

**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

(підпис) **Віктор КВАСНИЦЬКИЙ**

« ____ » _____ 2024р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: «Вдосконалення установки адитивного MIG/MAG наплавлення»**

Виконав :

студент 4 курсу, групи ЗВ-01

Кучик Анатолій Миколайович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н

Степанов Денис Володимирович _____

Консультант з охорони праці:

Зав. каф., професор, д.т.н

Левченко Олег Григорович _____

Консультант з розроблення економіки:

Доцент, к.е.н

Глущенко Ярослава Іванівна _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____
(підпис)

Київ – 2024

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально- науковий інститут матеріалознавства і 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

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Кучику Анатолію Миколайовичу

1. Тема роботи «Вдосконалення установки адитивного MIG/MAG наплавлення», керівник роботи Степанов Денис Володимирович, к.т.н, затверджені наказом по університету від «30»травня 2024 р. № 2210-с
2. Термін подання студентом роботи 14 червня 2024 року
3. Вихідні дані до роботи: дугові адитивні процеси, технології MIG/MAG -зварювання та MIG/MAG наплавлення.
4. Зміст пояснювальної записки: огляд сучасник дугових адитивних процесів і технологій, аналіз особливостей MIG/MAG -зварювання, вдосконалення уставки для MIG/MAG -наплавлення, експериментальна частина. .

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): вигляд кронштейну А1, вдосконалений маніпулятор MM7 А1, Структура зварювальної системи MIG/MAG А1, схема процесу наплавлення А1, приклади наплавлених зразків А1, загальний вигляд установки А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Левченко О.Г. зав.каф		
Економіка	Глуценко Я. І., доцент		

7. Дата видачі завдання 30 травня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз дугових адитивног технологій	04.06.2024	
2	Особливості MAG/MIG-наплавлення	05.06.2024	
3	Вдосконалення обладнання	07.06.2024	
4	Розробка технології багат шарового наплавлення тіл обертання	09.06.2024	
5	Заходи з охорони праці	13.06.2024	
6	Розробка стартап-проєкту	09.06.2024	

Студент _____Анатолій КУЧИК

Керівник _____Денис СТЕПАНОВ

РЕФЕРАТ

Ключові слова: наплавлення, адитивні технології, адитивне наплавлення, наплавлення MIG/MAG, дугові адитивні технології, зварювання MIG/MAG, технології 3D друку, захисні гази, наплавлення в захисних газах.

У вступі обґрунтовано актуальність теми адитивного виробництва у промисловості та проведено порівняння з іншими методами виробництва.

У першому розділі розглянуто основні види адитивних технологій та їх характеристики, а також порівняно їх між собою.

У другому розділі наведено характеристики наплавлення та зварювання за допомогою процесу MIG/MAG, висвітлено основні принципи та технічні характеристики.

У третьому розділі представлено обладнання для наплавлення, її ключові характеристики та компоненти та продемонстровано покращення кронштейну та маніпулятора для адитивного наплавлення

У четвертому розділі проведено експерименти наплавлення на трубі та валу.

У п'ятому розділі було розроблено стартап-проект для адитивного наплавлення MIG/MAG.

У шостому розділі проведено аналіз шкідливих та небезпечних факторів при наплавленні, та показані способи їх вирішення.

ABSTRACT

Key words: surfacing, additive technologies, additive surfacing, MIG/MAG surfacing, arc additive technologies, MIG/MAG welding, 3D printing technologies, shielding gases, surfacing in shielding gases.

The introduction substantiates the relevance of the topic of additive manufacturing in industry and compares it with other production methods.

The first chapter examines the main types of additive technologies and their characteristics, as well as compares them with each other.

In the second chapter, the characteristics of surfacing and welding using the MIG/MAG process are presented, the basic principles and technical characteristics are highlighted.

The third section introduces the deposition equipment, its key features and components and demonstrates improvements to the additive deposition arm and manipulator

In the fourth chapter, surfacing experiments on a pipe and a shaft are carried out.

In the fifth chapter, a start-up project for additive MIG/MAG welding was developed.

In the sixth chapter, an analysis of harmful and dangerous factors during surfacing is carried out, and methods of solving them are shown.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. Адитивні технології	8
1.1. Дугові адитивні технології	21
2. MIG, MAG наплавлення, як інструмент дугових адитивних технологій.....	30
3. Конструкторський розділ	39
3.1. Обладнання для дугового наплавлення MIG/MAG	39
3.2. Вдосконалення обладнання для наплавлення.....	46
4. Експериментальний розділ.....	51
5. Розробка стартап-проєкту	58
5.1. Опис ідеї проєкту	58
5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту.....	62
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	63
6. Охорона праці	70
6.1. небезпечні та шкідливі виробничі фактори.....	70
6.2. Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці	74
7. Список використаної літератури	86
8. Додатки.....	89

ВСТУП

Адитивне виробництво-це виготовлення деталей, засноване на поступовому додаванні деталей до плоскої або осьової основи. Назва "адитивний" є основним принципом цього процесу. Цей варіант виробництва також називають "культивуванням", оскільки продукт виробляється пошарово.

Адитивні технології є одними з найсучасніших та швидко розвиваючимся сектором в промисловості, ринок адитивних технологій щорічно зростає на 30% і, за оцінками експертів, його планується розвивати ще як мінімум 5 років. Звичайно, ринок праці користується великим попитом на майстрів, які розуміють, на що вони здатні, і знають обмеження адитивних технологій.

Використання 3D-принтера в поєднанні з комп'ютерною інженерією дозволяє знизити вагу виробу, об'єднати кілька елементів в один, створити обладнання для першого візуального макета, функціональних прототипів або швидкої збірки і очікувати довгострокових результатів. Розуміння адитивних технологій і вміння правильно їх використовувати дають величезну перевагу в роботі інженерів.

1. Адитивні технології

В даний час стрімко зростає інтерес і попит на адитивні технології (АТ), також відомі як 3D-друк. Суть АТ полягає в пошаровому формуванні 3D-об'єктів з цифрових моделей. Очікується, що широке впровадження цього методу трансформує багато галузей і секторів виробництва.

За традицією, що склалася в раніше опублікованій навчально-методичній літературі [1], до цієї групи відносять нанесення на першу заготовку різних типів покриттів, таких як плазмові (рисунок 1.1 а), гальванічні та наплавлення. На практиці розміри заготовки або деталі (навіть у найменшому перерізі) після нанесення покриття збільшуються лише незначно. Наприклад, для сталевого валу діаметром 80 мм покриття товщиною $\delta = 0,2$ мм збільшує діаметр лише на 0,5%.

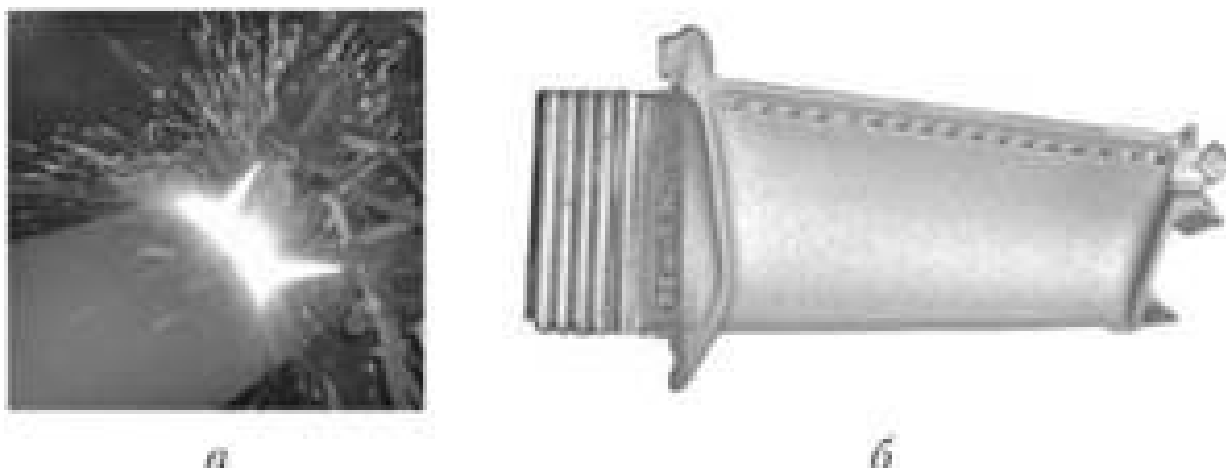


Рисунок 1.1. Приклади нанесення покриттів: *а* - плазмове нанесення покриття на готівка; *б* – тепло захисне покриття лопатки [1]

Геометрія деталі залишається незмінною, оскільки зовнішні контури ідентичні оригіналу. При цьому сумарний нульовий допуск заготовки і покриття не підвищує точність розмірів деталі, а навпаки дещо знижує її. Тому вкрай нераціонально або неможливо використовувати методи нанесення покриттів тільки для розмірної обробки. Основне призначення покриттів - не обробка розмірів і збільшення геометричних розмірів, а зміна фізико-механічних і структурних властивостей поверхневого шару, тобто надання

деталі заданої функціональної, технічної та експлуатаційної якості. Приклад нанесення термічного покриття на лопатку турбіни показаний на рисунку 1.1.6

Технологічні процеси наплавлення [1]

Наплавлення - нанесення за допомогою зварювання плавленням шару металу на поверхню заготовки або деталі (рисунок 1.2). Товщина наплавляемого шару може досягати декількох мм.

