

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально–науковий Інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона
Кафедра зварювального виробництва

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

«___» _____ 2025 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо–професійною програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та
споріднених технологій»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: «Дугове адитивне виробництво товстостінних елементів з
низьковуглецевих сталей»

Виконав:

студент IV курсу, групи ЗС–11

Борщевич Іван Ігорович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н.

Чвертко Євгенія Петрівна _____

Консультант з охорони праці:

Зав. каф., професор, д.т.н., професор

Левченко Олег Григорович _____

Консультант з розроблення стартап–проекту:

Доцент, к.е.н.

Глущенко Ярослава Іванівна _____

Рецензент:

Провідний інженер відділу №21 Інституту електрозварювання

імені Є.О. Патона НАН України

Вдовиченко Дмитро Михайлович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально–науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є. О. Патона
Кафедра зварювального виробництва

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»
Освітньо–професійна програма – «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ
«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Борщевичу Івану Ігоровичу

1. Тема проєкту «Дугове адитивне виробництво товстостінних елементів з низьковуглецевих сталей»,

керівник проєкту Чвертко Євгенія Петрівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1733–с

2. Термін подання студентом проєкту 9 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту Ескіз зварного виробу (додається). Матеріал виробу – сталь S355J2. Умови виготовлення – цехові.

4. Зміст пояснювальної записки:

Виконати конструктивно – технологічний аналіз виробу. Обґрунтувати вибір способу адитивного дугового наплавлення. Вибрати зварювальні матеріали. Розрахувати режими наплавлення, призначити параметри режимів наплавлення. Вибрати устаткування для наплавлення. Адаптувати вибране устаткування для наплавлення. Виконати компоновання установки для наплавлення. Спланувати розміщення засобів технологічного спорядження на виробничій площі. Скласти операційну карту процесу зварювання. Зробити загальні висновки до технологічного розділу дипломного проєкту. Розробити стартап–проєкт. Розробити заходи з охорони праці безпеки та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

1. Виріб (1 А1).

2. Схема технологічного процесу адитивного наплавлення товстостінного елементу (1 А1).

3. Кресленик складального пристрою (1 А1).

4. Визначення режимів адитивного наплавлення товстостінного елементу (1 А1).

5. Кресленик установки для адитивного наплавлення товстостінного елементу (1 А1).

6. План виробничої площі для адитивного наплавлення товстостінного елементу (1 А1).

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап – проєкт	Глущенко Я. І., доц.		
Охорона праці	Левченко О. Г., зав. каф.		

7. Дата видачі завдання 20 квітня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Строк виконання етапів проєкту	Прим.
1	Аналіз літератури за темою проєкту	до 30 квітня	
2	Детальна розробка і обґрунтування проєктних рішень технологічної частини проєкту	до 15 травня	
3	Розробка економічної частини проєкту	до 20 травня	
4	Розробка інженерних рішень з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	до 20 травня	
5	Оформлення графічного матеріалу	до 25 травня	
6	Оформлення пояснювальної записки і підготовка доповіді на захист	до 9 червня	

Студент _____ Іван БОРЩЕВИЧ
(підпис)

Керівник _____ Євгенія ЧВЕРТКО
(підпис)

РЕФЕРАТ

Тема дипломної роботи – «Дугове адитивне виробництво товстостінних елементів з низьковуглецевих сталей».

Дипломна робота написана на 66 сторінках, містить 15 рисунків, 11 таблиць, 15 формул та 37 посилань.

НАПЛАВЛЕННЯ, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, АДИТИВНЕ НАПЛАВЛЕННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ MIG, MIG–СМТ, MIG/MAG, 3D ДРУК, ЗАХИСНІ ГАЗИ, НАПЛАВЛЕННЯ В ЗАХИСНИХ ГАЗАХ, WAAM.

У вступі обґрунтовано актуальність теми адитивного виробництва у промисловості, зокрема СМТ технології.

У першому розділі розглядається ключові види адитивних технологій та їх характеристики, порівняно між собою. Описується обране обладнання, рух пальника при 3D друці, та описано складальний пристрій. Проведено розрахунки для способу наплавлення MIG, визначені найкращі та найдоцільніші розрахунки, проведено опис експериментальної частини, та показано кінцевий результат наплавлення. Розроблена технологія наплавлення 20 шарів з коливаннями і отримано деталь товщиною стінки 10,5 мм, та діаметрами: 169 – зовнішній, 148 – внутрішній.

У другому розділі розроблено стартап – проєкт для технології СМТ, та підтверджено економічну перспективність у сучасних умовах .

У третьому розділі проведено аналіз шкідливих та небезпечних факторів на виробництві, та показані способи їх вирішення та запобігання.

ABSTRACT

The topic of the thesis is “Wire Arc additive manufacturing of thick-walled elements from low-carbon steels”.

The thesis is written on 66 pages, contains 15 figures, 11 tables, 15 formulas and 37 references.

WELDING, ADDITIVE TECHNOLOGIES, ADDITIVE WELDING, MIG WELDING, MIG-CMT, MIG/MAG, 3D PRINTING, SHIELDING GASES, WELDING IN SHIELDING GASES, WAAM.

The introduction substantiates the relevance of the topic of additive manufacturing in industry, in particular CMT technology.

The first section considers the key types of additive technologies and their characteristics, compared with each other. The selected equipment, the movement of the torch during 3D printing are described, and the assembly device is described. Calculations for the MIG surfacing method are performed, the best and most appropriate calculations are determined, the experimental part is described, and the final result of surfacing is shown. The surfacing technology of 20 layers with oscillations is developed and a part with a wall thickness of 10.5 mm and diameters: 169 – external, 148 – internal is obtained.

In the second section, a startup project for CMT technology is developed, and its economic prospects in modern conditions are confirmed.

In the third section, an analysis of harmful and dangerous factors in production is performed, and methods for their solution and prevention are shown.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	8
ВСТУП.....	9
1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	10
1.1 Адитивні технології.....	10
1.1.1 Сучасні технології адитивного виробництва	10
1.1.2 Технологія WAAM: принцип дії, переваги та обмеження.....	12
1.1.3 Технологія MIG – CMT у контексті WAAM	14
1.1.4 Вплив захисного середовища на якість наплавлення.....	16
1.1.5 Вибір матеріалу для друку (S355J2)	18
Висновки по розділу	19
1.2 Конструкторсько – технологічна частина	20
1.2.1 Загальна характеристика виробу	20
1.2.2 Вибір обладнання	22
1.2.3 Траєкторія руху інструмента.....	26
1.2.4 Установка з обертачем.....	28
1.2.5 Складальний пристрій.....	30
Висновки по розділу	31
1.3 Розрахунок режимів та технологічних параметрів.....	32
1.3.1 Вихідні дані.....	32
1.3.2 Розрахунок подачі дроту та об'єму наплавлення	34
1.3.3 Розрахунок тепловкладення	36
1.3.4 Аналіз наплавлення.....	38
Висновок по розділу.....	39
2 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП – ПРОЄКТУ.....	40
2.1 Опис ідеї проєкту.....	40
2.2 Технологічний аудит ідеї проєкту.....	43
2.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап – проєкту.....	44

					ЗС11.01.00.000 ПЗ				
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Технологічний розділ	Літ.	Арк.	Аркушів	
Розроб.	Борщевич І.І.								
Перевір.	Чвертко Є.П.						6	66	
						КПІ ім. Ігоря Сікорського НН ІМЗ ім. Є.О. Патона			
Н. контр.	Лисак В.В.								
Затверд.	Квасницький В.В.								

Висновок по розділу.....	50
3 ОХОРОНА ПРАЦІ	52
3.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів	52
3.2 Нормативні вимоги безпеки та гігієни праці	54
3.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці.....	57
3.4 Пожежна безпека	59
ВИСНОВКИ	61
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	63

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

CMT – Cold Metal Transfer, низькотемпературне зварювання з мікрокрапельним перенесенням металу для зменшення деформацій;

DMLS – Direct Metal Laser Sintering, пряме лазерне спікання дроту;

EBM – Electron Beam Melting, електронно – променева плавка;

MAG – Metal Active Gas, дугове зварювання плавким електродом в середовищі активного газу;

MIG – Metal Inert Gas, дугове зварювання плавким електродом в середовищі інертного газу;

SLM – Selective Laser Melting, послідовне нанесення шарів металевої порошкової суміші та їх подальшого зварювання лазером;

SWOT – Strengths Weaknesses Opportunities Threats – аналіз сил і слабкостей;

TIG – Tungsten Inert Gas, ручне дугове зварювання неплавким електродом в середовищі інертного захисного газу;

WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing, дугове адитивне виробництво;

АТ – адитивні технології.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						8
Змн .	Арк .	№ докум .	Підпис	Дата		

ВСТУП

Розвиток сучасних технологій стрімко змінює підходи до виробництва в різних галузях промисловості. Однією з найбільш перспективних сфер є адитивне виробництво, яке дає змогу створювати складні металеві вироби шляхом пошарового наплавлення матеріалу. Це дозволяє значно скоротити виробничі витрати, зменшити кількість відходів і зменшити навантаження на механічну обробку.

Особливо актуальним адитивне виробництво стає у випадках, коли необхідно виготовляти вироби з товстими стінками, великою масою або складною геометрією, що є проблематичним або економічно недоцільним для традиційних технологій, таких як лиття, кування чи механічна обробка з масиву. Для таких випадків ефективним рішенням є застосування технології Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) – способу формування металевих виробів за допомогою дугового зварювання з подачею присадного дроту.

У рамках цієї дипломної роботи розглядається саме така технологія – дугове адитивне виробництво методом MIG – CMT (Metal Inert Gas– Cold Metal Transfer). Цей метод поєднує переваги процесу MIG–зварювання та низькотемпературного переносу металу, що характерно для CMT. Такий підхід дозволяє зменшити тепловкладення в матеріал, зменшити деформації й отримати якісні наплавлені шари з мінімальним розбризкуванням металу.

У дипломній роботі розглядається реалізація процесу – виготовлення циліндричного виробу шляхом наплавлення 20 шарів, що дозволяє дослідити базову технологію й оцінити її ефективність.

Метою даної роботи є розробити технологію дугового адитивного виробництва товстостінних елементів з низьковуглецевих сталей за допомогою процесу WAAM.

1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Адитивні технології

1.1.1 Сучасні технології адитивного виробництва

Упродовж останніх десятиліть адитивні технології (АТ) зайняли важливе місце серед сучасних виробничих процесів, оскільки вони дозволяють виготовляти вироби складної форми без використання традиційної обробки різанням або лиття. Основним принципом адитивного виробництва є пошарове формування виробу шляхом додавання матеріалу згідно з тривимірною цифровою моделлю, що забезпечує високий ступінь геометричної свободи та мінімізацію матеріальних відходів.

Серед найбільш поширених напрямів адитивного виробництва металів виділяють технології, які базуються на лазерному, електронно–променевому та дуговому джерелах енергії. До перших двох належать методи Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) та Electron Beam Melting (EBM) [1], які характеризуються високою точністю та здатністю виготовляти мікродеталі зі складною внутрішньою геометрією, детальніше про ці технології наведено в таблиці 1.1. Однак ці технології потребують дорогого обладнання, вакуумного або інертного середовища, мають обмеження щодо габаритів виробів.

Таблиця 1.1 – Основні методи адитивного виробництва

Метод	Технологія	Матеріали
Порошковий	DMLS – Пряме спікання металів	Майже будь–які сплави: нержавіюча сталь, інструментальні сталі, іноді–титанові
Порошковий	EBM – Електронно–променеве плавлення	Титанові сплави, нержавіюча сталь, кобальт–хром, алюміній(електропровідні порошки)

Продовження таблиці 1.1

Метод	Технологія	Матеріали
Порошковий	SLM – вибіркове лазерне плавлення	Титанові сплави, нержавіюча сталь, кобальт-хромові сплави, алюміній

На відміну від них, технології на основі електричної дуги – зокрема Wire Arc Additive Manufacturing – є значно доступнішими для впровадження у промислових умовах. У WAAM, як джерело тепла, використовується зварювальна дуга, а як присадний матеріал – зварювальний дріт (рисунок 1.1). Це дозволяє використовувати стандартне зварювальне обладнання та будувати великогабаритні металеві конструкції [2]. До основних переваг цього методу відносяться: висока швидкість наплавлення, можливість роботи з різними металами та сплавами, низька вартість обладнання, масштабованість процесу та швидка адаптація до змін у конструкції виробу.

