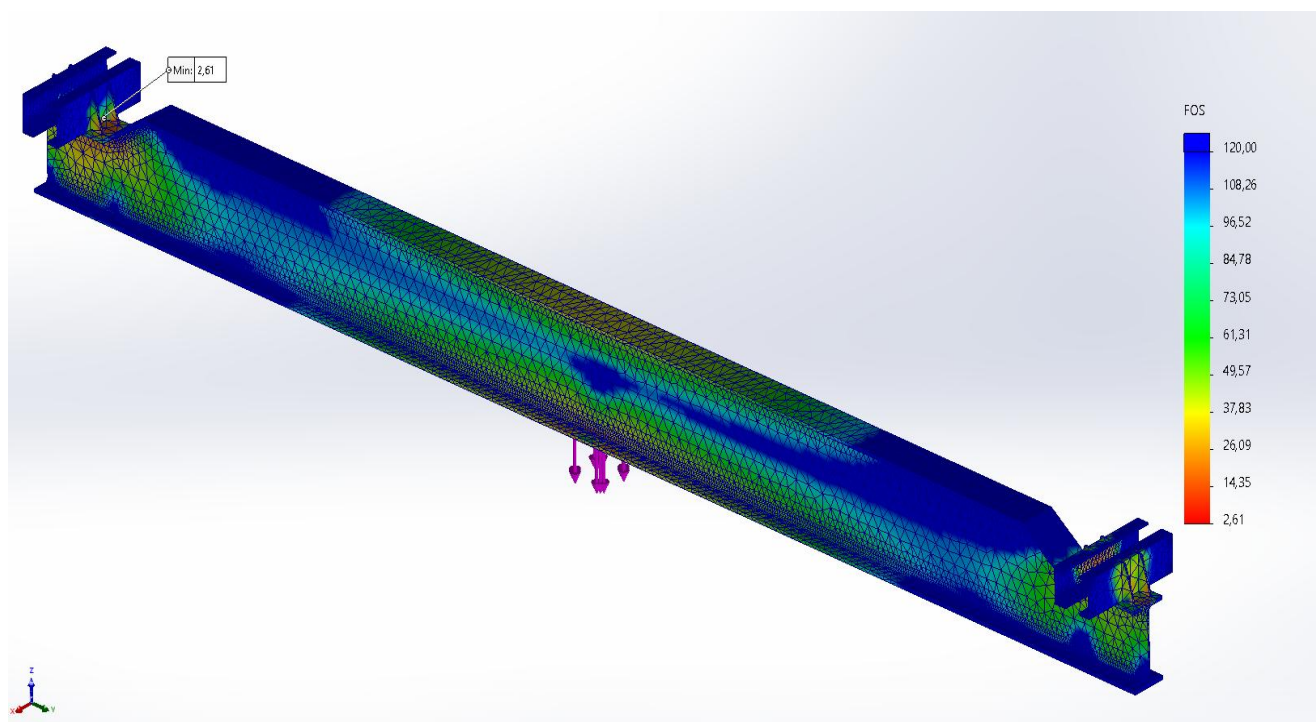


Рис. 2.8 - Поле коефіцієнта запасу міцності балки

Як видно з рис. 2.8, мінімальне значення коефіцієнта запасу міцності дорівнює 2,61 і відповідає зонам максимальних напружень.

Після аналізу напружено-деформівного стану підвісної кран-балки, виконаного методом скінченних елементів, необхідним етапом інженерного обґрунтування є перевірка отриманих результатів на відповідність вимогам чинних нормативних документів. Така перевірка дозволяє оцінити не лише фактичний рівень напружень і деформацій, але й забезпечити нормативно допустимий запас надійності конструкції з урахуванням можливих відхилень умов експлуатації від розрахункових.

У межах даного дослідження перевірка виконувалася за критеріями міцності, жорсткості та запасу міцності з урахуванням коефіцієнтів, рекомендованих для вантажопідіймальних і підвісних металоконструкцій.

Згідно з положеннями нормативних документів для підйомно-транспортного обладнання, до несучих елементів, що працюють під дією зосереджених і змінних навантажень, висувуються підвищені вимоги щодо надійності. Для таких конструкцій регламентуються:

- мінімальний коефіцієнт запасу міцності;
- допустимі напруження відносно границі текучості матеріалу;
- граничні прогини (переміщення), які не повинні перевищувати встановлених норм;
- урахування коефіцієнтів умов роботи та навантаження.

Для підвісних кран-балок, що працюють у статичному або квазістатичному режимі, мінімальний коефіцієнт запасу міцності зазвичай приймається не менше 1,1–1,3, залежно від категорії відповідальності конструкції та умов експлуатації.

Перевірка міцності конструкції виконується шляхом порівняння максимальних еквівалентних напружень, отриманих у результаті чисельного моделювання, з допустимими напруженнями матеріалу [1,15].

У загальному вигляді умова міцності має вигляд:

$$\sigma_{\text{екв}} \leq \frac{\sigma_{\text{Т}}}{\gamma_n},$$

де $\sigma_{\text{екв}}$ — максимальні еквівалентні напруження за Мізесом;

$\sigma_{\text{Т}}$ — границя текучості матеріалу;

γ_n — нормативний коефіцієнт запасу міцності.

За результатами комп'ютерного моделювання максимальні еквівалентні напруження у підвісній кран-балці становлять 120,57 МПа і локалізуються в зоні передачі навантаження на опорні вузли (рис. 2.4, 2.5).

Для сталі 09Г2С границя текучості становить $\sigma_{\text{Т}} = 345$ МПа.

При мінімально допустимому нормативному коефіцієнті запасу $\gamma_n = 1,1$ допустимі напруження становлять:

$$[\sigma] = \frac{345}{1,1} \approx 313 \text{ МПа.}$$

Оскільки: $120,57 \text{ МПа} < 313 \text{ МПа}$, умова міцності за напруженнями виконується.

У середовищі чисельного аналізу додатково виконано автоматичний розрахунок коефіцієнта запасу міцності, який визначається як відношення границі текучості матеріалу до фактичних еквівалентних напружень:

$$n = \frac{\sigma_{\text{Т}}}{\sigma_{\text{екв}}}.$$

За результатами моделювання мінімальне значення коефіцієнта запасу міцності становить $n_{\text{min}} = 2,61$, що відповідає зонам максимальних напружень (рис. 2.8).

Отримане значення перевищує мінімально допустиме нормативне значення, що підтверджує достатній запас міцності конструкції при заданому навантаженні.

Окрім міцності, для підвісних кран-балок важливою є перевірка жорсткості, оскільки надмірні прогини можуть негативно впливати на точність роботи вантажопідіймального механізму та призводити до підвищеного зносу вузлів.

Нормативно допустимий прогин для балкових елементів вантажопідіймальних систем, як правило, обмежується відношенням:

$$f_{\text{доп}} \leq \frac{L}{500} \cdots \frac{L}{700},$$

де L — розрахункова довжина балки.

За результатами чисельного аналізу максимальне сумарне переміщення підвісної кран-балки становить 0,62 мм і спостерігається в центральній частині конструкції (рис. 2.6).

Навіть при мінімально допустимому співвідношенні $L/500$ отримане значення прогину не перевищує нормативного обмеження, що свідчить про достатню жорсткість конструкції.

Для вантажопідіймальних конструкцій нормативами передбачено застосування коефіцієнтів умов роботи, які враховують:

- можливі відхилення навантаження від номінального;
- нерівномірність прикладання сил;
- технологічні та експлуатаційні фактори.

У даному дослідженні розрахунок виконано для номінального статичного навантаження без урахування динамічних ефектів. Отриманий коефіцієнт запасу міцності 2,61 дозволяє зробити висновок, що конструкція має резерв надійності для сприйняття помірних експлуатаційних відхилень без переходу в небезпечний стан.

За результатами перевірки підвісної кран-балки за нормативними коефіцієнтами встановлено, що:

- умова міцності за еквівалентними напруженнями виконується;
- мінімальний коефіцієнт запасу міцності перевищує нормативно допустиме значення;
- прогини конструкції не перевищують граничних значень;
- загальний рівень жорсткості відповідає вимогам для підвісних вантажопідіймальних систем.

Проведене комп'ютерне моделювання показало, що підвісна кран-балка при дії статичного навантаження 20 кН працює в межах пружної області матеріалу.

Напруження, переміщення та деформації не перевищують допустимих значень, а коефіцієнт запасу міцності свідчить про достатню надійність конструкції.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування чисельного моделювання для аналізу вантажопідіймальних конструкцій і можуть бути використані як обґрунтування працездатності підвісної кран-балки або як вихідні дані для подальшої оптимізації.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Технічне обґрунтування способу зварювання.

У практиці виготовлення зварних металоконструкцій використовується широкий спектр способів зварювання, серед яких найбільш розповсюдженими є: ручне дугове зварювання покритими електродами (Е), механізоване та автоматизоване зварювання у середовищі вуглекислого газу (УП), зварювання плавким електродом в інертних газах (ІП), автоматичне зварювання під флюсом (Ф), а також зварювання із застосуванням плазмової дуги (П).

Обґрунтування вибору конкретного способу зварювання здійснюється з урахуванням сукупності технологічних і конструктивних чинників, що визначають умови формування зварного з'єднання та його експлуатаційні характеристики. До таких чинників належать хімічний склад основного металу, товщина зварюваних елементів, просторове положення швів, геометрія з'єднань і їх довжина, а також обсяг випуску виробу й тип виробництва [8].

Під час виготовлення конструкцій допускається застосування більшості стандартних способів зварювання, що зумовлено доброю зварюваністю даної сталі та її низькою чутливістю до утворення дефектів у зоні термічного впливу. Водночас для вибору найбільш раціональної технології доцільно порівняти окремі способи зварювання за показниками продуктивності, якості зварних з'єднань та економічної доцільності.

Ручне дугове зварювання покритими електродами характеризується відносно невисокою продуктивністю, що обмежує ефективність його застосування у серійному виробництві. Кількісною характеристикою продуктивності є коефіцієнт наплавлення, який визначає масу наплавленого металу на одиницю зварювального струму за одиницю часу. Для даного способу його значення, як правило, становить 7–14 г/(А·год), що є істотно меншим порівняно з автоматичним зварюванням під флюсом (14–20 г/(А·год)) та зварюванням у вуглекислому газі (12–24 г/(А·год)).

Ручне зварювання виконують електродами діаметром переважно 1–5 мм, найчастіше — 3–6 мм, при зварювальних струмах у межах 90–350 А та щільності струму 10–18 А/мм². Натомість при автоматичному зварюванні під флюсом використовують електродні дроти діаметром 2–6 мм при значно більших значеннях сили струму — 200–1200 А і щільності струму 35–125 А/мм², що зумовлює істотне зростання продуктивності процесу [16–17].

Інтенсифікація ручного зварювання шляхом підвищення сили струму або збільшення діаметра електрода у багатьох випадках є технологічно недоцільною. Це пояснюється порушенням оптимального співвідношення між кількістю розплавленого основного та електродного металів, що ускладнює формування зварного шва, підвищує ймовірність прожогів тонколистових елементів і погіршує умови виконання зварювання у вертикальному та стельовому положеннях.

