

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня
бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розроблення технологічного процесу зварювання коромисла
екскаватора**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МПз-41
спеціальності 131 «Прикладна механіка»

(шифр і назва спеціальності)

	<u>Музика Р.П.</u> (підпис)	<u>Музика Р.П.</u> (прізвище та ініціали)
Керівник	<u>Підгурський М.І.</u> (підпис)	<u>Підгурський М.І.</u> (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<u>Дячун А.Є.</u> (підпис)	<u>Дячун А.Є.</u> (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	<u>Окіпний І.Б.</u> (підпис)	<u>Окіпний І.Б.</u> (прізвище та ініціали)
Рецензент	<u></u> (підпис)	<u></u> (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему «Розроблення технологічного процесу зварювання коромисла екскаватора» складається із розрахунково-пояснювальної записки об'ємом 67 аркушів формату А4 і графічної частини об'ємом 4 аркушів формату А1.

У кваліфікаційній роботі представлено комплексну науково-технічну розробку технологічного процесу виготовлення зварного вузла коромисла екскаватора LiuGong 922E. В роботі здійснено системний аналіз конструктивних особливостей виробу, обґрунтовано вибір способу зварювання, типу зварювального обладнання, режимів виконання зварних з'єднань, а також методів контролю їх якості. Значну увагу приділено розробці оснащення — стаціонарного кондуктора, призначеного для забезпечення високоточного складання та зварювання елементів конструкції в автоматизованому режимі. В рамках дослідження проведено інженерні розрахунки навантажень на маніпулятор і кантувач, що дозволило встановити оптимальні параметри для безпечної та ефективної експлуатації в умовах серійного виробництва. Запропоновані технічні рішення спрямовані на забезпечення стабільної якості зварювання, підвищення продуктивності та зниження витрат на виготовлення складових частин гідромеханічного обладнання.

Ключові слова: КОНДУКТОР, ЗВАРЮВАЛЬНИЙ РОБОТ, ЗВАРЮВАННЯ, КОРОМИСЛО ЕКСКАВАТОРА, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	8
1.1 Опис конструкції виробу	8
1.2 Характеристика матеріалу виробу.....	13
1.3 Технічні умови на виготовлення виробу.....	17
1.4 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення виробу	20
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	23
2.1 Обґрунтування способу зварювання.....	23
2.3 Вибір методу контролю якості виробу.....	42
2.4 Опис запропонованого технологічного процесу	47
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	52
3.1 Опис зварювальних пристосувань.....	52
3.2 Розрахунок маніпулятора для зварювання коромисла екскаватора	55
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	59
4.1 Організація навчання та інструктажів з питань охорони праці на підприємстві	59
4.2 Ризики та небезпеки при виконанні зварювальних робіт і методи їх запобігання	61
ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65
ДОДАТОК	67

ВСТУП

У сучасних умовах активного розвитку будівельної галузі спостерігається зростання попиту на спеціалізовані транспортні засоби та технічні апарати, здатні ефективно функціонувати в складних експлуатаційних умовах. Це, у свою чергу, зумовлює необхідність створення допоміжного обладнання, яке забезпечуватиме надійну та безперебійну роботу основних механізмів.

Серед таких технічних засобів особливе місце посідають екскаватори — універсальні машини, що широко застосовуються для проведення земляних робіт у важкодоступних місцях, під час розробки котлованів, планування територій, благоустрою ділянок та виконання низки спеціалізованих будівельно-монтажних операцій. Основною функціональною ланкою конструкції екскаватора є стріла, яка забезпечує робочий рух виконавчих органів, передаючи навантаження та координуючи переміщення ковша у просторі [1].

Зважаючи на складність та багатоаспектність завдань, які виконує екскаватор, особливий інженерний інтерес викликає саме конструкція стріли, а зокрема — її коромисло. Цей елемент відіграє ключову роль у забезпеченні динамічної стабільності, плавності ходу та точності позиціонування виконавчих механізмів машини. Якість його виготовлення безпосередньо впливає на ресурс техніки, експлуатаційну надійність та безпеку проведення робіт.

Проте ручне виготовлення коромисла без залучення високоточного обладнання є малоефективним і економічно недоцільним через низку чинників: значну трудомісткість процесу, потребу в висококваліфікованих робітниках, складність дотримання точних розмірів, а також велику кількість допоміжних технологічних операцій, необхідних при обробці великогабаритних конструкцій [2].

У зв'язку з цим постає актуальна інженерна задача — впровадження механізованих та автоматизованих методів виготовлення коромисла стріли. Оптимізація технологічного процесу за допомогою спеціалізованого зварювального устаткування дозволить суттєво підвищити продуктивність праці, знизити виробничі витрати, скоротити терміни виготовлення та забезпечити високу повторюваність геометричних параметрів виробу. Такий підхід також відкриває можливості для стандартизації виробництва й інтеграції сучасних цифрових рішень у процеси контролю якості та технічної діагностики.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис конструкції виробу

Екскаватори належать до класу багатофункціональної землерийної техніки, що широко використовується у будівництві, комунальному господарстві та гірничій промисловості. Ці машини здатні виконувати широкий спектр операцій, зокрема: розробку ґрунту (копання), планування територій, навантаження сипучих матеріалів, а також транспортування вантажів на короткі відстані (рис. 1.1, табл. 1.1). [1]

Екскаватор є одним із найуніверсальніших видів землерийної техніки, що виконує широкий спектр будівельних, монтажних, ландшафтних та гірничих робіт. Його основне призначення полягає у механізованому видобуванні, переміщенні та навантаженні ґрунту, сипучих і кускових матеріалів.



Рис. 1.1 – Екскаватор LiuGong 922E [3]

За конструктивними ознаками та функціональним призначенням екскаватори класифікуються як типові представники землерийних машин. Основними складовими їх робочого обладнання є стріла з механізмом

зворотної лопати, розташованої у задній частині машини, та базове шасі, яке забезпечує мобільність і стабільність під час виконання робіт.

Таблиця 1.1. – Технічні дані екскаватора LiuGong 922E [3]

Операційна вага	22000 кг
Об'єм ковша	1.2 м ³
Двигун	Cummins
Потужність	120 кВт/150 кс
Об'єм двигуна (ДВЗ)	6.7 л
Швидкість руху	5.7 км/год
Швидкість повороту платформи	12 об/хв
Довжина рукояті	2915 мм
Довжина стріли	5710 мм
Виривне зусилля ковша	152.5 kN
Зусилля копання рукояті	105 kN
Гідравліка (потік)	2x224 л/хв
Тиск у гідросистемі	34.3 мПа
Глибина копання	6595 мм
Висота вивантаження	9945 мм

Екскаваторна стріла виконує ключову роль у переміщенні робочого інструмента та передачі зусиль на розроблюваний ґрунт, а зворотна лопата дозволяє ефективно проводити виїмку ґрунту нижче рівня стоянки машини. Сукупність цих елементів забезпечує високу продуктивність та універсальність екскаватора в умовах змінного технологічного навантаження.

Коромисло (рис. 1.2), що є одним з ключових елементів робочого обладнання гідравлічного екскаватора типу LiuGong 922E, виконує функцію передавання зусилля від гідроциліндра до елементів стріли або ковша. Його конструкція відзначається підвищеною міцністю та геометричною жорсткістю, що забезпечує стабільну роботу при циклічних змінних навантаженнях [1].

Основою конструкції є зварна коробчаста система, сформована шляхом з'єднання двох основних боковин, виготовлених із листового прокату

конструкційної сталі. Боковини мають вигнуту обвідну форму, що узгоджується з кінематикою руху робочого органа та сприяє зменшенню маси конструкції без втрати міцності. Між боковинами передбачені поперечні з'єднувальні елементи, які відіграють роль жорстких зв'язків та забезпечують стабільність форми при деформаційних навантаженнях.



Рис. 1.2 — Конструкція коромисла екскаватора LiuGong 922E

На кінцях коромисла розташовані отвори циліндричної форми, які слугують для встановлення пальців шарнірних з'єднань. Посадкові зони виконані з урахуванням допусків під втулки або підшипникові елементи, залежно від умов з'єднання. Центральна частина коромисла оснащена монтажною фланцевою пластиною з трьома отворами, розміщеними по трикутній схемі. Даний вузол призначений для кріплення штока гідроциліндра та забезпечує стабільну передачу тягового зусилля.

Зварювання конструкції виконується з дотриманням нормативних вимог ДСТУ ISO 5817 та ДСТУ EN 1011. Основними типами зварних з'єднань є кутові шви з повним проваром по зовнішньому контуру боковин, а також стикові шви при з'єднанні фланцевої пластини та поперечних елементів жорсткості. Усі зварні шви підлягають візуально-оптичному контролю та неруйнівному випробуванню (ультразвуковий або капілярний метод), залежно від категорії відповідальності вузла [4].

Матеріал, що застосовується для виготовлення елементів конструкції, як правило, — низьколегована зварювана сталь підвищеної міцності (09Г2С або 10ХГСНД), яка забезпечує оптимальне співвідношення міцнісних характеристик, технологічності обробки та стійкості до втомного руйнування.

Конструкція коромисла відповідає сучасним вимогам до вантажонесучих елементів машин: вона забезпечує надійність, технологічність у виготовленні, довговічність в умовах динамічних навантажень та високі експлуатаційні характеристики.

Коромисло є важливою складовою частиною кінематичної схеми робочого обладнання гідравлічного екскаватора і виконує функцію передавання реактивного зусилля від виконавчих гідроциліндрів до стріли або ковша. Конструкція цього елемента передбачає поєднання високої жорсткості, достатнього рівня міцності та технологічності виготовлення, що забезпечується раціональним використанням зварних з'єднань і просторової форми деталей.

Основна геометрія коромисла реалізується у вигляді зварної коробчастої структури, яка складається з двох симетричних бічних стінок (профільних листів), з'єднаних між собою системою поперечних підсилювачів, монтажних фланців і втулкових елементів. Боковини виготовляються з листової прокатної сталі товщиною 10–12 мм із попередньо заданим вигином, що забезпечує дотримання геометричної відповідності

траєкторії руху ковша та стріли. Довжина бічних пластин становить близько 1200 мм, а висота — до 350 мм.

Для запобігання деформаціям при динамічних навантаженнях у внутрішній частині конструкції передбачені розміщені на певній відстані жорсткі з'єднувальні елементи — поперечні ребра товщиною до 16 мм. Вони зварюються кутовими швами до обох боковин, забезпечуючи збереження просторової форми та підвищену опірність згину.

Монтажна пластина, розташована в центральній частині коромисла, служить для фіксації штока гідроциліндра. Вона виконується з високоякісної сталі завтовшки 20–25 мм і має три отвори діаметром до 50 мм, розташовані за схемою рівностороннього трикутника. Конструктивно вона зварюється до боковин швами з посиленням проваром, із застосуванням попереднього підігріву у разі використання низьколегованих сталей.

Шарнірні з'єднання на кінцях коромисла реалізовані за допомогою циліндричних втулок, виготовлених з термічно обробленої сталі, які запресовуються в отвори боковин. Зовнішній діаметр втулок становить орієнтовно 90 мм, а внутрішній — 60 мм, що відповідає посадковим параметрам осей з'єднання. Втулки фіксуються повним обварюванням по обидва боки боковин, що забезпечує жорстке та надійне закріплення елементів під навантаженням.