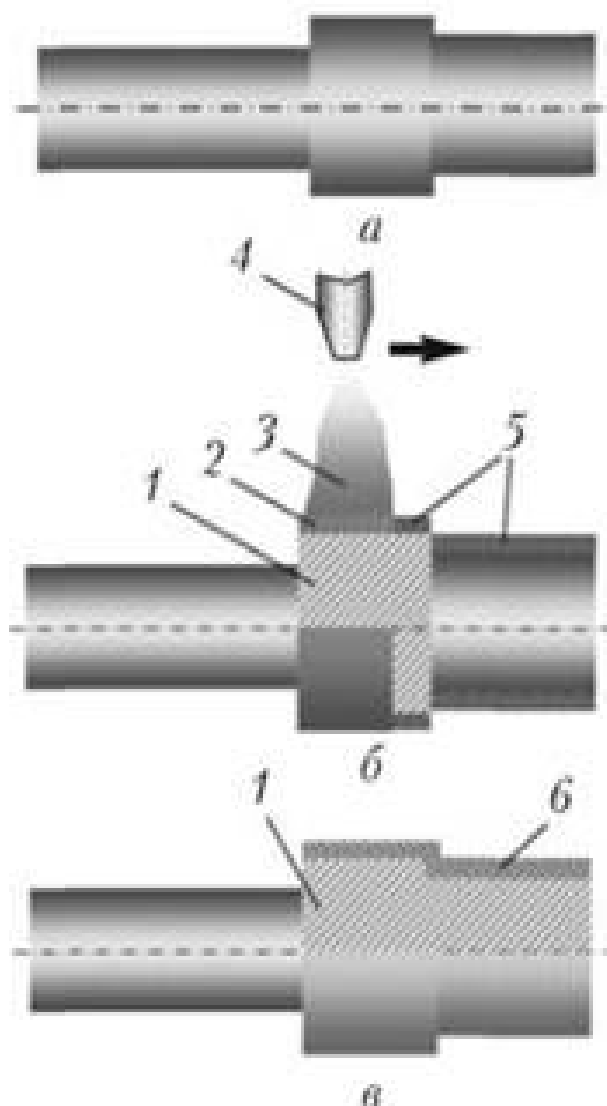


Рисунок 1.2. Наплавлення металу на деталь:

а - вихідний стан; б - процес наплавлення; в - після наплавлення; 1 - метал; 2 - наплавлений шар; 3 – високо температурний струмінь; 4 - пальник; 5 - вихідний присадний матеріал; 6 - готове покриття [1]

Метод об'ємного розширення рідко використовується для нових компонентів, за винятком випадків, коли поверхня повинна бути виготовлена з металу, відмінного від металу компонента. Наприклад, у випадку виробів, загальна міцність яких залежить від властивостей металу та його поперечного перерізу, поверхневий шар часто повинен працювати проти подальшого абразивного або абразивно-ударного зносу (наприклад, напрямні на верстатах, зуби ковшів на землерийній техніці, жолоби на канатних підйомниках). Умови роботи можуть ускладнюватися високими температурами, ерозією та корозійним впливом навколишнього середовища (наприклад, морської води, різних хімічних речовин у хімічному виробництві).

Наплавлення в основному використовується для ремонту сильно зношених деталей.

Моделювання плавеного осадження

Формоутворення деталі за способом FDM (Fused Deposition Modeling) відбувається за допомогою установки, схема якої показана на рисунку 1.3.

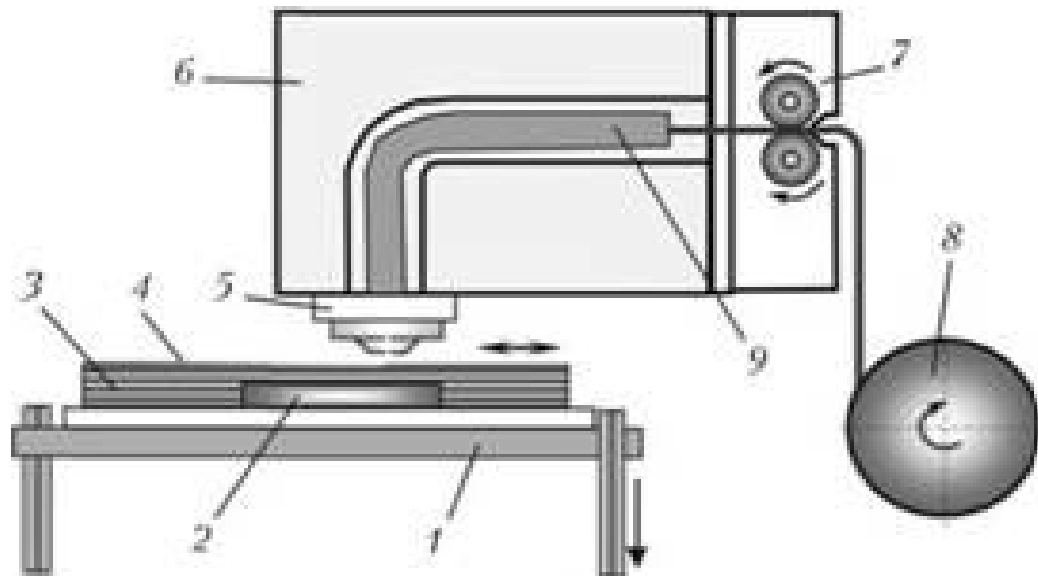


Рисунок 1.3. Моделювання плавеного осадження FDM:

1 - платформа; 2 - супорт; 3 - формована деталь; 4 - нанесення шару; 5 - форсунка; 6 - головка FDM; 7 - привід; 8 - котушка з дротом; 9 - пристрій нагріву дроту [1]

Намотаний на котушку 8 дріт подається до сопла 5 за допомогою притискних роликів приводного блоку 7, керованого координатним механізмом головки 6. Нагрівальний пристрій 9 нагріває дріт в головці 6 до температури, близької до температури плавлення. У нагрітому соплі 5 матеріал знаходиться в рідкому стані і видавлюється на попередній шар відформованої деталі 3, де прилипає до нього і застигає. Відстань між фокусною точкою і шаром, що наноситься, допомагає отримати необхідну форму деталі в плані. Як правило, товщина шарів за цим методом становить від 0,025 до 1,25 мм, а стінок - від 0,22 до 6 мм. Після завершення виготовлення одного шару платформа 1 опускається і починається формування наступного шару. Для зміцнення шаруватих секцій, де це необхідно, використовуються полістирольні опорні конструкції. В якості матеріалів використовуються термопласти і метали. Цей метод багато в чому схожий на наплавлення. Істотним недоліком цього методу є неможливість створення внутрішніх порожнин у заготовці. З точки зору комбінацій функцій, метод FDM навряд чи буде важливим для машинобудування.

Спосіб багатофазного затвердіння струменя [1]

Принципова схема багатофазного струменевого затвердіння (MJS: Multiphase Jet Solidification) показана на рисунку 1.4. і базується на пошаровому формуванні деталей шляхом диспергування рідкого матеріалу на поверхні.

Порошкоподібний матеріал, що підлягає обробці, нагрівається в камері 1 до температури трохи вище температури плавлення і витікає з сопла 2. Траєкторія і швидкість руху сопла 2 і камери 1 задаються комп'ютером. Матеріал 3, вилитий на поверхню заготовки, застигає за кілька секунд. На початковому етапі тепло виділяється в попередній шар 4, який нагрівається і розплавляється. Таким чином, шари відформованої заготовки назавжди з'єднуються.

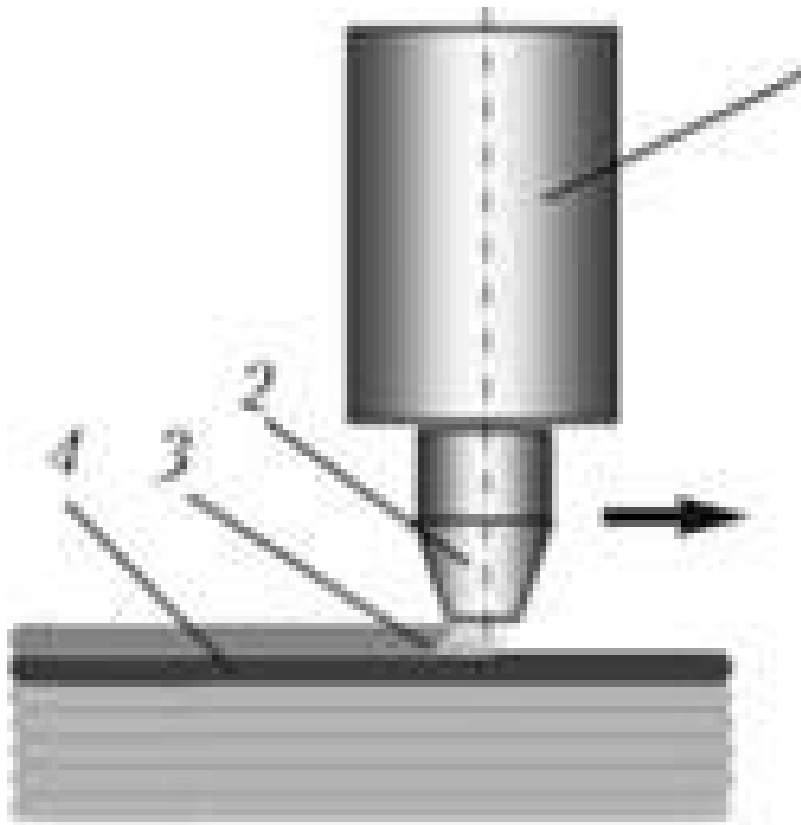


Рисунок 1.4. Схематичне зображення способу MJS:

1 – плавильна камера; 2 - змінна система форсунки; 3 - рідкий шар; 4 - попередній шар [1]

Температура контролюється таким чином, щоб розплавлений матеріал покривав поверхню шарами необхідної товщини. Цей метод схожий на метод FDM. Основні відмінності полягають у стані вихідного матеріалу (порошок, а не дріт) і системі його подачі.

Методом MJS виготовляють деталі шляхом обробки порошкових сумішей з низькотемпературних металевих сплавів, високоякісних сталей, титану і кераміки. Деталі, виготовлені з низькотемпературних матеріалів, готові до використання. При переробці порошкових високотемпературних сплавів і керамічних матеріалів (температура плавлення до 1300°C) отримані заготовки потребують подальшої обробки.

Технологічні процеси розмірної обробки формування деталей нарощуванням обсягу [1]

Описані вище методи лише умовно можна віднести до методів розмірної обробки. Власне розмірна обробка зі збільшеною кількістю деталей з'явилася лише нещодавно і все ще використовується лише для обмежених завдань в галузі машинобудування, в основному у виробництві виливків і форм. У той час як традиційні методи розмірної обробки розроблялися і використовувалися (а в багатьох випадках, на жаль, і досі використовуються) на основі людської праці і ручного управління, процес адитивного лиття став можливим тільки завдяки комп'ютерам і кваліфікованому програмному забезпеченню.

Існує кілька причин створення і впровадження нових методів: перша - це бажання скоротити цикл від створення потреби в новому продукті до його виведення на ринок (за рахунок скорочення проектно-конструкторських робіт і часу на підготовку виробництва). Другий - необхідність зменшення кількості різних видів обладнання та інструментів для виготовлення компонентів. Це досягається завдяки використанню методів адитивного виробництва, що означає зниження матеріальних і фінансових витрат. Третя - необхідність зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Нові методи є більш екологічними, ніж традиційні. Традиційні методи розмірної обробки призводять до утворення відходів, таких як стружка, відпрацьована охолоджуюча рідина та використані інструменти. Нові методи генерують дуже мало відходів. Нерозплавлений металевий порошок можна використовувати повторно. Четверта причина полягає в тому, що можна досягти прийнятної рівня точності. Допуски готових деталей складають до 0,025 мм, тому їх можна використовувати одразу після швидкої обробки.