Крім того, ручне дугове зварювання належить до трудомістких процесів, оскільки на поверхні зварювальної ванни постійно присутній шлаковий шар, який ускладнює забезпечення стабільної глибини проплавлення та рівномірного профілю шва по всій довжині з'єднання. У зв'язку з цим виконання таких робіт потребує високої кваліфікації персоналу. Через нестабільність глибини провару кутові шви, виконані ручним способом, зазвичай проєктують із дещо більшими катетами порівняно з аналогічними швами, сформованими автоматизованими методами.

Разом з тим ручне зварювання має окремі різновиди з підвищеною ефективністю. Застосування електродів із залізним порошком у покритті на рутиловій або фтористо-кальцієвій основі дозволяє підвищити продуктивність процесу у 1,8–2 рази порівняно зі зварюванням стандартними електродами. Додаткове зростання продуктивності можливе також при використанні режимів зануреної дуги за зниженої напруги.

Незважаючи на універсальність, маневреність і відносно невеликі капітальні витрати, ручне дугове зварювання має низку обмежень, які при значних обсягах його застосування негативно впливають на техніко-економічні показники виробництва. Водночас цей спосіб залишається доцільним у монтажних умовах,

під час зварювання металоконструкцій безпосередньо на будівельному майданчику, а також при виконанні зварювальних робіт на арматурних елементах у процесі їх монтажу.

Зварювання покритими штучними електродами залишається практично незамінним у випадках виконання робіт у важкодоступних зонах металоконструкцій, під час нецентралізованих ремонтів виробів, а також при одиничному виготовленні конструкцій з невеликим обсягом зварювальних операцій. Цей спосіб може застосовуватися і в умовах дрібносерійного, а в окремих випадках навіть серійного виробництва, коли кількість виробів не забезпечує економічної доцільності використання більш продуктивних механізованих або автоматизованих технологій.

Разом із тим у сучасному виробництві зварних конструкцій усе більшого поширення набувають механізовані способи зварювання суцільним і порошковим дротом у середовищі захисних газів. Саме ці методи на сьогоднішньому етапі розвитку технологій активно витісняють ручне зварювання покритими електродами. Найчастіше вони реалізуються у середовищі вуглекислого газу або його сумішей, що дозволяє покращити формування шва, дещо підвищити продуктивність процесу та істотно зменшити інтенсивність розбризкування металу.

Зварювання суцільним дротом зазвичай здійснюється у газових сумішах типу $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ або $\text{CO}_2 + \text{Ar} + \text{O}_2$. У ряді технологічних схем застосовується також порошковий дріт самозахисного типу, який дозволяє виконувати зварювання без використання зовнішнього газового захисту. При виготовленні зварних металоконструкцій перевага, як правило, надається саме механізованому зварюванню в захисних газах як більш універсальному та стабільному процесу.

До основних переваг механізованого зварювання належить висока концентрація енергії зварювальної дуги, що забезпечує збільшену глибину проплавлення з'єднань. У поєднанні з підвищеними швидкостями зварювання це сприяє формуванню відносно вузької зони термічного впливу та зменшенню зварювальних деформацій елементів конструкції [16-17].

Застосування механізованих процесів дозволяє виконувати зварні шви безперервно, без частих зупинок. За таких умов відпадає необхідність у додатковому заварюванні кратерів, що знижує трудомісткість операцій і сприяє підвищенню продуктивності при меншій витраті електродного матеріалу. Відсутність розплавленого шлаку на поверхні зварювальної ванни значно спрощує процес формування шва, особливо під час зварювання суцільним дротом, порівняно з ручним дуговим зварюванням покритими електродами.

Поряд із зазначеними перевагами механізовані способи зварювання суцільним і порошковим дротом мають і певні технологічні обмеження. Найбільш суттєвим недоліком є необхідність надійного газового захисту зварювальної ванни та зони горіння дуги від впливу атмосферного повітря. Крім того, у порівнянні з ручним зварюванням, ці способи характеризуються меншою маневреністю через жорсткий зв'язок зварювального пальника з механізмом подачі дроту, що ускладнює доступ до обмежених або складних за геометрією ділянок конструкцій.

При зварюванні суцільним дротом у захисних газах, яке зазвичай виконують на зворотній полярності дротами діаметром 1,2–1,6 мм, застосування чистого вуглекислого газу може призводити до значних втрат електродного матеріалу на розбризкування і чад — до 10–12 %. Це негативно впливає не лише на економічність процесу, але й на якість формування зварного шва, збільшуючи обсяг допоміжних робіт з очищення поверхні виробу та сопла зварювального пальника.

З метою зменшення розбризкування механізоване зварювання суцільним дротом доцільно виконувати у газових сумішах типу $\text{Ar} + (10\text{--}20\%) \text{CO}_2$ або $75\% \text{Ar} + 20\% \text{CO}_2 + 5\% \text{O}_2$, що дозволяє знизити втрати дроту до рівня 2,5–5,0 %. Додатковими заходами зменшення розбризкування є застосування джерел живлення з оптимальними динамічними характеристиками, дотримання раціональних швидкостей зварювання, стабілізація довжини дуги шляхом узгодження напруги, швидкості подачі дроту та його вильоту, а також очищення і попереднє прожарювання дроту при температурі 200–250 °C протягом 2 годин.

Значного ефекту можна досягти також при використанні імпульсно-дугових режимів зварювання [16-17].

Окрім зварювання в захисних газах, для виконання з'єднань із поперечним перерізом шва понад 20–30 мм² іноді застосовується механізоване зварювання під флюсом. Виконання цього процесу потребує відповідної кваліфікації, оскільки наявність шару флюсу ускладнює візуальний контроль формування шва. Саме цим механізоване зварювання під флюсом принципово відрізняється від зварювання плавким електродом у захисних газах.

З урахуванням особливостей техніки виконання, продуктивності та трудомісткості механізованих процесів у більшості випадків доцільно віддавати їм перевагу над ручним дуговим зварюванням покритими електродами. В умовах заводського виготовлення зварних конструкцій, зокрема у машинобудуванні, де переважає випуск однотипних виробів достатньої серійності, механізовані способи можуть практично повністю замінити ручне зварювання. Останнє доцільно зберігати лише для виконання зварних швів у важкодоступних місцях або під час виготовлення конструкцій зі спеціальних марок сталей.

У виробничих умовах зварювання суцільним дротом у захисних газах є особливо ефективним при виготовленні конструкцій з тонколистових деталей. Натомість застосування механізованого зварювання під флюсом є виправданим у разі однопрохідного виконання швів із поперечним перерізом понад 20–30 мм².

Серед автоматизованих процесів зварювання плавким електродом найбільш широке застосування мають дугове зварювання під флюсом, зварювання в захисних газах, а також електрошлакове зварювання. При напівавтоматичних процесах механізується, щонайменше, подача електродного дроту, його переміщення вздовж зварюваного шва та подача захисного середовища. У разі автоматичного зварювання всі операції, що супроводжують процес формування шва, виконуються в автоматичному режимі, за винятком запуску обладнання.

У виробництві зварних конструкцій необхідне застосування обладнання з різним рівнем механізації та автоматизації, що обумовлено відмінностями у конструктивних особливостях виробів, їх серійності та вимогах до якості.

Автоматичні способи зварювання плавким електродом вирізняються підвищеною продуктивністю та стабільно високою якістю з'єднань, що досягається завдяки можливості роботи на більш інтенсивних режимах, насамперед за рахунок підвищених значень зварювального струму. Стабільність якості при цьому забезпечується автоматизованим контролем процесу плавлення і формування зварного з'єднання.

При виборі способу зварювання елементів балки вирішальними є властивості основного матеріалу, зокрема використання сталі С345, яка характеризується доброю зварюваністю. Для цього матеріалу придатні більшість типових способів зварювання, однак з урахуванням технологічної доцільності для подальшого аналізу доцільно залишити ручне дугове зварювання, механізоване та автоматизоване зварювання у CO_2 , а також автоматичне зварювання під флюсом [19].

З огляду на товщину зварюваних листів у межах 8–20 мм, найбільш раціональними є механізовані та автоматизовані способи зварювання у захисних газах і під флюсом, які забезпечують високу якість з'єднань і суттєво перевершують ручне зварювання за продуктивністю. Умови заводського виготовлення, нижнє положення швів, їх добра доступність і серійний характер виробництва дозволяють обґрунтовано виключити ручне дугове зварювання як найбільш трудомісткий і економічно менш ефективний спосіб.

Таким чином, для виготовлення балки доцільно обрати механізоване зварювання у середовищі вуглекислого газу та зварювання під шаром флюсу як технологічно й економічно найбільш виправдані процеси. В умовах великосерійного виробництва це дозволяє застосовувати лінії з комплексною механізацією та автоматизацією з використанням прогресивних методів зварювання.

До зварювальних матеріалів при цьому висуваються підвищені технологічні вимоги, зокрема щодо забезпечення стабільності зварювального процесу, високої продуктивності, якісного формування шва, легкого видалення шлакової кірки, а

також надійного захисту зони горіння дуги та зварювальної ванни від впливу кисню, азоту й атмосферного повітря.

Для виконання зварювання в середовищі CO_2 доцільно застосовувати зварювальний дріт марки Св-08Г2С (табл. 3.1), який призначений для механізованого та автоматичного зварювання вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей у всіх просторових положеннях. Легування дроту марганцем і кремнієм сприяє зниженню окисних процесів у зварювальній ванні, підвищуючи розкисленість металу шва та його механічні властивості.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад дроту Св08Г2С [18, 20]

Марка дроту	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
Св08Г2С	0.05 – 0.11	1.8 – 2.1	0.7 – 0.95	0.2	0.25	0.01	0.015

Для отримання зварних з'єднань високої якості необхідно використовувати вуглекислий газ підвищеної чистоти — зварювальний або харчовий з додатковим осушенням. Основними домішками, вміст яких у газі жорстко регламентується, є азот і волога, оскільки їх присутність може призводити до утворення пор у металі шва та погіршення експлуатаційних характеристик з'єднань.

При автоматичному зварюванні сталі під флюсом доцільно застосовувати флюс АН-348А у поєднанні з електродними дротами типу Св-08Г2С. Раціональний підбір зварювальних матеріалів і теплового циклу зварювання дозволяє отримати метал шва з необхідним поєднанням міцності та пластичності, а також забезпечити високу стійкість проти утворення пор і кристалізаційних тріщин.

Таблиця 3.2- Хімічний склад флюсу АН-348А, % [18,20]

SiO	MnO	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	S	P	CaF_2
40-44	31-38	10-13	≤ 12	≤ 7	0.5-2.2	≤ 0.11	≤ 0.12	3-6

Балка є основним несучим елементом підвісної кран-балки та працює переважно в умовах поперечного згину. В конструкції кран-балки застосовано

зварну двотаврову балку, яка сприймає експлуатаційні навантаження у вертикальній та горизонтальній площинах. Несуча здатність і довговічність такої конструкції значною мірою визначаються якістю виконання зварних з'єднань між поясами та стінкою балки.