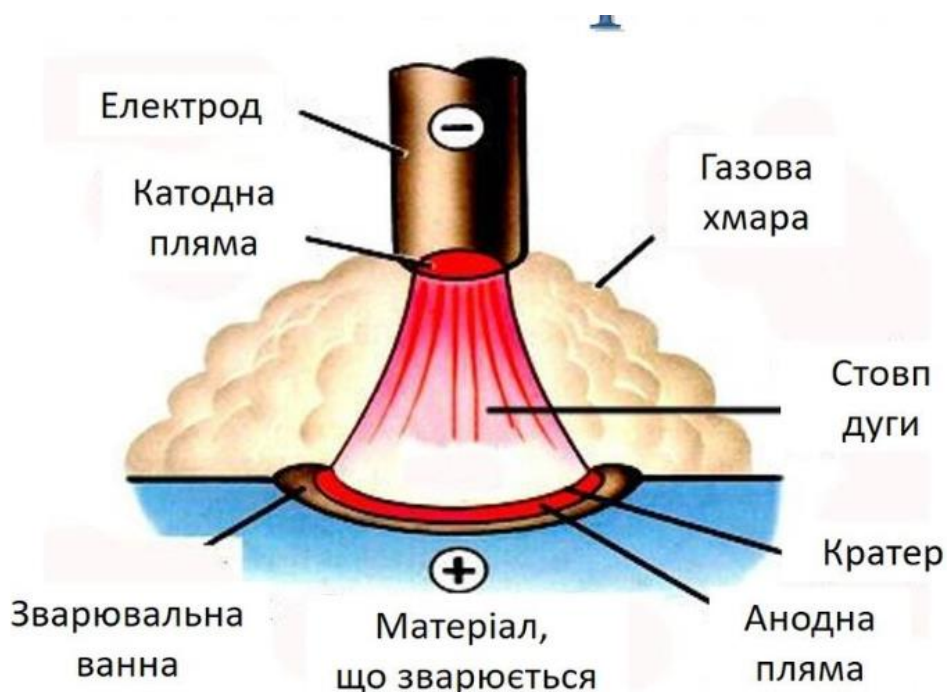


Рисунок 1.1 – Зварювальна дуга [3]

Адитивне дугове виробництво особливо ефективно для виготовлення товстостінних елементів, зокрема у важкому машинобудуванні, авіації, морській промисловості, а також для ремонтних робіт. Завдяки високій продуктивності та відносній простоті реалізації, WAAM набуває все більшого поширення як альтернатива традиційним способам виготовлення масивних металевих заготовок, таких як лиття або штампування.

На сучасному етапі розвитку адитивних технологій WAAM вважається оптимальним рішенням для тих завдань, де потрібне швидке виготовлення прототипів або одиничних серій виробів із високими вимогами до міцності та ресурсної надійності.

1.1.2 Технологія WAAM: принцип дії, переваги та обмеження

WAAM – це технологія адитивного виробництва металевих виробів, яка базується на використанні зварювальної дуги як джерела тепла для розплавлення металевого дроту, що подається у зону наплавлення [2]. У процесі реалізації технології відбувається пошарове формування виробу. Кожен шар наплавляється на попередній до досягнення необхідної висоти та форми заготовки (рисунок 1.2).

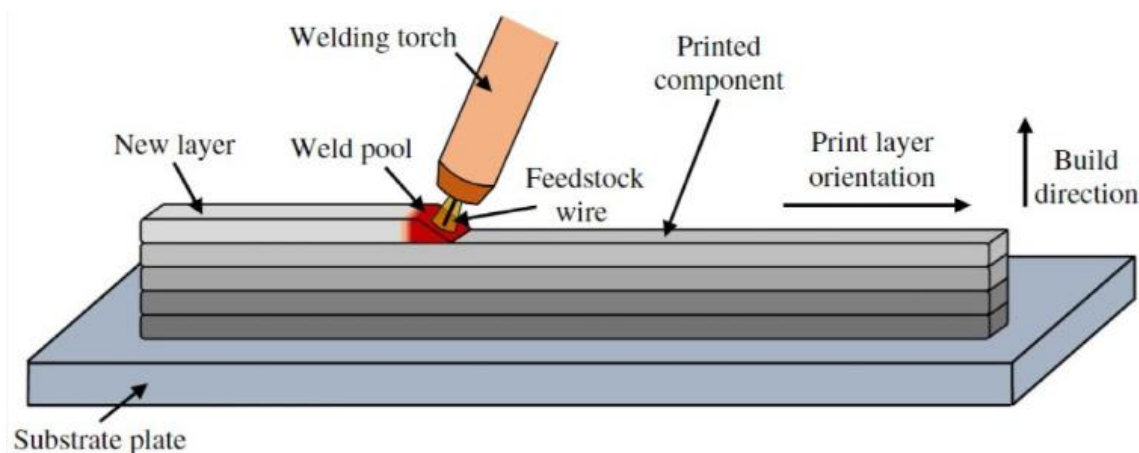


Рисунок 1.2 – WAAM технологія [3]

Основу WAAM-технології складає дугове зварювання, яке може реалізовуватись у різних варіаціях: MIG/MAG (з використанням інертного або

активного газу), TIG (вольфрамовим електродом), а також CMT (Cold Metal Transfer) [4]. Для формування траєкторії інструмента зазвичай застосовуються роботизовані комплекси або багатовісні координатні столи, які забезпечують точне позиціонування пальника та повторюваність операцій [5].

До основних переваг WAAM належать:

- висока продуктивність – наплавлення від 1 кг до 5 кг металу за годину, що значно перевищує швидкість порошкових адитивних методів;
- доступність обладнання – процес реалізується за допомогою стандартних зварювальних джерел та промислових роботів;
- велика габаритна зона друку – дозволяє виготовляти деталі значних розмірів без потреби у вакуумі або закритих камерах;
- низька собівартість – використання звичайного зварювального дроту значно знижує вартість матеріалу;
- гнучкість конструкцій – можливість оперативно змінювати параметри друку та адаптувати систему до різних виробів.

Водночас WAAM має і певні обмеження, які необхідно враховувати. Основним недоліком є порівняно невисока точність формування зовнішніх контурів, що вимагає подальшої механічної обробки. Також через високу теплову дію можуть виникати залишкові напруження та деформації, особливо при виготовленні великогабаритних деталей. У процесі наплавлення необхідно забезпечити надійний захист зони дуги інертним або активним газом, оскільки контакт розплавленого металу з киснем повітря може спричинити окислення та дефекти структури [2].

Окрему складність становить керування якістю та повторюваністю при виготовленні складних форм. Проте постійне вдосконалення програмного забезпечення, автоматизованих систем керування та застосування сенсорного моніторингу дає змогу істотно підвищити стабільність процесу.

Технологія WAAM – це сучасне та перспективне рішення для виготовлення сталевих виробів, яке особливо ефективне у випадках, коли необхідна швидкість, економічність і масштабованість процесу, а також можливість виготовлення товстостінних та великогабаритних деталей.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.1.3 Технологія MIG–СМТ у контексті WAAM

Однією з найважливіших складових процесу адитивного виготовлення металевих виробів методом WAAM є вибір конкретного способу зварювання, який визначає не лише ефективність, а й стабільність, якість та керованість процесу. Серед різноманітних дугових методів особливу увагу останніми роками привертає технологія MIG – СМТ, яка стала потужним інструментом для вдосконалення 3D друку.

Суть процесу СМТ полягає у поєднанні активного газового середовища (MAG–зварювання) з інтелектуальним керуванням переносу металу, реалізованим у режимі «холодного переносу» [6]. У традиційному MIG – зварюванні крапля металу переноситься до ванни під дією електричної дуги, що супроводжується інтенсивним тепловим впливом, розбризкуванням і формуванням нестабільної зони плавлення. На відміну від цього, у СМТ–режимі перенесення металу відбувається за рахунок коротких, контрольованих імпульсів струму, під час яких подача дроту короткочасно зупиняється та відводиться назад від зони дуги (рисунок 1.3) [6]. Завдяки цьому процес стає м'яким, стабільним, з мінімальним розбризкуванням і значно нижчим тепловкладенням (рисунок 1.4) [6].

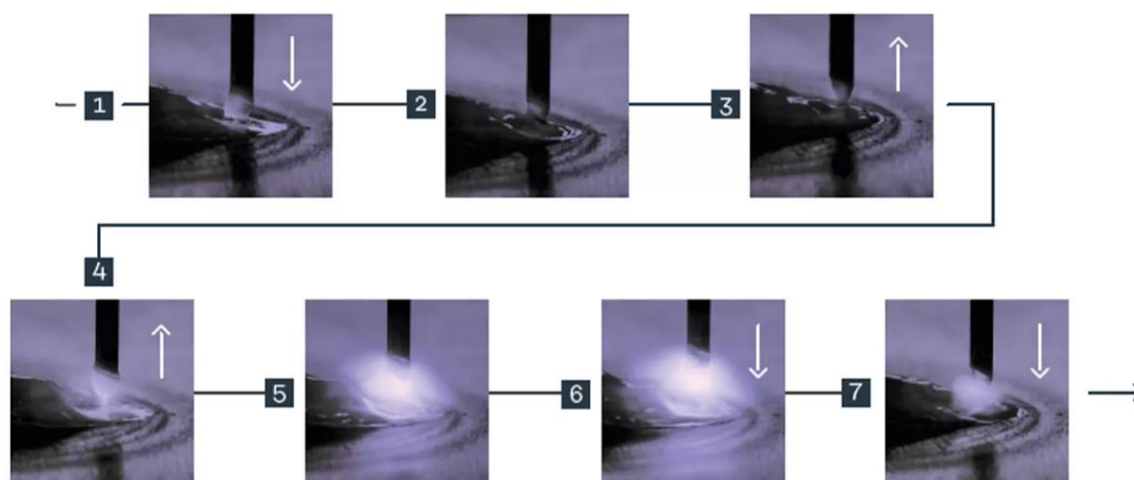


Рисунок 1.3 – СМТ процес [6]

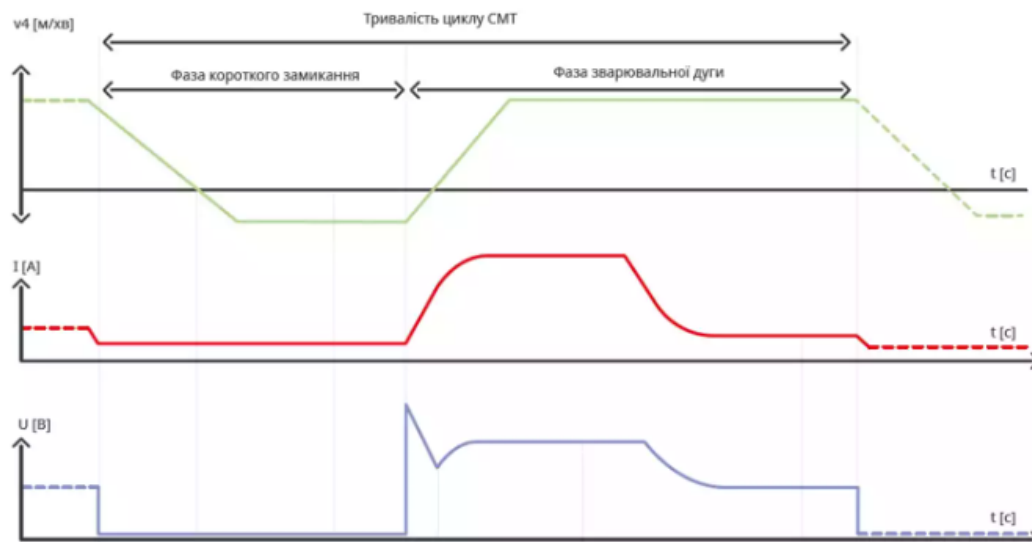


Рисунок 1.4 – Зміна параметрів у процесі наплавлення в режимі СМТ [6]

Для адитивного виробництва це дає одразу кілька вагомих переваг. По – перше, зменшене тепловкладення дозволяє формувати більш стабільні шари без надмірного розплавлення попередніх, що сприяє збереженню геометрії виробу та зниженню залишкових деформацій. По–друге, відсутність сильного розбризкування та димових газів покращує умови формування шва й дозволяє використовувати менш агресивні захисні середовища. По–третє, стабільність дуги та чіткий контроль подачі дроту значно спрощують керування процесом, особливо при роботизованому виконанні, де важливо забезпечити однакову якість при кожному проході [4].

MIG – СМТ особливо ефективна при роботі з тонкими або середньо товстими перерізами, проте у процесі досліджень було встановлено, що за умови правильного підбору режимів вона чудово працює і для товстостінних виробів. Це дозволяє розширити сферу її застосування не лише на легкі та середні конструкції, а й на важке машинобудування.

У межах WAAM – процесу технологія СМТ реалізується за допомогою сучасних джерел струму типу Fronius TPS (рисунок 1.5), які мають попередньо налаштовані програми для СМТ–зварювання, точну електроніку, здатну керувати подачею дроту з високою частотою, і можуть бути інтегровані з роботизованими маніпуляторами. Завдяки цьому можливе повне узгодження

рухів пальника, подачі дроту, подачі газу та регулювання струму в режимі реального часу.



Рисунок 1.5 – Джерело живлення Fronius для СМТ наплавлення [7]

Варто також відзначити, що застосування MIG–СМТ відкриває шлях до виготовлення багатошарових конструкцій без проміжної механічної обробки, оскільки форма й стабільність шару дозволяє проводити наплавлення одразу поверх попереднього. Це особливо важливо у серійному або дослідному виробництві, де економія часу та мінімізація ручних втручань відіграють вирішальну роль.

1.1.4 Вплив захисного середовища на якість наплавлення

Якість наплавлення при дуговому адитивному виробництві значною мірою залежить від вибору захисного газу, який використовується для ізоляції зони зварювання від атмосферного повітря. Основна роль захисного середовища полягає в запобіганні контакту розплавленого металу з киснем, азотом і воднем, що містяться в повітрі. У разі проникнення цих газів до зони плавлення можуть виникати пори, тріщини, оксидні включення, а також знижуватись механічні властивості готового виробу [8].