Зварювання всіх з'єднаних елементів конструкції виконується відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 15614-1, з обов'язковим дотриманням технологічного регламенту. Для основних кутових і стикових швів застосовуються зварювальні матеріали типу Св-08Г2С або дріт із вмістом марганцю, що забезпечує підвищену в'язкість металу шва. Контроль якості зварних з'єднань передбачає візуальний огляд, вимірювання розмірів швів та застосування неруйнівних методів (ультразвуковий або капілярний контроль) залежно від категорії відповідальності вузла [5].

Загальні габаритні розміри зварного коромисла становлять:

- довжина — близько 1250 мм,
- максимальна висота профілю — до 350 мм,
- ширина між боковинами — 100–120 мм.

Сумарна маса конструкції, за умови використання сталі S355 або 09Г2С, становить близько 50–65 кг, що є прийнятним для експлуатації в межах навантажень, характерних для екскаваторів середнього класу.

Таким чином, представлена конструкція коромисла є прикладом ефективного інженерного рішення, що поєднує оптимізацію матеріалу, геометрії та зварної технології, забезпечуючи довговічність та надійність в умовах змінних експлуатаційних навантажень.

1.2 Характеристика матеріалу виробу

Для виготовлення коромисла екскаватора застосовується конструкційна низьколегована атмосферостійка сталь марки 10ХСНД, яка вирізняється підвищеними механічними властивостями та стабільною зварюваністю. Використання цього матеріалу обумовлене його здатністю зберігати високу тріщиностійкість і ударну в'язкість навіть у зонах термічного впливу, що є критично важливим за умов змінного навантаження та роботи в агресивному середовищі.

З технологічної точки зору, сталь 10ХСНД характеризується пониженою схильністю до утворення загартованих структур у ЗТВ та зниженою чутливістю до холодних і гарячих тріщин при дотриманні оптимальних режимів зварювання. Її хімічний склад забезпечує сприятливе протікання процесів рекристалізації та стабілізації структури після зварювання, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики зварних з'єднань.

Вибір саме цієї марки сталі є технічно обґрунтованим і підтверджується результатами аналізу фізико-механічних властивостей та зварювальних

характеристик, наведеними у таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі 10ХСНД [8]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	As
до 0.12	0.8 - 1.1	0.5 - 0.8	0.5 - 0.8	до 0.035	до 0.03	0.6 - 0.9	до 0.12	до 0.008	0.4 - 0.6	до 0.08

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталі [8]

Сортамент	Розмір	σ_b	σ_T	δ_5	ψ	KCU
-	мм	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²
Лист	5 - 9	540	400	19		
Прокат		510-685	390	19		290
Сорт, Класу міцності 390	до 50	530	390	18		

Низьколеговані сталі зазвичай характеризуються доброю зварюваністю. Водночас наявність легуючих елементів у їхньому складі зумовлює утворення загартованих структур у зоні термічного впливу (ЗТВ), що за несприятливих умов — зокрема, при порушенні температурного режиму або підвищеній жорсткості конструкції — може спричинити зниження тріщиностійкості матеріалу до холодних тріщин [9].

Легуючі компоненти здатні також впливати на схильність металу шва до утворення гарячих тріщин, посилювати або, навпаки, пом'якшувати наслідки перегріву, а також змінювати тенденцію до крихкого руйнування як у зоні термічного впливу, так і безпосередньо у металі шва.

Особливу складність становить зварювання термічно зміцнених сталей, для яких характерна дестабілізація механічних властивостей у різних підзонах ЗТВ, що проявляється у зниженні ударної в'язкості та зниженні опору крихкому руйнуванню.

Найбільші труднощі при зварюванні низьколегованих сталей пов'язані з необхідністю забезпечення високої ударної в'язкості в області поблизу лінії

сплавлення — як у металі шва, так і в зоні термічного впливу. Підвищена крихкість таких сталей, особливо при електрошлаковому зварюванні, зазвичай є наслідком надмірного зростання аустенітного зерна, виникнення внутрішньозереневих структур, утворення манштеттових структур, феритних облямівок по межах зерен, а також розвитку високотемпературної хімічної неоднорідності. Остання зумовлює сегрегацію і виділення карбідних фаз або легкоплавких сульфідних включень уздовж меж зерен, що істотно знижує пластичність і в'язкість металу.

Одним із ключових критеріїв, що визначає зварюваність сталевих матеріалів, є їхня схильність до утворення холодних та гарячих тріщин у зварних з'єднаннях. Ці дефекти мають різну природу виникнення та механізм розвитку, однак обидва типи суттєво знижують надійність конструкції і можуть призвести до передчасного виходу з ладу зварного вузла.

Гарячі тріщини виникають переважно за дії високих усадочних напружень у поєднанні з утворенням крихкої межзеренної фази. Одним із ефективних підходів до оцінки цієї схильності є використання показника Вілкінсона [9].

$$W = C + S + P + Si/25 + Ni/100 + Cr/50 + Mo/20 + Cu/55 \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} W &= 0,12 + 0,020 + 0,025 + 0,028 + 0,0025 + 0,005 + 0 + 0,0055 \\ &= 0,206 \end{aligned}$$

Для сталі 10ХСНД показник Вілкінсона становить $W \approx 0,206$, що свідчить про помірну схильність до утворення гарячих тріщин. Це означає, що при зварюванні необхідно дотримуватись контрольованих теплових режимів, уникати надлишкової тепловкладення та застосовувати зварювальні матеріали з оптимальними хімічними властивостями.

Для мінімізації ризику ГТ рекомендується:

- використовувати попередній підігрів до 100–150 °С (за товщини понад 10 мм);
- забезпечити рівномірне охолодження зони шва;
- використовувати присадкові матеріали з підвищеним вмістом фериту.

З метою кількісного оцінювання зварюваності, а також прогнозування ймовірності появи холодних тріщин, доцільно скористатись аналітичними залежностями, які враховують вміст вуглецю та легуючих елементів у сталі — зокрема, розрахунком вуглецевого еквівалента. Цей параметр дає змогу оцінити схильність металу до загартування в зоні термічного впливу, що є критичним фактором при формуванні холодних тріщин. застосовують рівняння Стефаріана [9]:

$$C_e = C + (Mn/6) + (Si/24) + (Ni/10) + (Cr/5) + (Mo/4) + (V/14) \quad (1.2)$$

$$C_e = 0,12 + (0,5/6) + (0,8/24) + (0,5/10) + (0,6/5) = 0,407\%.$$

Відповідно до класифікації за зварюваністю, сталі умовно поділяють на чотири категорії:

- I. легко зварювані (добре зварювані),
- II. зварювані з обмеженнями (задовільно зварювані),
- III. зварювані з попередньою або післязварювальною обробкою (обмежено зварювані),
- IV. складно зварювані або практично не зварювані.

Оцінювання зварюваності сталей у більшості випадків здійснюється на основі вуглецевого еквівалента (C_e), який враховує сумарний вплив вуглецю та легуючих елементів на утворення загартованих структур у зоні термічного впливу та, відповідно, на ймовірність появи холодних тріщин.

Для сталі марки 10ХСНД, яка використовується у відповідальних зварних конструкціях.

В нашому випадку $Se=0,407\%$. Цей рівень відповідає класу добре зварюваних сталей, за умови дотримання технологічних параметрів процесу зварювання. Зокрема, при виконанні зварювальних робіт у температурних умовах, що перевищують $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ризик утворення холодних тріщин у зоні зварювання суттєво знижується. Це пояснюється як менш інтенсивним охолодженням зони термічного впливу, так і сприятливим впливом температури на кінетику фазових перетворень.

Окрім того, вміст легуючих елементів у складі сталі 10ХСНД сприяє формуванню дрібнозернистої структури шва та підвищенню стійкості наплавленого металу до тріщинуватості, що додатково покращує її зварювально-технологічні характеристики.

1.3 Технічні умови на виготовлення виробу

Процес виготовлення коромисла як відповідального елемента робочого обладнання екскаватора повинен відповідати комплексу вимог, що охоплюють конструкційно-технологічні, матеріалознавчі, зварювальні та контрольні аспекти. Враховуючи умови експлуатації — динамічне навантаження, змінні режими роботи, високі вимоги до точності монтажу та втомної міцності — до процесу виготовлення пред'являється підвищений рівень якості на всіх етапах.

Для виготовлення основних елементів (боковини, фланці, підсилювачі) застосовуються конструкційні низьколеговані зварні сталі, зокрема 09Г2С або S355J2, які характеризуються високими показниками ударної в'язкості, доброю зварюваністю та стабільністю механічних властивостей після зварювання. Елементи, що працюють у шарнірному

з'єднанні, виготовляються з легованих сталей, таких як 40Х або 30ХГСА, з подальшою термічною обробкою для підвищення зносостійкості [1].

Перед зварюванням усі деталі підлягають обов'язковому очищенню від окалини, мастила, корозії та інших забруднень. Обробка кромek виконується механічним способом або термічним різанням з наступною зачисткою. Вимоги до шорсткості поверхонь у зонах зварювання повинні відповідати стандартам ДСТУ EN ISO 9692-1.

При складанні конструкції необхідно забезпечити точність взаємного розташування всіх елементів відповідно до креслень, із допустимими відхиленнями за ISO 2768 (середній або тонкий клас точності). Особливо жорсткі допуски задаються для співвісності отворів під пальці, оскільки від цього залежить робота всієї кінематичної системи.

Складання виконується з використанням технологічних шаблонів або кондукторів, які забезпечують фіксацію деталей у проектному положенні до моменту закінчення зварювання. Для уникнення деформацій передбачено застосування попереднього точкового зварювання по периметру з наступним багатоступеневим обварюванням.

Зварювання здійснюється методами напівавтоматичного дугового зварювання в захисному газовому середовищі (MAG) або автоматичного зварювання під флюсом (SAW), залежно від типу шва та доступності зони. Для основних з'єднань застосовується зварювальний дріт Св-08Г2С у парі з захисним газом типу $\text{Ar}+\text{CO}_2$ (міксер 82/18 або 80/20), що забезпечує стабільність дуги та належну металургійну якість шва.

Температурний режим має важливе значення: при товщині металу понад 10 мм рекомендується попередній підігрів до температури 120–150 °С, особливо при зварюванні низьколегованих сталей. Міжпрохідна температура контролюється в межах 150–200 °С.

Послідовність накладання швів повинна забезпечити рівномірність розподілу зварювальних деформацій. У критичних вузлах допускається симетричне зварювання з чергуванням сторін.

Усі зварні з'єднання підлягають контролю якості згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 5817 (рівень В або С — залежно від категорії навантаження). Застосовуються такі методи контролю:

- візуально-оптичний контроль — для оцінки геометрії шва, наявності видимих дефектів;
- ультразвуковий контроль (УЗК) — для виявлення внутрішніх дефектів (непроварів, порожнин);
- капілярний або магнітопорошковий контроль — для оцінки поверхневих тріщин на стикових швах.

У зонах монтажних отворів контроль виконується з особливою ретельністю, оскільки ці ділянки схильні до втомних руйнувань.

У разі зварювання елементів з підвищеним рівнем напруги та наявності концентраторів напружень (фланці, втулки), доцільним є проведення післязварювального зняття залишкових напружень шляхом нормалізації або високотемпературного відпуску (при 580–620 °С протягом 2–3 годин).

Зовнішня поверхня конструкції після зварювання зачищається, шви обробляються до напівокруглої форми (у разі необхідності), і виконується антикорозійна обробка (грунтування та фарбування згідно ISO 12944).