На сьогоднішній день з'явилося сімейство методів, які мають свої особливості і конкурують між собою, але мають схожі цілі. У літературі такі інтегровані методи відомі як швидке прототипування. Їх основна мета - значно

прискорити проектно-конструкторські роботи шляхом створення матеріальних моделей (статичних прототипів) майбутніх продуктів.

Використовувані способи отримали свою умовне позначення, що складається з початкових літер слів, складових назва способів матеріалізації (RP):

- DMD - Direct Metal Deposition - пряме осадження металу;
- LENS - Laser Engineering Net Shaping - формування за допомогою лазерної інженерної мережі;
- SFP - Solid Foil Polymerization - полімеризація твердої фольги;
- SL (SLA) - Stereolithography - спосіб стереолітографії;
- SLS (LS) - Selectiv Laser Sintering - виборче лазерне спікання;
- SGC - Solid Ground Curing - основне термічний вплив;
- BPM - Ballistic Particle Manufacturing - виготовлення з використанням балістики;
- DLF - Directed Light Fabrication - виготовлення спрямованим світлом;
- DSPC - Direct Shell Production Casting - пряме блочне виготовлення оболонок.

Загалом таких методів налічується понад 20, і їхня кількість, безсумнівно, зростатиме. Розглянемо тут лише ті, які цікаві з точки зору виробництва готових інженерних компонентів з конструкційних матеріалів (переважно металевих сплавів, кераміки та полімерів). Методи, які зосереджені на виготовленні моделей спроектованого виробу або випалюванні моделей для лиття, розглядатися не будуть.

Всі методи мають схожу логіку побудови деталей і принципи, засновані на прямому переході від методів 3D-CAD до деталей без використання форм, інструментів, технологічних середовищ і т.д. Тривимірні тверді тіла (деталі) отримують генеративними засобами. На етапі проектування виробу образ деталі визначається аналітично за допомогою креслень, файлів КТ або фотографій. На цій основі створюється математична 3D-модель конструкції, яка оптимізується відповідно до певних критеріїв за допомогою програмного

забезпечення. Потім ця модель матеріалізується шарами (наприклад, металом, керамікою, полімером).

Таким чином, спільною рисою розглянутих методів є те, що компоненти виготовляються шар за шаром з порошкоподібної сировини (порошки використовуються в конструкції так само, як у порошковій металургії) (подібно до того, як будується будинок з цегли, ряд за рядом). До цього часу в основному використовувалося обладнання та програмне забезпечення для формування плоских шарів. Перспективними є також методи формування шарів на криволінійних поверхнях.

Виготовлення деталей методом лазерного синтезу PHENIX [1]

Спосіб виготовлення деталей методом лазерного синтезу PHENIX здійснюється на обладнанні, зовнішній вигляд якого представлений на рисунку 1.5, на рисунку 1.6 - принципова схема.

Технологія PHENIX реалізується наступним чином. Спочатку CAD-файл деталі обробляється в комп'ютерній стійці 2 (див. рис. 1.5) за допомогою CAM/CAD-пакету PHENIX. Далі відбувається формування порошкового шару. З резервуара 1 (див. рис. 1.6) стартовий порошок 3 розподіляється на поверхню робочого циліндра 8 за допомогою модуля вирівнювання та нанесення покриття 4. Потім енергія передається порошку за допомогою променя волоконного лазера 6 і гарячої печі 2, яка розплавляє і спікає порошок в зоні, що оточує лазерну пляму.



Рисунок 1.5. Установа виборчого лазерного спікання:

1 - вікно спостереження за процесом; 2 - комп'ютерна стійка; 3 – бункер [1]

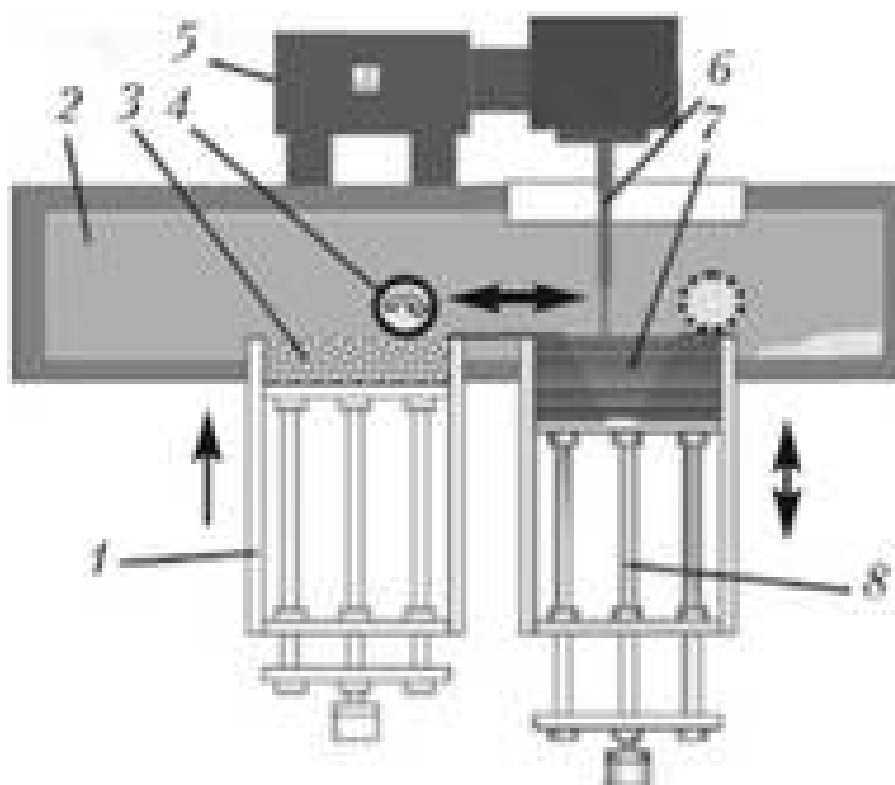


Рисунок 1.6. Схема процесу лазерного спікання:

1 резервуар з матеріалом; 2 піч; 3 порошок; 4 модуль вирівнювання і нанесення шарів; 5 - волоконний лазер; 6 - промінь лазера; 7 - формована деталь; 8 - робочий циліндр [1]

Довколишній порошок приймає при цьому задану форму (рисунок 1.7).

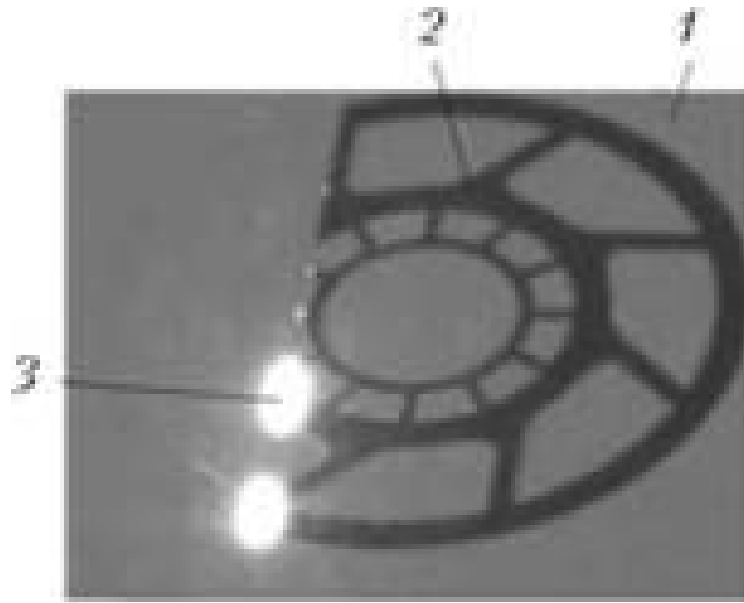


Рисунок 1.7. Процес формування деталі:

1 - шар порошку; *2* - сформована частина шару; *3* - місце лазерного спікання

Поперечні перерізи оцифрованих деталей складаються лазером один за одним. Після формування шарів робочий циліндр 8 (див. рис. 1.6) опускається і процес повторюється до тих пір, поки не буде сформований весь об'єм деталі. Після завершення формування останнього шару деталь (або декілька деталей) виймається з бункера 3 (див. рис. 1.5) під робочим столом і обробляється.

Деталі можуть бути виготовлені з різних металів або кераміки (наприклад, оксиду алюмінію, муліту, оксиду цирконію). На рисунках 1.8 і 1.9 показані зразки готових деталей.



Рисунок 1.8. Вид готової деталі [1]

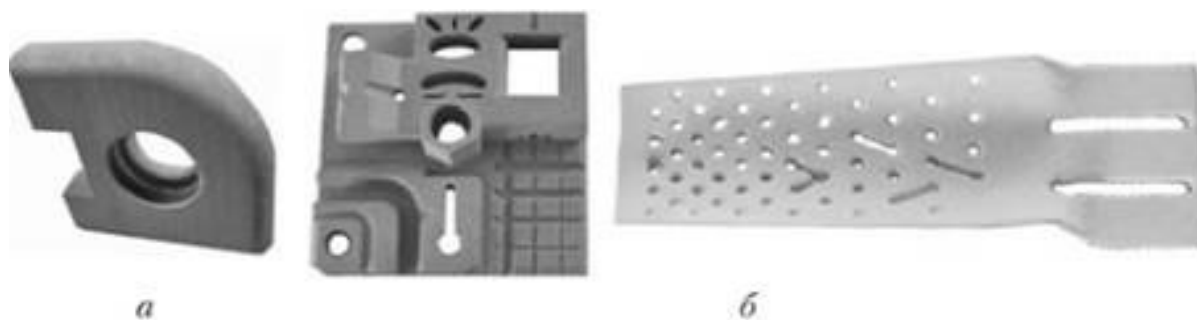


Рисунок 1.9. Зразки отриманих методом PHENIX деталей:

а - зі сталі; *б* – кераміки [1]

Основною перевагою цього процесу є те, що при побудові моделі не потрібні так звані опори. В інших процесах (не описаних тут) для створення нависаючих складових елементів використовуються спеціальні опори, які захищають щойно побудований тонкий шар моделі від руйнування.

Механічні властивості, досягнуті цим методом, вважаються близькими до властивостей механічно оброблених деталей. Однак керамічні деталі потребують подальшої обробки - випалу в печі. За допомогою цього методу можна досягти точності до 50 мікрон, якщо об'єм деталі становить до 15 дм³.