У технології WAAM найчастіше використовуються інертні та активні гази, або їхні суміші, зокрема аргон (Ar), є хімічно нейтральними і не вступають у реакцію з металом у зоні зварювання. Аргон має низьку теплопровідність, високу щільність, що дозволяє ефективно «накривати» зону дуги і стабілізувати процес. Його застосування забезпечує м'яке горіння дуги, мінімальне розбризкування, рівномірне формування валиків та відсутність оксидної кірки на поверхні наплавленого металу (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Балони з аргонм

Крім складу газу, важливу роль відіграє і режим його подачі. При надмірно низькому потоці газу не вдається повністю ізолювати розплав від повітря, тоді як надто інтенсивна подача спричиняє турбулентність і затягування повітря у зону дуги. Оптимальний режим подачі аргону підбирається дослідним шляхом з урахуванням швидкості руху пальника, конфігурації форсунки, діаметра дроту та інших параметрів.

Ще одним фактором є геометрія пальника та розташування газового сопла, які мають забезпечувати повне охоплення зони плавлення потоком інертного газу. При правильному розміщенні газ рівномірно розподіляється навколо дуги та знижує ризик утворення оксидів. Важливо також, щоб сопло залишалося чистим протягом усього процесу, оскільки накопичення бризок або продуктів згоряння можуть змінити напрям потоку газу і погіршити захист.

Процес СМТ передбачає тривале наплавлення з високим тепловим навантаженням, стабільне та ефективне захисне середовище є критично важливим. Саме завдяки використанню аргону вдалося забезпечити контрольований процес наплавлення, уникнути появи дефектів у швах і досягти необхідної якості при друці 20-шарового циліндричного виробу.

Тому, захисне середовище виступає не лише як допоміжний елемент, а як невід’ємна частина технологічного процесу, що прямо впливає на стабільність, чистоту та міцність сформованого металу. Вибір аргону як основного газу для MIG-СМТ у даному випадку був технічно обґрунтованим та практично ефективним.

1.1.5 Вибір матеріалу для друку (S355J2)

Одним із ключових факторів при використанні технології адитивного дугового виробництва є вибір присадного матеріалу, від якого значною мірою залежать технологічні властивості процесу, структура та експлуатаційні характеристики готового виробу. Для формування шару використовувався зварювальний дріт S355J2, який широко застосовується у зварювальному виробництві завдяки своїй універсальності, доступності та стабільним механічним властивостям.

Він являє собою суцільний зварювальний дріт діаметром 1,0 мм, виготовлений зі сплаву на основі низьковуглецевої сталі з підвищеним вмістом марганцю та кремнію які у складі дроту виступають як дешлакуючі та стабілізуючі елементи, які покращують формування шва, зменшують ризик утворення тріщин та пор і забезпечують чисту зварювальну ванну без домішок, хімічний склад дроту наведено в таблиці 1.2 [9].

Таблиця 1.2 – Хімічний склад S355J2 [9]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
≤ 0,12	0,5–0,8	1,3–1,7	≤ 0,3	≤ 0,04	≤ 0,035	≤ 0,3	≤ 0,012	≤ 0,3

Завдяки оптимальному хімічному складу та стабільним геометричним характеристикам, цей дріт чудово підходить для MIG-зварювання в інертному середовищі, а також для СМТ, де особливо важливо мати рівномірну подачу металу та стабільний перенос крапель. В умовах адитивного друку це дозволяє досягати передбачуваних параметрів шару без різких перепадів ширини або висоти наплавлення [10].

Крім того, цей сплав відзначається високою технологічною надійністю – дріт не має порожнин, має рівномірну намотку на катушці, у механізмі подачі й не викликає пропусків подачі, що особливо важливо у безперервному процесі WAAM-друку. Висока якість поверхні дроту зменшує зношення подаючих роликів, знижує ризик виникнення дугових нестабільностей і сприяє більш точному контролю подачі матеріалу.

З урахуванням усіх згаданих характеристик, вибір цього дроту для реалізації 3D друку в умовах WAAM є технічно обґрунтованим і ефективним з погляду якості, надійності та вартості. Його властивості відповідають вимогам до створення товстостінного циліндричного виробу, забезпечуючи належну міцність і стабільність наплавлених шарів.

Висновки по розділу

У результаті проведеного аналізу було встановлено, що адитивне дугове виробництво, зокрема технологія WAAM, є перспективним напрямом у сучасному машинобудуванні. Вона дозволяє формувати металеві вироби шляхом пошарового наплавлення дроту з використанням зварювальної дуги, що забезпечує високу продуктивність і гнучкість виготовлення деталей. WAAM-технологія особливо ефективна для формування великогабаритних або товстостінних заготовок, де традиційні способи виявляються затратними або непридатними.

Під час реалізації 3D друку металами одним із найбільш раціональних рішень є застосування процесу СМТ. Поєднання активного газового середовища з технологією «холодного переносу» металу дозволяє зменшити теплове

					3С11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження, стабілізувати процес та знизити ймовірність дефектів при наплавленні. Завдяки цим перевагам цей метод добре адаптується до умов роботизованого друку та забезпечує надійне формування шарів у процесі створення товстостінних деталей.

Застосування аргону як основного інертного газу дозволяє досягти чистоти шва, знизити окислення та підвищити стабільність дуги. У поєднанні з правильно налаштованим режимом подачі газу це створює умови для якісного, рівномірного наплавлення без дефектів.

Що стосується присадного матеріалу, дріт S355J2 виявився вдалим вибором для реалізації даної технології. Він забезпечує стабільну подачу металу, має оптимальний хімічний склад для MIG-зварювання та не створює додаткових труднощів у процесі. Його застосування дає змогу досягти необхідних механічних характеристик виробу та оптимізувати витрати.

1.2 Конструкторсько-технологічна частина

1.2.1 Загальна характеристика виробу

У межах дипломної роботи як об'єкт адитивного виготовлення обрано деталь циліндричної форми, що складається з 20 наплавлених валиків. Такий вибір зумовлений прагненням дослідити основні закономірності формування наплавленого шару при застосуванні технології СМТ та протестувати її ефективність в умовах реального виробничого середовища.

Геометрично виріб має форму порожнистого циліндра, діаметр якого складає:

- зовнішній – 169 мм,
- внутрішній – 148 мм,
- ширина стінки 10,5 мм.

Ці параметри були обрані для забезпечення симетрії під час обертання деталі на зварювальному обертачі та зручності при налаштуванні траєкторії руху зварювального пальника.

					3С11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висота виробу формується в результаті нанесення 20 шарів металу, кожен з яких має в середньому висоту 1,5 мм, що відповідає середньому приросту шару при застосуванні режиму з подачею дроту $2,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, швидкістю лінійного переміщення $50 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ і коливаннями пальника шириною 9 мм. Загальна висота деталі після завершення друку становить приблизно 30 мм, з урахуванням накопиченої висоти шарів та незначної нерівномірності профілю поверхні (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Циліндр наплавлений WAAM процесом СМТ технологією

Особливістю даного виробу є відсутність складної геометрії – циліндрична форма дає змогу сконцентрувати увагу на дослідженні якісних параметрів шару, стабільності дуги, рівномірності наплавлення та теплового впливу. Такий підхід є доцільним на початковому етапі впровадження технології, оскільки дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх факторів і зосередитись на відпрацюванні основного процесу.

Формування деталі відбувається за принципом циклічного переміщення зварювального пальника по замкненій круговій траєкторії, з контролем висоти підйому після кожного шару. Це реалізується за допомогою попередньо налаштованої програми в контролері промислового робота, яка враховує геометричні параметри деталі, час охолодження між шарами, а також необхідність збереження постійного положення дуги щодо осі виробу.

Для кріплення заготовки використовується основа з притискними елементами, що дозволяє забезпечити фіксацію деталі під час друку, а також передбачено умовний зварювальний обертач, який може бути використаний для обертання деталі навколо вертикальної осі в разі розширення технології до безперервного або багатонаправленого наплавлення.

Отже, деталь, є тестовим зразком, який дає змогу оцінити ефективність застосування технології СМТ для створення товстостінних сталевих виробів, забезпечуючи наочну демонстрацію можливостей WAAM-друку з позиції реального виробничого процесу.

1.2.2 Вибір обладнання

Для реалізації процесу дугового адитивного виробництва методом MIG-СМТ необхідне точне, стабільне та взаємопов'язане обладнання, здатне забезпечити погоджену роботу всіх елементів: джерела живлення, подачі дроту, руху пальника, захисного газу й керування. Від правильного вибору комплексу залежить успішність формування швів, геометрія шару, повторюваність і стабільність усього процесу.

Центральним елементом комплексу виступає промисловий робот AIR-130 (рисунок 1.8) [11], що виконує функцію переміщення зварювального пальника за запрограмованою траєкторією. Робот має шість ступенів свободи, що дозволяє йому виконувати рухи в тривимірному просторі з високою точністю.

Робот має максимальний радіус дії близько 3,1 метра та вантажопідйомність до 130 кг, що дозволяє використовувати його з різними типами пальників, механізмів подачі дроту та додаткового оснащення. Він забезпечує точне позиціонування пальника під час нанесення кожного шару.



Рисунок 1.8 – AIR – 130 3100 [11]

Керування роботом здійснюється за допомогою пульта оператора AIR-TP (рисунок 1.9), який є універсальним інтерфейсом для ручного та автоматизованого управління. На етапі налаштування маршруту руху використовувався навчальний режим (Teach mode), що дозволяє вручну вводити точки переміщення, регулювати швидкість, напрямок руху, кут нахилу пальника тощо. Пульт обладнано зручним екраном, джойстиком управління, кнопками аварійного зупинення, а також вбудованими функціями програмування. Це дозволило оператору гнучко налаштовувати траєкторію відповідно до реальної геометрії деталі та забезпечити плавність переміщення інструмента [12].



Рисунок 1.9 – Пульт керування роботом [12]

Для реалізації процесу зварювання використовується джерело живлення Fronius TPS 3200 CMT, яке є одним з найбільш сучасних апаратів для зварювання в режимі холодного переносу. Джерело забезпечує низьке тепловкладення, стабільну дугу та контрольований перенос краплі металу, що є критично важливим при формуванні рівномірних та повторюваних шарів. Система керування джерелом в автоматичному режимі регулює струм і напругу залежно від положення пальника, подачі дроту та інших факторів, що дозволяє досягти високої стабільності та зменшити ризики утворення дефектів [13]. Джерело сумісне з технологією MIG/MAG з подачею чистого аргону або суміші з CO₂ як захисного газу, що відповідає вимогам CMT – процесу (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Fronius TPS 3200 [13]

Важливою складовою комплексу є шафа керування ARC5 – 280, яка виконує функцію центрального вузла керування електричними та сигнальними ланцюгами. Саме в цій шафі відбувається підключення джерела живлення, подачі дроту, системи вентиляції, газозахисту, а також комунікація з роботом. Усі сигнали, які надходять від датчиків, систем безпеки та виконавчих пристроїв, проходять через цю шафу, що дозволяє централізовано керувати технологічним процесом і швидко реагувати у разі відхилень (рисунок 1.11). Шафа також містить модулі аварійного зупинення, контролю фази, індикації помилок, а також забезпечує безпечне підключення до мережі живлення.



Рисунок 1.11 – Шафа керування ARC5 – 280 [14]

Особливу увагу приділено системі подачі захисного газу, адже саме вона створює умови для якісного наплавлення. У нашому випадку використовувався чистий аргон, подача якого здійснювалась зі стандартного балону через редуктор, з наступною подачею в зону пальника. Стабільний ламінарний потік аргону забезпечував повне витіснення кисню та інших шкідливих домішок із зони зварювання. подача аргону відбувалась під тиском від 0,2 МПа до 0,3 МПа, витрата газу становила орієнтовно від $10 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$ до $12 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$, що було достатньо для утворення захисної оболонки навколо зони дуги.

Окремо варто зазначити наявність механізму подачі дроту, який є частиною системи Fronius та синхронізований із джерелом струму. Він забезпечував подачу дроту зі швидкістю, яка регулювалася в межах від $2,5 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$ до $3,0 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$ залежно від обраного шару. Дріт подавався через направляючі канали, з мінімальними втратами напруги та без блокування, що дозволяло уникнути коливань в стабільності наплавлення.

Уся система обладнання працювала як єдиний автоматизований комплекс, в якому кожен елемент від робота до пальника взаємодіє із іншими на основі точно налаштованих параметрів. Така взаємодія, з урахуванням режиму MIG – СМТ з використанням аргону, дозволила досягти рівномірного формування

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шарів, уникнути перегрівів, скоротити кількість дефектів і виконати друк дослідного циліндричного виробу відповідно до вимог завдання.

1.2.3 Траєкторія руху інструмента

Одним із ключових аспектів реалізації адитивного дугового виробництва є формування правильної траєкторії руху інструмента, яка забезпечує рівномірне нанесення металу, стабільну ширину валика та належну геометрію виробу. Переміщення зварювального пальника здійснювалось за заздалегідь запрограмованою замкненою круговою траєкторією, яка повторювала зовнішній контур деталі – порожнистого сталевго циліндра.

Програмування руху робота виконувалось за допомогою пульта AIR-TP [12], оператор вручну задає ключові точки маршруту, по яких надалі рухається маніпулятор. Для формування шару використовувався циклічний обертальний рух пальника по кільцевій траєкторії, при якому після завершення одного шару зварювальний пальник підіймався на певну висоту – у нашому випадку 1,5 мм на шар, згідно з експериментально визначеним приростом висоти. Цей підйом автоматично задавався в програмному блоці після кожного повного кола.

В процесі реалізації було використано коливання пальника за розрахованою траєкторією, що додатково стабілізує ширину наплавленого шару. Амплітуда коливань становила 9 мм, а швидкість коливання – $50 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$. Таке поєднання кругової траєкторії з поперечними коливаннями дозволяє не лише зменшити глибину проплавлення та уникнути перегріву, а й формувати більш рівномірний шар по всій товщині стінки. Цей режим особливо ефективний при роботі з вуглецевими сталями, коли важливо уникати структурних дефектів у зоні термічного впливу.