Таким чином, виготовлення зварного коромисла екскаватора вимагає дотримання комплексу нормативних і технологічних вимог, які забезпечують його працездатність, надійність та безпечну експлуатацію в умовах змінних навантажень. Висока якість зварних з'єднань, точність складання та контроль матеріалів є ключовими чинниками забезпечення довговічності даного конструктивного елемента.

1.4 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення виробу

Виготовлення зварної конструкції коромисла екскаватора є складним багатоступеневим технологічним процесом, що вимагає високого рівня узгодженості між проектними вимогами, матеріальною базою, режимами зварювання та контролем якості. Проведений критичний аналіз дозволяє виокремити основні вузькі місця в технологічному ланцюгу та обґрунтувати шляхи їх оптимізації з точки зору зварювального виробництва.

На початковому етапі особливу увагу слід приділити відповідності матеріалів технічним умовам. Часто на практиці спостерігаються відхилення в хімічному складі прокату, що може впливати на зварюваність та експлуатаційну надійність конструкції. Недостатній контроль якості матеріалів, зокрема в частині ударної в'язкості при низьких температурах, створює потенційні зони крихкого руйнування.

Підготовка кромки для зварювання виконується шляхом термічного або механічного різання. На даному етапі критичним є забезпечення мінімальної зони термічного впливу, уникнення тріщин і задирок, які в подальшому можуть діяти як концентратори напружень.

Процес складання є одним із найбільш відповідальних, адже геометрична точність отворів під шарнірні з'єднання, паралельність боковин та співвісність отворів безпосередньо впливають на кінематику механізму. У виробничих умовах часто не приділяється належної уваги жорсткості складальних пристроїв, що призводить до зміщень деталей у процесі зварювання.

Також проблемною зоною є контроль за деформаціями. Відсутність попередньої симетричної фіксації або використання тимчасових прихваток низької якості здатне спричинити порушення геометрії виробу, що вимагає трудомісткого відновлення після зварювання.

3. Зварювання основних швів

Зварювання конструкції здійснюється методами напівавтоматичного або автоматичного дугового зварювання, які за наявності правильних режимів забезпечують достатню глибину проплавлення та низький рівень дефектності. Проте в практиці часто спостерігається перегрів металу основи, особливо в зонах з великою тепловкладенням — що спричиняє збільшення зерна металу шва та теплової зони впливу.

Нерівномірне теплове навантаження між сторонами конструкції може призвести до значних зварювальних деформацій, зокрема короблення боковин. Відсутність температурного контролю між проходами також сприяє формуванню мікротріщин у зоні шва, що не завжди виявляються візуально.

Застосування неруйнівного контролю, як правило, проводиться вибірково. У відповідальних вузлах, таких як посадкові отвори або монтажні фланці, цього підходу недостатньо. Відсутність суцільного ультразвукового контролю на критичних ділянках, де можливе виникнення непроварів або порожнин, створює ризики для подальшої експлуатації в умовах змінних навантажень.

Також важливо зазначити, що в процесі виготовлення часто нехтують обов'язковою вхідною кваліфікацією зварювальників згідно з вимогами ISO 9606-1, що може бути критичним у випадках складних стикових з'єднань.

На заключному етапі часто не виконується нормована післязварювальна термообробка, особливо для сталей з підвищеним вмістом вуглецю або легуючих елементів. Відсутність відпуску або нормалізації призводить до збереження залишкових напружень, які в експлуатації стають причиною втомного руйнування.

Антикорозійна обробка (фарбування чи металізація) також часто проводиться без попередньої перевірки стану швів або їх доочищення, що негативно впливає на довговічність покриття.

Таким чином, на основі проведеного критичного аналізу можна констатувати, що найбільш вразливими з точки зору технологічної

надійності є етапи складання (геометрія), зварювання (теплові деформації, мікродефекти), та контроль якості (недостатній обсяг неруйнівного контролю). Для підвищення якості виготовлення доцільно впровадити:

- автоматизацію зварювальних процесів із замкнутим контролем параметрів;
- використання попередньо кваліфікованих технологічних інструкцій (WPS/PQR);
- розширення спектра неруйнівного контролю до 100% у критичних зонах;
- обов'язкове термічне нормування після зварювання.

Інтеграція цих заходів дозволить значно підвищити надійність конструкції, зменшити кількість відмов у польових умовах та подовжити міжремонтний ресурс обладнання..

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування способу зварювання

У структурі технологічного процесу виготовлення зварних конструкцій важливу роль відіграє обґрунтований вибір способу зварювання, оскільки саме він визначає не лише якість з'єднання, але й продуктивність зварювальних операцій, стабільність металургійних властивостей шва та рівень зварювальних напружень.

На сучасному етапі розвитку технологій існує значна кількість методів дугового зварювання, кожен з яких має свою сферу доцільного застосування. Критерії вибору включають [10-11]:

- технологічну складність виробу,
- геометрію та протяжність зварних з'єднань,
- доступність до зони зварювання,
- товщину металу,
- економічну ефективність процесу.

З урахуванням конструктивних особливостей коромисла екскаватора, зокрема значної масивності елементів, наявності довгих прямих швів та змінної товщини секцій (часто у межах 8–20 мм), для її зварювання доцільно застосовувати наступні способи:

Ручне дугове зварювання покритими електродами (РДЗ) — використовується для зварювання важкодоступних ділянок, коротких з'єднань, прихваток та ремонтних операцій. Забезпечує універсальність, проте має обмежену продуктивність. Однією з головних технологічних вимог при зварюванні сталей є забезпечення необхідного хімічного складу металу шва в умовах різних типів з'єднань та просторових положень зварювання. Цей процес ускладнюється варіативністю глибини проплавлення основного металу та зміною кількості наплавленого металу, що безпосередньо впливає на формування структури шва [10].

З метою стабілізації структури зварного металу, покриття електродів модифікується відповідно до типу сталі та умов зварювання. Зокрема, важливо досягнути оптимального вмісту фериту в шві, що дозволяє мінімізувати схильність до утворення гарячих тріщин, а також забезпечити підвищену жаростійкість і корозійну стійкість зварного з'єднання в експлуатаційних умовах.

Застосування електродів з основним (фтористо-кальцієвим) покриттям дає змогу отримати зварний метал із заданим хімічним складом і структурою. Таке покриття сприяє зниженню втрат легуючих елементів у процесі зварювання, а також забезпечує високу якість металургічного процесу за умови ведення короткої зварювальної дуги без поперечних коливань електрода. Така технологія додатково зменшує ймовірність утворення поверхневих дефектів унаслідок налипання бризок на основний метал.

Тип покриття електродів визначає необхідність використання постійного струму зворотної полярності, величину якого підбирають так, щоб питома сила струму не перевищувала 25–30 А/мм діаметра електрода. У разі виконання зварювання у вертикальному або стельовому положенні струм зменшують на 10–30 % порівняно з нижнім положенням, щоб запобігти стіканню металу шва.

Для зменшення ймовірності виникнення гарячих тріщин при ручному дуговому зварюванні доцільно використовувати електроди діаметром 3 мм, а зварювання виконувати короткими «нитковими» швами. У всіх випадках важливо обмежити надмірне проплавлення основного металу, зберігаючи контрольовану зону термічного впливу.

Крім того, перед застосуванням електроди мають бути прокалені при температурі 250–400 °С протягом 1–1,5 години, що дозволяє зменшити вміст вологи в покритті й, відповідно, мінімізувати ризик утворення пор та тріщин, спричинених водневою крихкістю.

Автоматичне зварювання під флюсом (ПФ) — доцільне для виконання довгих горизонтальних швів на масивних деталях. Відзначається високою глибиною провару, низьким розбризкуванням металу та забезпеченням захисту ванни від впливу атмосфери. Особливо ефективне при зварюванні елементів великої товщини в нижньому положенні.

Зварювання під флюсом є одним із провідних методів з'єднання високолегованих сталей товщиною в діапазоні від 3 до 50 мм. Основною перевагою цього способу порівняно з ручним дуговим зварюванням покритими електродами є стабільність хімічного складу та механічних властивостей зварного металу по всій довжині шва — як у з'єднаннях із розділенням кромок, так і без нього [10].

Такий ефект досягається завдяки:

- безперервності процесу зварювання, що усуває утворення кратерів, характерних для ручної зміни електродів;
- однорідному плавленню зварювального дроту і основного металу;
- ефективному захисту зони зварювання флюсом, який запобігає окисненню легуючих елементів киснем повітря.

Крім того, зварний шов, виконаний під флюсом, відзначається якісним формуванням поверхні, дрібною чешуйчастою структурою та плавним переходом до основного металу. Відсутність бризок на зовнішніх поверхнях істотно підвищує корозійну стійкість з'єднання, особливо у випадку з антикорозійними сталями.

Підготовка кромок до зварювання в цьому методі менш трудомістка: розділення кромок виконується лише для деталей товщиною понад 12 мм, у той час як при ручному зварюванні — вже з 3–5 мм. Метод допускає зварювання без розділення кромок або з підвищеним зазором при товщині до 30–40 мм. Окрім цього, зниження втрат на розбризкування та згорання електродного дроту на 10–20 % зменшує витрати на матеріали.

Після завершення зварювання залишки шлаку та флюсу необхідно ретельно видалити з поверхні шва, оскільки вони можуть негативно впливати на антикорозійні властивості з'єднання.

Метод дугового зварювання під флюсом є одним з найефективніших процесів у сфері механоскладального виробництва, зокрема при виготовленні відповідальних металоконструкцій з вуглецевих, низько- та високолегованих сталей. Його застосування дозволяє забезпечити високу продуктивність при одночасному досягненні якісних з'єднань із заданими механічними та металографічними характеристиками.

Серед безумовних технологічних переваг зварювання під флюсом слід відзначити:

- стабільність формування шва по всій довжині завдяки постійній швидкості подачі електродного дроту і глибини проплавлення;
- мінімальні втрати електродного матеріалу, що становлять у середньому не більше 2 %;
- відсутність розбризкування, що дозволяє зменшити обсяг післязварювальної механічної обробки;
- високий рівень захисту зони дуги від доступу атмосферного кисню, що значно знижує ризик окислення легуючих елементів;
- знижену швидкість охолодження зварювальної ванни, що сприяє формуванню рівномірної структури шва із підвищеною в'язкістю;
- відсутність необхідності у засобах індивідуального захисту від світлового випромінювання, оскільки дуга повністю екранована шаром флюсу;
- зменшені вимоги до кваліфікації персоналу, що знижує навчальні витрати та спрощує підготовку операторів;
- відтворюваність результатів зварювання, що забезпечується автоматизованим режимом процесу та виключенням людського фактора.

Попри широкий спектр переваг, метод зварювання під флюсом також має низку обмежень, які слід враховувати при його виборі. Зокрема:

- підвищена трудомісткість, пов'язана з необхідністю підготовки, просушування та регенерації флюсів;
- складність точного контролю положення дуги щодо кромek деталей;
- несприятливий вплив на умови праці при недостатньому захисті від пилу флюсу;
- обмеження щодо застосування в усіх просторових положеннях шва — метод здебільшого орієнтований на зварювання у нижньому положенні.

Зварювання під флюсом є доцільним у широкому діапазоні сфер:

- для виконання зварювання в умовах стаціонарного цехового виробництва;
- при з'єднанні металів товщиною від 1,5 до понад 150 мм;
- при зварюванні однорідних і різнорідних металів, включаючи антикорозійні та жароміцні сплави;
- у технологічних процесах наплавлення зносостійких шарів.