Під час виготовлення балки найбільш відповідальними є кутові та таврові з'єднання, за допомогою яких з'єднуються поясні елементи товщиною 20 мм зі стінкою (полицею) товщиною 12 мм. Для забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції параметри зварних швів повинні відповідати діючим нормативним вимогам і бути узгодженими з прийнятим способом зварювання.

Зварювальний режим визначається як сукупність параметрів процесу зварювання, які забезпечують формування зварного шва необхідної геометрії, глибини проплавлення та механічних властивостей. У разі напівавтоматичного зварювання в середовищі захисного газу до основних параметрів режиму. [19]

Для обґрунтування режимів зварювання розглянемо таврове з'єднання типу ТЗ (рис. 3.1), яке є характерним для з'єднання пояса балки зі стінкою. Товщина пояса становить $S = 20$ мм, товщина стінки $S_l = 12$ мм. Для з'єднань такого типу приймаємо рекомендований катет кутового шва $K = 9$ мм.

Першим етапом розрахунку є визначення глибини проплавлення основного металу. Орієнтовну глибину проплавлення визначаємо за залежністю:

$$h = K - 0,5b,$$

де b — ширина зварного валика. За прийнятих геометричних параметрів та $K = 9$ мм отримаємо $h \approx 8$ мм.

Отримане значення забезпечує надійне проплавлення з'єднання при заданих товщинах елементів балки.

Для формування кутового шва з катетом 9 мм обираємо електродний дріт діаметром $d_e = 1,6$ мм, що є раціональним для напівавтоматичного зварювання конструкційних сталей середньої товщини.

Силу зварювального струму визначаємо за емпіричною залежністю:

$$I_{зв} = 125 \cdot d_e \cdot 1,5 \pm 35.$$

Підставивши значення $d_e = 1,6 \text{ мм}$, одержимо:

$$I_{зв} = 125 \cdot 3 \cdot 1,5 \pm 35 = 560 \pm 35 \text{ А.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо номінальне значення зварювального струму $I_{зв} = 580 \text{ А}$.

Напругу зварювання визначаємо за залежністю:

$$U_{зв} = 15 + 0,05I_{зв},$$

звідки:

$$U_{зв} = 15 + 0,05 \cdot 580 = 44 \text{ В.}$$

Швидкість подачі електродного дроту визначаємо з урахуванням сили струму та діаметра дроту за відомою методикою:

$$V_{пд} = 1,9 \cdot \frac{I_{зв}}{d_e^2}.$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$V_{пд} = 1,9 \cdot \frac{600}{3^2} \approx 127 \text{ м/год.}$$

Швидкість зварювання визначаємо за формулою:

$$V_{зв} = 21 - 0,175h,$$

де h — глибина проплавлення в мм. За $h = 8 \text{ мм}$:

$$V_{зв} = 21 - 0,175 \cdot 8 = 19,6 \text{ м/год.}$$

З урахуванням стабільності процесу приймаємо $V_{зв} = 20 \text{ м/год}$.

Для оцінки тепловкладення визначаємо погонну енергію зварювання:

$$q_n = \frac{0,24 \cdot I_{зв} \cdot U_{зв} \cdot \eta}{V_{зв}},$$

де коефіцієнт корисного використання теплоти дуги $\eta = 0,75$. Підставивши числові значення, отримаємо:

$$q_n = \frac{0,24 \cdot 580 \cdot 44 \cdot 0,75}{20} \approx 229,68 \text{ ккал/см.}$$

Дійсну глибину проплавлення визначаємо з урахуванням коефіцієнта провару φ_p :

$$h_d = 0,0165 \cdot \sqrt{\frac{q_n}{\varphi_{\text{пр}}}}$$

За $\varphi_p = 2,32$ отримаємо: $h_d \approx 0,66$ см, що відповідає вимогам до з'єднання пояса товщиною 20 мм зі стінкою товщиною 12 мм.

Коефіцієнт наплавлення визначаємо за залежністю:

$$\alpha_n = 11,7 + 0,0156 \frac{I_{\text{зв}}}{d_e},$$

звідки:

$$\alpha_n = 11,7 + 0,0156 \cdot \frac{580}{3} \approx 14,8 \text{ г/(А год)}.$$

Отримані параметри режиму зварювання забезпечують формування кутового шва необхідної геометрії, достатню глибину проплавлення та стабільні механічні властивості зварного з'єднання при виготовленні балки з поясом - 20 мм і стінкою - 12 мм.

З урахуванням прийнятого способу та розрахованих режимів зварювання, з метою підвищення стабільності якості та загальної результативності виготовлення гофрованих балок доцільно впровадити роботизовані зварювальні комплекси. Використання таких систем забезпечує відтворюваність параметрів зварювального процесу, мінімізує вплив людського фактора, скорочує обсяг ручних операцій і створює умови для глибокої автоматизації виробництва, що в сукупності сприяє підвищенню технологічного рівня та конкурентоспроможності продукції.

Зварювання поздовжніх швів балки доцільно виконувати на спеціалізованому стенді-кантувачі, що являє собою жорстку металоконструкцію для опирання і фіксації виробу. Конструктивне виконання стенда забезпечує розташування з'єднання у найбільш сприятливому для автоматичного процесу просторовому положенні, тобто зварювання здійснюється за схемою «в човник», що підвищує стабільність формування валика та зменшує ймовірність дефектів, пов'язаних із стіканням металу зварювальної ванни [21].

Безпосередньо зварювальні операції реалізуються автоматом шведської компанії ESAB, який переміщується вздовж виробу по направляючій над робочою

зоною стенда. З метою виключення водневого насичення металу шва і зниження ризику пороутворення та холодних тріщин, перед початком робіт дрiт i флюс пiддають термiчнiй пiдготовцi (прожарюванню) у сушильнiй печi за температури 300 °C протягом 3 годин, що забезпечує видалення вологи та стабiлiзацiю сипучостi флюсу.

Зварювання чотирьох поздовжнiх швiв виконують послiдовно, з дотриманням черговостi накладання швiв для зменшення сумарних деформацiй i забезпечення симетричного тепловкладення. Перекантовування балки мiж проходами здiйснюють мостовим краном, що дозволяє швидко переводити шви у технологiчно зручне положення та пiдтримувати сталi умови формування шва на всiх дiлянках. Геометричнi параметри кутових швiв (зокрема катет) приймають за проєктною документацiєю; у разi вiдсутностi прямого зазначення параметр шва призначають, орієнтуючись на мiнiмальну товщину зварюваних елементiв та розрахунковi вимоги до несучої здатностi з'єднання.

Комплект зварювального обладнання ESAB складається з джерела живлення DC 600 (рис. 3.5) та трактора-автомату типу А6 DK (рис. 3.4, табл.3.3), що забезпечують реалiзацiю процесу дугового зварювання пiд шаром флюсу в автоматичному режимi з високою повторюванiстю параметрiв.

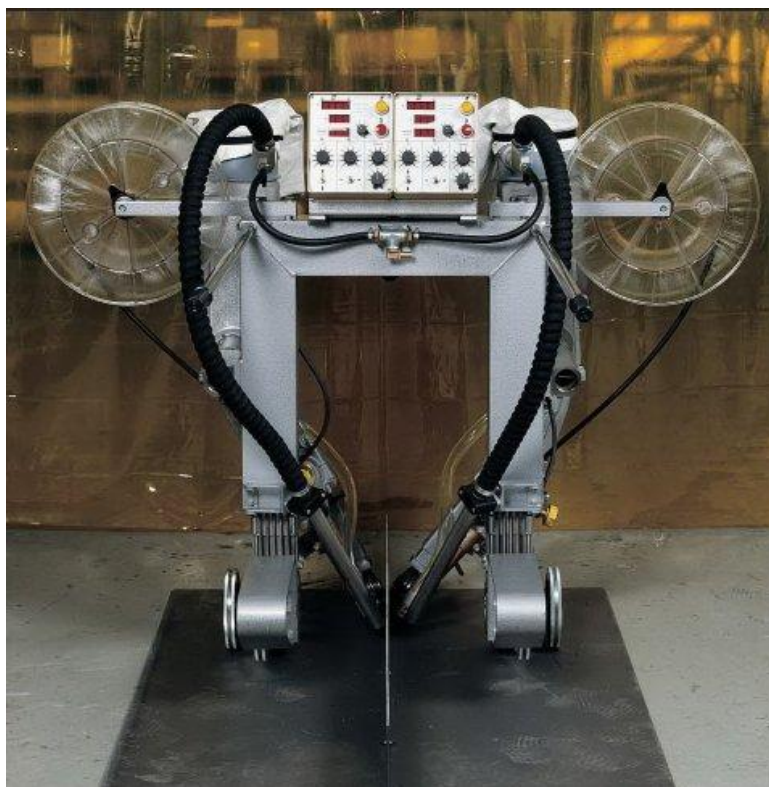


Рис. 3.4 – Трактор-автомат А6 ДК [22]

Таблиця 3.3 Технічні дані А6 ДК [22]

Параметр	Значення
Габаритні розміри (Д × Ш × В), мм	870 × 400 × 830
Висота порталу (у світлі), мм	800
Ширина порталу (у світлі), мм	400
Маса обладнання, кг	150
Діапазон швидкості подачі зварювального дроту, м/хв	0,2 – 4,0
Діапазон швидкості переміщення трактора, м/хв	0,15 – 2,0
Максимальний зварювальний струм при ПВ = 100 %, А	1500
Діаметр зварювального дроту, мм	3,0 – 6,0



Рис. 3.5 Зварювальний трансформатор DC 600 [22]

Трактор-автомат А6 ДК є самохідним зварювальним агрегатом, призначеним для виконання автоматичного дугового зварювання плавким електродом, переважно під шаром флюсу, а також у середовищі захисних газів. Обладнання використовується у складі автоматизованих зварювальних комплексів під час виготовлення балкових, рамних та інших протяжних зварних конструкцій. Живлення системи керування та приводних електродвигунів трактора здійснюється від джерела струму типу DC 600, що забезпечує необхідні енергетичні параметри для роботи на підвищених струмах, характерних для підфлюсового зварювання.

Конструкція трактора передбачає можливість точного налаштування положення контактної наконечника у горизонтальній та вертикальній площинах. Регулювання виконується за допомогою механізму поперечного переміщення (хрестового супорту), що дозволяє забезпечити правильну орієнтацію електрода відносно осі шва. Кут нахилу вузла подачі дроту змінюється поворотом механізму

подачі, що є важливим для стабілізації дугового проміжку і коректного формування шва при зварюванні кутових та таврових з'єднань.

Для роботи під флюсом трактор комплектується струмознімачем діаметром 20 мм, який допускає тривале навантаження до 800 А при ПВ 100 %, а також режим підвищених струмів до 1000 А при ПВ 60 %, що розширює технологічні можливості комплексу при зварюванні товстостінних елементів. На зварювальну головку можуть встановлюватися подаючі ролики для зварювання як одинарним дротом, так і схемою з подвоєною подачею. У разі використання порошкового дроту застосовують спеціальні ролики з накаткою, які запобігають проковзуванню та деформації дроту і забезпечують рівномірну подачу електродного матеріалу протягом усього циклу.