Реалізація програми руху відбувалася в координатній системі робота, яка була попередньо орієнтована відносно базової точки на деталі. Для забезпечення повторюваності при кожному запуску, було задано нульову точку на осі симетрії виробу, відносно якої розраховувались усі координати для кожного шару. Після завершення кожного кола зварювання активувалась команда підйому пальника

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на наступну висоту, що дозволяло формувати новий шар точно поверх попереднього (рисунок 1.12).

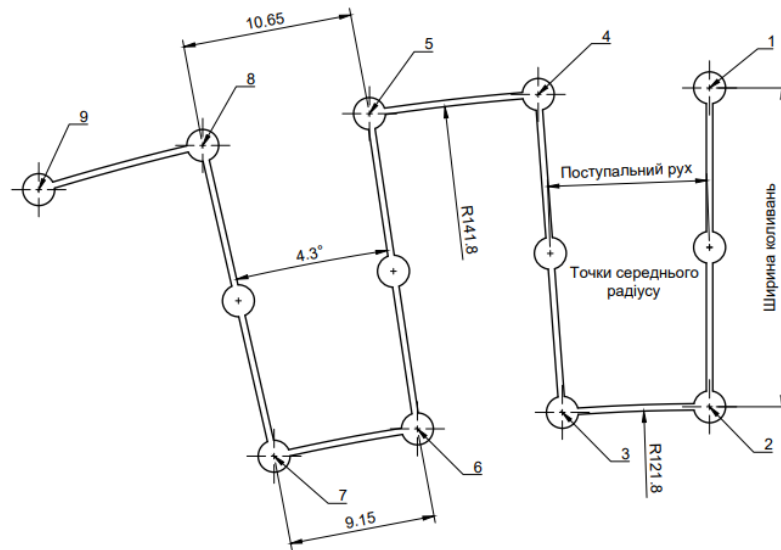


Рисунок 1.12 – Траєкторія руху пальника

Важливою умовою стабільності є витримування однакової швидкості обертання, яка підбиралася відповідно до подачі дроту – в нашому випадку це $2,8 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$. Для забезпечення злагодженої роботи використовувалась функція синхронізації руху робота з подачею матеріалу через блок керування. Також враховувалась теплова інерція деталі, тому між окремими шарами робилась коротка технічна пауза протягом 4 хвилин для часткового охолодження наплавленої поверхні – це дозволяло зменшити ризик деформацій і поліпшити геометричну стабільність конструкції.

Уся траєкторія розраховувалась з урахуванням реального діаметра деталі, радіуса дії робота та врахування положення сопла пальника відносно осі симетрії виробу. Робота пальника велася в положенні, максимально перпендикулярному до поверхні наплавлення, з кутом нахилу не більше 10° , що сприяло рівномірному переносу металу в зону шва.

Загалом, побудова траєкторії руху пальника є ключовим етапом у процесі WAAM-друку. Успішна реалізація цього етапу дозволила забезпечити високу точність, рівномірність і повторюваність шарів, що є критичними умовами для формування якісних товстостінних виробів.

1.2.4 Установка з обертачем

Одним із важливих елементів, який забезпечує точність та зручність реалізації процесу, є зварювальний стіл із функцією обертання деталі, або ж – обертач. У даній роботі, попри те, що основна траєкторія друку реалізовувалась за рахунок переміщення зварювального пальника роботом, наявність обертача є доцільною як частина уніфікованого підходу до виготовлення деталей циліндричної або осесиметричної форми.

Зварювальний позиціонер – це механічний пристрій, який дозволяє повертати деталь навколо однієї з осей (у нашому випадку – вертикальній) з контрольованою швидкістю та фіксацією положення. Такий пристрій виконує дві основні функції: перша – позиціонування та фіксація заготовки в початковому положенні, друга – плавне обертання виробу у випадку, якщо це потрібно для оптимізації процесу формування шару або забезпечення рівномірного теплового впливу [15].

У нашій установці обертач має платформу діаметром близько 600 мм, яка здатна витримувати вагу сталевих виробів з притискним оснащенням. Платформа встановлена на підшипниковому вузлі, що забезпечує плавне обертання без люфту, та приводиться в рух електромеханічним приводом з редуктором, керування яким здійснюється через окремий модуль шафи управління або вручну (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Обертач Yaskawa TR – 1000 7G [16]

У центральній частині платформи передбачено монтажні пази для притискачів, що дозволяють жорстко зафіксувати заготовку на час друку. У нашому випадку додатково встановлено зварювальну поверхню, для того, щоб можна було фіксувати деталь в будь якому зручному для насположенні, чотири притискачі, які рівномірно розміщені по колу й здатні утримувати виріб у стабільному положенні під час циклічного теплового навантаження (рисунок 1.14) [17].



Рисунок 1.14 – Зварювальна поверхня з отворами [17]

Наявність обертача забезпечила:

- зручне початкове позиціювання деталі під задану траєкторію;
- компенсацію неточностей у розміщенні при повторному запуску процесу;
- можливість тестування альтернативного сценарію друку – наприклад, із фіксованим пальником і обертовою заготовкою, що актуально для майбутніх модифікацій процесу.

Платформа з обертачем була змонтована так, щоб мати достатню жорсткість, антивібраційне покриття та систему заземлення. Стіл розміщено в межах робочої зони робота таким чином, щоб забезпечити максимальний доступ маніпулятора до всієї поверхні деталі, не виходячи за межі безпечної траєкторії.

Конструкція обертача також передбачає можливість блокування платформи в певному положенні, що важливо у випадках, коли необхідна повна нерухомість деталі протягом усього циклу наплавлення.

У підсумку, обертач у цій роботі виконує допоміжну роль, його наявність свідчить про адаптивність і гнучкість виробничої установки. За потреби, така конструкція дозволяє легко модернізувати систему під ротаційний режим WAAM-друку, у якому деталь обертається, а пальник залишається нерухомим або рухається вздовж осі. Це відкриває додаткові можливості для друку циліндричних або конусних деталей із складною геометрією та полегшує масштабування процесу на наступні виробничі рівні.

1.2.5 Складальний пристрій

Для забезпечення надійного закріплення заготовки під час адитивного наплавлення необхідно використовувати спеціальний складальний пристрій, який забезпечує точне розміщення деталі в зоні друку, а також запобігає її зміщенню, обертанню чи коливанню в процесі термічного впливу.

У роботі як складальний пристрій застосовується металева основа з чотирма регульованими притискачами, яка встановлюється безпосередньо на платформу обертача. Основа виготовлена зі сталевого листа товщиною 10 мм, що забезпечує необхідну жорсткість конструкції та стійкість до деформацій при дії високої температури. Поверхня основи має Т-подібні пази, які дозволяють гнучко змінювати положення притискачів залежно від розмірів виробу (рисунок 1.15).

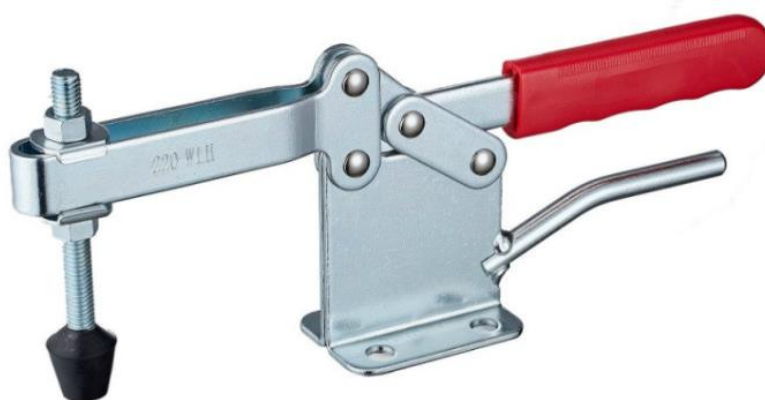


Рисунок 1.15 – Притискач універсальний [18]

Притискачі являють собою фіксатори із упорами, які притискають заготовку до основи та не дають їй рухатись у горизонтальній площині. Кожен притискач встановлений на окремому кронштейні, що дозволяє розміщувати їх симетрично відносно центру деталі. Завдяки цьому вдається рівномірно розподілити зусилля притискання та запобігти перекосу або нахилу виробу.

Конструкція притискачів дозволяє швидко закріплювати та знімати заготовку, що важливо для оперативного обслуговування установки, а також для багаторазового запуску друку без зміни положення елементів. У нижній частині пристрою передбачено пази для установчого штифта, який слугує базовою точкою при фіксації осі циліндра. Це дає змогу точно суміщати заготовку з траєкторією руху зварювального пальника та уникати зсувів під час роботи.

Ще однією особливістю складального пристрою є його модульність – притискачі можуть бути легко замінені або налаштовані під виробу іншого розміру чи форми, що робить пристрій універсальним для використання в різних технологічних експериментах. Для ізоляції від заземлення, поверхня основи покрита захисним жаротривким шаром, що дозволяє зменшити електричне навантаження на кріпильні елементи.

Під час експлуатації складальний пристрій продемонстрував високу надійність і зручність, забезпечуючи повну нерухомість деталі впродовж усього циклу наплавлення. Це стало запорукою стабільного формування кожного шару та збереження точної геометрії виробу без додаткових коригувань у процесі друку.

Висновки по розділу

Було здійснено всебічне технічне опрацювання та деталізацію запропонованої інженерної ідеї, яка полягає у використанні технології дугового адитивного наплавлення MIG – СМТ для виготовлення сталевих деталей складної просторової геометрії, зокрема фланців і втулок із товстими стінками. Проведено попереднє конструкційне проектування технологічного процесу,

					3С11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підбір обладнання, описано основні режимні параметри, а також розроблено послідовність виконання процесу наплавлення для 20-шарового зразка.

У ході розробки було вибрано сучасне, серійне зварювальне обладнання – джерело живлення Fronius TPS 3200 з режимом CMT, роботизовану систему керування траєкторією. Усі параметри були обґрунтовані з точки зору сумісності з матеріалом, товщиною стінки та режимом тепловкладення.

З урахуванням експериментальних даних і таблиці режимів було розроблено модель зростання геометрії деталі з урахуванням приросту по висоті, ширині та кількості валиків на кожному шарі. Візуалізація траєкторії руху пальника свідчить про стабільне переміщення за кільцевою схемою з активними коливаннями, що забезпечує рівномірне розподілення металу та уникнення дефектів, пов'язаних із накопиченням тепла.

У результаті конструкторсько – технологічного опрацювання встановлено, що реалізація даного методу є технічно доцільною, з низьким порогом входу для підприємств, які вже мають стандартне зварювальне обладнання. Таким чином, проведене конструкторське та технологічне обґрунтування підтвердило інженерну готовність і практичну придатність запропонованої технології для подальшої інтеграції у виробничу практику та подальшого масштабування в умовах малого та середнього підприємництва.

1.3 Розрахунок режимів та технологічних параметрів

1.3.1 Вихідні дані

Проведення розрахунків у рамках адитивного дугового виробництва потребує точного визначення вихідних параметрів, які впливають на геометрію шару, якість наплавлення, тепловкладення, витрату матеріалів та захисного газу. На підставі проведених експериментів, технологічних рекомендацій виробника обладнання та попередньо відпрацьованих режимів було визначено основні вихідні дані, які використовуються у подальших обчисленнях.

Параметри процесу були обрані експериментально, з урахуванням товщини стінки виробу та бажаної висоти шару. Середній діаметр друкованої

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деталі становив близько 159 мм (середнє значення між внутрішнім і зовнішнім діаметром), що відповідало довжині одного кола $L \approx 500$ мм. Наплавлення виконувалося пошарово, із загальною кількістю 20 шарів, кожен з яких мав орієнтовну висоту 1,5 мм. Загальна висота виробу після завершення друку – 30 мм. Вхідні дані для розрахунків наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Вхідні дані для розрахунків

Швидкість подачі дроту, $\text{м} \cdot \text{хв}^{-1}$		2,8
Сила струму, А	I	130
Напруга, В	U	18,5
Швидкість переміщення пальника, $\text{мм} \cdot \text{с}^{-1}$		50
Амплітуда коливань, мм		9
Теплоємність, $\text{Дж} / \text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$	ср	$4,8 \cdot 10^6$
Густина сталі, $\text{г} / \text{см}^3$	ρ	7,85
Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ\text{C}$	λ	41,9
Коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Дж} / \text{сек} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	α	60
Коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2 / \text{сек}$	a	$8,7 \cdot 10^{-6}$
Коефіцієнт корисної дії	η	0,85
Число Непера (основа натуральних логарифмів)	e	2,718
Температура плавлення, $^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл}}$	1480
Початкова температура, $^\circ\text{C}$	T_0	20
Товщина пластин, які зварюються, м	δ	0,01

Маса дроту на один шар, об'єм наплавленого металу, лінійна енергія зварювання, витрати електроенергії та газу будуть обчислюватися на підставі вищезазначених значень.

1.3.2 Розрахунок подачі дроту та об'єму наплавлення

З метою оцінки витрат матеріалу та точного визначення маси наплавленого металу для формування циліндричного виробу було проведено розрахунок об'єму наплавлення та відповідної подачі зварювального дроту [19], [20]. Дані розрахунки базуються на геометричних характеристиках наплавленого валика, швидкості подачі дроту, кількості шарів, а також враховують вплив коливань пальника на реальні габарити валика.