Подальше підвищення ефективності процесу можливе за рахунок реалізації низки технічних рішень:

- використання незалежних або комбінованих дуг між кількома електродами, зокрема без підведення струму до виробу;
- застосування трифазних дугових систем, де глибина проплавлення регулюється розподілом струму між дугами;
- використання стрічкових або розщеплених електродів, що підвищує коефіцієнт наплавлення;
- введення додаткового присадного дроту без підведення струму — з метою точного легування шва;
- мультидугове зварювання у спільну або розділену ванну для зростання продуктивності;

- зварювання по металевій підкладці, яка одночасно виконує роль джерела легувальних елементів і теплоакумулювального екрана.

Таким чином, зварювання під флюсом виступає високоефективним способом з'єднання конструкційних матеріалів, що при раціональному технічному супроводі дозволяє досягти оптимального поєднання продуктивності, якості з'єднання та економічної доцільності.

MIG/MAG належить до прогресивних методів дугового зварювання, що дозволяє реалізовувати процес із високим ступенем контрольованості та стабільності. Процес може здійснюватися як за допомогою неплавкого електрода (переважно вольфрамового), так і з використанням плавкого електрода, де останній є джерелом наплавленого металу.

У разі застосування неплавкого електрода формування шва відбувається шляхом розплавлення кромки основного металу, а також введення у зону дуги присадного дроту, за необхідності. Плавкий електрод, навпаки, розплавляється безпосередньо у процесі зварювання, беручи участь у формуванні шва як наплавлюваний компонент.

Для захисту зони дуги від атмосферних впливів застосовуються три основні групи газів:

- інертні (аргон, гелій),
- активні (вуглекислий газ, азот, водень),
- газові суміші — інертних, активних або змішаного типу.

Вибір захисної атмосфери обумовлюється низкою чинників: хімічним складом зварюваного матеріалу, вимогами до властивостей шва, економічною доцільністю та режимними параметрами зварювального процесу.

Застосування сумішей інертних і активних газів дозволяє підвищити стабільність дуги, покращити глибину проплавлення, змінити форму зварного валика, а також здійснити металургійне оброблення зони розплаву, підвищуючи продуктивність процесу.

Подача газу в зону зварювання здійснюється переважно централізовано, однак при високих швидкостях зварювання плавким електродом можливе бічне введення потоку. Для оптимізації витрати дорогих інертних газів застосовується подача двох потоків із роздільним складом, де зовнішній шар формує, наприклад, вуглекислий газ. У разі зварювання активних матеріалів, для захисту як розплавленого, так і нагрітого до високих температур твердого металу, використовують подовжені сопла, локальні мобільні камери, або стаціонарні камери, заповнені інертним газом.

Застосування переносних гнучких камер із прозорих полімерних матеріалів дозволяє виконувати зварювання великих конструкцій, локально ізолюючи зону дуги від впливу атмосфери.

Теплофізичні властивості газів чинять істотний вплив на теплову ефективність дуги, а отже — на форму та глибину шва. Наприклад, гелієва дуга є більш м'якою, має вищу напругу порівняно з аргоном, але при цьому забезпечує меншу глибину проплавлення та більшу ширину шва. Вуглекислий газ за характеристиками проплавлення займає проміжне положення між аргоном і гелієм.

Стабільність дуги та мінімізація вигорання легуючих елементів є вирішальними при зварюванні високолегованих сталей, тому застосування інертних середовищ тут має особливе значення. Досягнення заданого хімічного складу металу шва можливе за рахунок:

- корекції складу присадного дроту;
- регулювання участі основного металу в утворенні шва;
- зміни хімічного складу захисного газу, що впливає на характер металургійних реакцій під час зварювання плавким електродом.

Метод зварювання в захисних газах також надає високу гнучкість за просторовим положенням з'єднання, що забезпечує значно ширшу сферу застосування порівняно з ручним дуговим зварюванням покритими електродами.

Зварювання з використанням плавкого електрода здійснюється як у середовищі інертних газів (аргон, гелій), так і в активних атмосферах (вуглекислий газ, кисень, азот) або їх комбінаціях. Вибір конкретного газу або суміші обумовлюється хімічним складом зварюваного металу та вимогами до структури й властивостей сформованого з'єднання.

При зварюванні високолегованих сталей, що містять легкоокиснювані елементи, зокрема алюміній, титан, цирконій тощо, доцільно використовувати чисті інертні середовища — переважно аргон. Це дозволяє запобігти окисненню критичних компонентів та забезпечити струминне перенесення металу електрода, що характеризується:

- високою стабільністю дуги;
- відсутністю розбризкування крапель розплаву, що є ключовим для зварювання в складних просторових положеннях;
- зниженням ймовірності локальної корозії, зумовленої залишками металевих бризок на поверхні конструкції.

Однак реалізація струминного перенесення вимагає струму вище критичного значення, що може спричинити проварювання наскрізь при зварюванні тонколистових матеріалів. Для оптимізації режимів до аргону вводять до 3–5 % кисню або 15–20 % вуглекислого газу. Така контрольована окисна атмосфера сприяє зниженню ризику пороутворення, пов'язаного з присутністю водню в зоні зварювання. Водночас така комбінація підвищує вигорання легуючих елементів, а за надмірного вмісту CO_2 можливе науглерожування металу шва, що негативно впливає на його корозійну стійкість [10].

Додавання до аргону 5–10 % азоту дозволяє підвищити концентрацію азоту в шві, що є доцільним при зварюванні аустенітних сталей, оскільки азот виконує роль сильного аустенітовотворювального елементу, сприяючи стабілізації відповідної структури [11].

Зварювання аустенітних сталей ефективно реалізується за допомогою імпульсно-дугового режиму в середовищі аргону або його сумішей з киснем чи вуглекислим газом. Імпульсна подача струму забезпечує:

- струминне перенесення металу навіть при знижених середніх значеннях струму;
- зменшення перегріву зони шва;
- формування дрібнозернистої структури зварного металу;
- зниження схильності до утворення гарячих і холодних тріщин.

Таким чином, вибір складу захисного газу, його частка в суміші та режим дугового горіння суттєво впливають на стабільність зварювального процесу, геометрію шва, втрати легуючих компонентів та загальну надійність з'єднання, особливо при роботі з високолегованими сталями у складних умовах.

Одним з найбільш доступних захисних середовищ є вуглекислий газ, який забезпечує задовільну стабільність дуги та прийнятну якість шва. Проте використання CO_2 має низку технологічних недоліків.

Значним обмеженням при зварюванні в чистому вуглекислому газі є інтенсивне розбризкування електродного металу, втрати якого можуть сягати 10–12 %. Крім того, на поверхні зварного валика часто утворюються щільні окисні плівки, що міцно зв'язані з основним металом. Такі плівки негативно впливають на корозійну та жароміцну стійкість з'єднання.

Для мінімізації налипання бризок рекомендується наносити захисні емульсії на крайки до початку зварювання, а для зменшення окисності атмосфери доцільним є введення у зону дуги невеликої кількості фторидного флюсу типу АНФ-5. Також імпульсно-дугове зварювання дозволяє значно зменшити кількість бризок завдяки стабілізації перенесення металу [12].

Сучасні зварювальні дроти для роботи у середовищі вуглекислого газу, особливо при зварюванні високолегованих аустенітних сталей, містять

підвищені концентрації титану, ніобію, кремнію, алюмінію та хрому, що сприяє покращенню корозійної стійкості та механічних властивостей шва.

Основні недоліки зварювання в захисних газах:

- висока вартість інертних газів та їх дефіцитність;
- необхідність застосування засобів захисту від світлового та теплового випромінювання дуги;
- ризик порушення газового захисту при потраплянні повітряного потоку або забрудненні сопла;
- потреба в додатковому газовому обладнанні і, в деяких випадках, у водяному охолодженні пальника.

Переваги зварювання в захисних газах у порівнянні з ручним дуговим і зварюванням під флюсом:

- підвищена якість зварних з'єднань, зокрема на легованих та кольорових металах;
- можливість виконання зварювання у будь-якому просторовому положенні;
- відсутність шлакових включень, що усуває необхідність післязварювального зачищення;
- безперервне візуальне спостереження за формуванням шва, що є критичним для механізованих процесів;
- легкість автоматизації та висока продуктивність;
- низька собівартість за умови використання активних газів (CO_2).

Застосування газових сумішей дає змогу регулювати теплові та металургійні параметри дуги, впливати на структуру зварного шва, зменшити розбризкування і підвищити стабільність процесу. Найбільш поширені комбінації захисних газів приведено в табл. 2.1.

На основі техніко-економічного аналізу обрано автоматичне зварювання у середовищі суміші CO_2 (20%) (вищий сорт) та Ar (80%) (вищий

сорт). Такий склад забезпечує оптимальне співвідношення між якістю шва, стабільністю дуги та економічністю процесу.

Таблиця 2.1 Типи газових сумішей для зварювання та їх застосування [12]

Суміш	Призначення / Переваги	Застосування
Ar + He (50:50 або 40:60)	Збільшення тепловіддачі дуги, зварювання без пропалів	Алюмінієві та титаномісткі сплави
Ar + O ₂ (1–5%)	Стабілізація дуги, покращення плинності ванни, дрібнокрапельний перенос	Вуглецеві та нержавіючі сталі
Ar + CO ₂ (75–80% Ar, 20–25% CO ₂)	Мінімальне розбризкування, гарне формування шва	Низьковуглецеві та низьколеговані сталі
CO ₂ + O ₂ (60–80% CO ₂ , 20–40% O ₂)	Підвищення температури ванни, покращення формування шва	Високолеговані та конструкційні сталі
Ar + CO ₂ + O ₂ (75/20/5%)	Висока стабільність, відсутність пористості	Універсальне застосування: вуглецеві, нержавіючі та леговані сталі

З урахуванням хімічного складу сталі та її експлуатаційних властивостей, доцільним є застосування зварювального дроту марки Св-08ХГ2С. Цей дріт, легований марганцем і хромом, забезпечує формування металу шва з підвищеною ударною в'язкістю, що є критично важливим при експлуатації конструкцій в умовах дії знижених температур та змінних навантажень.

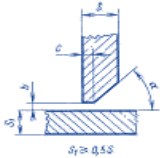
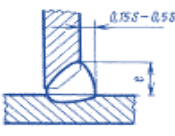
Таблиця 2.2 – Хімічний склад дроту Св – 08ХГ2С, % [12]

Марка дроту	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
Св-08ХГ2С	0,05-0,11	1,7-2,1	0,70-0,95	0,70-1,0	<0,25	<0,025	<0,030

Для досягнення стабільної якості зварного з'єднання необхідно обґрунтовано визначити оптимальні параметри режиму зварювання.

Розрахункові значення параметрів установлюються відповідно до нормативно-технічних рекомендацій та даних фахової літератури [13].

Таблиця 2.3 – Конструктивні параметри зварного з'єднання коромисла екскаватора

Умовні позначення	Конструктивні елементи		S, мм	b, мм		с, мм		е, мм		α, град+2°
	Підготовка кромки зварювальних деталей	Шва зварного з'єднання		Номинальний	Граничне відхилення	Номинальний	Граничне відхилення	Номинальний	Граничне відхилення	
T6			10,0	0	+1	1	±1	8	±2	45

Тип шва за кількістю проходів приймаємо однопровідний. [13].

Визначаємо площу поперечного перерізу шва

$$F_H = \frac{k^2}{2} \quad (2.1)$$

Катет шва приймаємо для T6 – $k = 8$ мм

$$F_{H8} = \frac{8^2}{2} = 32 \text{ мм}^2$$

Для катета 8 мм – $d_e = 2,0$ мм.