Спосіб прямого осадження металу (DMD) [1]

Технологія, названа Direct Metal Deposition (DMD), була розроблена фірмою POM в США в 1999 р Загальний вигляд установки показаний на рисунку 1.10, а принцип роботи – на рисунку 1.11

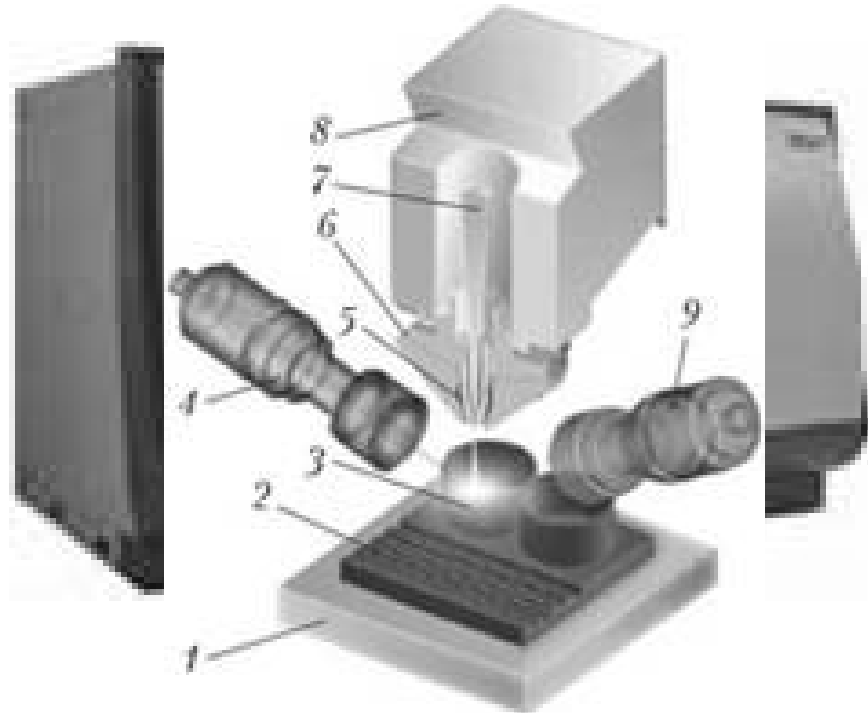


Рисунок 1.11. Установка DMD: 1 - платформа; 2 - підкладка; 3 - формування деталі; 4, 9 - оптична система (відеокамери); 5 - сопло вдуву інертного газу; 6 - канал подачі порошку; 7 - промінь лазера; 8 - фокусувальна оптична система

Пристрій виглядає як великий обробний центр. Усередині корпусу знаходиться робочий стіл, який рухається за координатами x , y і z , потужний CO₂-лазер (2,5-5 кВт) і пристрій оптичного зворотного зв'язку з відеокамерою (цей пристрій відрізняє технологію DMD від інших). Поруч з відеокамерою знаходиться труба, яка подає металевий порошок з бункера в робочу зону. У робочій зоні немає ніяких затискачів або кріплень, які часто зустрічаються при механічній обробці.

Ззовні корпусу встановлений контролер ЧПК GE Fanuc серії 180i-M з адаптивними алгоритмами управління процесом, які гарантують якісне розплавлення металу та контроль геометричної точності. Програмне забезпечення керує соплом і оптикою, які випромінюють CO₂-лазер

відповідно до траєкторії руху інструменту (CAM), створеної на основі 3D CAD-моделі.

Процес формування деталі відбувається наступним чином (див. рис. 1.11). Лазерний промінь 7 фокусується на заготовці 3 або підкладці з інструментальної сталі 2 для формування зони розплавленого металу. Металевий порошок подається з лотка через канал 6 за допомогою інертного газу до коаксіального сопла 5 через канал 6 і впорскується струменем печі в динамічну зону розплаву для нарощування об'єму. Лазер рухається по траєкторії, створеній з CAD-файлу, експортованого в САМ-систему, і розплавляє металевий порошок.

Програмне забезпечення використовує системи оптичного зворотного зв'язку 4 і 9 для контролю розплавленої області під час нанесення металу, забезпечуючи точну подачу тепла і майже повне усунення нагрітих ділянок. Під час цього процесу розплавлений метал швидко охолоджується ($103\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{с}$) і твердне, що призводить до поетапного і пошарового "зростання" деталі. В результаті виходить деталь з високою міцністю та однорідною мікроструктурою.

У процесі DMD склад металу можна швидко змінювати, вводячи в розплав різні типи металевих порошків. Це дає можливість створювати гібридні та градаційні металеві композити, яких раніше не існувало.

Можна створювати деталі з майже готовою геометрією з різних інструментальних і швидкорізальних сталей, вольфрамових, нікелевих і кобальтових сплавів, металів: алюмінію, міді, хрому, нікелю та іридію (будь-якого металевого порошку з температурою плавлення до 2650°C).

Крім того, в процесі не використовуються жодні наповнювачі, лише порошкові сплави. Замкнутий цикл зворотного зв'язку забезпечує більшу точність і усуває необхідність проміжної обробки через помилки при нанесенні.

Висота 2,4 м, довжина 3,7 м, ширина 3 м, швидкість нанесення сталі приблизно 25-160 см³/год, ширина шару 1 мм, товщина 0,025 мм, точність

розмірів $\pm 0,13$ мм. діапазон переміщення по осях X, Y і Z 61 см.

На закінчення слід зазначити, що розроблено принцип прямого тривимірного формування, а не пошарового. Однак досягнуті на сьогоднішній день результати стосуються використання в цьому процесі специфічних полімерів, а не металів. [1]

Цей метод базується на властивості рідких полімерів застигати при блокуванні певних світлових променів. Коли на полімер проектується зображення місцевості, він застигає по всьому об'єму зображення. Цей метод цікавий тим, що відтворює весь об'єм одразу, а не шар за шаром, як при відтворенні тривимірного об'єкта з 3D-CAD.

1.1 Дугові адитивні технології

Дронове-дугове адитивне виробництво (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing) є однією з адитивних технологій, і застосовують дріт як наплавлений матеріал.

Таблиця 1.1 - Матеріали і процеси, випробувані для отримання об'ємних металевих виробів пошаровим адитивним нарощуванням із застосуванням дугового зварювання. [2]

Матеріали	Процеси
– Низьколегована конструкційна сталь; – Високоміцна сталь; – Нержавіюча сталь; – Нікелеві жаропрочні сплави; – Алюмінієві сплави; – Титан, титанові сплави; – Мідь, мідні сплави	– TIG (DC та імпульсне) – висока якість; – TIG височастотне (DC та імпульсне) – висока точність, висока якість; – Імпульсне MIG – простота, економічна ефективність; – Cold Metal Transfer (CMT) – низьке тепловкладання, висока стабільність процесу;

	– Tandem Pulsed MIG – висока швидкість нарощування; – Плазма РТА – високі якість, швидкість.
--	---

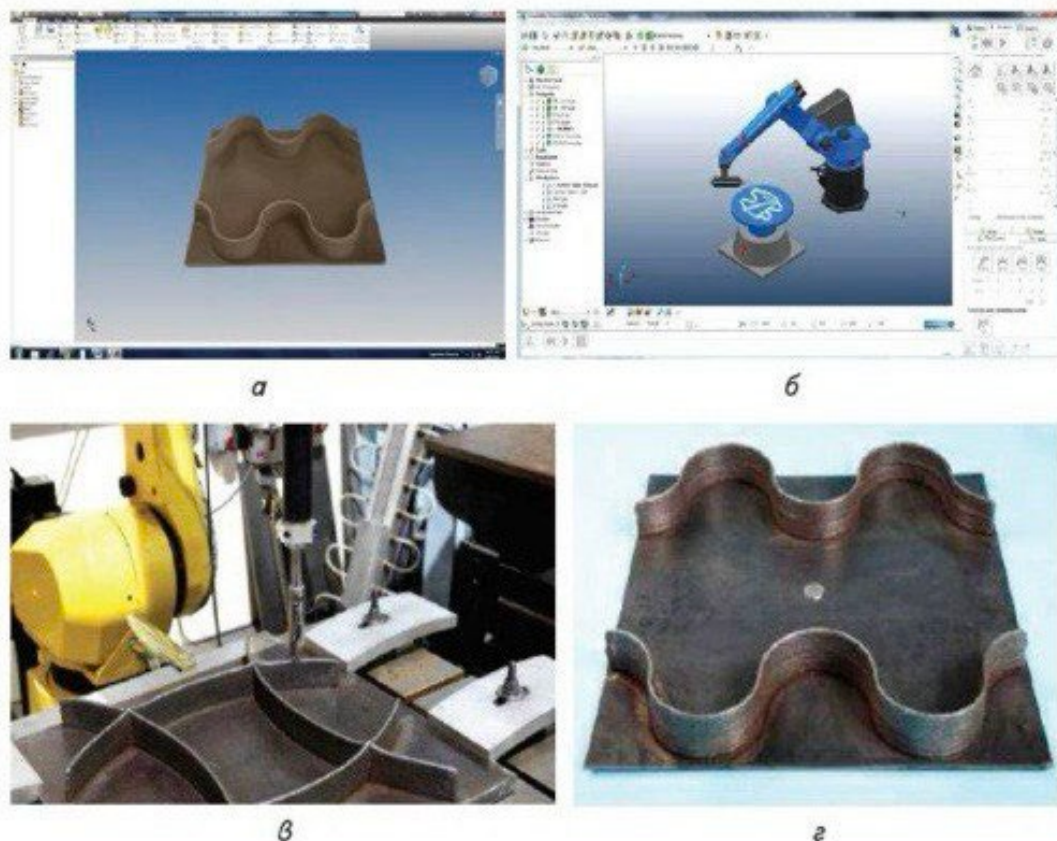


Рисунок 1.12 - Технологічний процес 3D друку об'ємних металевих виробів за методом Wire-Arc Additive Manufacturing: а) – комп'ютерне проектування деталі; б) – програмне забезпечення для 3-D позиціонера або робота з інтегрованим зварювальним устаткуванням; в) – роботизований комплекс зі зварювальною установкою; г) – готова деталь[2]

WAAM можна визначити як низку процесів, призначених для виготовлення деталей шляхом нанесення послідовних шарів за допомогою дугового зварювання. Концепція адитивного дугового зварювання як способу виробництва деталей була вперше опублікована в Європі в 1990-х роках, як повідомляють RIBEIRO, NORRISH [2] і SPENCER та ін. [3]. Однією з перших

публікацій, присвячених цьому методу виробництва, був патент BARKER [4] під назвою "Спосіб виготовлення орнаментів", в якому Баркер запропонував використовувати процес ММА-зварювання для виготовлення декоративних деталей (рис. 1.13). Ідея виготовлення деталей за допомогою 17-шарової обробки поверхні за допомогою зварювання не є новою, але лише в останні 20 років цей метод набув широкого застосування.