У процесі WAAM-друку відбувається поступове формування виробу шар за шаром. Кожен шар являє собою наплавлений валик із певною шириною та висотою. У даному випадку циліндр складається з 20 наплавлених шарів, що укладаються по замкненій траєкторії діаметром 148 мм.

Форма поперечного перерізу валика наближено приймається прямокутною, що дозволяє спростити обчислення площі. При цьому враховується, що через синусоїдальні коливання пальника ширина шару в реальних умовах більша за теоретичне значення. За результатами спостережень та вимірів встановлено:

Ширина шару: $b=11,5$ мм; висота шару: $h=1,5$ мм.

Площа поперечного перерізу одного шару визначається за формулою (1.1):

$$A = h \cdot b \quad (1.1)$$

$$A = 1,5 \text{ мм} \cdot 11,5 \text{ мм} = 20,7 \text{ мм}^2 = 20,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Оскільки кожен шар укладається по колу, його довжина дорівнює довжині кола з діаметром 148 мм визначаємо за формулою (1.2):

$$L = \pi \cdot D_{\text{сер}} \quad (1.2)$$

$$L = 3,14 \cdot 148 \text{ мм} = 0,464 \text{ м}$$

Об'єм одного шару визначається як добуток площі поперечного перерізу на довжину шару (1.3):

$$V_1 = A \cdot L \quad (1.3)$$

$$V_1 = 20,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 0,464 \text{ м} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Загальний об'єм наплавленого металу

Оскільки шарів у нашому виробі 20, об'єм наплавленого металу розраховується за формулою (1.4):

$$V_{\text{заг}} = V_1 \cdot 20 \quad (1.4)$$
$$V_{\text{заг}} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot 20 = 1,92 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Маса наплавленого металу

Для визначення маси використовується густина сталі ρ (1.5):

$$m = V_{\text{заг}} \cdot \rho \quad (1.5)$$
$$m = 1,92 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 1,51 \text{ кг}$$

Отже, для побудови одного циліндричного виробу з 20 шарів витрачається приблизно 1,5 кг зварювального металу.

Для розрахунку подачі необхідного об'єму зварювального дроту, що подається за одиницю часу, використаємо геометричні характеристики дроту:

Діаметр дроту, $d=1,0 \text{ мм}$

Площа поперечного перерізу дроту знаходиться за формулою (1.6):

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (1.6)$$
$$A = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 0,785 \text{ мм}^2 = 0,785 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Швидкість подачі дроту: $v_{\text{дроту}} = 2,8 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$

Тоді об'єм дроту, що подається за хвилину (1.7):

$$V = A \cdot v_{\text{дроту}} \quad (1.7)$$
$$V = 0,785 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 2,8 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1} = 2,198 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$$

Маса дроту, що подається за хвилину знаходиться за формулою (1.8):

$$m = V_{\text{шару}} \cdot \rho \quad (1.8)$$
$$m = 2,198 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot 7850 = 1,035 \text{ кг/хв}$$

1.3.3 Розрахунок тепловкладення

Оцінка тепловкладення є одним із ключових етапів при аналізі процесу зварювання, особливо в адитивному виробництві, де надлишкове нагрівання може призвести до деформацій, зниження міцності або структурних дефектів у виробі. У випадку використання технології СМТ, тепловкладення істотно зменшується порівняно з класичними режимами MAG/MIG завдяки імпульсному режиму переносу металу та зниженій середній тепловій потужності. Для розрахунку розмірів зварювальної ванни (глибини проплавлення, ширини, довжини ванни, площі та об'єму) було використано емпіричну модель тепловіддачі дугового зварювання [21].

Для розрахунку лінійної енергії використовується загальновідома формула (1.9):

$$Q = I \cdot U \cdot \eta \quad (1.9)$$

Підставляємо значення з попереднього підрозділу: $U=18,5$ В; $I=130$ А; $\eta=0,85$.

$$Q = 18,5 \cdot 130 \cdot 0,85 = 2120 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}$$

Тепловкладення визначається відношенням теплової потужності до швидкості подачі (1.10):

$$Q_{\text{п}} = \frac{Q}{v} \quad (1.10)$$

$$Q_{\text{п}} = \frac{2120}{0,00694} = 305,3 \text{ кДж/м}$$

Розрахунок глибини проплавлення (1.11):

$$h_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{2q}{\pi \cdot e \cdot \vartheta \cdot c_p \cdot \Delta T}} \quad (1.11)$$

$$h_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2120}{3,14 \cdot 2,718 \cdot 0,00694 \cdot 4,8 \cdot 10^6 \cdot 1460}} = 5,2 \text{ мм}$$

Розрахунок довжини зони тепловпливу (ванни) (1.12):

$$L_{\text{т}} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \Delta T} \quad (1.12)$$

$$L_T = \frac{2120}{2 \cdot 3,14 \cdot 41,9 \cdot 1460} = 4,9 \text{ мм}$$

Розрахунок ширини зварювальної ванни (1.13):

$$B = \sqrt{\frac{8q}{\pi \cdot e \cdot \vartheta \cdot c_p \cdot \Delta T}} \quad (1.13)$$

$$B = \sqrt{\frac{8 \cdot 2120}{3,14 \cdot 2,718 \cdot 0,00694 \cdot 4,8 \cdot 10^6 \cdot 1460}} = 9,7 \text{ мм}$$

Розрахунок площі проплавлення (1.14)

$$F_{\text{пр}} = \frac{0,368 \cdot q}{\vartheta \cdot c_p \cdot \Delta T} \quad (1.14)$$

$$F_{\text{пр}} = \frac{0,368 \cdot 2120}{0,00694 \cdot 4,8 \cdot 10^6 \cdot 1460} = 39 \text{ мм}^2$$

Розрахунок об'єму зварювальної ванни (1.15):

$$V = \frac{q^2}{8 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c_p \cdot \vartheta \cdot \Delta T^2} \quad (1.15)$$

$$V = \frac{(2120)^2}{8 \cdot 3,14 \cdot 41,9 \cdot 4,8 \cdot 10^6 \cdot 0,00694 \cdot (1460)^2} = 132 \text{ мм}^3$$

У результаті розрахунків тепловкладення для режиму СМТ було визначено, що значення тепловкладення для нашого процесу становить близько 305 кДж/м.

Такі параметри тепловкладення забезпечують мінімальне теплове деформування виробу та сприяють формуванню стабільного валу наплавленого металу з чіткими границями зони проплавлення. Це особливо важливо при виготовленні фланців та інших з'єднувальних деталей, які потребують геометричної точності та герметичності після наплавлення.

Окрім цього, отримані значення глибини проплавлення, ширини зони термічного впливу та об'єму зварювальної ванни повністю відповідають експериментальним спостереженням та дозволяють гарантувати однорідність наплавлення при подальшому нашаруванні 20 шарів. Це свідчить про коректність обраних параметрів і доцільність їх використання при реальному впровадженні процесу в умовах виробництва.

1.3.4 Аналіз наплавлення

Процес адитивного дугового наплавлення відбувається шляхом багатошарового нанесення металевого дроту в умовах керованого тепловкладення. В даній роботі для формування виробу застосовувався процес MIG-зварювання, при якому наплавлення здійснювалось шар за шаром, із постійною висотою підйому по осі Z та запрограмованими коливаннями пальника.

Загальна висота виробу становила 30 мм, яка формувалася шляхом послідовного нанесення 20 окремих шарів по циліндричній траєкторії. Кожен шар мав сталу геометрію та однакові параметри подачі, що дозволило забезпечити рівномірність структури та форму деталі.

У таблиці 1.4 наведені основні параметри, які використовувались під час побудови кожного шару. Для забезпечення стабільності ширини валика використовувались синусоїдальні коливання пальника з амплітудою 9 мм. Висота програмного підйому після кожного шару складала 1,5 мм, що дозволяло уникнути "набухання" або перехресного перекриття шарів.

Таблиця 1.4 – Параметри наплавлення по шарах

Номер шару	Запрограмоване підняття пальника	Приріст висоти деталі за шар, мм	Запрограмована ширина коливань	Ширина шару, мм	Швидкість подачі дроту мм/хв	Швидкість лінійних коливань
1	1,5	1,5	9	10,5	2,8	50
2	1,5	1,5	9	10,5	2,8	50
3	1,5	1,5	9	10,5	2,8	50
4	1,5	1,5	9	10,5	2,8	50
5	1,5	1,5	9	10,5	2,8	50
10	1,5	1,5	9	10,5	2,8	50
15	1,5	1,5	9	10,5	2,8	50
20	1,5	1,5	9	10,5	2,8	50

Висновок по розділу

Було виконано комплексне технологічне обґрунтування процесу дугового дрогового адитивного наплавлення методом MIG у захисному газі. На основі аналізу параметрів зварювання та результатів експериментів проведено низку теоретичних розрахунків, що дозволили встановити ключові закономірності формування зварювальної ванни, наплавленого шару та геометрії виробу в цілому.

У результаті виконаних розрахунків встановлено, що при обраному режимі зварювання (струм 130 А, напруга 18,5 В, швидкість переміщення 25 м/год), теплова потужність дуги становила близько 2120 Дж/с, а тепловкладення – понад 305 кДж/м, що забезпечувало ефективне формування валиків без надмірного перегріву металу. Глибина проплавлення досягала 5,2 мм, ширина шва – 9,7 мм, а об'єм зварювальної ванни в середньому становив 132 мм³.

На основі розрахунків подачі дроту було визначено, що для формування одного виробу висотою 20 шарів і сумарною висотою 30 мм необхідно приблизно 1,5 кг зварювального дроту. Геометрія кожного шару залишалась сталою завдяки постійним налаштуванням коливань пальника, з амплітудою 9 мм, що дозволило забезпечити рівномірний розподіл тепла та сталість ширини валика (10,5 мм).

Тож, виконані розрахунки підтверджують придатність обраного режиму MIG-друку для побудови товстостінних циліндричних виробів і слугують базою для подальшої оптимізації технології та розробки режимів друку виробів складнішої форми.

					3С11.01.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

2 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП – ПРОЄКТУ

2.1 Опис ідеї проєкту

Ідея стартап – проєкту полягає у створенні технологічного рішення для адитивного виготовлення та ремонту товстостінних сталевих виробів шляхом пошарового дугового наплавлення з використанням процесу СМТ (таблиця 2.1). Це рішення ґрунтується на використанні серійного зварювального обладнання та роботизованої системи з числовим керуванням, що дозволяє здійснювати високоточне формування об'єму металу без необхідності лиття, механічної обробки або застосування спеціальних форм.

Таблиця 2.1 – Опис ідеї проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Застосування методу дугового адитивного наплавлення MIG–СМТ зі зміщенням пальника для виготовлення товстостінних фланців з вуглецевої сталі	Ремонтні майстерні підприємств аграрного сектору (елеватори, насосні станції, сільгосптехніка)	Оперативне відновлення працездатності без заміни вузлів, зниження простоїв та витрат на імпортні деталі
	Енергетичні підприємства (ТЕЦ, ГЕС, ТЕС, котельні)	Виготовлення нестандартних фланців, які неможливо замовити в серійному виробництві; висока якість зварювання
	Нафтогазова і хімічна промисловість	Відповідність вимогам до герметичності, довговічності, можливість виконання швів, які витримують високі температури та агресивні середовища

					ЗС11.01.00.000 ПЗ			
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розроблення стартап – проєкту			
Розроб.	Борщевич І.І.							
Перевір.	Глуценко Я.І.							
Н. контр.	Лисак В.В.							
Затверд.	Квасницький В.В.							
						Літ.	Арк.	Аркушів
							40	66
						КПІ ім. Ігоря Сікорського НН ІМЗ ім. Є.О. Патона		

Унікальність ідеї полягає в тому, що вона поєднує переваги дротового адитивного виробництва з сучасною низькотепловою технологією зварювання СМТ, що забезпечує стабільність геометрії та якість шва при мінімальних деформаціях.

Стартап спрямований на впровадження такого рішення як готового функціонального модуля (установки), придатного до використання в умовах малого або середнього підприємства чи ремонтного цеху. Систему можна адаптувати під конкретні геометричні параметри замовника та оперативно змінювати конфігурацію виробу за допомогою редагування керуючої програми.

Запропоноване рішення вирішує одразу кілька виробничих проблем: знижує вартість деталей, прискорює цикл їх виготовлення, дозволяє працювати із дрібними серіями або одиничними замовленнями без втрати якості. Особливо актуальним є цей підхід для секторів, де часто використовуються нестандартні фланцеві з'єднання: в енергетиці, агропромисловості, хімічній та нафтогазовій промисловості.

Таким чином, ідея стартап – проєкту полягає у трансформації принципів класичного зварювання на інноваційний рівень цифрового, адаптивного та економічного виробництва, здатного замінити традиційні методи отримання деталей, які потребують значних часових і матеріальних витрат.

Для визначення конкурентоспроможності проєкту проведено порівняльний аналіз ключових характеристик стартап–рішення з відомими виробниками зварювального та адитивного обладнання, які вже присутні на ринку. У якості аналогів було розглянуто продукцію таких компаній, як Fronius, Lincoln Electric та ESAB, що представляють найбільш впізнавані системи для зварювання та промислового наплавлення [22], [23], [24].