Визначаємо зварювальний струм:

$$I_{3B} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot j \quad (2.2)$$

Для діаметра дроту 2,0 мм приймаємо $j = 120 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$.

$$I_{зв8} = \frac{\pi \cdot 2,0^2}{4} \cdot 120 = 376 \text{ A}$$

Визначаємо коефіцієнт наплавлення:

$$\alpha_H = A + B \frac{I_{зв}}{d_{ел}}, \quad (2.3)$$

де $A = 7.0$; $B = 0.04$.

$$\alpha_{H8} = 7 + 0.04 \frac{376}{4} = 10,76 \text{ г/А} \cdot \text{год.}$$

Визначаємо швидкість зварювання

$$V_{зв4} = \frac{A}{I_{зв}} \quad (2.4)$$

$$V_{зв8} = \frac{10 \times 10^3}{376} = 26,6 \text{ м/год.}$$

Напругу зварювання:

$$U_d = 20 + I_{зв} \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_{ел}}} \pm 1 \quad (2.5)$$

$$U_{д8} = 20 + 376 \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2,0}} \pm 1 = 33 \pm 1 \text{ В}$$

Приймаємо $U_d = 33 \text{ В}$.

Визначимо швидкість подачі дроту:

$$V_{п.д.} = \frac{4 \cdot \alpha_H \cdot I_{зв}}{\pi \cdot d_{ел}^2 \cdot \gamma}, \quad (2.6)$$

де $\gamma = 7800 \text{ кг/м}^3$;

$$V_{п.д.8} = \frac{4 \cdot 10,76 \cdot 10^{-3} \cdot 376}{3,14 \cdot (2,0 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 7800} = 165 \frac{\text{м}}{\text{год}}$$

Витрата захисного газового середовища під час зварювання коромисла екскаватора визначається на основі попередньо розрахованих режимів зварювання (табл. 2.4) та встановлюється відповідно до нормативних даних, наведених у табл. 2.5.

Таблиця 2.4 – Режими зварювання

Тип з'єднання	Сила струму Ізв, А	Напруга на дузі U_d , В	Діаметр дроту de , мм	Швидкість зварювання $V_{зв}$, м/год	Швидкість подачі дроту $V_{п. д.}$, м/год
T1	376	33	2,0	26,6	165

Таблиця 2.5 – Витрати захисного газу [12]

Струм зварювання, А	50 ÷ 60	90 ÷ 100	150 ÷ 160	220 ÷ 240	280 ÷ 300	360 ÷ 380	430 ÷ 450
Напруга дуги, В	17 – 28	19 – 20	21 – 22	25 – 27	28 – 30	30 – 32	32 – 34
Витрата газу, л/хв	8 – 10	8 – 10	9 – 10	15 – 16	15 – 16	18 – 20	18 – 2

2.2 Вибір зварювального устаткування

З урахуванням обраного способу зварювання та технологічних режимів, для забезпечення високих показників якості, стабільності процесу та підвищення продуктивності при виготовленні коромисла екскаватора, доцільним є застосування роботизованих зварювальних систем. Такий підхід дозволяє автоматизувати виробничий процес, мінімізувати людський

фактор, знизити кількість технологічних відхилень та забезпечити відповідність сучасним стандартам міцності, герметичності та експлуатаційної надійності зварних з'єднань [14-15].

Для реалізації процесу автоматизованого зварювання у складі виробничого комплексу передбачено використання шестивісного промислового зварювального робота моделі QRC 410. Дана модель розроблена компанією CLOOS спеціально для виконання високоточних зварювальних операцій, зокрема при зварюванні великогабаритних та відповідальних конструкцій.

Основні технічні характеристики робота QRC 410:

- кількість ступенів свободи 6 осей, що забезпечує високу маневровість;
- робочий радіус (досяжність) до 2810 мм, що дозволяє виконувати зварювання по складних траєкторіях;
- повторюваність позиціонування $\pm 0,1$ мм, що гарантує високу точність з'єднань;
- максимальна вантажопідйомність на фланці 10 кг, що дозволяє встановлювати різні типи пальників;
- інтегрована система охолодження пальника, з можливістю рідинного охолодження;
- можливість програмування траєкторій руху в режимі offline, з 3D-візуалізацією робочої зони;
- сумісність з джерелами зварювання CLOOS GLC, QINEO та іншими сучасними системами напіваавтоматичного зварювання.

Використання робота QRC 410 дозволяє досягти високої стабільності процесу зварювання по всій довжині шва, зменшити витрати часу на підготовчі і завершальні операції, покращити умови праці персоналу шляхом усунення безпосереднього контакту зі зварювальною дугою і шкідливими аерозолями та забезпечити гнучкість виробництва завдяки можливості оперативного перепрограмування на інші типи з'єднань і деталей [15-16].

Таким чином, впровадження роботизованого зварювання із застосуванням QRC 410 (рис. 2.1) забезпечує якісний прорив у модернізації зварювального процесу, що особливо важливо для відповідальних елементів несучих конструкцій.



Рис. 2.1 Зварювальний робот QRC 410 [16]

Для живлення роботизованого зварювального комплексу передбачено застосування джерела зварювального струму типу Qineo Step 600 C (рис. 2.2), яке характеризується високою стабільністю дуги, широким діапазоном регулювання параметрів та сумісністю з автоматизованими системами керування.

У процесі виготовлення відповідальних металоконструкцій, зокрема при зварюванні конструктивних елементів з високоміцних і низьколегованих сталей, особливе значення має вибір зварювального обладнання, яке здатне забезпечити стабільність теплового циклу, повторюваність результату та відповідність суворим технологічним параметрам. У цьому контексті

установка Qineo Step 600 C (виробництва CLOOS, Німеччина) виступає як один із найперспективніших зразків сучасної дугової зварювальної техніки.



Рис. 2.2. Джерело зварювального струму Qineo Step 600 C [17]

Даний зварювальний апарат належить до серії професійних джерел струму QINEO, що характеризуються високим ступенем адаптивності, модульною конструкцією та розширеним діапазоном налаштувань, які дозволяють з високою точністю реалізовувати технологічні процеси зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів (MIG/MAG).

Qineo Step 600 C оснащений силовим модулем з максимальним зварювальним струмом до 600 А при ПН=60 %, що дозволяє ефективно виконувати зварювання виробів значної товщини, а також здійснювати наплавлення. Система керування підтримує синергійний режим, завдяки якому зварювальні параметри (напруга, швидкість подачі дроту, індуктивність тощо) автоматично узгоджуються відповідно до вибраного типу матеріалу, діаметра електрода та захисного газу. Це суттєво зменшує час налаштування та усуває людський фактор при виборі режимів [17].

Інтерфейс зварювального апарата вирізняється високою ергономічністю: цифровий дисплей із багаторівневим меню, енкодерна система керування та можливість збереження до 10 користувацьких програм

дають змогу оперативно адаптувати установку до зміни зварювального завдання.

Серед ключових переваг варто зазначити:

- стабільне горіння дуги за будь-яких просторових положень;
- широкий діапазон робочих струмів для застосування з різними перетинами зварювального дроту (від 0,8 до 2,0 мм);
- низький рівень розбризкування, що сприяє чистому формуванню шва без потреби додаткової механічної обробки;
- високий ККД джерела живлення, що забезпечує економію енергоресурсів при тривалих виробничих циклах.

Qineo Step 600 C сумісний із сучасними дротоподавачами, включаючи роботизовані системи CLOOS QWD-A, та має стандартні промислові інтерфейси для інтеграції в роботизовані зварювальні комплекси. Окремо слід відзначити можливість роботи в імпульсно-дуговому режимі, що забезпечує покращене формування шва при зварюванні високолегованих сталей, зокрема нержавіючих та корозійностійких.

Підвищена надійність електронних компонентів, система охолодження та стійкість до пилу й вологи (клас захисту IP 23) роблять установку придатною для роботи як у стаціонарних умовах цеху, так і в умовах монтажного виробництва.

З метою реалізації зварювально-складального процесу елементів коромисла екскаватора обґрунтовано обрано напівавтоматичне джерело зварювального струму TransSteel 4000 Pulse (рис. 2.3, табл. 2.6). Зазначена модель повністю відповідає технічним вимогам до зварювання конструкцій із низьколегованих сталей, забезпечує високу стабільність дуги в широкому діапазоні струмів та дозволяє здійснювати ефективний контроль за параметрами зварювального процесу [18].



Рис. 2.3 – Півавтомат *TransSteel 4000 PULSE* [18]

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики напівавтоматичної зварювальної установки *TransSteel 4000 Pulse* [18]

Параметр	Значення
Напруга мережі	380 / 400V
Зварювальний струм мінімальний	10 A
Зварювальний струм максимальний	400 A
Зварювальний струм / тривалість включення [10хв/40°C]	400A / 40%
Зварювальний струм / тривалість включення [10хв/40°C]	370A / 60%
Зварювальний струм / тривалість включення [10хв/40°C]	340A / 100%
Діапазон робочої напруги Мінімальний	14,5 V
Напруга холостого ходу	65 V
Клас захисту	IP23
Габаритні розміри / довжина	747 mm
Габаритні розміри / ширина	300 mm
Габаритні розміри / висота	497 mm
Маса	32,5 kg
Вага	34,5 kg
Вага з упаковкою	37,7 kg
Клас випромінювання перешкод	A

Дане джерело призначене для MIG/MAG-зварювання сталей, алюмінієвих сплавів і нержавіючих матеріалів, включаючи роботу в пульсуючому режимі, що дозволяє ефективно зменшити теплове

навантаження на основний метал, підвищити якість формування шва та знизити ризик виникнення дефектів, пов'язаних із перегрівом або пористістю.

TransSteel 4000 Pulse оснащено інтелектуальною системою синергічного керування, яка дозволяє автоматично підбирати оптимальні параметри зварювання залежно від обраного дроту, газу та матеріалу. Інтерфейс з графічним дисплеєм підтримує багатомовну навігацію та має зручну структуру меню, що сприяє швидкому налаштуванню апарата навіть в умовах інтенсивної експлуатації.

Пульсуючий режим зварювання, реалізований у цій моделі, дозволяє формувати шви з мінімальним розбризкуванням, що особливо важливо при зварюванні легованих сталей, де якість поверхні має критичне значення. Крім того, зменшене тепловкладення сприяє збереженню мікроструктури основного металу.

2.3 Вибір методу контролю якості виробу

Однією з ключових проблем у сучасному зварювальному виробництві є гарантування стабільно високої якості зварних з'єднань, адже саме від їхнього технічного рівня залежить експлуатаційна надійність, безпека та економічна ефективність металевих конструкцій. Будь-які дефекти в області зварювання — як у самому металі шва, так і в зонах термічного впливу — можуть спричинити зниження міцності, опору втомі, герметичності та інших критичних характеристик виробу.

Контроль якості зварювальних операцій здійснюється згідно з затвердженими технологічними регламентами та інструкціями, з урахуванням вимог чинних стандартів і проектної документації.

Попередній контроль перед зварюванням включає перевірку:

- наявності у зварника відповідної кваліфікації та дозволу на виконання зварювальних робіт;
- відповідності зібраних вузлів технічній документації, включаючи наявність маркування;
- підготовки кромки і прилеглих поверхонь (очищення від окалин, іржі, мастила тощо);
- наявності та відповідності сертифікатів на зварювальні матеріали (дріт, флюси, електроди);
- технічного стану зварювального устаткування, а також наявності документів, що підтверджують його справність і допуск до експлуатації;
- температури підігріву з'єднуваних елементів, якщо вона передбачена технологічною картою або нормативними положеннями.