Для виконання операцій локального доопрацювання зварних з'єднань, а також усунення виявлених дефектів доцільно застосовувати зварювальний напівавтомат *TPS 600i* (рис. 3.6, табл. 3.4). Установка має мобільне виконання відкритого типу, що забезпечує зручність експлуатації в умовах виробничої ділянки та під час виконання допоміжних зварювальних операцій.

Принцип роботи апарата ґрунтується на механізованій подачі суцільного електродного дроту за схемою «штовхання», що забезпечує стабільність дугового процесу та рівномірне формування зварювальної ванни. Конструктивні та енергетичні характеристики *TPS 600i* дозволяють ефективно виконувати як стикові, так і кутові зварні з'єднання. Застосування даного напівавтомата забезпечує високу якість зварного шва, мінімальний рівень розбризкування металу та надійну повторюваність результатів, що є особливо важливим під час ремонтно-коригувальних операцій та доведення готових виробів до вимог нормативної документації.



Рис. 3.6 Джерело живлення типу *TPS 600i*[23]

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики *TPS 600i* [23]

Параметр	Значення
Номінальна напруга живильної мережі	3 × 400 В
Частота мережі живлення	50–60 Гц
Мінімальний зварювальний струм	3 А
Максимальний зварювальний струм	600 А
Зварювальний струм при ПВ (10 хв / 40 °С)	500 А при 100 %
Напруга холостого ходу	74 В
Клас захисту оболонки	IP23
Габаритні розміри (довжина)	706 мм
Габаритні розміри (ширина)	300 мм
Габаритні розміри (висота)	510 мм
Маса обладнання	50 кг

3.2 Опис технологічного процесу

Технологічний процес виготовлення балок включає ряд кроків, на кожному з яких проводиться контроль якості матеріалів та виробів. Послідовність виконання операцій приведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Технологічний маршрут виготовлення підвісної кран-балки

№ операції	Найменування операції	Зміст та суть операції (науково-технічний опис)	Обладнання та оснащення
005	Транспортна	Подавання складальних одиниць балки на ділянку підготовки поверхонь з використанням підйомно-транспортних засобів.	Мостовий кран
010	Слюсарна (очисна)	Видалення продуктів корозії, мастил і технологічних забруднень у зонах зварювання з метою забезпечення стабільності дугового процесу та якості з'єднань.	Кутова шліфмашина, зубило, молоток, металева щітка
015	Транспортна	Переміщення підготовлених заготовок до складального станду для попереднього складання балки.	Мостовий кран
020	Складальна	Установлення елементів балки у складальному пристрої, фіксація притискачами, створення контрольованого зворотного прогину, виконання прихваток від центру до країв.	Складальний стенд, гідравлічні/пневматичні притискачі, напівавтомат <i>TPS 600i</i>
025	Зачишувальна	Механічна зачистка прихваточних швів та локальних напливів для підготовки до основного зварювання.	Кутова шліфмашина
030	Контрольна	Первинний візуальний контроль якості прихваток та взаємного розташування елементів балки.	Набір шаблонів
035	Транспортна	Переміщення складеної балки на робоче місце основного зварювання.	Мостовий кран
045	Слюсарна	Додаткове очищення зон зварювання перед виконанням основних зварних швів.	Кутова шліфмашина, щітка
050	Складально-зварювальна	Виконання кутових швів з одного боку балки, зняття зі станду, перекантівка та	Складально-зварювальний стенд, зварювальний автомат

		зварювання з протилежного боку для зменшення зварювальних деформацій.	A6 DK , напівавтомат TPS 600i, мостовий кран
055	Слюсарна	Очищення зон зварних швів від бризок металу та залишків шлаку.	Кутова шліфмашина, молоток, щітка
060	Зачищувальна	Зачистка поверхні виробу від крапель металу та нерівностей.	Кутова шліфмашина
065	Контрольна	Остаточний контроль якості зварних з'єднань і перевірка геометричних розмірів балки.	Набір ВК, лінійка, кутник
070	Транспортна	Транспортування готової балки у зону складування готової продукції.	Кран-балка
075	Фарбувальна	Фарбування готової конструкції кран балки	Епоксидні ґрунти, Поліуретанові емалі

Операції технологічного процесу реалізують із застосуванням обладнання яке приведено нижче.

Вхідний контроль здійснюється із застосуванням універсальних засобів вимірювальної техніки, зокрема вимірювальних лінійок із межею вимірювання до 1000 мм та ціною поділки 1,0 мм, кутомірів для перевірки геометричної точності кутових параметрів, а також штангенциркулів із межею вимірювання до 1000 мм і точністю 0,1 мм для визначення товщини та лінійних розмірів металопрокату. Реалізація зазначеної системи контролю забезпечує своєчасне виявлення відхилень властивостей і параметрів матеріалів від установлених вимог, що, у свою чергу, сприяє стабільності технологічного процесу та досягненню необхідного рівня якості готової продукції.

Листовий метал, що надходить на виробництво, підлягає попередній поверхневій обробці методом дробоструминного очищення, яка є важливим етапом технологічної підготовки заготовок. Застосування цієї технології забезпечує інтенсивне та рівномірне видалення окалини, корозійних утворень, задирок, поверхневих забруднень і залишків формувальних матеріалів. У результаті досягається підвищення якості поверхні, точності геометричних

параметрів заготовок і стабільності подальших технологічних операцій. Усі роботи з очищення виконуються на спеціалізованій дробоструминній установці (рис. 3.7).



Рис. 3.7 – Дробоструминна установка SK-2 ÇETİNGİL для очищення поверхні листового металу [24]

Вирівнювання листового прокату є необхідною технологічною операцією, спрямованою на усунення залишкових деформацій і відхилень від площинності, що виникають у процесі прокатування та транспортування матеріалу. Для відновлення геометричної форми сталевих листів товщиною 12 мм застосовується спеціалізоване правильне обладнання, зокрема багатовалкові правильні машини типу Bendmak BPSM 20/18, які забезпечують досягнення заданих показників площинності та підвищують точність подальших технологічних операцій (рис. 3.8).



Рис. 3.8– Правильна машина Bendmak BPSM 20/18 для вирівнювання листового прокату [24]

Розмітка та розкрій листового прокату здійснюються на газорізальній машині типу CNCMS – 3000 (рис. 3.9) з використанням газокисневої суміші та програмного керування, що забезпечує високу точність відтворення заданих контурів деталей. Конструктивною особливістю обладнання є наявність п'яти ріжучих різаків, які працюють одночасно, що дозволяє істотно скоротити тривалість операції та зменшити рівень термічних деформацій, які виникають у матеріалі в процесі різання.

Після завершення газокисневого розкрою всі отримані смуги підлягають механічному очищенню з метою видалення шлакових нашарувань і бризок металу, що утворюються в зоні різку. За наявності залишкових деформацій або відхилень від площинності заготовки додатково проходять операцію правки. Після виконання контрольних вимірювань і підтвердження відповідності геометричних параметрів вимогам конструкторської документації смуги вважаються готовими та транспортуються за допомогою мостового крана на установку автоматичного збирання для подальших технологічних операцій.



Рис. 3.9 – Машина CNCMS – 3000 [24]

Складання балки здійснюється на спеціалізованій складальній установці, що забезпечує стабільне позиціонування елементів і дотримання заданих геометричних параметрів конструкції (рис. 3.10). На початковому етапі верхній

пояс балки встановлюється та орієнтується у складальному стенді з подальшою фіксацією у проектному положенні. Далі на роликовий стенд послідовно укладається вертикальний гофрований лист, який формує стінку балки та забезпечує необхідну жорсткість конструкції. Після цього монтується нижній пояс гофрованої балки з приведенням його у відповідність до осевих і лінійних розмірів. Для забезпечення точності взаємного розташування складальних елементів, а також запобігання їх зміщенню в процесі подальших технологічних операцій, усі елементи конструкції надійно фіксуються за допомогою притискних та направляючих пристроїв складальної установки.



Рис. 3.10 –Складальна стенд-установка для складання підвісної кран-балки

Зварювання повздовжніх зварних з'єднань балки виконують на спеціалізованому зварювальному стенді, який забезпечує стабільне положення виробу та необхідні умови для автоматизованого процесу. Для реалізації операції використовується зварювальне обладнання шведської компанії ESAB, що переміщується вздовж балки по напрямних, розташованих над стендом, забезпечуючи сталість режимів і рівномірність формування шва по всій довжині.

Процес зварювання здійснюється під шаром флюсу із застосуванням електродного дроту марки Св-08Г2С діаметром 3 мм у поєднанні з флюсом АН-348, що дозволяє отримати зварні з'єднання з високими механічними

властивостями та низькою ймовірністю дефектів. Перед використанням зварювальні матеріали підлягають обов'язковій термічній підготовці — прокалюванню в сушильній печі за температури 300 °С протягом трьох годин з метою видалення вологи та стабілізації хімічного складу.

Зварювання повздовжніх швів виконують попарно, що сприяє зменшенню зварювальних деформацій і більш рівномірному розподілу залишкових напружень у конструкції. Перекантування балки між окремими етапами зварювання здійснюють за допомогою мостового крана, що забезпечує безпечне транспортування та точне позиціонування виробу.

Після завершення зварювальних операцій у зварних листових конструкціях формуються залишкові напруження стиску і розтягування, які можуть негативно впливати на їхню стійкість, геометричну точність і експлуатаційну надійність. У ряді випадків втрата стійкості окремих елементів або конструкції в цілому можлива навіть за відсутності зовнішніх робочих навантажень, якщо рівень залишкових зварювальних напружень досягає або перевищує критичні значення. Наявність залишкових деформацій у вузлах і елементах великогабаритних конструкцій ускладнює процес складання, а іноді робить його неможливим без застосування додаткових технологічних операцій, таких як підгонка, підрублювання або правка, що призводить до зростання трудомісткості та ускладнення виробничого процесу.

Зварювальні деформації, які виникають під час локального нагрівання та подальшого охолодження металу, зумовлюють необхідність призначення підвищених припусків на механічну обробку. Особливо небезпечним є спотворення геометрії поперечних перерізів елементів і конструкції в цілому, оскільки такі відхилення можуть спричинити появу додаткових, не врахованих під час проектування напружень у процесі експлуатації, що підвищує ризик передчасного виходу виробу з ладу. Зміна форми елементів здатна суттєво впливати на експлуатаційні характеристики зварної конструкції, а також погіршувати її зовнішній вигляд, що є особливо характерним для тонкостінних листових виробів.

З метою підвищення міцності та довговічності зварних конструкцій у разі обґрунтованої необхідності застосовують спеціальні методи зниження або усунення залишкових зварювальних напружень. До найбільш поширених належить загальний високий відпуск у термічних печах, при якому конструкцію нагрівають до температури 600–650 °C і витримують за цієї температури залежно від товщини елементів: до 20 мм — протягом 3 годин, від 20 до 36 мм — близько 4 годин, після чого здійснюють охолодження на повітрі. Місцевий високий відпуск застосовують для зниження напружень у окремих зонах або елементах зварних конструкцій і для покращення пластичних властивостей металу; при цьому нагрівання здійснюють за допомогою переносних термічних установок. Водночас слід враховувати, що нерівномірний локальний нагрів може призводити до виникнення додаткових залишкових напружень значної величини.