У таблиці 2.2 наведено узагальнене порівняння за низкою техніко–економічних показників, що мають ключове значення для розробки і впровадження інноваційного рішення.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Таблиця 2.2 – Сильні, слабкі, та нейтральні сторони проєкту

№ п/п	Техніко – економічні характеристики	Мій проєкт	Fronius	Lincoln Electric	ESA B	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	Можливість багат шарового наплавлення без дефектів	Висока	Середня	Середня	Середня			+
2	Якість шва при товстостінному друці	Висока	Висока	Висока	Середня		+	
3	Енергоспоживання/економічність	Низьке	Високе	Високе	Високе	+		
4	Гнучкість програмування траєкторії руху	Висока	Середня	Висока	Середня			+

Проект вирізняється високою адаптивністю, енергоефективністю та можливістю локалізованого використання без потреби у складному обладнанні. На відміну від систем загального призначення, запропоноване рішення спеціалізується на виготовленні деталей з об'ємною товщиною стінки, що дозволяє зменшити кількість дефектів у процесі наплавлення.

Сильними сторонами проєкту є:

- здатність працювати з нестандартними формами без підготовки спеціальної оснастки;
- висока точність формування валика;
- низький рівень споживання енергії завдяки СМТ– процесу;
- програмована система коливань пальника, що забезпечує рівномірність швів.

Серед слабких місць можна відзначити відсутність широкого промислового впровадження, що зумовлює потребу у демонстраційних проєктах і апробації в умовах виробництва.

2.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Аудит ідеї з погляду її реалізації показує, що всі ключові елементи, необхідні для впровадження, є доступними на ринку (таблиця 2.3). Джерело живлення з режимом СМТ, роботизована система переміщення пальника, механізм обертання заготовки або стіл з автоматизованим підйомом – це стандартні компоненти, що використовуються у зварювальному виробництві, і можуть бути адаптовані під завдання стартапу без необхідності глибокої інженерної розробки з нуля.

Таблиця 2.3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Опис ідеї проєкту	Технологія реалізації ідеї проєкту	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Застосування методу дугового дротового адитивного наплавлення зі зміщенням зони дії пальника для виготовлення товстостінних циліндричних виробів	Дугове наплавлення MIG – СМТ з активним коливальним рухом пальника	Існують експериментальні та науково–дослідні установки; промислова реалізація з обертанням і зміщенням рідкісна	Розробку можна вважати інноваційною, але патентно чистою для застосування в індивідуальних виробництвах
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: Дугове адитивне виробництво товстостінних елементів з низьковуглецевих сталей				

Система управління може базуватись як на промисловому ПЛК, так і на відкритих програмованих платформах (Arduino, Raspberry Pi), що дозволяє значно здешевити прототип і прискорити його запуск. Для формування траєкторії руху пальника використовується заздалегідь підготовлена програма, яку можна створити у спеціалізованому ПЗ, наприклад RoboDK або KUKA Sim, або навіть у середовищі G – code з відповідною адаптацією. Можливість швидкої зміни геометрії майбутнього виробу досягається саме завдяки цьому програмному компоненту.

З точки зору технологічних обмежень, головним фактором є дотримання режимів охолодження та оптимального темпу нанесення валика. В умовах багатошарового наплавлення це вимагає стабільності параметрів струму, напруги та швидкості подачі дроту, що реалізується за допомогою сучасних зварювальних джерел із цифровим контролем.

Аналіз доступності ресурсів та матеріалів підтверджує, що сталеві зварювальні дротова проволочка марок S355 широко представлена на українському ринку. Захисні гази також не є дефіцитними, а вартість експлуатації системи значно нижча, ніж у випадку з лазерними чи електронно – променевими аналогами.

Таким чином, технологічний аудит підтверджує реальну здійсненність ідеї в умовах малого підприємства. Проєкт має високий ступінь інтеграційної готовності: всі компоненти системи вже існують у промисловому або лабораторному виконанні, і завдання стартапу полягає не у створенні нової технології, а у її доцільній конфігурації, адаптації та запуску в конкретному сегменті ринку.

2.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап–проєкту

Для забезпечення успішного запуску стартап–проєкту було проведено попередній аналіз потенційного ринку, який дозволяє оцінити його ємність, структуру, динаміку та основні бар'єри входу наведено в таблиці 2.4.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						44
Змн .	Арк .	№ докум .	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Основні ринкові показники для стартап проєкту

№ з/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Від 400 млн до 600 млн грн/рік (сукупний ринок зварювального обладнання, послуг наплавлення та відновлення деталей)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Технічні регламенти, сертифікація швів, потреба у кваліфікованих кадрах, витрати на технічну апробацію
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ EN ISO 15614–1, вимоги до зварних з'єднань фланців, сертифікація швів за технічними умовами галузі
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	Від 20 % до 30 % для ремонтновиробничих підприємств, що працюють з дрібносерійними або індивідуальними замовленнями

У першу чергу, слід відзначити, що ринок реалізації зварювального обладнання, сервісів з наплавлення та відновлення деталей є досить вузькоспеціалізованим, однак стабільним. За оціночними даними, на ньому працює від 4 до 6 основних гравців, серед яких – постачальники устаткування, імпортери комплектуючих і спеціалізовані ремонтні підприємства. Наявність таких гравців свідчить про обмежену, але чітко структуровану конкуренцію.

Загальний обсяг продажів у цьому сегменті оцінюється в межах від 400 млн грн до 600 млн грн на рік, з урахуванням комплексного ринку: обладнання, витратних матеріалів, послуг з відновлення та малосерійного виготовлення деталей з'єднувального типу (фланці, втулки, адаптери тощо). Це створює фінансово привабливі умови для впровадження нового, адаптивного та менш затратного технологічного рішення.

Варто підкреслити, що динаміка ринку позитивна – щорічне зростання попиту становить від 15 % до 20 %, зокрема завдяки актуальності імпортозаміщення, старінню основних виробничих фондів та підвищенню вимог до швидкості виготовлення нестандартних компонентів. Сучасні підприємства зацікавлені у зменшенні логістичних витрат, що збільшує попит на локальні технологічні рішення з гнучким форматом виробництва.

Водночас ринок має низку обмежень для входу, які слід враховувати в процесі реалізації стартапу. Зокрема, це потреба у сертифікації зварних швів згідно з галузевими стандартами (зокрема, ДСТУ EN ISO 15614–1), наявність жорстких вимог до якості з'єднань, а також дефіцит персоналу з відповідною кваліфікацією для обслуговування автоматизованих установок. Всі ці фактори є керованими за умови правильного вибору стратегічного партнера та належної демонстрації працездатності рішення [25].

Окрему увагу слід звернути на економічні параметри галузі. Середня рентабельність у секторі вузькоспеціалізованих ремонтно – виробничих підприємств, що працюють з дрібносерійними замовленнями, становить від 20 % до 30 %. Це підтверджує високу інвестиційну привабливість проєкту, а також можливість швидкої окупності вкладень за умов налагодженого виробничого процесу.

Таким чином, проведений аналіз ринкових можливостей свідчить про наявність обґрунтованого попиту на запропоноване рішення, достатню ринкову ємність, помірний рівень конкуренції та реальні умови для масштабування проєкту. Підготовлений ринок, разом із технологічною простотою реалізації та можливістю гнучкого виробництва, створюють сприятливе середовище для виходу стартапу на комерційний рівень. У таблиці 2.5 систематизовано основні

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

групи споживачів, до яких може бути спрямована розроблена технологія дугового дротового наплавлення.

Таблиця 2.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап – проєкту

№ з/п	Основна потреба клієнта	Цільовий сегмент користувачів	Поведінкові особливості та фактори прийняття рішень	Технічні/якісні вимоги до продукту
1	Швидке виготовлення або ремонт з'єднувальних деталей	Енергетичні підприємства (ТЕЦ, ГЕС, АЕС)	Орієнтація на скорочення простоїв, потреба у локальному ремонті	Надійність, герметичність, стійкість до температур
2	Виробництво нестандартних фланців, втулок, кілець	Аграрні підприємства, елеватори, ремонтні майстерні	Пошук доступних рішень на місцях, обмеження за кошторисом	Простота монтажу, точність геометрії
3	Заміна імпорتنих компонентів, адаптація під власні умови	Нафтогазовий сектор, хімічна промисловість	Орієнтація на якість, сертифікацію, підрядників із досвідом	Сертифіковані шви, матеріали, довговічність
4	Оснащення навчального процесу або демонстрацій	Освітні установи, ПТНЗ, центри зварювання	Необхідність сучасного обладнання для підготовки кадрів	Безпечність, візуалізація процесу, доступність

Для успішного виведення стартап – продукту на ринок необхідно чітко визначити потенційні цільові групи клієнтів, їхні потреби, поведінкові особливості та вимоги до кінцевого продукту. Першу цільову категорію становлять енергетичні підприємства – теплоелектроцентралі, котельні, гідроелектростанції та тепломережі.

Для них критично важливим є забезпечення безперервної роботи обладнання, а отже – можливість швидкого виготовлення або відновлення фланців, з'єднувальних втулок і корпусних деталей. Такі підприємства зазвичай мають жорсткі вимоги до якості швів, герметичності та стійкості до високих температур, що цілком узгоджується з можливостями запропонованої технології.

Другою групою є аграрні підприємства, зокрема елеватори, насосні станції, машинно–тракторні станції. У цьому сегменті часто виникає потреба у виготовленні нестандартних деталей у стислі терміни та за помірну ціну. Такі клієнти зазвичай працюють з обмеженим бюджетом, але високо цінують оперативність і функціональність рішення. Застосування MIG–СМТ дозволяє уникнути дорогих механічних операцій і виготовити потрібну деталь без залучення зовнішніх постачальників.

Третім ключовим напрямком є нафтогазова та хімічна промисловість, де використовується обладнання, що працює в агресивних середовищах і під високим тиском. Для таких клієнтів критично важливою є довговічність, відповідність стандартам (ДСТУ, ISO), а також можливість документального підтвердження якості швів. Стартап – продукт може бути адаптований до цих умов шляхом налаштування режимів наплавлення та застосування відповідних витратних матеріалів.

Окремо варто виокремити навчальні заклади та освітні центри, які потребують сучасного обладнання для підготовки фахівців зі зварювання, робототехніки та адитивного виробництва. Для них важливою є візуалізація процесу, доступність інтерфейсу керування, а також безпечність роботи.

Таким чином, клієнтська база є доволі широкою та різноманітною. Це створює передумови для поетапного виходу на ринок – від локальних сервісних підприємств до галузевих гравців загальнонаціонального масштабу.

SWOT – аналіз дозволяє комплексно оцінити внутрішні та зовнішні чинники, що впливають на перспективи реалізації стартап – проекту (таблиця 2.6.)

Він дає змогу виявити сильні й слабкі сторони ідеї, а також можливості, які відкриває ринок, і ризики, з якими може зіткнутися команда проекту на шляху його реалізації.

Таблиця 2.6 – SWOT аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: - Можливість багат шарового наплавлення без дефектів завдяки зниженому тепловкладенню (MIG–CMT). - Простота інтеграції на базі стандартного зварювального обладнання (Fronius, ABB, ін.). - Висока якість шва (стійка геометрія, відсутність пор і тріщин). - Потенціал для дрібносерійного, індивідуального та ремонтного виробництва.	Слабкі сторони: - Середня швидкість процесу в порівнянні з повністю автоматизованими системами. - Обмежений рівень автоматизації (на прототипному етапі). - Потреба у первинній сертифікації з'єднань для критичних об'єктів. - Відсутність досвіду у великомасштабному впровадженні подібних систем в Україні.
Можливості: - Зростання попиту на оперативне відновлення деталей трубопроводів, фланців та з'єднань у промисловості. - Імпортозаміщення та локалізація виробництва у відповідь на логістичні виклики. - Відсутність прямих аналогів у сегменті дрібносерійного WAAM – виробництва в Україні.	Загрози: - Жорсткі вимоги до зварних з'єднань та їх документального підтвердження (ДСТУ/ISO). - Консервативність галузі: перевага перевірених технологій. - Конкуренція з боку великих іноземних компаній, що пропонують автоматизовані зварювальні комплекси.

Однією з найважливіших сильних сторін запропонованої технології є її гнучкість та адаптивність. На відміну від традиційних методів виробництва сталевих деталей, що потребують значної кількості механічної обробки, проєкт дає змогу швидко виготовляти товстостінні вироби за індивідуальними параметрами. Процес CMT дозволяє здійснювати якісне наплавлення з мінімальним тепловкладенням, що є вирішальним для формування рівномірного, бездефектного шва. Додатково, застосування промислового робота забезпечує точний контроль геометрії, що зменшує залежність від людського фактора.

Проте існують і слабкі сторони, зокрема відсутність широкої практики застосування MIG–CMT саме у сфері WAAM в Україні. Через це потенційним клієнтам може бути складно оцінити переваги технології без демонстраційного прикладу. Іншою слабкою стороною є потреба у підготовці кваліфікованого персоналу, здатного програмувати робота та контролювати процес. Також виникає питання стандартизації: не всі замовники можуть приймати зварні фланці, виготовлені без механічної обробки, без підтвердження відповідних технічних стандартів.

Щодо ринкових можливостей, то проєкт має значний потенціал. У багатьох галузях – особливо в агропромисловості, енергетиці, транспортуванні нафти і газу – зростає попит на швидке локальне виготовлення металевих з'єднувальних елементів, які зазвичай потребують довготривалого очікування постачання. Крім того, в умовах обмеженого імпорту та зростання цін на серійні металеві вироби стартап може запропонувати доступну альтернативу.