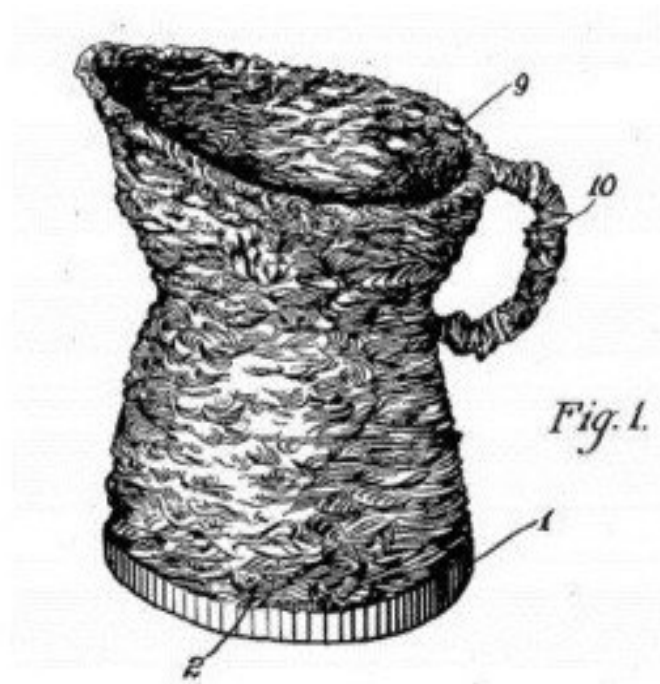


Рисунок 1.13 - Схема першого процесу WAAM, ідеалізованого Баркером , у 1920 р. [4]

Група компаній Damen Shipyards, RAMLAB, Promarin, Autodesk і Bureau Veritas спільно запустили проект під назвою WAAMpeller. Назва відсилає до гребного гвинта буксира Damen Stan Tug 1606 і вшановує технологію електродугового адитивного виробництва (WAAM), що використовується при його виготовленні. WAAM-гвинт діаметром 1300 мм і вагою близько 180 кг складається з 298 шарів нікелевих, алюмінієвих і бронзових сплавів. Після виготовлення гвинта були проведені випробування, і гвинт WAAM показав якість, подібну до звичайних литих гвинтів [5]. Процес виробництва показано на рисунку 1.14.

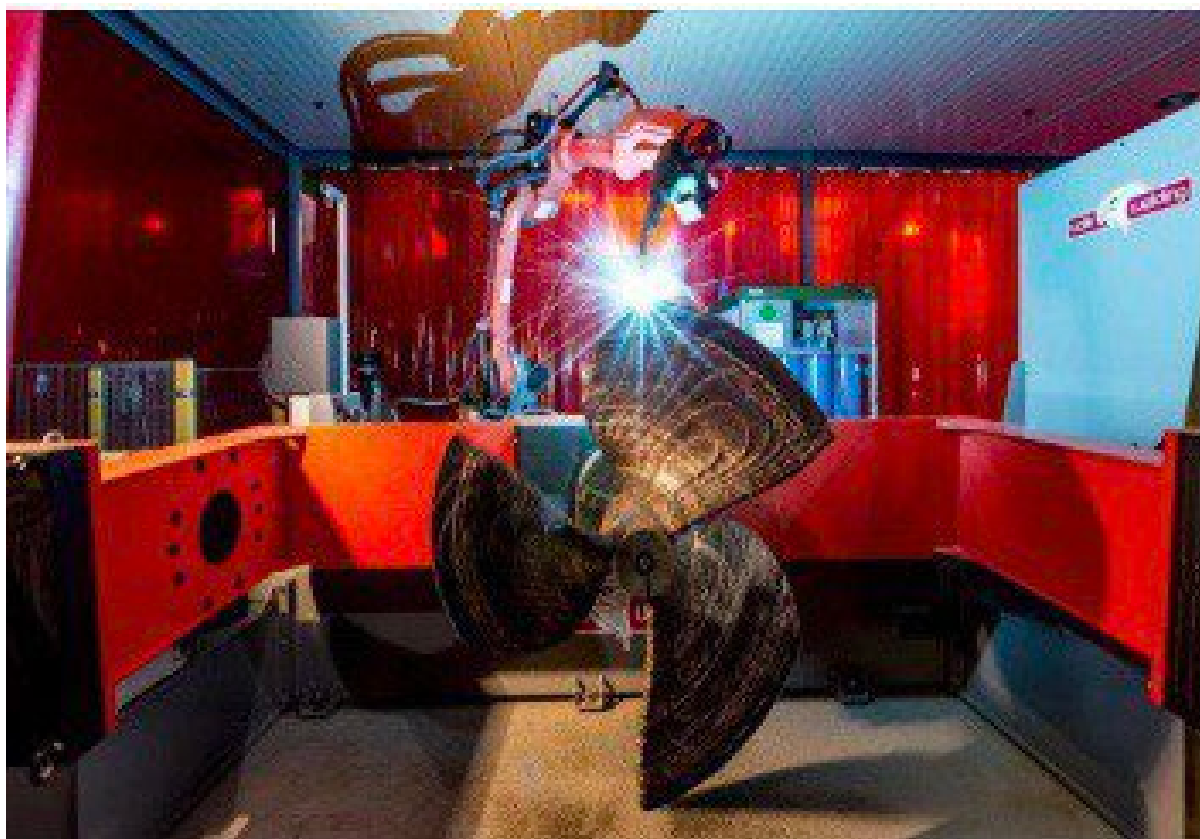


Рисунок 1.14 - Процес виготовлення гвинта WAAMpeller методом Wire-Arc Additive Manufacturing [5]



Рисунок 1.15 - Надрукований на 3D-принтері гребний гвинт [5]

Компанія Fronius розробила унікальну технологію під назвою Cold Metal Transfer (CMT) для створення тривимірних металевих виробів.

Зварювання CMT, також відоме як процес MIG/MAG, характеризується особливим методом відокремлення крапель матеріалу, що дає змогу використовувати його в тих сферах застосування, які раніше були складними або неможливими для технології MIG/MAG. Абревіатура CMT походить від англійської назви "Cold Metal" (холодний метал). Абревіатура CMT походить від англійської назви "Cold Metal Transfer", що означає, що процес відбувається за низьких температур. Порівняно зі звичайним зварюванням MIG/MAG, процес CMT генерує значно менше тепла.

В основі процесу лежить коротке замикання. У цьому процесі коротке замикання відбувається при раптовому збільшенні струму, що призводить до підвищення температури. Однак у процесі CMT, коли відбувається коротке замикання, струм мінімізується, а зварювальний дріт відтягується назад, таким чином переносячи метал при найнижчій температурі. При дуговому зварюванні зварювальний дріт опускається у ванну, де дуга гасне, а струм зменшується, щоб уникнути розриву.

Процес характеризується стабільним горінням дуги і відсутністю бризок, що зменшує тепловіддачу до основного металу і скорочує матеріальні та часові витрати на 50%. Ця технологія також гарантує високу продуктивність і якість зварного матеріалу.



Рисунок 1.16 - Стадії перенесення металу в процесі CMT [6]

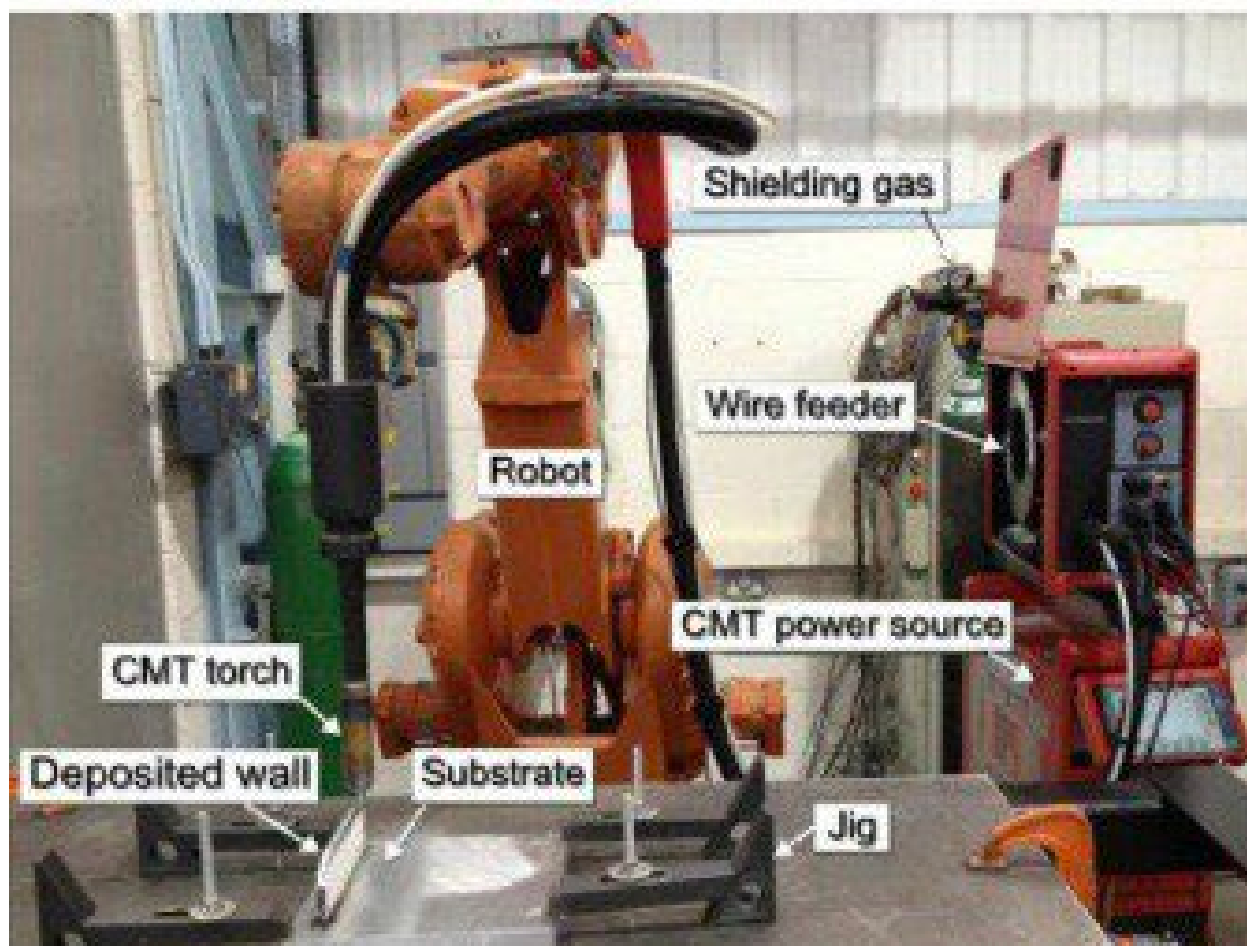


Рисунок 1.17 – Компоненти установки CMT- процесу створення об'ємного виробу [6]