Механічний відпуск ґрунтується на прикладанні до конструкції напружень, рівномірно розподілених по поперечному перерізу та близьких до межі плинності матеріалу. Застосування цього способу супроводжується побічними ефектами, такими як наклеп і зниження пластичності, а також є технологічно складним через необхідність створення значних зусиль. Термопластичний відпуск передбачає нагрівання зон, розташованих паралельно зварному шву, в яких діють залишкові напруження стиску; подовження нагрітих ділянок викликає появу напружень розтягування у шві та пластичну деформацію, що сприяє зниженню рівня залишкових напружень.

Для тонкостінних зварних конструкцій із пластичних матеріалів ефективним є метод обкатки, який дозволяє одночасно зменшити залишкові напруження та деформації. Суть методу полягає у пропусканні виробу між роликами або валиками з регульованим зусиллям обтиснення, при цьому обробці може підлягати як зона шва та навколошовна область, так і вся конструкція в цілому. Близьким за принципом дії є метод проковування зварних швів, який найбільшу ефективність має у гарячому стані металу. Запобігання виникненню значних залишкових зварювальних напружень також досягається шляхом зниження нерівномірності

нагрівання виробу під час зварювання, що реалізується вибором оптимальних режимів та застосуванням супутнього підігріву.

Після зварювання досліджуваної конструкції, як правило, фіксуються деформації, величина яких перевищує допустимі значення, встановлені чинними нормативними документами. Для усунення таких відхилень виконують правку на спеціалізованих стендах із гідравлічними направляючими, призначеними для вирівнювання полиць і забезпечення відповідності геометричних параметрів встановленим нормам. Правку здійснюють до повного досягнення допустимих значень деформацій.

Операцію правки виконують на правильній машині типу JZJ-800 (рис. 3.11), яка є складовою частиною технологічної лінії з виготовлення таврових сталевих зварних конструкцій. Даний верстат призначений для усунення деформацій, що виникають у процесі зварювання сталевих пластин унаслідок циклів нагрівання та охолодження. Конструктивні та кінематичні особливості правильної машини забезпечують її застосування виключно для зварних виробів таврового перерізу. Обладнання характеризується високою продуктивністю та ефективністю і широко використовується у великомасштабному промисловому, мостовому та металургійному будівництві, а також в інших галузях, де застосовуються зварні металеві конструкції.



Рис. 3.11 – Правильна машина для усунення деформацій таврових зварних металоконструкцій [25]

Таблиця 3.6 – Технічні параметри машини для правки таврових металоконструкції [25]

Параметр	Значення
Швидкість вирівнювання:	18М/хв
Загальна потужність обладнання:	22KW + 1.1KW x 2
Загальний розмір обладнання:	3500 x 1100 x 1700 мм.
Загальна вага обладнання:	9000 кг.
Матеріал виробу:	Q235 – А

Вирівнювальний пресувальний вал у поєднанні з приводним валом формує систему опорної та навантажувальної точок важільного механізму, у межах якої виникає контрольована пружна деформація металу. Під час проходження краю Н-подібної сталевих плити через зазначений пристрій локальні нерівності та відхилення геометрії усуваються внаслідок дії зусилля, яке передається через вирівнювальний вал. Після зняття навантаження пружна деформація частково компенсується, що забезпечує відновлення заданої геометричної форми краю листа та досягнення необхідних показників рівності.

Опоряджувальні операції є завершальним етапом технологічного процесу виготовлення балки та спрямовані на забезпечення її ідентифікації, захисту від корозійного впливу та надання виробу завершеного зовнішнього вигляду. До основних операцій фінальної обробки належать маркування та нанесення захисного лакофарбового покриття.

На заключному етапі виготовлення на готові балки наносять маркування, яке містить серійний номер, основні технічні характеристики виробу та інші ідентифікаційні відомості, передбачені технічною документацією. Маркування виконується автоматизованим способом, що забезпечує високу чіткість зображення, стабільність параметрів нанесення та стійкість позначень до механічних і атмосферних впливів. Наявність маркування значно спрощує ідентифікацію балок під час транспортування, монтажу та подальшої експлуатації.

Фарбування конструкції здійснюється з метою захисту металевої поверхні від корозії та підвищення експлуатаційної довговічності виробу. Для цього застосовується алкідний ґрунт, призначений для обробки сталевих поверхонь, який забезпечує надійну адгезію до основного металу та створює ефективний захисний шар. Нанесення ґрунтового покриття формує основу для подальших лакофарбових шарів і сприяє збереженню технічних та естетичних характеристик балки в умовах експлуатації.

Контроль якості є невід'ємною складовою технологічного процесу виготовлення зварної перфорованої двотаврової балки та здійснюється відповідно до встановлених технічних вимог і чинної нормативної документації. На початковому етапі обов'язковим є вхідний контроль вихідних матеріалів, до яких належать основний метал, зварювальний дріт і середовища захисних газів. Насамперед перевіряють відповідність сертифікаційних даних матеріалів вимогам, передбаченим технологією зварювання, після чого виконують їх візуальний огляд з метою виявлення зовнішніх дефектів, пошкоджень або ознак невідповідності якості [26].

Перед допуском матеріалів до використання у зварній конструкції додатково оцінюють їх зварюваність, що дозволяє забезпечити відповідність матеріалів технологічним та експлуатаційним вимогам і, як наслідок, підвищити надійність та довговічність готового виробу. Наступним етапом контролю є перевірка фактичних геометричних параметрів основного металу та зварювального дроту, зокрема їх розмірів, на відповідність сертифікованим значенням. Виявлені відхилення можуть істотно впливати на стабільність процесу зварювання та погіршувати якість сформованих з'єднань.

Забезпечення необхідних властивостей вихідних матеріалів і високого рівня якості готової продукції значною мірою залежить від технічного стану та надійності зварювального обладнання. З цією метою дотримуються регламентів технічного обслуговування та вимог експлуатаційної документації. У процесі підготовки зварювальних апаратів перевіряють справність регулювальних механізмів, наявність і точність контрольно-вимірювальних приладів, стан

струмопідвідних кабелів, якість електричних контактів і зварювальних мундштуків. Під час зварювання в середовищі захисних газів додатково контролюють роботу газових редукторів, витратомірів, шлангів, сопел пальників та інших елементів газозахисної системи, що забезпечує стабільність дуги і відтворюваність параметрів процесу.

Контроль дотримання технології охоплює всі стадії виготовлення зварних виробів — від підготовки матеріалів і складання заготовок до оцінювання якості готових з'єднань. Важливим елементом є моніторинг режимів зварювання, який здійснюється шляхом візуального контролю показань приладів та спостереження за формуванням зварного шва. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти відхилення від заданих параметрів і запобігати виникненню дефектів.

Вагому роль у забезпеченні якості відіграє рівень кваліфікації виробничого персоналу. Контроль професійної підготовки операторів здійснюється на всіх етапах технологічного процесу шляхом регулярної атестації та підтвердження кваліфікації зварювальників, складальників і фахівців з неруйнівного контролю. Це гарантує відповідність їхніх навичок вимогам сучасного виробництва та складності виконуваних операцій.

Візуальний контроль застосовується на різних етапах виготовлення виробу — під час підготовки та складання заготовок, у процесі виконання зварювальних робіт і при оцінюванні готових з'єднань. Цей метод є універсальним і використовується незалежно від подальшого застосування інших способів контролю. Його перевагами є простота, оперативність і економічність. У ході огляду виявляють тріщини, подрізи, пропали, напливи, непровари кореня шва та кромки, а також оцінюють форму і рівномірність валиків, характер лускатості, розподіл металу в підсиленні шва та ступінь проплавлення.

Зовнішній вигляд зварних з'єднань аналізують з урахуванням способу зварювання, просторового положення шва, марки матеріалу та інших технологічних чинників. Для підвищення об'єктивності оцінювання результати контролю порівнюють із затвердженими еталонними зразками. Геометричні параметри зварних швів і заготовок визначають із використанням шаблонів та

спеціалізованих вимірювальних інструментів. За результатами зовнішнього контролю виробу, за необхідності, направляють на додаткові методи контролю, призначені для виявлення внутрішніх дефектів [26].



Рис. 3.12 - Шаблон WG-2 для оцінювання форми та розмірів зварного шва [27]

Для виявлення внутрішніх дефектів у зварних з'єднаннях зварних металоконструкцій широко застосовується ультразвуковий неруйнівний контроль, який характеризується різноманітністю методичних підходів, використанням хвиль різного типу та широким діапазоном робочих частот. Серед існуючих методів ультразвукової дефектоскопії найбільш розповсюдженим є ехо-метод, частка застосування якого перевищує 80 % під час контролю металопродукції. Основною вимогою до схеми контролю є забезпечення надійного виявлення дефектів різної просторової орієнтації, зокрема тих, що істотно впливають на міцність і безпеку експлуатації виробів [11].

Для виконання ручного ультразвукового контролю, окрім дефектоскопа та ультразвукових перетворювачів, застосовується комплекс допоміжних засобів і матеріалів. До них належать калібрувальні зразки для перевірки працездатності апаратури, контактні рідини та пристрої для їх нанесення, матеріали для очищення контрольованої поверхні, вимірювальні лінійки для визначення координат

дефектів, а також засоби фіксації та маркування результатів контролю, зокрема олівці, папір, крейда, швидковисихаючі фарби або керни.

Перед проведенням ультразвукового контролю забезпечується належна підготовка поверхні зварних з'єднань. Допустимий рівень шорсткості при контактному методі контролю визначається типом використовуваного перетворювача: для прямого перетворювача рекомендована шорсткість поверхні становить 10–20 мкм, тоді як для похилого перетворювача вона може змінюватися в межах 20–40 мкм. У разі наявності грубої поверхні доцільним є застосування знижених робочих частот, що сприяє підвищенню достовірності виявлення внутрішніх дефектів. Як контактне середовище рекомендується використовувати в'язкі рідини, зокрема мінеральні олії або гліцерин, які забезпечують стабільний акустичний контакт між перетворювачем і поверхнею виробу.

Безпосередній контроль зварних з'єднань у роботі виконується із застосуванням ультразвукового дефектоскопа УД4-76, що забезпечує необхідну чутливість і точність вимірювань під час діагностування внутрішніх дефектів (рис. 3.13).



Рис. 3.13 - Ультразвуковий дефектоскоп УД4-76, застосований для контролю зварних з'єднань [28]

4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок сили притиску балки в кондукторі

Розрахунок зусиль притискання притискних пристроїв кондуктора виконано з метою забезпечення геометричної стійкості кран-балки під час складання та зварювання поясних швів і запобігання виникненню недопустимих деформацій. Методика розрахунку базується на положеннях, наведених у літературному джерелі [29], та враховує вплив усадочних деформацій, що виникають у процесі зварювання, на напружено-деформований стан зварної балки.