Поява подібної технології також відкриває можливості для співпраці з навчальними закладами, які потребують сучасних рішень для підготовки фахівців зі зварювання та автоматизованого виробництва.

Серед зовнішніх загроз можна виокремити конкуренцію з боку міжнародних компаній, які вже мають досвід у сфері промислового 3D – друку металами. Також існують регуляторні ризики, пов'язані з сертифікацією продукції та проходженням технічного контролю, особливо для деталей, що працюють під тиском або у складних умовах. Необхідність валідації процесу і відповідність ДСТУ чи ISO вимогам можуть уповільнити вихід на ринок. Ще одним фактором є залежність від вартості та стабільності постачання зварювального дроту, захисних газів та комплектуючих.

Висновок по розділу

У цьому розділі було проведено комплексну оцінку технічної та економічної доцільності реалізації стартап–проєкту, що передбачає впровадження технології MIG – CMT адитивного наплавлення для виготовлення

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						50
Змн .	Арк .	№ докум .	Підпис	Дата		

та ремонту товстостінних сталевих деталей. Запропонована технологія відзначається високим рівнем гнучкості, енергоефективності та здатністю забезпечувати високу якість зварного шва без потреби у складній механічній обробці.

У межах технологічного аудиту підтверджено, що всі компоненти системи є доступними на ринку, а їх інтеграція не потребує розробки унікальних елементів. Проєкт орієнтований на мале виробництво, ремонтні підприємства та галузі, де критичним є швидке виготовлення або відновлення з'єднувальних вузлів. Аналіз ринкових можливостей показав наявність незаповненої ніші, де запропоноване рішення може успішно конкурувати з традиційними методами лиття чи механічної обробки.

SWOT – аналіз дозволив виявити ключові сильні сторони проєкту, зокрема: адаптивність, простоту реалізації, економічність і актуальність для ринку. Разом з тим було окреслено і потенційні ризики – сертифікаційні вимоги, конкуренцію з боку міжнародних гравців та необхідність у навчанні персоналу. У відповідь на ці виклики сформовано комплексну стратегію реалізації, що передбачає пілотне впровадження, демонстрацію готових виробів і поступове масштабування.

Загалом розробка стартап – проєкту підтвердила його інженерну обґрунтованість, практичну доцільність та економічну перспективність у сучасних умовах. Проєкт має високий потенціал до впровадження в промислову практику та подальшого розвитку як частина національного імпортозаміщення й цифровізації виробничих процесів.

З ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Під час виконання зварювальних робіт у рамках технології WAAM, працівники перебувають під впливом різних шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ). Їх дія може негативно впливати на організм людини як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі. Для забезпечення безпечної експлуатації обладнання та організації робочого процесу необхідно проаналізувати всі можливі фактори ризику й передбачити відповідні заходи захисту.

Одним із основних небезпечних чинників є вплив електричного струму, що виникає внаслідок створення електричної дуги між дротом і металом. У разі порушення цілісності ізоляції кабелів або заземлення, а також у вологих умовах існує висока ймовірність ураження електричним струмом. Відповідно до вимог НПА ОП 40.1–1.32–01, усі токоведучі елементи повинні бути надійно ізольовані, а корпуси зварювального обладнання – заземлені [26].

Іншим суттєвим чинником є інтенсивне світлове та ультрафіолетове випромінювання від зварювальної дуги. Воно може спричинити ураження очей (електроофтальмію), опіки шкіри та подразнення слизових оболонок. Потужне випромінювання вимагає застосування світлофільтрів, зварювальних щитків та повного екранування робочої зони. Згідно з ДСТУ EN 169:2017, для захисту органів зору використовуються світлофільтри з оптичним класом не нижче 10 DIN [27].

У процесі наплавлення відбувається виділення аерозолів металів та шкідливих газів, серед яких найнебезпечнішими є оксиди азоту, озон, марганець, діоксиди вуглецю.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ		
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Охорона праці		
Розроб.	Борщевич І.І.						
Перевір.	Левченко О.Г.						
Н. контр.	Лисак В.В.						
Затверд.	Квасницький В.В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського НН ІМЗ ім. Є.О. Патона		
					Літ.	Арк.	Аркушів
						52	66

При довготривалому вдиханні ці речовини викликають захворювання органів дихання, алергічні реакції, а в деяких випадках – системні інтоксикації. Наприклад, перевищення гранично допустимої концентрації марганцю (ГДК для марганцю – 0,3 мг/м³) може викликати хронічні зміни центральної нервової системи. Тому використання ефективної місцевої витяжної вентиляції є обов’язковим, згідно з вимогами ДСН 3.3.6.042–99 [28].

Окремої уваги потребує тепловий вплив, який створюється як безпосередньо дугою, так і розігрітими поверхнями. Температура в зоні горіння дуги може сягати 3000 °С, а температура поверхонь наплавленого металу – понад 500–600 °С. Контакт із гарячими деталями або розплавом спричиняє термічні опіки. Це вимагає застосування термостійкого спецодягу, зокрема рукавиць (краг), фартухів і захисного взуття. Таблиця 3.1 [29].

Таблиця 3.1 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при зварюванні

ШНВФ для наплавлення в Аргоні та СО ₂			Інтенсивність фактора
Шкідливі виробничі фактори	Шкідливі речовини		XX
	Випромінювання в оптичному діапазоні	Ультрафіолетове	X
		Видиме	XX
		Інфрачервона	X
	Електромагнітні поля		-
	Магнітні поля		-
	Іонізуючі випромінювання		-
	Шум		-
	Ультразвук		-
	Статичне навантаження руху		X
Небезпечні виробничі фактори	Електричний струм		XX
	Іскри, бризки і види розплавленого металу		-
	Механізми і вироби, що рухаються		X
	Системи, які знаходяться під тиском, що не дорівнює атмосферному		X

Примітки: XX – інтенсивний фактор; X – помірний фактор; (-) – незначний фактор чи його відсутність.

Механічні травмонебезпечні фактори пов'язані з наявністю рухомих елементів роботизованої системи: маніпулятор, подавач дроту, поворотний стіл. Неправильне програмування або відсутність огорожі може призвести до зіткнення з роботом, затискання або травмування. Всі рухомі частини мають бути огорожені або недоступні під час роботи установки, а система керування повинна мати функції екстреної зупинки.

Ще одним поширеним шкідливим фактором є шум, що утворюється під час роботи джерела живлення, приводу подачі дроту та вентиляції. Рівень шуму може сягати понад 80 дБ, що при тривалому впливі спричиняє втому, зниження концентрації уваги та з часом – приглухуватість. Згідно з ДСН 3.3.6.037–99, допустимий рівень шуму для тривалої роботи становить не більше 70 дБ, тому при перевищенні цього значення необхідно використовувати засоби індивідуального захисту слуху (беруші або навушники) [30].

Крім того, слід враховувати фактор психофізіологічного навантаження на оператора, який має постійно контролювати параметри процесу, слідкувати за стабільністю дуги, температурним режимом і якістю наплавлення. Перенапруження, стрес, висока відповідальність за результат – усе це створює додаткові ризики.

Загалом, у процесі WAAM – друку працівники можуть піддаватись впливу до 8–10 шкідливих або небезпечних факторів одночасно. Для безпечного виконання робіт необхідно проводити постійний моніторинг середовища, контроль за станом вентиляції, електрозахисту, справністю систем огороження та наявністю засобів індивідуального захисту.

3.2 Нормативні вимоги безпеки та гігієни праці

Організація безпечних умов праці при виконанні дугового зварювання, передбачає суворе дотримання чинних законодавчих та нормативно-технічних

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

вимог у сфері охорони праці. Усі роботи мають здійснюватися відповідно до вимог державних стандартів, правил та інструкцій, спрямованих на збереження здоров'я працівників та попередження нещасних випадків.

Основним нормативним документом, що регламентує безпечне виконання зварювальних робіт в Україні, є НПАОП 28.52–1.31–13 – "Правила охорони праці під час виконання електрозварювальних робіт" [31]. Цей нормативний акт встановлює вимоги до організації робочих місць, порядку підключення та обслуговування зварювального обладнання, а також до використання засобів індивідуального та колективного захисту. Вимоги є обов'язковими для виконання всіма суб'єктами господарювання, що займаються зварювальним виробництвом.

Вимоги до освітлення зварювального поста визначаються згідно з ДБН В.2.5–28:2018, де зазначено, що рівень освітленості повинен становити не менше 300 лк при зварюванні середньої точності, а джерела світла повинні бути розміщені так, щоб не створювати прямих відблисків і сліпучої дії на працівника [30]. Зварювальні пости слід обладнувати як загальним, так і локальним освітленням. При цьому джерела світла мають бути захищені від пилу, бризок та температурного впливу.

Згідно з ДСН 3.3.6.042–99, концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони не повинна перевищувати встановлених гранично допустимих рівнів (ГДР) [32]. З метою запобігання перевищенням ГДР обов'язковим є використання ефективної вентиляції. Для зварювальних дільниць передбачено як загальнообмінну вентиляцію, так і місцеву витяжку безпосередньо з зони утворення диму й газів. Система повинна бути обладнана витяжними зонтами або всмоктуючими модулями, які мають забезпечити видалення не менше 90 % забруднювальних речовин до потрапляння в дихальну зону працівника.

Безпечне використання електрообладнання передбачає виконання вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), які зобов'язують встановлювати захисне заземлення та використовувати автомати захисту від перевантажень та коротких замикань. Згідно з ПУЕ, усі металеві корпуси електроприладів, що можуть потрапити під напругу, мають бути підключені до системи заземлення з

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

опором не більше ніж 4 Ом. У зварювальних кабелях не допускаються механічні пошкодження або оголені ділянки.

Значну увагу слід приділяти інструктажам з охорони праці, які регламентуються відповідно до НПАОП 0.00–4.12–05 [33]. Працівники, що виконують зварювальні роботи або обслуговують зварювальну установку, зобов'язані проходити первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі, що фіксуються в спеціальному журналі. До самостійної роботи допускаються тільки особи, які мають відповідну підготовку, пройшли перевірку знань з охорони праці та отримали відповідне посвідчення.

Важливим елементом безпеки є використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), відповідно до вимог ДСТУ EN 175:2001 (щитки зварника), ДСТУ EN 169:2001 (затемнюючі фільтри), ДСТУ EN 397:2001 (захисні каски) та інших галузевих стандартів. Працівник повинен мати спеціальний одяг з вогнетривкої тканини, краги, взуття з металевим носком, маску з автоматичним затемненням та при потребі – респіратор з фільтрами типу АВЕК для захисту органів дихання [34].

З метою забезпечення ергономіки робочого місця та зменшення фізіологічного навантаження на оператора зварювального процесу, враховуються вимоги ДСТУ 2456–94, які встановлюють допустимі норми просторового планування, розміщення устаткування, висоти робочих поверхонь, сидінь, пультів керування тощо [35]. Важливо, щоб працівник міг змінювати положення тіла, не зазнаючи статичного навантаження, а органи керування були розташовані в зоні комфортної досяжності.

Таким чином, дотримання нормативних вимог у галузі охорони праці, гігієни та техніки безпеки є обов'язковою умовою безпечної експлуатації WAAM–технологій. Виконання зазначених регламентів дозволяє значною мірою знизити рівень професійного ризику, запобігти нещасним випадкам і забезпечити стабільність виробничого процесу.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Реалізація технологічного процесу WAAM вимагає комплексного підходу до інженерного забезпечення безпеки праці. Це особливо актуально у зв'язку з тим, що процес відбувається в зоні дії одразу кількох небезпечних факторів – електричної дуги, високих температур, газового середовища, рухомих механізмів та автоматизованого обладнання. Інженерні рішення відіграють ключову роль у створенні умов, які мінімізують вплив цих факторів на людину.

Одним із найважливіших елементів безпеки є автоматизація процесу зварювання. У проєкті передбачено використання промислового робота, що виконує всі основні операції – позиціонування пальника, керування зварювальним струмом і подачею дроту, а також переміщення інструменту по заданій траєкторії. Завдяки цьому людське втручання в безпосередню зону наплавлення зведене до мінімуму. Оператор не контактує з дугою чи розплавом, а лише контролює параметри з пульта або з безпечної відстані.

Для захисту від електричного струму передбачено застосування ізольованих струмопровідних кабелів, які мають відповідну сертифікацію та перевіряються перед кожним використанням. Усі металеві корпуси обладнання з'єднані із контуром заземлення, що забезпечує швидке відведення струму в разі пробією ізоляції. Додатково встановлюються автоматичні вимикачі з диференційним захистом, які миттєво вимикають живлення у разі витoku струму.

З метою запобігання пошкодженню зору та шкіри ультрафіолетовим і тепловим випромінюванням, навколо зони зварювання встановлено захисні екрани з термостійких прозорих або металевих матеріалів. Вони перешкоджають поширенню світлового випромінювання за межі робочої зони та запобігають випадковому погляду на дугу.

Для усунення шкідливих газів та аерозолів, що утворюються в процесі плавлення металу, на установці реалізовано систему місцевої витяжної вентиляції. Витяжний зонт або гнучкий всмоктуючий рукав встановлюється безпосередньо над зоною зварювання, що дозволяє ефективно видаляти дим і гази до потрапляння в повітря робочої зони. Ця вентиляція підключена до

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фільтрувального блоку, який очищує повітря від шкідливих речовин перед викидом назовні. Додатково забезпечується загальнообмінна вентиляція, яка підтримує постійний приплив свіжого повітря та перешкоджає накопиченню аргону в приміщенні.