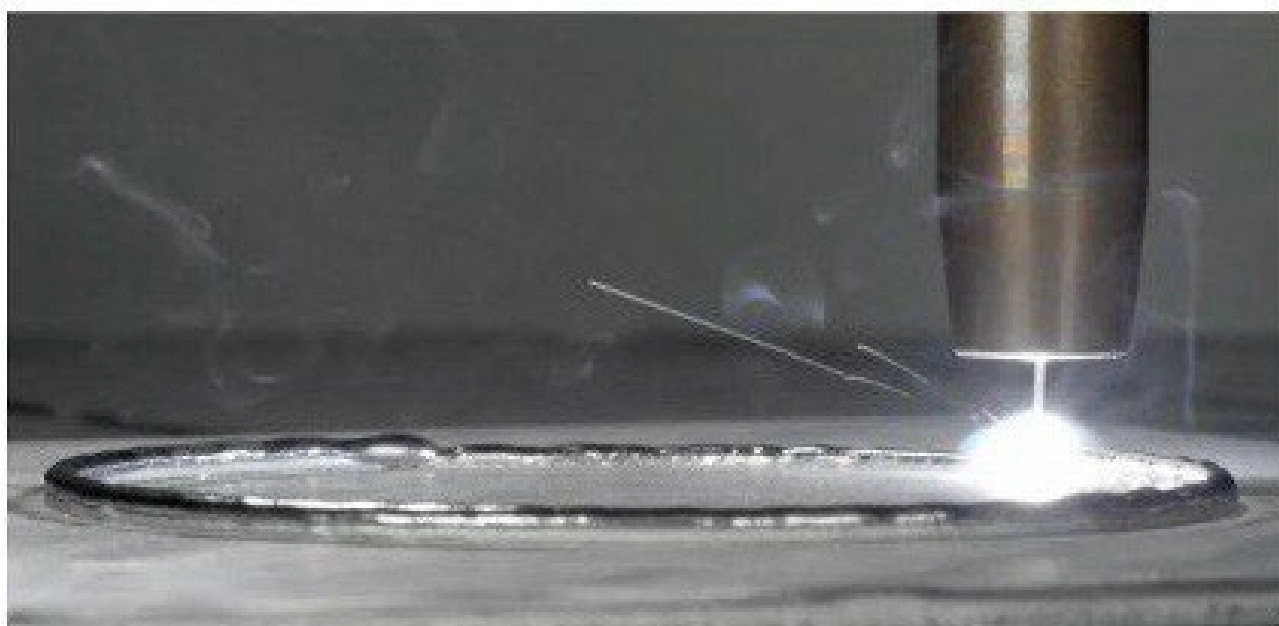


Рисунок 1.18- Процес створення тривимірної деталі з використанням Cold Metal Transfer [6]

Важливо підкреслити, що метод додавання металу за допомогою дугового зварювання дозволяє створювати великогабаритні металоконструкції. Типовим прикладом є MX3D, який спільно з Інститутом Йоріса Лалмана, Arup, ArcelorMittal, Autodesk, Hymans, Lenovo, ABB, Air Liquide & Oerli, Primovent, AMS та Делфтським технологічним університетом створив перший у світі міст з нержавіючої сталі з використанням дугового зварювання 3D. був розроблений перший у світі пішохідний міст з нержавіючої сталі. Швидкість зварювання становила понад 2 м/год, а довжина зварювального дроту - 1100 км. довжина моста становить 12,3 метра, ширина - 6,3 метра, а вага - 4,5 тонни. Міст пройшов численні випробування і інспекції і був встановлений на каналі Ауде Сейц Ахтербургвалль в Амстердамі в 2021 році. Проект ще раз показує, що 3D-друк по металу відкриває можливості для створення об'єктів складної форми і великих розмірів з різних матеріалів, які перевершують можливості традиційних промислових технологій. [7]



Рисунок 1.19 – Виготовлення пішохідного мосту методом Wire-Arc Additive Manufacturing [7]

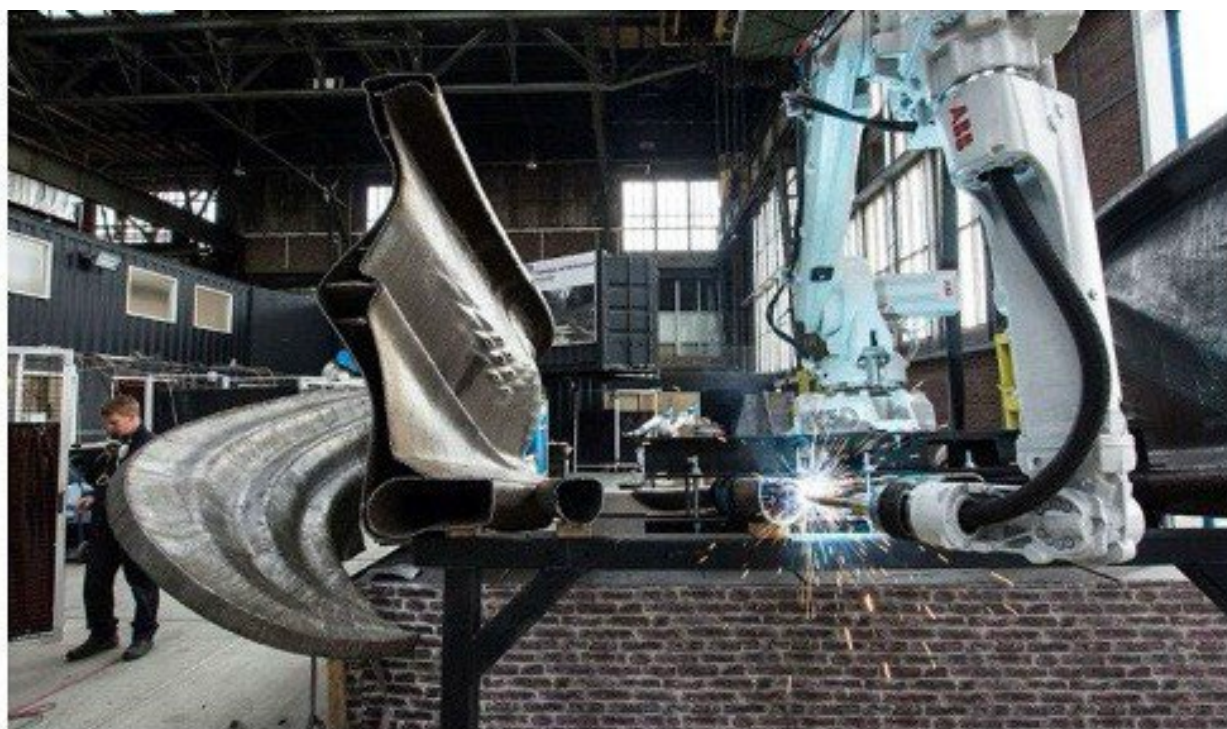


Рисунок 1.20 – Виготовлення пішохідного мосту методом Wire-Arc Additive Manufacturing [7]



Рисунок 1.21 – Встановлений міст над каналом Аудезейтс Ахтербургвал у Амстердамі [7]

Висновки до розділу:

Зварювання – це процес з'єднання матеріалів шляхом їхнього плавлення. Його використовують у різних галузях промисловості, зокрема в металургії, автомобілебудуванні та суднобудуванні. Останніми роками все більшої популярності в галузі зварювання набуває адитивна технологія. Ця технологія дозволяє створювати складні форми і конструкції шляхом пошарового нанесення матеріалів.

Однією з проблем при зварюванні є те, що розплавлений метал має тенденцію розтікатися під дією сили тяжіння, особливо в нижніх положеннях. Це може призвести до нерівномірного розподілу матеріалу і зміни форми зварної деталі.

Однак за допомогою адитивних технологій цю швидкість можна змінити. Наприклад, 3D-друк дозволяє зварювати деталі у вертикальному положенні, де сила тяжіння тягне розплавлений метал вниз, створюючи тонкі стінки або вищі деталі.

Адитивні технології також можуть змінити сам процес зварювання. Можна створювати складні форми та внутрішні структури, які були складними або неможливими за допомогою традиційних методів.

Таким чином, застосування адитивних технологій у зварюванні може призвести до більш ефективних та інноваційних процесів, відкриваючи нові можливості для виробництва та дизайну.

2. MIG/MAG наплавлення, як інструмент дугових адитивних технологій

Головною умовою отримання якісних нероз'ємних з'єднань під час зварювання є забезпечення стабільного процесу горіння дуги. Основною умовою отримання якісних нероз'ємних з'єднань при зварюванні є забезпечення стабільного процесу горіння дуги, рівномірне проплавлення основного металу та електродного металу. Порівняно з іншими способами дугового зварювання, процес зварювання в захисних газах з механізованим подаванням електродного дроту має низку суттєвих особливостей. Необхідно розібратися в їхній природі.

До таких особливостей відносяться, по-перше, джерело живлення і склад газового середовища, в якому горить зварювальна дуга.

На відміну від дугового зварювання, де використовуються штучні електроди, використовується джерело живлення зі спадаючою вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Для зварювання в середовищі захисних газів, де використовується плавкий електрод, використовується джерело живлення з жорсткою або зростаючою характеристикою. Жорстка характеристика означає відсутність залежності між зварювальним струмом і напругою дуги.

Під час зварювання в захисному газі з електродами, що витрачаються, зварювальник може регулювати тільки напругу. Встановивши вихідну напругу холостого ходу зварювального джерела живлення, можна налаштувати довжину дугового розряду та тривалість спалаху дуги, можна встановити стабільні умови горіння. Змінюючи швидкість, можна встановити величину зварювального струму. Правильний вибір напруги дуги і швидкості подачі зварювального дроту забезпечується стабільне горіння дуги і рівномірне проплавлення електродного металу.

Важливою характеристикою процесу зварювання в захисному газі з використанням електрода є напрямок протікання струму, тобто пряма або

зворотна полярність.