У процесі зварювання здійснюється контроль за такими параметрами:

- дотриманням встановленого режиму зварювання (струм, напруга, швидкість подачі дроту тощо);
- черговістю виконання зварних швів згідно з технологічною схемою;
- товщиною і шириною шва, відповідністю геометричних параметрів заданим у проекті;
- виконанням усіх вимог, зазначених у проектно-конструкторській або технологічній документації;
- наявністю маркування зварника на кожному з'єднанні після завершення робіт.

Післязварювальний контроль якості з'єднань включає:

- 100% візуально-оптичну перевірку всіх зварних швів на предмет зовнішніх дефектів;
- вибіркового неруйнівного контролю, зокрема ультразвукову дефектоскопію (щонайменше 0,5% загальної довжини швів), згідно з вимогами стандартів.

Тріщини будь-якого характеру та розміру в зварних з'єднаннях не допускаються. Їх виявлення вимагає обов'язкового видалення дефектної ділянки з подальшим ремонтом і повторною діагностикою.

Для оцінювання розмірів швів і локалізації дефектів застосовуються високоточні вимірювальні інструменти з точністю не гіршою за $\pm 0,1$ мм або стандартизовані шаблони для контролю зварних з'єднань. Вибірковий контроль додатково здійснюється в ділянках, де спостерігалися тріщини, напливи або інші дефекти, а також у зонах перетину зварних швів, що є потенційно напруженими вузлами конструкції [19].

У процесі виготовлення коромисла екскаватора особливу увагу приділяють візуальному та вимірювальному контролю, які є обов'язковими етапами забезпечення якості зварних з'єднань і конструкцій загалом. Дані методи належать до контролю першої лінії і дозволяють своєчасно виявити відхилення від технічних вимог ще на ранніх стадіях виготовлення.

Візуальний контроль застосовується для перевірки:

- поверхневого стану основного металу до зварювання (наявність тріщин, корозії, окалин тощо);
- якості поверхні зварного шва після зварювання (наявність напливів, підрізів, пористості, непроварів, прожогів тощо);
- загальної відповідності геометричних форм та конфігурацій деталей.

Для деталізації огляду малих дефектів застосовуються лупи з 5–10-кратним збільшенням, що дозволяє виявляти мікродефекти і нерівності поверхні швів, недоступні для неозброєного ока.

Вимірювальний контроль передбачає перевірку відповідності зварних швів і з'єднаних елементів встановленим геометричним параметрам. У процесі контролю використовуються [19]:

- штангенциркулі;
- мікрометри;
- спеціалізовані шаблони для контролю.

Завдяки інтеграції візуального та вимірювального контролю до основного технологічного процесу забезпечується своєчасне виявлення дефектів, що можуть вплинути на подальші етапи складання, виготовленні та експлуатації виробу.

Одним із найбільш інформативних методів неруйнівного контролю зварних з'єднань конструктивних елементів екскаватора, зокрема коромисла, є ультразвукова дефектоскопія. Цей метод дозволяє з високою точністю виявляти внутрішні дефекти металу та зони термічного впливу без порушення цілісності виробу [19].

Контроль виконується за комбінованою схемою увімкнення перетворювача, яка передбачає використання одного датчика одночасно в режимах випромінювання й приймання ультразвукових хвиль. Перед початком перевірки перетворювач встановлюється на очищену поверхню в області контролю перпендикулярно до осі зварного шва та переміщується вздовж нього поступально-обертальними рухами. Кут повороту під час сканування становить $10-15^\circ$ уліво та вправо, при цьому крок сканування не повинен перевищувати половини ширини п'єзокристалу перетворювача.

Для підвищення точності діагностики контроль доцільно проводити з обох боків шва. Якщо доступ з однієї сторони неможливий, в технічному звіті обов'язково фіксуються недоступні для контролю ділянки.

Виявлення дефекту здійснюється за наявністю ехо-сигналу, амплітуда якого перевищує встановлений контрольний рівень чутливості. Важливо відокремлювати справжні сигнали від хибних, які можуть бути зумовлені поверхневими нерівностями, наявністю технологічних отворів, змінами в геометрії виробу тощо. У разі виявлення ехо-сигналу у зоні шва здійснюється подальше вимірювання координат джерела відбиття та визначення просторового положення дефекту.

До основних параметрів оцінки дефектів належать:

- амплітуда ехо-сигналу або еквівалентна площа дефекту;

- умовна протяжність дефекту;
- кількість дефектів на одиницю довжини зварного шва. [19].

При контролі кутових і таврових з'єднань особливу увагу приділяють кореню шва, де ймовірність виникнення непровару є найвищою. Перевірка здійснюється прямими або одноразово відбитими променями з обох сторін шва за допомогою нахилених та комбінованих перетворювачів, обраних відповідно до товщини контролюваної зони.

Параметри чутливості та розгортки приладу налаштовуються на еталонних зразках, що мають ті самі геометричні характеристики, що й контрольована конструкція, та містять штучні відбивачі, еквівалентні допустимим дефектам.

Для ультразвукової дефектоскопії коромисла екскаватора передбачено застосування приладу HARFANG WAVE (рис. 2.4), який забезпечує високу роздільну здатність, стабільність сигналу та можливість точного вимірювання координат внутрішніх порушень структури металу.



Рис. 2.4 — Дефектоскоп HARFANG WAVE [20].

Оцінювання якості зварних з'єднань і конструкції в цілому здійснюється з використанням різних методів технічного контролю. Водночас, універсального засобу, здатного виявити усі можливі дефекти в з'єднанні, не існує, тому на практиці застосовується комплексний підхід до контролю з урахуванням характеру конструкції, її призначення та умов експлуатації.

2.4 Опис запропонованого технологічного процесу

Виготовлення коромисла екскаватора є відповідальним багатоступеневим процесом, який охоплює комплекс технологічних операцій, спрямованих на формування надійного й міцного вузла. Враховуючи конструктивні особливості цієї деталі, технологічна послідовність включає етапи: транспортування, очищення, виправлення, розкрій, підготовку кромки, складання, зварювання, контроль та остаточне доопрацювання. Послідовність їх виконання приведена в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 - Технологічний процес виготовлення коромисла екскаватора

Номер операції	Назва операції	Короткий опис
010	Транспортування та попередній контроль	Перевірка поверхні листа, транспортування до зони обробки.
015	Очищення	Дробоструминеве очищення металевої поверхні.
020	Виправлення	Правлення листа на листоправильній машині.
025	Розкрій	Лазерне різання елементів конструкції.
030	Обробка крайок	Фасонна обробка крайок на кромкостругальному верстаті.
035	Контроль геометрії	Перевірка точності розмірів та форм деталей.
040	Складання	Попереднє позиціонування та прихоплення елементів коромисла.
045	Зварювання	Напіваавтоматичне зварювання з використанням роботизованих комплексів.
050	Виправлення та зачищення	Механічне зачищення швів, правлення при необхідності.
055	Контроль якості	Візуальний, вимірювальний та ультразвуковий контроль зварних з'єднань.
060	Остаточна обробка	Фінальна зачистка, контроль параметрів перед передачею у збірку.

У подальшій частині документа наведено розгорнутий опис технологічних операцій, що становлять процес виготовлення, а також обладнання, за допомогою якого здійснюється їх реалізація.

010. Транспортування та попередній контроль заготовок. Листовий прокат, як правило, стандартних розмірів (6000 × 1500 × 10 мм або 6000 × 1500 × 8 мм), доставляється до зони механічної обробки. Перед початком технологічного циклу проводиться візуальна перевірка поверхні на наявність корозійних уражень, забруднень та дефектів прокату.

015. Поверхневе очищення. Для забезпечення якісної підготовки поверхні до подальших операцій застосовується дробоструминна установка прохідного типу SK-1 ÇETİNGİL (рис. 2.5), яка дозволяє видалити окалину, продукти корозії, масляні залишки та інші забруднення.



Рис. 2.5 — Машина SK — 1 [21]

020. Виправлення листового металу. Листи, що мають залишкові деформації, хвилеподібність або викривлення, піддаються правленню на листопрямильній машині BPSM 30/50 (рис. 2.6), що дозволяє досягти необхідної плоскої геометрії для подальшої обробки.



Рис. 2.6 – Листопрямильна машина BPSM30/50 [21].

025. Розкрій заготовок. Контурне вирізання елементів коромисла виконується на лазерній установці Gweike LF3015GC (рис. 2.7) відповідно до конструкторської документації. Здійснюється різання верхніх і нижніх поясів, стінок та інших складових деталей конструкції.



Рис. 2.7 Установка LF3015GC [21]

030. Обробка кромки. Для забезпечення повноцінного зварного з'єднання крайки підлягають фасонній обробці на кромкоштригальному верстаті АВМ28. Формуються фаски необхідної геометрії залежно від типу з'єднання та товщини металу (10 мм).



Рис. 2.8 – Кромкостругальний станок АВМ28 [21]

035. Контроль геометричних параметрів. Після заготівельних операцій проводиться перевірка розмірної відповідності за допомогою шаблонів, штангенциркулів та інших вимірювальних приладів, що забезпечує контроль точності форми, положення отворів та відповідності кресленням.

040. Складання елементів коромисла. Складання виконується у складальному кондукторі, що забезпечує правильне взаємне розташування боковин, поперечних елементів та монтажної пластини з мінімальними відхиленнями. Фіксація проводиться за допомогою прихваток, які розміщуються симетрично для уникнення короблень. На даному етапі особлива увага приділяється забезпеченню співвісності отворів під палець, точності положення втулок і дотриманню паралельності боковин. Всі елементи фіксуються згідно зі схемою складання, із допустимим відхиленням до $\pm 0,5$ мм по довжині й висоті. Для уникнення зсувів і деформацій використовується тимчасове прихоплення за допомогою TransSteel 4000 Pulse.

045. Виконання зварювальних операцій. Зварювання проводиться автоматичним способом у середовищі $80\% \text{ Ar} + 20\% \text{ CO}_2$ із застосуванням дроту Св-08ХГ2С. Дана операція реалізовується за допомогою роботизованої системи QRC-410 і з джерелом Qineo Step 600 С. Процес зварювання

виконується з дотриманням черговості накладання швів для зменшення зварювальних деформацій. У зонах з підвищеним напруженням (фланець, кріплення гідроциліндра) використовуються комбіновані шви з глибоким проваром.

050. Виправлення та зачищення зварних швів. Після охолодження швів виконується механічне зачищення поверхонь швів від шлаку та бризок за допомогою шліфувального інструменту. При виявленні зварювальних деформацій проводиться правлення конструкції.

055. Контроль якості зварювання. Здійснюється комплексний контроль, що включає візуально-вимірний метод та ультразвукову діагностику дефектоскопом HARFANG WAVE . У випадку виявлення недопустимих дефектів проводиться локальне видалення та повторне зварювання з наступним контролем.

060. Остаточна обробка та завершальний контроль. Фінальна стадія передбачає усунення залишкових нерівностей, дефектів поверхні та контроль усіх розмірів і параметрів зварного шва. Після позитивного результату випробувань коромисло направляється на наступні етапи складання у вузол робочого обладнання екскаватора.

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Опис зварювальних пристосувань

В умовах сучасного машинобудівного виробництва, де особливі вимоги висуваються до точності, жорсткості та геометричної стабільності складальних зварних конструкцій, ефективним засобом підвищення якості є застосування спеціалізованих кондукторів. Для виготовлення зварного вузла коромисла екскаватора LiuGong 922E використовується стаціонарний універсальний кондуктор (рис. 3.1), який дозволяє забезпечити високоточне позиціонування елементів конструкції, мінімізуючи похибки під час складання та деформації при зварюванні.