Вихідними даними для розрахунку є: довжина кран-балки $L = 8\text{ м}$; матеріал — сталь 09Г2С з межею текучості $\sigma_t = 590\text{ МПа}$ та модулем пружності $E = 2,1 \cdot 10^5\text{ МПа}$; геометричні параметри перерізу: висота стінки $h_c = 600\text{ мм}$, товщина стінки $\delta_c = 12\text{ мм}$, ширина полиці $b_p = 220\text{ мм}$, товщина полиці $\delta_p = 20\text{ мм}$. Параметри режиму зварювання: сила струму $I = 376\text{ А}$, напруга дуги $U_d = 40\text{ В}$, швидкість зварювання $V_{зв} = 1\text{ см/с}$, коефіцієнт корисної дії процесу $\eta = 0,8$, катет шва $K = 8\text{ мм}$. Залишкову кутову деформацію приймаємо $\text{tg } \alpha = 0,01$.

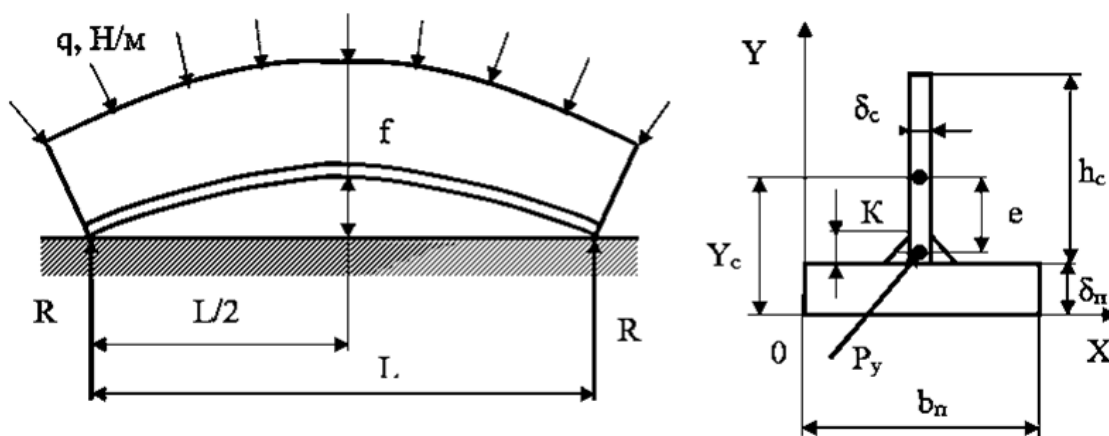


Рис. 4.1 – Розрахункова схема визначення зусиль притискання балки в кондукторі [29]

Для визначення положення центра ваги поперечного перерізу балки обчислюємо статичний момент перерізу відносно нижньої полиці:

$$S_x = b_p \delta_p \frac{\delta_p}{2} + h_c \delta_c \left(\frac{h_c}{2} + \delta_p \right). \quad (4.1)$$

Підставляючи числові значення (у сантиметрах), отримуємо:

$$S_x = 22 \cdot 2 \cdot \frac{2}{2} + 60 \cdot 1,2 \left(\frac{60}{2} + 2 \right) = 2348 \text{ см}^3.$$

Площа поперечного перерізу балки визначається за формулою

$$F = h_c \delta_c + b_p \delta_p, \quad (4.2)$$

звідки

$$F = 60 \cdot 1,2 + 22 \cdot 2 = 116 \text{ см}^2.$$

Координату центра ваги балки знаходимо як

$$Y_c = \frac{S_x}{F} = \frac{2348}{116} = 20,24 \text{ см}. \quad (4.3)$$

Ексцентриситет прикладання усадочної сили, з урахуванням положення зварного шва, визначаємо за виразом

$$e = Y_c - \left(\frac{1}{3} K + \delta_p \right). \quad (4.4)$$

Підставивши значення, отримаємо

$$e = 20,24 - \left(\frac{0,8}{3} + 2,0 \right) = 17,97 \text{ см} = 0,1797 \text{ м}.$$

Теплову потужність зварювальної дуги визначаємо за формулою

$$q_d = I U_d \eta. \quad (4.5)$$

Звідси

$$q_d = 376 \cdot 40 \cdot 0,8 = 12032 \text{ Вт}.$$

Величину усадочної сили, що виникає під час зварювання двох поясних швів, визначаємо за методикою [15]:

$$P_{y2} = 1,15 \cdot 17 \cdot \frac{q_d}{V_{3B}}. \quad (4.6)$$

Після підстановки отримуємо

$$P_{y2} = 1,15 \cdot 17 \cdot 12032 = 235226 \text{ Н}.$$

Для подальшого аналізу усадочну силу приводимо до еквівалентного рівномірно розподіленого навантаження вздовж балки:

$$q = \frac{9,6 P_{y2} e}{L^2}. \quad (4.7)$$

Тоді

$$q = \frac{9,6 \cdot 235226 \cdot 0,1797}{8^2} = 6342 \text{ Н/м.}$$

Зосереджена сила, що діє на всю довжину балки, становить

$$Q = qL = 6342 \cdot 8 = 50737 \text{ Н.} \quad (4.8)$$

Опорні реакції на кінцях балки, закріпленої в кондукторі, визначаються як

$$R = \frac{Q}{2} = \frac{50737}{2} = 25369 \text{ Н} \approx 25,4 \text{ кН.} \quad (4.9)$$

Отже, сумарне зусилля притискання на кожному кінці балки повинно бути не меншим за величину опорної реакції з урахуванням коефіцієнта запасу, що гарантує стабільне положення лонжерона в процесі зварювання.

Додатково розглядається випадок виникнення кутових деформацій типу «грибоподібності» полиць (рис. 4.2).

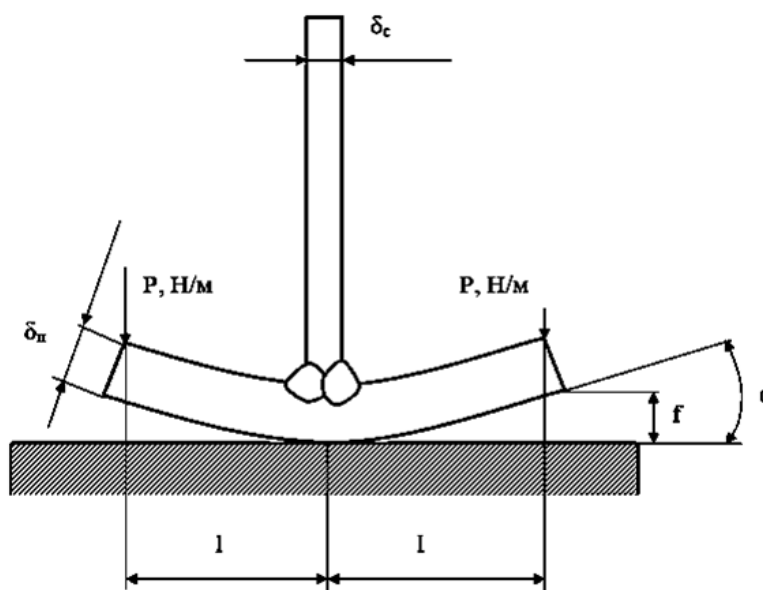


Рис. 4.2 – Розрахункова схема дії притисків при кутовій деформації полиць після зварювання [29]

Критичне значення кутової деформації визначається за виразом

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}} = \frac{2l\sigma_{\text{доп}}}{3E\delta}, \quad (4.10)$$

звідки

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}} = \frac{2 \cdot 0,16 \cdot 590 \cdot 10^6}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,008} = 0,037.$$

Оскільки $\operatorname{tg} \alpha < \operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}}$, погонна сила притиску визначається за формулою

$$P = \frac{\delta^3 \operatorname{tg} \alpha E}{4l^2}. \quad (4.11)$$

Після підстановки числових значень отримуємо

$$P = \frac{0,008^3 \cdot 0,01 \cdot 2,1 \cdot 10^{11}}{4 \cdot 0,16^2} = 10500 \text{ Н/м.}$$

Тоді погонна сила притиску для всієї полиці балки становить

$$Q_p = 2P = 2 \cdot 10500 = 21000 \text{ Н/м.} \quad (4.12)$$

Отримані значення використовуються для вибору типу, кількості та розташування притискних пристроїв кондуктора з метою забезпечення геометричної стабільності балки під час складання та зварювання.

4.2 Опис роботи запропонованих зварювальних пристосувань

Відповідно до розробленого технологічного процесу складання зварної конструкції здійснюється у спеціалізованому складально-зварювальному кондукторі (рис. 4.3), який забезпечує точне взаємне позиціонування елементів балки та стабільність їх положення під час виконання складальних і зварювальних операцій.

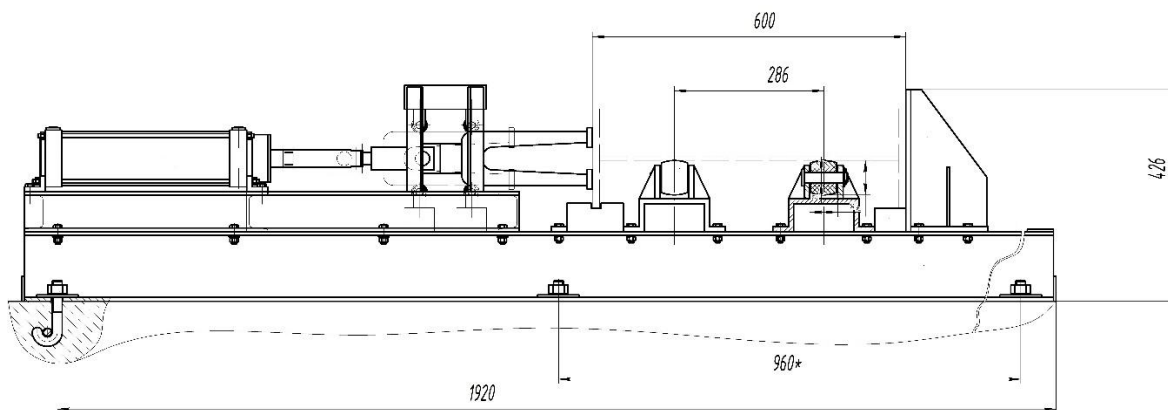


Рис. 4.3 - Складально-зварювальний стенд для виготовлення балок

Кондуктор являє собою жорстку раму (плиту), на якій змонтовані постійні опорні упори та рухомі притискні елементи. Рухомі притискачі приводяться в дію пневматичними циліндрами, що дозволяє створювати необхідне притискне зусилля та забезпечувати надійну фіксацію елементів конструкції. Конструктивне виконання притискачів передбачає можливість регулювання їх положення відносно нерухомих упорів, розташованих з протилежного боку, що забезпечує універсальність кондуктора та дозволяє використовувати його для складання лонжеронів змінного перерізу, а також зварних двотаврових і коробчастих балок.

Рухомі притискачі-упори переміщуються вздовж напрямних, закріплених на фундаментній рамі, та фіксуються у заданому положенні за допомогою вставних пальців. Постійні упори кріпляться до рами за допомогою спеціальних кронштейнів. Кронштейни та супорти оснащені електромагнітами, які використовуються для утримання стінки гофрованої балки під час складання. Налаштування стенду під необхідну ширину полиць здійснюється із застосуванням змінних заставних сухарів, на які спираються полиці балки. Така конструкція забезпечує точне вертикальне притискання полиць до стінки та стабільність їх положення по всій довжині виробу.