Під час зварювання в активних газах зазвичай використовують зворотню полярність. Матеріал, що зварюється, підключається до негативного полюса джерела живлення. Активна пляма електрода створюється потоком плазми мають різну рухливість. Катодна пляма (на негативному електроді) більш рухлива, ніж анодна пляма (на позитивному електроді). Зварювальна дуга горить між рідкою зварювальною ванною, яка має відносно велику площу, і кінцем електродного дроту 0,64-2,5 мм, залежно від діаметра. Проходження струму, навіть у газах струм переноситься в основному електронами.

При такій полярності потік негативно заряджених частинок рухається від великої "негативної" поверхні катода до малої "позитивної" поверхні анода, майже до точки. Якщо площа анода обмежена, то утворення анодної плями. Відомо, що утворення анодних плям супроводжується швидким зменшенням анодного падіння напруги. Це пов'язано з тим, що електрони з більшою ймовірністю досягають поверхні електродного дроту. Процес горіння електричної дуги більш стабільний, ніж у разі прямої полярності. [8]

Газове середовище

Газоподібне середовище, в якому горить електрична зварювальна дуга, призначене для захисту розплавленого електрода й основного металу називається захисним газом.

Повітря – це газова суміш, що складається з 78 % молекул азоту, 21 % молекул кисню і 1 % інших газоподібних елементів (наприклад, аргону, гелію). Азот найбільш небезпечний у процесі утворення дефектів зварного шва, розчиняється в розплавленому металі й утворює нітридні неметалічні включення, і може стати центром руйнування зварного з'єднання. Це також може призвести до утворення газових ядер в об'ємних порах. Роль кисню, адсорбованого на рідкому металі, вивчена недостатньо добре. Однак використання чистого інертного газу, як захисне середовище використовується газ аргон, а зварювання сталі без додавання кисню, як

відомо, призводить до утворення пор. Відомо, що аргон призводить до утворення пор. Є дані, що підтверджують роль кисню як поверхнево-активного елемента, що захищає розплавлене залізо від азоту.

Однак захисні гази під час зварювання плавким електродом виконують не тільки захисну функцію. Фізичні властивості газів, що оточують зварювальну дугу, залежать від типу перенесення електродного металу в зварювальну ванну. Перенесення електродного металу в зварювальну ванну Згідно з ДСТУ ISO 4063:2014, основними типами перенесення електродного металу є: перенесення з коротким замиканням у дуговому проміжку, крапельне перенесення, струменеве перенесення та імпульсне перенесення.

Під впливом плазмового потоку краплі рідкого металу на кінчиках електродного дроту дуже рухливі. Або краплі плавно переміщуються в зварювальну ванну, або краплі викидаються зі зварювальної ванни на тверду поверхню виробу під впливом парів металу, залежить від якості зварного шва і ступеня розбризкування.

Вуглекислий газ використовується як захисний газ з моменту початку промислового застосування механічного зварювання в середині 20-го століття. Вуглекислий газ використовувався як захисний газ завдяки своїй високій теплопровідності та здатності вплавлятися в металеву конструкцію шва. Незважаючи на те, що висока теплопровідність CO₂ призводила до досить хорошого проплавлення металевої заготовки, процес характеризувався низькою стабільністю і великою кількістю бризок металу.

Інша проблема використання чистого вуглекислого газу для зварювання полягає в тому, що він поставляється на виробництво в балонах і тому перебуває в рідкому стані. У процесі використання вуглекислий газ перетворюється з рідини на газ. При цьому витрачається велика кількість тепла (ендотермічна реакція).

Замерзання відновника на балоні, особливо помітно в холодну пору року, щоб усунути це явище, зварювальник змушений підключати до редуктора спеціальний пристрій: газовий нагрівач, що працює від вольтової

мережі. Потужні промислові зварювальні джерела навіть мають спеціальні роз'єми для цієї мети.

Під час виконання зварювальних робіт необхідно контролювати використання захисного газу. Недостатнє використання не захищає якісно розплавлений метал від впливу повітря.

Надмірне використання призводить до швидкого охолодження периферії зварювальної дуги, що призводить до швидкого охолодження периферії зварювальної дуги призводить до збільшення щільності зварювального струму і швидкості зварювання. У результаті щільність зварювального струму збільшується, і зусилля на метал зварювальної ванни зростає [8].

Типи дуги у зварюванні MIG/MAG

Дуга короткого замикання

Ця дуга запалюється під час короткочасного контакту дрового електрода з деталлю. У результаті цього виникає швидко зростаючий струм короткого замикання, який розплавлює дровий електрод і крапля відривається. Після короткого замикання зварювальна дуга знову запалюється. Дуга короткого замикання використовується в діапазоні низьких потужностей для тонких листів і дає змогу здійснювати зварювання майже в будь-якому положенні. Дуга короткого замикання також здебільшого використовується в кореневому шарі.

Проміжна дуга

Проміжна дуга змінюється між короткими замиканнями та розпилює сполуки з нерегулярними інтервалами. У результаті цього утворюється більше бризок. Використовувати цю зварювальну дугу ефективно неможливо, тож краще уникати її застосування.

Струменева дуга

Ця дуга постійно горить без коротких замикань у діапазоні вищих потужностей і чудово підходить для зварювання товстіших листів. Це означає, що можна розвивати високу швидкість наплавлення й здійснювати глибоке

проплавлення.

Імпульсна зварювальна дуга

Імпульсна зварювальна дуга складається з основної фази струму низької потужності та фази імпульсного струму високої потужності без коротких замикань. Це означає, що бризки майже не утворюються. У фазі імпульсного струму краплі зварювання цілеспрямовано відриваються завдяки використанню точно дозованого імпульсного струму.

Обертова дуга

Ця дуга навіть потужніша за струменеву й використовується для товстих листів, для яких потрібна висока швидкість наплавлення. Перехід крапель металу у зварювальну ванну відбувається під час руху обертання. Обертова дуга також називається високоефективною зварювальною дугою.

Комбінована зварювальна дуга

Ця зварювальна дуга складається з дуги короткого замикання й імпульсної зварювальної дуги. Необхідне проплавлення й тепловий вплив утворюються у фазі імпульсної зварювальної дуги, тоді як у фазі дуги короткого замикання відбувається охолодження зварювальної ванни й полегшується керування нею. [9]

Варіанти процесів зварювання MIG/MAG

Процес зварювання із низьким рівнем утворення бризок

Процес LSC – модифікована коротка дуга з надзвичайно високою стабільністю. Вона дає змогу виконувати високоякісні зварні шви за мінімального рівня утворення бризок та підвищеної швидкості наплавлення навіть у перехідній та крапельній дугах. Сутність процесу LSC полягає в тому, що за низького струму виникає коротке замикання, яке зумовлює плавність повторного підпалювання і стабільність зварювання. Саме за таким принципом працює система TPS/i, що миттєво й ефективно розпізнає фази процесу під час короткого замикання та оперативно реагує на них. Завдяки цьому, а також стабілізатору проплавлення зварювальникам вдається досягти

чудових результатів, особливо за утворення крапельної дуги.



Рисунок 2.1 LSC [9]

CMT — Cold Metal Transfer: «ХОЛОДНИЙ» зварювальний процес для найвищої якості

Процес CMT відрізняється від традиційного зварювання MIG/MAG дуже низьким тепловим впливом і надзвичайно стабільною дугою. Зварювальний процес Fronius CMT (Cold Metal Transfer) дає змогу досягнути оптимальних результатів зварювання різних матеріалів, наприклад сталі та алюмінію.

Переваги для зварників

Цифрова система керування процесом виявляє коротке замикання та сприяє відриву краплі шляхом втягування дроту: під час зварювання дріт подається вперед і втягується в момент короткого замикання. У результаті дуга генерує тепло лише протягом дуже короткого інтервалу горіння.

Контроль над коротким замиканням і стабільно низька сила струму забезпечують перехід матеріалу без утворення бризок. Довжина дуги вимірюється та регулюється механічним способом. Завдяки цьому дуга залишається стабільною незалежно від структури поверхні деталі чи швидкості зварювання. Це дає змогу використовувати процес СМТ будь-де та в будь-якій позиції.

Різноманітні цікаві сфери для застосування

Процес СМТ ідеально підходить для з'єднання сталі та алюмінію. Під час зварювання лист оцинкованої сталі «змочується» розплавленим алюмінієм, внаслідок чого утворюється паяно-зварний шов. Крім того, зварювальний процес СМТ підходить для пайки сталевих листів, оцинкованих гарячим чи електролітичним методом. Під час такої пайки, що здійснюється зварювальним дротом зі сплаву міді та кремнію, практично не утворюється бризок. При цьому деформація оцинкованих листів є мінімальною. Процес СМТ дає змогу з'єднувати тонкі алюмінієві листи (діаметром від 0,3 мм), тому що завдяки низькому тепловому впливу не потрібно підтримувати зварювальну ванну. Так само чудові результати дає зварювання нержавіючої сталі та магнію.

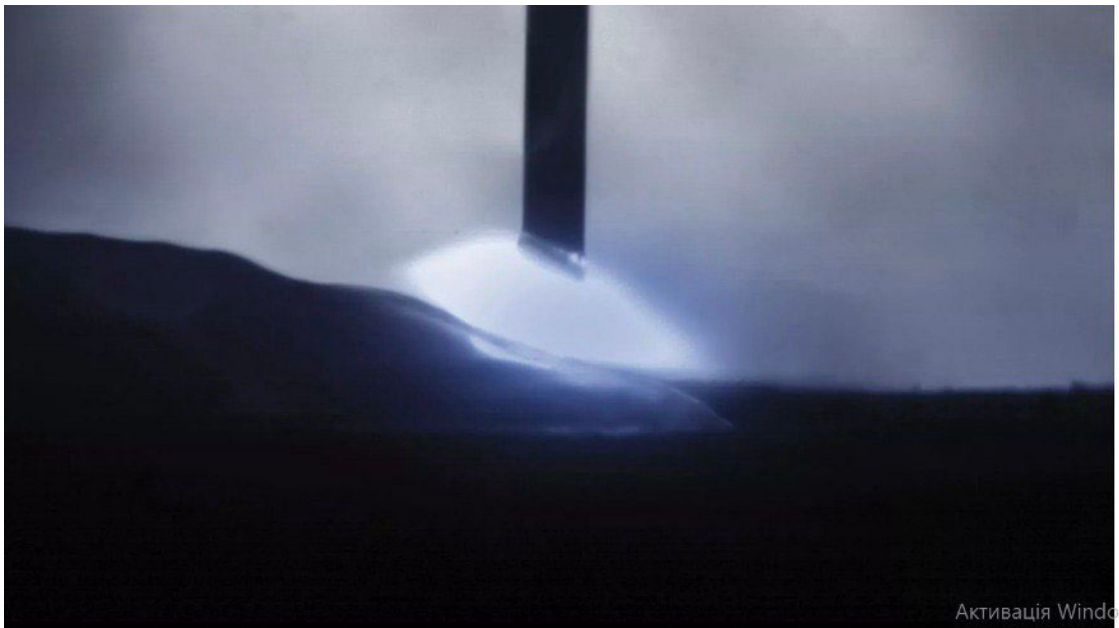


Рисунок 2.2 СМТ [9]