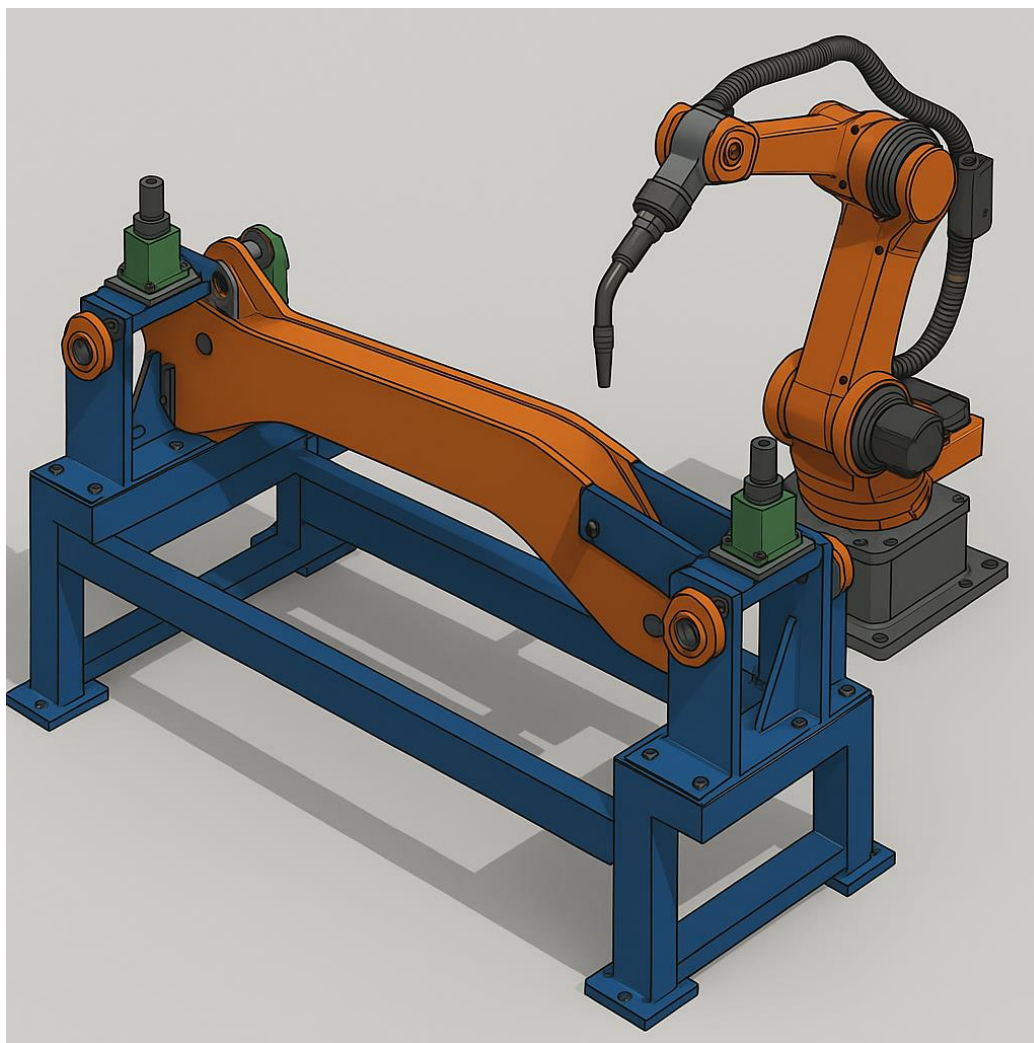


Рис. 3.1-Кондуктор складання коромисла

Кондуктор для складання коромисла є стаціонарним технологічним пристроєм, призначеним для забезпечення стабільної геометрії та точної взаємної орієнтації складових елементів вузла перед проведенням зварювальних операцій. Його використання дає змогу мінімізувати похибки під час складання, забезпечити жорстке фіксування елементів у процесі зварювання, а також інтегрувати складальний процес у роботизовану зварювальну систему.

Основний принцип роботи кондуктора ґрунтується на фіксації заготівель у строго визначених координатах відповідно до конструкторської документації з використанням гідравлічних та механічних затискачів, жорстко позиціонованих базових опор та напрямних елементів. Вся конструкція забезпечує точне відтворення геометрії коромисла з урахуванням допусків на усадку після зварювання.

Кондуктор складається із:

I. Рами, що являє собою зварну просторову конструкцію з профільних сталевих балок, яка виконує функцію основи та забезпечує загальну геометричну стабільність пристрою. Конструктивно рама адаптована до кріплення на виробничому стенді або платформі з автоматизованою подачею.

II. Опорних баз та установчих гнізд, розташовані відповідно до конструкторських координат для точного встановлення бокових стінок, верхніх і нижніх поясів, ребер жорсткості та проушин. Виготовлені з зносостійкого матеріалу (високоміцна конструкційна сталь), піддаються термообробці для збереження точності базування протягом тривалого експлуатаційного циклу.

III. Гідравлічних фіксаторів (притискачі), що використовуються для швидкої та надійної фіксації складових деталей у процесі складання. Принцип дії базується на подачі тиску через центральну гідростанцію, що активує циліндри і створює розподілене притискне зусилля без пошкодження

заготовок. Особливо ефективні при роботі з деталями різної жорсткості, де є ризик деформацій.

IV. Регульованих напрямних, які забезпечують гнучкість налаштування кондуктора під інші модифікації коромисел без зміни основної рами. Напрямні каретки фіксуються в заданому положенні з високою точністю (до $\pm 0,1$ мм).

V. Візуально-контрольних шаблонів та індикаторних засобів, які призначені для оперативного контролю відповідності фактичного положення елементів заданим допускам. Можуть містити оптичні або механічні індикатори відхилення, знімні шаблони для перевірки співвісності отворів проушин.

Передбачена можливість інтеграції кондуктора з роботизованими зварювальними системами. Це реалізується через відкриті зони доступу, жорстко визначені траєкторії руху зварювальної головки та фіксовані зони відведення диму й тепла.

Робота кондуктора полягає в тому, що деталі попередньо підготовлені (зачищені, знежирені), встановлюються в базові позиції вручну або з використанням крана. Після перевірки співвісності та положення активується гідравлічна система, яка забезпечує багатоточкову фіксацію. Проводиться прихватка конструкції, після чого можливе автоматизоване або ручне зварювання згідно із затвердженим технологічним маршрутом. По завершенні зварювання фіксатори розтискаються, а готове коромисло знімається з кондуктора для подальших операцій.

Після первинного складання та часткового зварювання, частково зварене коромисло переносять в маніпулятор RWP 1050.1221 (рис. 3.2). Його конструкція забезпечує можливість фіксації та обертання складеного коромисла до оптимального положення для зварювання.



Рис. 3.2 – Маніпулятор *RWP1050.1221* [21]

3.2 Розрахунок маніпулятора для зварювання коромисла екскаватора

Вихідним даними для розрахунку є:

- вага виробу з кріпильними пристроями $G = 1000$ Н,
 - координати центра ваги $e = 50$ мм, $h = 350$ мм;
 - $D = 1000$ мм, $l = 160$ мм, $\kappa = 120$ мм, $R = 300$ мм,
- кут нахилу шпинделя $\alpha = 45^\circ$.

Визначаємо вантажний крутний момент [22]

$$M_{BT} = Ge \sin \alpha = 1000 \cdot 0,05 \cdot 0,707 = 159,075 \text{ Нм.} \quad (3.1)$$

Нехтуючи тертям в підшипниках, визначаємо окружну силу на зубчастому колесі:

$$Q = \frac{M_{BT}}{R} = \frac{159,075}{0,3} = 530,25 \text{ Н} \quad (3.2)$$

Згинальні моменти в шпинделі на опорі А:
у вертикальній площині

$$M_1 = Gh \sin \alpha = 4500 \cdot 0,35 \cdot 0,707 = 1,114 \times 10^3 \text{ Нм} \quad (3.3)$$

у перпендикулярній нахиленій площині

$$M_2 = Ge \cos \alpha + Qk = 4500 \cdot 0,05 \cdot 0,707 + 530,25 \cdot 0,12 = 222,705 \text{ Нм} \quad (3.4)$$

Результуючий згинальний момент

$$M_3 = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} = \sqrt{1114^2 + 222,705^2} = 1,36 \times 10^3 \text{ Нм} \quad (3.5)$$

Радіальні опорні реакції А_в та В_в у вертикальній площині від дії сили G₁

$$A_{\text{в}} = G \frac{l+h}{l} \sin \alpha = 4500 \cdot \frac{0,16+0,35}{0,16} \cdot 0,707 = 1,014 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.6)$$

$$B_{\text{в}} = G \frac{h}{l} \sin \alpha = 4500 \cdot \frac{0,35}{0,16} \cdot 0,707 = 6,691 \times 10^3 \text{ Н} \quad (3.7)$$

Радіальні опорні реакції А_н та В_н в перпендикулярній нахиленій площині
від дії окружної сили Q та G₂

$$A_{\text{н}} = Q \frac{l+k}{l} + G_2 \frac{e}{l} = Q \frac{l+k}{l} + G \frac{e}{l} \cos 45^\circ, \quad (3.8)$$

$$A_{\text{н}} = 530,25 \cdot \frac{0,16+0,12}{0,16} + 4500 \cdot \frac{0,05}{0,16} \cdot 0,707 = 1,922 \times 10^3 \text{ Н}$$

$$B_H = Q \frac{k}{l} + G_2 \frac{e}{l} = Q \frac{k}{l} + G \frac{e}{l} \cos 45^\circ, \quad (3.10)$$

$$B_H = 530,25 \cdot \frac{0,12}{0,16} + 4500 \cdot \frac{0,05}{0,16} \cdot 0,707 = 1,392 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Результуючі реакції опор

$$A = \sqrt{A_\epsilon^2 + A_H^2} = \sqrt{10140^2 + 1922^2} = 1,032 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.11)$$

$$B = \sqrt{B_\epsilon^2 + B_H^2} = \sqrt{6961^2 + 1392^2} = 7,099 \times 10^3 \text{ Н} \quad (3.12)$$

Аксіальна реакція $A_{yn} = G_2 = G \cos 45^\circ = 4500 \cdot 0,707 = 3,182 \times 10^3 \text{ Н.}$

Діаметр шпинделя на опорі А визначається з розрахунку на згинання та кручення.