З точки зору механічної безпеки, промисловий робот розміщується у відокремленій зоні, обмеженій захисною огорожею. Доступ до неї можливий лише після зупинки роботи через відповідні блокувальні пристрої. На маніпуляторі передбачено кінцеві вимикачі, які не дозволяють вихід інструмента за межі безпечного простору. Програмне забезпечення керування містить функцію аварійного зупинення (Emergency Stop), що дає змогу миттєво припинити всі рухи робота та знеструмити систему [29].

З метою термічного захисту всі гарячі зони позначаються попереджувальними знаками, а розігріті деталі після завершення друку переміщуються на спеціальну охолоджувальну платформу. Робочі поверхні виготовляються з термостійких матеріалів. Інструмент, який контактує з металом, оснащено термоізоляційними вставками.

Також у проєкті реалізовані ергономічні рішення, що підвищують безпеку: правильне розташування пульта керування, мінімізація статичного навантаження на оператора, наявність антиковзкого покриття на підлозі, оптимальне розміщення елементів обслуговування. Робоче місце спроектоване так, щоб забезпечити достатній огляд, легкий доступ до керуючих пристроїв та комфортне положення тіла працівника.

Особливу роль відіграє використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). На зварювальній дільниці обов'язковим є носіння маски зі світлофільтром, захисного костюму з негорючих тканин, термостійких краг, сталевих черевиків та, за потреби, респіратор для захисту органів дихання. Усі ЗІЗ мають бути сертифіковані та відповідати вимогам ЄС і українських ДСТУ.

3.4 Пожежна безпека

Пожежна безпека є критично важливим аспектом при організації зварювальних робіт, особливо в умовах використання електричної дуги, горючих матеріалів, джерел високої температури та газового обладнання. Потенційна пожежонебезпека зумовлена наявністю джерел запалювання (зварювальна дуга, розплавлений метал), легкозаймистих матеріалів (дріт, пакувальні матеріали, іноді – змазка), а також витратних газів (аргон у балонах).

Відповідно до вимог НАПБ Б.03.002–2007 ("Правила пожежної безпеки для об'єктів, на яких проводяться зварювальні роботи"), виробнича дільниця WAAM відноситься до приміщень категорії Г за пожежною небезпекою, що означає наявність твердих горючих речовин у незначній кількості та помірну пожежну навантаженість. Саме тому для зменшення ризику виникнення пожежі на етапі проєктування дільниці передбачено комплекс інженерних та організаційних заходів [29], [36].

По–перше, вогнестійкість і термостійкість матеріалів, що використовуються в межах робочої зони, мають відповідати вимогам ДБН В.1.1–7:2016 ("Пожежна безпека об'єктів будівництва"). Поверхні, що можуть контактувати з бризками металу або дугою, виконуються з негорючих або важкогорючих матеріалів. Обладнання встановлюється на термостійкій основі, яка перешкоджає займанню [37].

По–друге, вся електропроводка виконується у вогнестійкому виконанні, з використанням ізоляційних матеріалів, що не підтримують горіння. Захист мережі забезпечують автоматичні вимикачі, які миттєво реагують на коротке замикання або перевантаження. Пристрій захисного відключення (УЗО) обов'язковий для всіх електричних ланцюгів, підключених до джерела зварювання та вентиляції.

На дільниці обов'язково повинні бути встановлені вогнегасники. Для електроустановок класу Е застосовуються вуглекислотні вогнегасники (ОУ – 5 або ОУ – 8), які не пошкоджують електроніку і ефективні для гасіння кабельних трас. Для загального використання встановлюють порошкові вогнегасники

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(ВП – 5 або ВП – 9), що придатні для гасіння твердих, рідких і газоподібних речовин. Розміщення вогнегасників здійснюється згідно з нормами – не далі ніж 20 м від поста зварювання, у легкодоступному місці, з відповідним маркуванням.

Балони з аргоном або іншими захисними газами розміщуються окремо, у вертикальному положенні, з фіксацією на спеціальних стійках. Категорично заборонено зберігати балони поблизу джерел тепла, електрообладнання, або під дією прямих сонячних променів. Газові комунікації перевіряються на герметичність перед кожним запуском, а всі з'єднання – ущільнені відповідно до технічних норм.

Для запобігання виникненню пожежі в разі аварійної ситуації передбачено встановлення аварійної кнопки відключення живлення, яка одночасно вимикає джерело зварювання, вентиляцію та подачу дроту. Робоче місце оснащено системою пожежної сигналізації, яка реагує на зміну температури або наявність диму. На входних дверях має бути розміщений план евакуації, а всі маршрути до евакуаційних виходів – вільними від перешкод.

Працівники зобов'язані проходити інструктаж з пожежної безпеки, згідно з наказом підприємства. Інструктаж проводиться перед початком роботи, повторно – не рідше одного разу на півроку. Перевірка знань оформлюється відповідним протоколом, а журнал інструктажів зберігається на дільниці. У разі зміни умов праці або обладнання проводиться позаплановий інструктаж.

Таким чином, комплексна реалізація вимог пожежної безпеки у поєднанні з грамотним технічним проектуванням дільниці для ЗД – друку металами дозволяє мінімізувати ризик виникнення пожеж і гарантувати безпечні умови для працівників. Своєчасне технічне обслуговування, контроль за справністю обладнання, наявність первинних засобів пожежогасіння та чітке дотримання інструкцій є обов'язковими умовами стабільної й безпечної роботи.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломної роботи на тему «Дугове адитивне виробництво товстостінних елементів з низьковуглецевих сталей» було вирішено комплексне інженерне, технологічне та стартап – орієнтоване завдання, яке відповідає актуальним викликам сучасного машинобудування, ремонту та виробництва нестандартних з'єднувальних вузлів.

На першому етапі було проведено глибокий аналіз існуючих методів адитивного виробництва металевих деталей. Виявлено, що саме дрогове дугове наплавлення WAAM, зокрема в режимі CMT, є найбільш перспективним для реалізації в умовах обмеженого бюджету, нестандартних вимог і дрібносерійного виробництва. Обґрунтовано вибір режиму CMT, який дозволяє суттєво знизити тепловкладення, забезпечити стабільне перенесення металу та високу якість формування шару при мінімальних деформаціях.

У розділі конструкторсько – технологічної частини було розроблено повну структуру виробничого процесу. Проведено вибір джерела живлення, визначено параметри струму (135 А), подачі дроту ($2,8 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$), швидкості переміщення ($2,4 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$), обґрунтовано використання дроту S355J2 та захисного газу Ar.

У рамках розділу розрахунків було визначено погонну енергію, глибину проплавлення, площу та об'єм зварювальної ванни, з урахуванням впливу коливань пальника. Отримані значення підтвердили, що обрані параметри дозволяють забезпечити якісне формування кожного шару без перегріву чи дефектів наплавлення. Також було перераховано подачу дроту та обсяг наплавленого металу для всіх 20 шарів, що дозволило спрогнозувати витрати матеріалів.

У розділі економічного обґрунтування було запропоновано розглядати реалізацію проєкту у формі стартапу з подальшим впровадженням на ринок локального ремонтного, аграрного, енергетичного та нафтогазового секторів. Проведено повноцінний SWOT – аналіз, оцінено ринкові бар'єри, можливості масштабування, рентабельність і обсяг внутрішнього ринку.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрему увагу приділено розділу з охорони праці, де проаналізовано потенційні виробничі ризики при експлуатації MIG – обладнання, зокрема пов’язані з електробезпекою, шкідливими випарами, УФ – випромінюванням і шумом. Запропоновано заходи технічного й організаційного захисту, засоби індивідуального захисту для оператора, а також умови ефективної вентиляції та розміщення зварювального поста згідно з нормативами.

У результаті дослідження доведено, що обрана технологія є реальною до впровадження, економічно виправданою та технічно обґрунтованою. Вона має високий інноваційний потенціал, відповідає світовим стандартам адитивного виробництва, дозволяє локалізувати складні технології в умовах малого підприємництва.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 7 основних типів адитивного виробництва [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ua.insta3dm.com/info/the-7-main-types-of-additive-manufacturing-f-71989879.html> (дата звернення 25.05.2025) – Назва з екрану.

2. WAAM [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.ramlab.com/resources/waam-101/> (дата звернення 25.05.2025) – Назва з екрану.

3. Зварювальна дуга [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://vseosvita.ua/lesson/zvariuvalna-duha-344546.html> (дата звернення 25.05.2025) – Назва з екрану.

4. Адитивне дугове наплавлення просторових виробів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ela.kpi.ua/items/e04fc9eb-71ba-4013-b8f1-163a7d381884> (дата звернення 26.05.2025) – Назва з екрану.

5. Процес зварювання СМТ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryuvalni-tekhnologiyi/svit-zvaryuvannya/fronius-welding-processes/cmt> (дата звернення 26.05.2025) – Назва з екрану.

6. Fronius Additive [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryuvalni-tekhnologiyi/informatsiya-pro-produkt/fronius-additive> (дата звернення 26.05.2025) – Назва з екрану.

7. TPS/I [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryuvalni-tekhnologiyi/produkty/ruchne-zvaryuvannya/migmag/tpsi/tpsi/tps-500i> (дата звернення 26.05.2025) – Назва з екрану.

8. Зварювання плавким електродом [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.sjf.tuke.sk/ktmappv/sk/studium/ucebne-katedry/20-frontpage/410-2022-12-12-09-36-17> (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Сталь 09Г2С [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/09g2s> (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

10. Вплив методів GMAW і PAW [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2023/pdfarticles/11/5.pdf> (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

11. Peitian Robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.peitianrobot.com/peitian_products/air130-3100/ (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

12. Industrial robot arm for pick-and-place applications [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://sa.made-in-china.com/co_aradmin/product_Air10-a-10kg-6-Axis-Industrial-Robotics-Arm-for-Pick-and-Place-Application_rsseegrry.html (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

13. Fronius TPS 2700 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://all.biz/tr-tr/fronius-tps-2700-transpuls-synergic-kaynak-makinas-g48540> (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

14. Controllers [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.peitianrobot.com/controllers/> (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

15. Різновиди та використання зварювальних обертачів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://kulturabr.kiev.ua/riznovidi-ta-vikoristannya-zvaryuvalnix-obertachiv/> (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

16. TR-1000 7G [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.yaskawa.eu.com/robotics/hardware-accessories/productdetail/product/tr-1000-7g_20556 (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

17. D16-3D Octagonal Table [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://sw-weldingtable.com/m/productShow.asp?id=69> (дата звернення 27.05.2025) – Назва з екрану.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Toggle Clamp [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://eu.made-in-china.com/co_lzhuiding/product_Pneumatic-Toggle-Clamps-Toggle-Clamp-for-Railway-Stainless-Steel-Toggle-Clamp_eoinurhhy.html (дата звернення 28.05.2025) – Назва з екрану.

19. Хоменко О.О., Похмурський В.І. Фізика зварювання: навч. посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 252 с.

20. Білоус М.П., Головка О.С. Технологія зварювання плавленням: навчальний посібник. – Київ: ІСДО, 2018. – 224 с.

21. Гришук О.Я. Основи теплових процесів у зварюванні: підручник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 156 с.

22. Fronius [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine> (дата звернення 30.05.2025) – Назва з екрану.

23. Lincoln Electric [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.lincolnelectric.com/en/About-Us> (дата звернення 30.05.2025) – Назва з екрану.

24. ESAB [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://esab.com/be/eur_fr/ (дата звернення 30.05.2025) – Назва з екрану.

25. Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/eu/standard/51792.html> (дата звернення 02.06.2025) – Назва з екрану.

26. Правила будови електроустановок [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://dnaor.com/html/1692/doc-НПАОП_40.1-1.32-01 (дата звернення 03.06.2025) – Назва з екрану.

27. Засоби індивідуального захисту очей [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://dnaor.com/html/61365/doc-ДСТУ_EN_169-2001 (дата звернення 03.06.2025) – Назва з екрану.

28. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://dnaor.com/html/34094/doc-ДСН_3.3.6.042-99 (дата звернення 03.06.2025) – Назва з екрану.

					ЗС11.01.00.000 ПЗ	Арк..
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

29. Розділ з охорони праці в дипломних проектах [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://opcb.kpi.ua/wp-content/uploads/2015/05/01-Рекомендації-для-бакалаврів-ЗФ.pdf> (дата звернення 03.06.2025) – Назва з екрану.

30. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://dnaor.com/html/40957/doc-ДСН_3.3.6.037-99 (дата звернення 03.06.2025) – Назва з екрану.

31. Правила охорони праці під час зварювання металів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://dnaor.com/html/32346/doc-НПАОП_28.52-1.31-13 (дата звернення 03.06.2025) – Назва з екрану.

32. Природне і штучне освітлення [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_5_28/1-1-0-1188 (дата звернення 05.06.2025) – Назва з екрану.

33. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05#Text> (дата звернення 05.06.2025) – Назва з екрану.

34. Засоби індивідуального захисту очей та обличчя під час зварювальних та споріднених процесів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://dnaor.com/html/62391/doc-ДСТУ_EN_175-2001 (дата звернення 05.06.2025) – Назва з екрану.

35. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://dnaor.com/html/61739_2.html (дата звернення 06.06.2025) – Назва з екрану.

36. Норми визначення категорій приміщень [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dnaor.com/html/62106/doc-ДСТУ_Б_В.1.1-36_2016 (дата звернення 06.06.2025) – Назва з екрану.

37. Пожежна безпека об'єктів будівництва [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080743763845318619 (дата звернення 06.06.2025) – Заголовок з екрану.