Для забезпечення дотримання встановлених допусків при складанні двотаврових балок заставні сухарі виготовляються з підвищеною точністю. Це дозволяє обмежити зміщення осі симетрії поясу відносно осі стінки в межах 2...4 мм. Пневматичні притискачі-упори розміщуються з кроком 750 мм і створюють притискне зусилля близько 20 кН кожен. Основою роботи цього пристрою є принцип еластичного (клавішного) притиснення гнучких елементів до жорсткого, що забезпечує рівномірне прилягання полиць до кромek стінки по всій довжині балки незалежно від локальної кривизни кромek або особливостей перерізу лонжерона. Застосування клавішного притиснення дозволяє копіювати форму жорсткого елемента та запобігати утворенню зазорів у з'єднаннях.

Після встановлення та фіксації стінки і полиць виконують прихоплення складених елементів. Дана операція здійснюється із застосуванням зварювальних

напіваавтоматів і слугує для забезпечення незмінності взаємного розташування елементів перед основним зварюванням.

Складену підвісну кран-балку транспортують на позицію зварювання, де зварювальні роботи виконуються безпосередньо в кондукторі, який забезпечує надійну фіксацію конструкції та збереження її геометричних параметрів у процесі зварювання (рис. 4.4).



Рис. 4.4 – Кондуктор для зварювання двотаврових балок

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Характеристика та аналіз потенційних небезпек і шкідливих виробничих чинників у цеху

Під час експлуатації технологічного обладнання у виробничому середовищі формується сукупність шкідливих і небезпечних чинників, дія яких за відсутності належних запобіжних заходів створює передумови для виникнення виробничого травматизму. Простір, у межах якого ці чинники проявляються постійно або періодично та здатні негативно впливати на працівника, визначається як небезпечна зона.

Зварювальні процеси в середовищі вуглекислого газу супроводжуються забрудненням повітря робочої зони зварювальними аерозолями, до складу яких входять тверді частинки пилу, а також токсичні газоподібні продукти і випари. Серед них особливо небезпечними є сполуки фтору, оксид вуглецю, оксиди азоту та інші хімічно активні речовини, що можуть спричиняти гострі або хронічні ураження органів дихання.

Наявність у цеху рухомих механізмів, переміщуваних вантажів і специфічні умови виконання технологічних операцій зумовлюють підвищений рівень ризику для персоналу. До основних джерел небезпеки належать можливість затягування або защемлення працівників рухомими елементами обладнання, падіння або неконтрольоване переміщення вантажів, а також інтенсивне пилоутворення. Недотримання вимог охорони праці та правил безпечної експлуатації обладнання може призводити до тяжких наслідків, зокрема термічних опіків різного ступеня, ураження електричним струмом і часткової або тимчасової втрати зорових функцій.

Окрему небезпеку становить випромінювання зварювальної дуги. Інтенсивне ультрафіолетове та видиме світлове випромінювання при безпосередньому впливі на органи зору може спричиняти електроофтальмію, тоді як тривала дія інфрачервоного випромінювання підвищує ризик розвитку помутніння кришталика ока, що проявляється у формі катаракти [30].

Під час проєктування, впровадження та подальшої експлуатації підприємств, у технологічному циклі яких передбачені зварювальні роботи, необхідно реалізовувати комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання виробничому травматизму та зменшення ризику розвитку професійних захворювань. Пріоритетним завданням при цьому є мінімізація впливу шкідливих і небезпечних виробничих чинників на працівників шляхом раціонального планування робочих зон і вибору безпечних технологій.

З метою захисту персоналу від дії небезпечних факторів у виробничому середовищі застосовуються як колективні, так і індивідуальні засоби захисту. За функціональним призначенням їх доцільно класифікувати на чотири основні групи: огорожувальні елементи, запобіжні пристрої, засоби попереджувальної сигналізації та системи дистанційного керування технологічним обладнанням.

Робочі майданчики, сходові марші та переходи в цехах повинні бути обладнані захисними огороженнями з поручнями висотою не менше 1,0 м, при цьому нижня частина огорожі виконується суцільною на висоту близько 0,2 м з метою запобігання зісковзуванню або падінню предметів. Технологічні канали для прокладання трубопроводів, оглядові колодязі, збірники та інші заглиблення у підлозі перекриваються міцними настилами або трапами, що забезпечують безпечне пересування персоналу.

Обладнання, робота якого супроводжується підвищеними рівнями шуму та вібрації, доцільно монтувати на окремих ізольованих фундаментах із застосуванням спеціальних вібропоглинальних і звукопоглинальних матеріалів. Такий підхід дозволяє зменшити передачу коливань на будівельні конструкції та знизити загальний акустичний вплив у робочій зоні.

Під час використання ручного механізованого електричного або пневматичного інструменту працівники повинні забезпечуватися індивідуальними засобами захисту, зокрема віброізолювальними рукавицями, спеціальними віброзахисними рукоятками або еластичними прокладками. Для

осіб, які систематично працюють з вібруючим обладнанням, рекомендовано впроваджувати регламентовані перерви тривалістю 10–15 хвилин після кожної години безперервної роботи [30].

Зниження рівня вібрацій доцільно здійснювати безпосередньо в місцях їх виникнення ще на стадіях проєктування машин і розроблення технологічних процесів. Ефективним методом є віброгасіння, що зазвичай реалізується шляхом встановлення агрегатів на самостійні віброгасячі основи або спеціальні фундаменти з демпфувальними властивостями.

У зонах підвищеної небезпеки обов'язково розміщуються попереджувальні написи, знаки безпеки та інформаційні плакати, які інформують персонал про можливі ризики та необхідність дотримання встановлених вимог охорони праці.

Електрообладнання, що експлуатується на виробничих підприємствах, належить до джерел підвищеної небезпеки для персоналу, оскільки електрична напруга не сприймається органами чуття людини без безпосереднього контакту. Це ускладнює своєчасне виявлення загрози та підвищує ризик ураження електричним струмом під час виконання робіт з обслуговування або ремонту електроустановок.

З метою індивідуального захисту працівників, які здійснюють експлуатацію та технічне обслуговування електроустановок, застосовується комплекс спеціальних ізолювальних засобів. До них належать ізолювальні штанги і кліщі, електроінструмент з подвійною або посиленою ізоляцією, діелектричні рукавиці, боти та калоші, а також діелектричні килимки, мати і ізолювальні підставки. Зазначені засоби індивідуального захисту підлягають регулярним періодичним випробуванням на електричну міцність, проходять контроль на відсутність пошкоджень і маркуються відповідно до чинних нормативних вимог та правил електробезпеки.

5.2 Шляхи збереження працездатності та підвищення продуктивності праці

Покращення умов праці зварювальників досягається шляхом впровадження комплексу організаційно-технічних заходів, серед яких ключове значення мають автоматизація й механізація технологічних операцій, раціоналізація виробничих процесів, ефективний захист органів зору від дії променистої енергії, своєчасне видалення пилу та газоподібних домішок із повітря робочої зони за допомогою вентиляційних систем, а також забезпечення електробезпеки під час виконання зварювальних робіт.

Вагомий внесок у підтримання високого рівня працездатності зварника та зростання продуктивності його праці роблять допоміжні пристрої для фіксації й переміщення зварюваних конструкцій. До таких належать кондуктори, кантувачі, маніпулятори, струбцини та різноманітні затискні механізми, використання яких зменшує фізичне навантаження на працівника, підвищує точність операцій і скорочує тривалість технологічного циклу.

Одним із важливих чинників гігієни праці та ефективної організації виробництва є належний рівень освітленості робочих приміщень. У виробничих будівлях застосовується як природне освітлення, що забезпечується через світлові прорізи, так і штучне, яке реалізується за допомогою систем загального та місцевого електричного освітлення з урахуванням характеру виконуваних робіт [30].

Зварювальна дуга є інтенсивним джерелом ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, яке негативно впливає на органи зору і шкірні покриви людини. Термічні та променеві опіки можливі переважно під час роботи з відкритою дугою, зокрема при ручному дуговому зварюванні або зварюванні в середовищі вуглекислого газу. Захист тіла зварника забезпечується спеціальним вогнестійким одягом, а очей — щитками або масками, оснащеними світлофільтрами темно-синього спектра.

Для запобігання механічним ушкодженням очей під час видалення флюсу та відбивання шлаку зварник повинен користуватися захисними окулярами з прозорим склом. У разі легких опіків очей рекомендується застосовувати холодні примочки, промивання слабким лужним розчином або використання спеціальних очних крапель. При тяжких ураженнях необхідне негайне звернення за медичною допомогою.

Висока температура зварювальної дуги спричиняє інтенсивне випаровування металів, пари яких, взаємодіючи з киснем повітря, утворюють дрібнодисперсні аерозолі у вигляді оксидів. Особливо токсичними є сполуки цинку, свинцю, кадмію та міді, що виділяються під час зварювання кольорових металів і їх сплавів, зокрема латуні та бронзи. Крім того, при плавленні окремих флюсів у повітря можуть надходити оксиди марганцю, а також пари хлористого і фтористого водню.

Зварювання в середовищі вуглекислого газу супроводжується утворенням оксиду вуглецю (чадного газу), який є небезпечним для організму людини. З огляду на те, що вуглекислий газ має більшу густину порівняно з повітрям, він здатний накопичуватися у замкнених або недостатньо вентильованих просторах, що призводить до зниження концентрації кисню та створює загрозу задухи.

Для забезпечення нормативного стану повітряного середовища у виробничих приміщеннях застосовують загальнообмінну та місцеву вентиляцію. Загальна вентиляція, як правило, виконується у вигляді приточно-втяжної системи з підігрівом припливного повітря в холодний період року і призначена для оновлення повітря у цехах і майстернях. Місцева вентиляція використовується для безпосереднього відсмоктування шкідливих газів і пилу в зоні їх утворення. Під час виконання робіт у замкнених просторах застосовують ізолювальні дихальні апарати або шлангові маски з подачею свіжого повітря [30].

У разі отруєння зварювальними газами потерпілого необхідно негайно вивести на свіже повітря, звільнити від стискуючого одягу та забезпечити

спокій до прибуття медичного працівника. За відсутності дихання слід терміново розпочати проведення штучної вентиляції легень відповідно до встановлених правил першої допомоги.

5.3 Підвищення стійкості інженерно-технічного комплексу до дії ударної хвилі

Інженерно-технічна інфраструктура промислового підприємства охоплює сукупність будівель і споруд, технологічного обладнання, інженерних мереж і комунікацій, зокрема системи електропостачання, тепlopостачання, водопостачання, каналізації та газорозподілу. Узгоджена та безвідмовна робота цих елементів визначає функціональну цілісність об'єкта в умовах надзвичайних впливів.

Вирішальну роль у забезпеченні загальної стійкості підприємства відіграє міцність будівель і споруд. Разом із тим підвищення стійкості всіх без винятку об'єктів будівельного фонду є економічно недоцільним через значні матеріальні витрати. Тому доцільно зосереджувати зусилля на зміцненні ключових виробничих елементів, від надійності яких безпосередньо залежить функціонування підприємства, але рівень стійкості яких є нижчим за необхідний. Підвищення опірності будівель до дії ударної хвилі досягається шляхом улаштування додаткових зв'язків між несучими конструкціями, застосування каркасних і рамних схем, підкосів і опор для зменшення розрахункових прольотів, а також використання матеріалів з підвищеними міцнісними характеристиками [31].