Застосовуємо сталь 40Х для якої $[\sigma] = 80 \text{ МПа}$

$$\sigma = \frac{M_3}{0,1d^3} \leq [\sigma], \quad \text{звідки} \quad d = \sqrt[3]{\frac{M_3}{0,1[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{1136}{0,1 \cdot 80 \cdot 10^6}} = 0,052 \text{ м.} \quad (3.13)$$

Приймаємо $d = d_A = d_B = d_{yn} = 55 \text{ мм.}$

Визначаємо момент сил тертя в підшипниках, прийнявши $f = 0,1$

$$M_{TP} = 0,5f(Ad_A + Bd_B) + 0,5fA_{yn}d_{yn}, \quad (3.14)$$

$$M_{TP} = 0,5 \cdot 0,1(10320 \cdot 0,055 + 7099 \cdot 0,055) + 0,5 \cdot 0,1 \cdot 3182 \cdot 0,055 = 56,65 \text{ Нм.}$$

Повний крутний момент, який повинен бути подоланий приводом обертача

$$M_{кр} = M_{BT} + M_{TP} = 159,075 + 56,65 = 215,725 \text{ Нм.} \quad (3.15)$$

Загальний к. к. д. приводного механізма обертача, який включає
циліндричний зубчастий редуктор $\eta_3 = 0,9$ та черв'ячний редуктор
 $\eta_ч = 0,6$

$$\eta_0 = \eta_3 \eta_ч = 0,9 \cdot 0,6 = 0,54.$$

Частота обертання планшайби при швидкості зварювання $V_з = 25 \frac{\text{м}}{\text{год}}$.

$$n = \frac{V_{зв}}{\pi D} = \frac{25}{3,14 \cdot 1,0} = 7,962 \text{ об/год.} \quad (3.16)$$

Кутова швидкість планшайби

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \cdot 7,962}{30} = 0,833 \text{ рад.} \quad (3.17)$$

Потужність приводного електродвигуна

$$N = \frac{M_{кр} \omega}{\eta_0} = \frac{215,725 \cdot 0,833}{0,54} = 332,828 \text{ Вт} \quad (3.18)$$

Приймаємо електродвигун потужністю $N = 0,5 \text{ кВт}$.

4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Організація навчання та інструктажів з питань охорони праці на підприємстві

Одним із ключових напрямів попередження виробничого травматизму є системна підготовка персоналу в галузі охорони праці, яка включає навчання, регулярну перевірку знань та підвищення кваліфікації працівників.

Формування системи навчання на підприємстві, а також організацію перевірки знань із зазначеної сфери здійснюють уповноважені особи — кадрова служба або інші відповідальні спеціалісти, призначені роботодавцем. У випадку посадових осіб, які проходили навчання у спеціалізованих галузевих центрах, перевірку знань виконує комісія, сформована органом управління, до юрисдикції якого належить підприємство. Головою цієї комісії виступає керівник або його заступник, відповідальний за охорону праці, або керівник відповідного профільного підрозділу.

Для осіб, які проходили навчання в установах, не підпорядкованих галузевим органам, контроль здійснюється комісією, утвореною територіальним підрозділом центрального органу виконавчої влади у сфері нагляду за охороною праці.

Працівники, не залучені до виконання небезпечних робіт, проходять навчання та перевірку знань з охорони праці не рідше ніж один раз на три роки. Натомість особи, які виконують роботи підвищеної небезпеки, зобов'язані проходити таку перевірку щорічно, включаючи вивчення чинних нормативно-правових документів.

Залежно від мети та моменту проведення, інструктажі класифікують на вступний, первинний, повторний, позаплановий і цільовий. [23]

Вступний інструктаж проводиться:

- для всіх осіб, які влаштовуються на роботу (незалежно від посади чи кваліфікації);
- для представників сторонніх організацій, задіяних у роботах на підприємстві;
- для учнів, студентів, а також осіб, які перебувають на екскурсії.

Первинний інструктаж здійснюється безпосередньо на робочому місці:

- з новоприйнятими працівниками;
- з тими, хто переводиться до іншого підрозділу;
- з відрядженими працівниками, які беруть участь у виробничому процесі.

Повторний інструктаж має періодичний характер і проводиться не рідше:

- одного разу на 3 місяці — для робіт підвищеної небезпеки;
- одного разу на 6 місяців — для інших видів робіт.

Позаплановий інструктаж проводиться у випадках:

- зміни технологій, обладнання, матеріалів;
- введення в дію нових нормативів;
- виявлення порушень або аварійних ситуацій;
- перерви в роботі понад 30 (для небезпечних робіт) або 60 днів (для інших).

Цільовий інструктаж застосовується у разі виконання робіт за нарядом-допуском, за наказом або при ліквідації надзвичайних ситуацій.

Факт проведення інструктажів обов'язково фіксується в журналі реєстрації, що має бути прошнурований, пронумерований та завірений печаткою. У випадках, коли оформлюється наряд-допуск, відповідні відмітки щодо інструктажу вносяться безпосередньо до нього.

Позачергове навчання передбачене у разі зміни посади, після нещасного випадку, а також за умови оновлення нормативної бази. Спеціалізоване навчання з питань охорони праці може проводитися як на

базі підприємства, так і у зовнішніх навчальних закладах, що мають відповідний дозвіл. У першому випадку розробка навчальних програм здійснюється з урахуванням специфіки виробництва, категорій працівників і функціональних обов'язків, а затверджується така програма наказом керівника підприємства.

Таким чином, ефективність управління охороною праці значною мірою залежить від чіткого дотримання вимог щодо інструктажів і навчання працівників, що дозволяє знизити рівень ризиків та запобігти нещасним випадкам на виробництві.

4.2 Ризики та небезпеки при виконанні зварювальних робіт і методи їх запобігання

Процес зварювання є технічно складним та пов'язаний з багатьма факторами ризику, які можуть становити загрозу для життя та здоров'я працівників. Саме тому дотримання вимог охорони праці, використання сертифікованого обладнання та ефективних засобів індивідуального захисту є обов'язковими умовами безпечного виконання зварювальних робіт.

Одним із першочергових заходів зниження ризиків є правильний вибір технічного обладнання, що відповідає критеріям безпечності, надійності та ергономічності. Таке обладнання не лише зменшує імовірність травмування персоналу, а й створює комфортні умови праці без втрати продуктивності [24].

До основних загроз під час зварювання відносяться:

- вплив високих температур;
- потужне ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання;
- виділення токсичних аерозолів, газів і парів;
- утворення бризок і шлакових частинок;
- шумове навантаження.

Найбільш вразливими органами людини в процесі зварювання є очі, органи дихання, шкіра, а також слуховий апарат. Вплив вказаних факторів у поєднанні зі складними просторовими положеннями виконання робіт часто призводить до професійного перевтомлення та травматизму.

Одним із основних ризиків для органів зору є потужне світлове випромінювання дуги, яке містить компоненти ультрафіолетового та інфрачервоного спектру. Навіть короточасне спостереження за дугою без засобів захисту може викликати гостре запалення рогівки ("електроофтальмія") або термічні опіки.

Для запобігання цим наслідкам використовуються зварювальні маски з автоматичними світлофільтрами, які забезпечують повний захист від шкідливого випромінювання та дозволяють зварювальнику зберігати високу точність роботи без перевтоми.

У зоні зварювання можуть утворюватись аерозолі, що містять до 40 різних хімічних сполук — оксиди металів, фториди, оксид вуглецю, озон тощо. При вдиханні ці частинки глибоко проникають у легені, спричиняючи хронічні запальні захворювання та, у тривалому періоді, — онкологічні ураження дихальної системи.

Одним із найефективніших засобів захисту є використання автономних респіраторних систем з фільтрами високої ефективності (PAPR-системи), що включають вентилятор, фільтрувальні модулі, гнучкий шланг і герметичну маску. Такі системи мають низький коефіцієнт проникнення шкідливих речовин (TIL) і дозволяють зварювальнику безпечно працювати у середовищах з високим рівнем димовиділення.

Іскри, розплавлений метал і гарячі гази можуть призвести до займання горючих матеріалів, опіків шкіри, пошкодження одягу або інвентарю. Для мінімізації цих ризиків зварювальники повинні використовувати спецодяг з негорючих тканин, вогнестійкі рукавиці, краги, а також відповідне взуття.

Також важливою є наявність локальної вентиляції, яка забезпечує відведення диму й газів безпосередньо від джерела утворення — це дозволяє не допустити накопичення токсичних речовин у дихальній зоні працівника [24].

Методи зниження ризиків на робочому місці:

- обов'язкове проходження вступного та первинного інструктажу перед початком робіт;
- забезпечення зварювальників сертифікованими ЗІЗ відповідно до характеру робіт;
- використання локальних витяжних пристроїв або систем примусової вентиляції;
- постійний контроль технічного стану обладнання та заземлення;
- регулярне навчання персоналу щодо ризиків та порядку дій у разі надзвичайних ситуацій;
- системна оцінка умов праці та впровадження превентивних заходів у разі виявлення небезпек.

ВИСНОВКИ

У межах виконання кваліфікаційної роботи було розроблено обґрунтовану технологічну концепцію виготовлення зварного коромисла екскаватора LiuGong 922E, що охоплює ключові аспекти сучасного виробництва — від конструкторського аналізу до організації автоматизованого процесу зварювання.

Проведений комплексний аналіз конструкції коромисла екскаватора дозволив визначити ключові технічні вимоги до технологічного процесу його виготовлення та раціонально обрати методи зварювання з урахуванням матеріалів і конструктивних навантажень.

Розроблено технологічну послідовність виготовлення з деталізацією складальних і зварювальних операцій, що забезпечує високу точність та мінімізацію зварювальних деформацій.

Запропоновано конструкцію кондуктора з гідравлічними фіксаторами та адаптацією під роботизовані системи, що дозволяє автоматизувати процес збирання та зварювання, підвищивши продуктивність і повторюваність операцій.

Розрахунок вантажного моменту, крутного моменту приводу та зусиль у маніпуляторі підтверджує працездатність системи в умовах реального навантаження та відповідає вимогам безпеки.

Розроблені пропозиції можуть бути впроваджені у виробничу практику підприємств, що спеціалізуються на виготовленні великогабаритних зварних вузлів техніки, сприяючи підвищенню ефективності виробничих процесів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Будівельні машини та обладнання / Лівінський О.М. та інші.// Підручник . - К. :Українська академія наук; «МП Леся» , 2015.-612 с
2. Кривов Г.О Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Г.О. Кривов, К.О. Зворикін. – К.: КВІЦ, 2012. – 896 с.
3. <https://liugong.ua/ekskavator-922e>
4. 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).
5. 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).
6. ДСТУ EN 474-1:2016 Землерийні машини. Вимоги щодо безпеки. Частина 1. Загальні вимоги.
7. ДСТУ 3932-2000. Машини землерийні. Гідравлічні екскаватори і зворотні лопати-навантажувачі. Пристрій обмеження швидкості опускання стріли. Технічні вимоги і методи випробувань.
8. http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=993
9. Палаш В. М. Металознавчі аспекти зварності залізобетонних сплавів.: Навчальний посібник. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2003. - 263 с.
10. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: підручник. – К.: Основа, 2021. – 400 с.
11. 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.
12. Костін О.М. Зварювальні матеріали: навч. посібник / О.М. Костін – Миколаїв: НУК, 2004. –225 с.
13. 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.

14. Биковский, О.Г. Довідник зварника: довідник / О.Г. Биковський, І.В. Пінковський. - К.: Техніка, 2002. – 336 с.
15. 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.
16. https://hydrolider.com.ua/ua/p579840841-svarochnye-roboty-cloos.html?srsId=AfmBOoog3YvdW26m6cBCJ7Zl_iZLgC1_as8AuEdzSvcgQRLhB3L3qJgS
17. <https://www.indiamart.com/proddetail/qineo-step-600-c-mig-mag-co2-welding-machine-20014384791>
18. <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tehnolohiyi/produkty/>
19. 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.
20. <https://standart-pribor.com.ua/product/defektoskop-ud4-76-tofd-versiya/>
21. <https://svartech.com.ua/>
22. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві: Навч. посібник / А.С. Карпенко. - К.: Арістей, 2005. - 268 с.
23. Безпека життєдіяльності та охорона праці : підруч. / В.В. Сокурєнко, О.М. Бандурка та ін. – Харків : ХНУВС, 2021. 308 с.
24. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві. Навчальний посібник. – К.: Основа, 2010. – 240 с.

ДОДАТОК