Для малоповерхових споруд ефективним заходом підвищення міцності є часткове обвалування ґрунтом, що зменшує дію динамічних навантажень. Висотні конструкції, зокрема димові труби, башти та колони, закріплюють системами розтяжок, параметри яких визначаються розрахунком на дію очікуваних навантажень.

Захист резервуарів для зберігання легкозаймистих і горючих рідин може реалізовуватися шляхом їх розміщення у підземних сховищах або

заглибленням у ґрунт. Підвищення механічної стійкості таких ємностей досягається також за рахунок конструктивного посилення оболонок, зокрема встановлення ребер жорсткості.

Повний захист усього технологічного обладнання від впливу ударної хвилі є практично нереалізовним. Доцільність захисту окремих агрегатів визначається їх стратегічною значущістю для виробництва та можливістю збереження працездатності підприємства після часткового руйнування будівель. Комплекс заходів щодо захисту обладнання передбачає формування резервів вузлів і деталей, а також виготовлення спеціальних захисних конструкцій, які можуть застосовуватися у період загрози для запобігання пошкодженню устаткування внаслідок обвалення будівельних елементів.

Сучасні промислові підприємства характеризуються значною кількістю відкрито прокладених інженерних комунікацій для транспортування води, електроенергії, пари та газу. Таке розміщення спрощує контроль технічного стану і ремонт, проте водночас знижує їхню стійкість до дії ударної хвилі. З метою підвищення надійності комунікацій доцільно заглиблювати основні енергетичні й технологічні мережі в ґрунт або розміщувати їх на низьких естакадах з подальшим обвалуванням. Додаткове підвищення міцності трубопроводів забезпечується встановленням ребер жорсткості, хомутів і об'єднанням декількох труб у компактні пучки.

Система електропостачання займає важливе місце в структурі промислового об'єкта, тому підприємство повинно мати щонайменше два незалежні джерела живлення — основне та резервне. Для запобігання пошкодженню електричних мереж у разі виникнення перенапруг, зумовлених електромагнітними впливами, необхідно застосовувати пристрої автоматичного захисного відключення.

Газопостачання великих підприємств, як правило, передбачає наявність підземних газгольдерів постійного об'єму, які використовуються у разі пошкодження зовнішніх джерел або газопроводів. Газові мережі прокладають під землею з підведенням до об'єкта з кількох напрямків, а для локалізації

аварійних ситуацій їх оснащують автоматичними пристроями відключення окремих ділянок [31].

Стійкість функціонування промислового об'єкта значною мірою залежить також від надійності систем теплопостачання та паропостачання. З цією метою підприємства повинні мати як зовнішні джерела теплової енергії (теплоелектроцентралі), так і внутрішні резервні установки у вигляді місцевих котелень.

Особливу увагу слід приділяти забезпеченню стійкості системи водопостачання. Промисловий об'єкт має отримувати воду щонайменше з двох незалежних джерел, одне з яких бажано розміщувати під землею. Водопровідні мережі прокладають у ґрунті та оснащують запірною арматурою, що дозволяє відключати окремі ділянки у разі аварій.

Для підвищення надійності каналізаційних систем доцільно передбачати роздільне відведення стічних вод: окремо для дощових і окремо для виробничих та господарсько-побутових. Каналізаційна система підприємства повинна мати аварійні випуски у водні об'єкти або зливову мережу, що забезпечує зменшення ризику затоплення та порушення санітарного стану території.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання, пов'язане з розробленням технології виготовлення підвісної кран-балки та дослідженням її напружено-деформованого стану з урахуванням особливостей зварювання і складання зварних металоконструкцій.

Проведений аналіз конструктивних рішень і умов експлуатації підвісних кран-балок показав доцільність застосування зварної двотаврової схеми, яка забезпечує раціональне поєднання міцності, жорсткості та металомісткості. Обґрунтовано вибір конструкційної сталі та основних геометричних параметрів балки з урахуванням вимог до вантажопідіймального обладнання.

Розроблено та обґрунтовано технологічний процес виготовлення підвісної кран-балки, що включає підготовку металопрокату, складання елементів у складально-зварювальному кондукторі, виконання зварювальних операцій, зниження залишкових напружень, правку та опоряджувальні операції. Запропонована послідовність операцій сприяє підвищенню точності виготовлення та зменшенню технологічних деформацій.

Запропоновано конструкцію складально-зварювального кондуктора з фіксованими упорами та пневматичними притискними пристроями, що дозволяє виконувати складання балок різних типорозмірів. Застосування еластичного (клавішного) притиснення забезпечує рівномірне прилягання полиць до стінки по всій довжині балки та знижує ймовірність утворення зазорів у стиках.

Виконано інженерний розрахунок зусиль притискання в кондукторі з урахуванням дії усадочних сил і кутових деформацій, що виникають під час зварювання поясних швів. Визначено необхідні значення притискних зусиль для запобігання втраті геометричної стійкості балки та виникненню деформацій типу «грибоподібності» полиць.

Проведено дослідження напружено-деформованого стану підвісної кран-балки з використанням чисельного моделювання. Результати розрахунків показали, що максимальні напруження та прогини не перевищують допустимих

значень, а розподіл напружень у зоні зварних з'єднань підтверджує працездатність і надійність розробленої конструкції.

Обґрунтовано систему контролю якості, яка охоплює вхідний контроль матеріалів, контроль технологічних параметрів зварювання, візуальний та ультразвуковий контроль зварних з'єднань. Реалізація такої системи дозволяє своєчасно виявляти дефекти та забезпечувати стабільну якість готової продукції.

Розглянуто питання охорони праці та безпеки під час виготовлення і зварювання підвісних кран-балок. Запропоновані організаційні та технічні заходи спрямовані на зниження виробничих ризиків і забезпечення безпечних умов праці персоналу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Металеві конструкції. Загальний курс : підручник /О. О. Нілов та ін. 2-е вид., перероб. і доп. Київ : Сталь, 2010.869 с.
2. БН В.2.6-163:2010 “Сталеві конструкції”, Держбуд України, 2010 – 96 с.
3. https://kzpto.com.ua/uk/kran-balka-oporna/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=S_KZPTO_Opro_n_kran_balka&utm_term=%D0%BA%D1%83%D0%BF%D0%B8%D1%82%D0%B8%20%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%BD%20%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%BA%D1%83&gad_source=1&gad_campaignid=20839928392&gclid=EAIaIQobChMI_rSmhpnSkQMV-1iRBR1GFyL3EAMYASAAEgKNMPD_BwE
4. https://ua.krانkomplekt.com/grcran/kran_odnobalochniy_podvesnoy_ruchnoy/
5. <https://uemc.com.ua/pidvisni-kran-balki/>
6. Палаш В. М. Металознавчі аспекти зварності залізовуглецевих сплавів.: Навчальний посібник. – Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2003. - 263 с.
7. https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=120
8. Кривов Г.О Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Г.О. Кривов, К.О. Зворикін. – К.: КВІЦ, 2012. – 896 с.
9. ДСТУ EN ISO 5817:2022 Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів (EN ISO 5817:2014, IDT; ISO 5817:2014, IDT).
10. ДСТУ EN ISO 15614-1:2019 Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 1. Дугове та газове зварювання сталей і дугове зварювання нікелю та нікелевих сплавів (EN ISO 15614-1:2017, IDT; ISO 15614-1:2017, Corrected version 2017-10-01, IDT).
11. Титаренко В.Є. Напружено-деформований стан і довговічність рам напівпричепів / Дисерт. канд. техн. наук. – Тернопіль: ТДТУ, 2006. – 180 с.

12. Підгурський М.І. Методи прогнозування ресурсу несучих і функціональних систем бурякозбиральних комбайнів / Дисерт. докт. техн. наук. – Тернопіль: ТДТУ, 2007. – 340 с.
13. Особливості дослідження напружено-деформівного стану будівельних сталевих перфорованих балок методом скінчених елементів / М. Підгурський, І. Підгурський, М. Сташків, В. Ігнат'єва, С. Данильченко, Д. Биків, О. Підлужний // Вісник ТНТУ. — Т. : ТНТУ, 2023. — Том 111. — № 3. — С. 126–138.
14. Investigation of the Stress Intensity Factor for the Edge Crack in I-beam Under Bending Moment Author links open overlay panel /Mykola Pidgurskyi, Mykola Stashkiv, Roman Rohatynskyi, Ivan Pidgurskyi, Viktor Senchyshyn, Andriy Mushak/ Procedia Structural Integrity. Vol. 59, P. 322-329. ISSN: 2452-3216
15. Чертов І.М. Зварні конструкції: Підручник. – К.: Арістей, 2006. – 376 с.
16. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: підручник. – К.: Основа, 2021. – 400 с.
17. Спеціальні способи зварювання : підручник / І. В. Кривцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв, за загальною редакцією академіка НАН України, доктора технічних наук, професора Б. Є. Патона. – Миколаїв : НУК, 2017.– 346 с.
18. Костін О.М. Зварювальні матеріали: навч. посібник / О.М. Костін – Миколаїв: НУК, 2004. –225 с.
19. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Технологія та устаткування зварювання плавленням» / М.І. Підгурський, Б.П. Татарин, І.Б. Окіпний, В.С. Сенчишин. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. – 95 с.
20. Биковський, О.Г. Довідник зварника: довідник / О.Г. Биковський, І.В. Пінковський. - К.: Техніка, 2002. – 336 с.
21. Александров О.Г. Джерела живлення для дугового зварювання та наплавлення [Текст]: навчальний посібник / О.Г. Александров, Д.А. Антонюк, Капустян О.Є. – Львів: Новий світ – 2000, 2013. – 224 с.

22. <https://svarcom.net/katalog/automation/saw/traktors/tractor-a6-dk.html>
23. <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnohiiyi/produkty/>
24. <https://svartech.com.ua/>
25. <https://ua.dtyqwelding.com/hbeam-production-equipments/new-conditioned-h-beam-flange-straightening.html>
26. Камель Г. І. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2018. — 241 с.
27. <https://jasic.ua/ua/product/katetomer-wg-2-295>
28. <https://intron-set.com.ua/product/defektoskop-ultrazvukovoj-epoch-1000/>
29. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві: Навч. посібник / А.С. Карпенко. - К.: Арістей, 2005. - 268 с.
30. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві Навчальний посібник. / О.Г. Левченко – К.: Основа, 2010. – 240 с.
31. Стеблюк М.І. С79 Цивільна оборона. Підручник. – К.: Знання, 2006 – 487 с.
32. Окіпний І. Б., Сенчишин В. С., Ткаченко І. Г., Комар Р. В., Дячун А. Є. Кваліфікаційна робота магістра : методичні вказівки для здобувачів другого (освітньо-професійного) рівня вищої освіти за спеціальністю G9 Прикладна механіка галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 40 с.

ДОДАТКИ