Оптимізована імпульсивна зварювальна дуга

Технологія РМС та оптимізована імпульсна зварювальна дуга гарантують високоякісні шви та високу швидкість зварювання. Завдяки стабілізатору проплавлення та довжини дуги керувати дугою ще ніколи не було так легко. [9]



Рисунок 2.3 РМС [9]

Висновки до розділу:

MIG та MAG наплавлення, широко використовуваний процес, спрямований на відновлення або покращення властивостей металевих поверхонь, ґрунтується на розплавленні електродного дроту, що містить наплавлювальний матеріал, за допомогою магнітної дуги, що формується між електродом і оброблюваною деталлю. Основні переваги цього процесу полягають у високій швидкості наплавлення, високій якості отриманого шару та можливості автоматизації. MIG та MAG наплавлення підвищує міцність, зносостійкість і корозійну стійкість деталей, а також відновлює їх геометричну форму. Захисний газ, який використовується у процесі, формує оболонку, що запобігає окисленню наплавлювального матеріалу, що забезпечує високу якість наплавленого шару. MIG та MAG наплавлення може здійснюватись як вручну, так і за допомогою автоматизованих систем, що робить його універсальним методом, придатним для різних галузей промисловості, включаючи машинобудування, автомобільну промисловість, нафтогазову галузь та інші. Загалом, MIG та MAG наплавлення є ефективним і надійним методом для відновлення та покращення металевих деталей.

3. Конструкторський розділ

3.1. Обладнання для дугового наплавлення MIG/MAG

У розділі пропонується розробка пристрою для адитивного виробництва з використанням методу MAG. Пристрій складається з механізованого зварювального апарату в середовищі вуглекислого газу та модернізованого фрезерного верстата з ЧПК. Фрезерний верстат із ЧПК може керувати рухом пальника по осях X і Y. Обробка поверхонь тривимірних деталей здійснюється за допомогою інвертора. Для цього використовується інверторний цифровий апарат для механізованого зварювання PATON ProMIG-250-15-4. [10]



Рисунок 3.1 – Зварювальний апарат для механізованого зварювання PATON ProMIG-250-15-4 [10]

Інверторний цифровий апарат PATON ProMIG-250-15-4 - це апарат, призначений для механізованого зварювання (MIG/MAG), ручного дугового зварювання (ММА), аргонодугового зварювання (TIG), з постійним струмом, в середовищі захисних газів і 39 сумішей. Пристрій ProMIG-250-15-4 має цифровий метод управління, що забезпечує точне налаштування режимів

зварювання. Збільшена тривалість навантаження при номінальному струмі до 250 А дозволяє працювати з будь-якими електродами діаметром від 1,6 мм до 6 мм (плавкими), а також механізоване зварювання суцільним дротом діаметром від 0,6 до 1,2 мм. Завдяки подвійній конструкції корпусу джерело живлення можна легко від'єднати від механізму подачі дроту, що підвищує мобільність при роботі в режимах MMA та TIG.

Таблиця 3.1 Технічні характеристики апарата для механізованого зварювання PATON ProMIG-250-15-4: [10]

Напруга холостого ходу, В	12/75
Функція «Hot-Start»	Регулюється
Номінальна напруга в мережі електроживлення, В	220/230
Номінальний споживаний струм із фази мережі, А	32...36
Номінальний зварювальний струм, А	250
Максимальний струм, що діє, А	335
Тривалість навантаження на номінальному струмі	70%
Межі зміни напруги в мережі електроживлення, В	160 - 260
Межі регулювання зварювального струму, А	12 - 250
Діаметр штучного електрода, мм	1,6 - 5
Функція "Arc-Force"	Регулюється
Діаметр суцільного зварювального дроту, мм	0,6 - 1,2
Функція "Anti-Stick"	Автоматична
Напруга підпалу дуги, В	110
Номінальна споживана потужність, кВА	6,9 – 7,9
Максимальна споживана потужність, кВА	11
Клас захисту	IP33
Габаритні розміри, ШхГхВ, мм	275x450x290
Охолодження	Адаптивне
Маса, кг	12,7
Термін гарантії, міс	60

Продовження Таблиці 3.1

Маса брутто, кг	24
Імпульсні режими при зварюванні	ММА/TIG/MIG/MAG
Блок зниження напруги холостого ходу	Вкл/Викл
Кількість роликів механізму подачі дроту	4

У комплект входять: зварювальний апарат, ремінь для перенесення на плечі, фірмовий гофрокороб PATON™, пальник зварювальний напівавтоматичний ABIMIG A255 LW, 3 м., мідний кабель (3 м) з електродотримачем ABICOR BINZEL DE2300, мідний кабель (3 м) з клемою «маса» ABICOR BINZEL MK300, комплекти роликів для 4-х діаметрів сталевого дроту та 2-х діаметрів алюмінієвого дроту, штуцер для швидкознімного з'єднання газового шлангу, інструкція з експлуатації.

Механізм переміщення

Для руху зварювального пальника в осях X,Y , який зварює деталь за встановленим програмним алгоритмом, використовується механізм переміщення модернізованого фрезерного верстата. Даний верстат є настільним, призначеним для фрезерування та свердління металів та іншої обробки для заготовок з металу, сплавів, органічних матеріалів, дерев. Конструктивно він базується на базовій моделі DM-X3, але має ряд переваг і доповнень, таких як можливість нахилу шпиндельної головки по горизонталі, цифровий дисплей на кінці шпиндельної головки, що відображає швидкість, напрямки і т.д., а також просте управління за допомогою сенсорних кнопок на корпусі.

Таблиця 3.2 - Технічні характеристики верстату із ЧПК

Модель	DM-X3
Максимальний діаметр свердління (по сталі)	25 мм
Максимальний діаметр кінцевої фрези	25 мм
Максимальний діаметр нарізного різьблення	M12 мм
Максимальний діаметр торцевого фрезерування	50 мм
Максимальна відстань від шпинделя до столу	350 мм
Виліт шпинделя	230 мм
Хід пінолі шпинделя	70 мм
Вертикальний хід шпиндельного вузла	300 мм
Конус шпинделя	MT3
Діапазон частоти обертання шпинделя	100-1750 об / хв
Нахил шпиндельного вузла	-45+90 °
Розмір робочого столу	550 x160 мм
Поздовжній хід столу	300 мм
Поперечний хід стола	160 мм
Крок точної подачі по лімбу	0,02 / 0.01 мм
Розмір Т-паза столу	12 мм
Потужність двигуна	1,0 кВт
Габаритні розміри	685x560x830 мм
Розміри в упаковці	840x820x1040 мм
Вага нетто / брутто	165/198 кг
Підключення	220/50 В / Гц



Рисунок 3.2 – Комп’ютерна модель фрезерувального верстату із ЧПК

Механізм переміщення пальника по осі Z

Для напавлення у вертикальному положенні треба, щоб пальник переміщався по трьох осях X, Y, Z. Для осі Z ми використаємо кронштейн який встановимо на стіл верстата. Зовнішній вигляд кронштейну наведено на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Кронштейн з закріпленою різьбовою шпилькою M16

Приводом у конструкції буде кроковий двигун Nema 23

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики крокового двигуна Nema 23

Типорозмір	Nema 23
Маркування	23hs5628
Фланець	57 мм
Довжина	56 мм
Номінальний струм	2,8 А

Продовження Таблиці 3.3

Крок (кут повороту)	$1,8^{\circ} \pm 5\%$
Утримуючий момент	12,6 кг/см
Діаметр валу	6,35 мм
Підключення	4 дроти, 2 фази / Роз'єм (опціонально)
Маса	0.7 кг

Маніпулятор М77

В якості обертача було використано зварювальний маніпулятор М77. Базова модель маніпулятора зображена на рисунку 4.4. Приводом буде двигун Nema 23



Рисунок 3.5 – Маніпулятор М77

Таблиця 3.4 - Технічні характеристики маніпулятора M77

Вага нетто	70 кг
Габарити В х Ш х д	440х400х1410мм
Діапазон швидкості	Від 0,03 до 8,0 об/хв
Джерело живлення	220 В
Крутний момент на валу	22,8 Нм
Максимальне робоче навантаження	50Н
Нахил	0-360°
План-шайба	400 мм

3.2 Вдосконалення обладнання для наплавлення

Для наплавлення деталі, здійснено вдосконалення обладнання кронштейну та маніпулятора M77.

Вдосконалення кронштейну

В конструкції кронштейн ми замініли замість шпилькою M16 на ШВП SFU 12-4.

В даному випадку будемо мати переваги:

- Ширший крок ходу
- Точність наплавлення
- Не буде зазору допочатку наплавлення
- Не врахування викривлень під час наплавлення



Рисунок 3.6 – Кронштейн з ШВП SFU 12-4



Рисунок 3.7 – ШВП SFU 12-4

Таблиця 3.5 - Технічні характеристики ШВП SFU 12-4

Діаметр	12 мм
Довжина різьби	730 мм
Крок	4 мм
Матеріал	сталь GCR15
Точність	C7
Довжина	800 мм

Вдосконалення маніпулятора М77

В конструкції М77 були здійснені маніпуляції, а саме вилучення валу черв'ячної передачі яка була під'єднана до двигуна Nema 23 та редуктора. Вдосконалення полягає в тому що було під'єднано двигун на пряму до редуктора, що дозволило збільшити швидкість обертання з 3 об/хв. до 40 об./хв.. Завдяки цьому з'явилась можливість проводити наплавлення виробів малого діаметру без перегрівання та частих зупинок на охолодження. Також на планшайбу було встановлено трьохкулачковий самоцентруючий патрон, і вилучено чотири кулачка, що були на початку, це дає змогу фіксувати деталі менших діаметрів, забезпечує та кращу фіксацію та центрацію, збільшує швидкість встановлення виробу в обертач.



Рисунок 3.8 – М77 з трьох кулачковим самоцентруючим патроном

Висновок до розділу

В розділі були наведено обладнання та його вдосконалення: кронштейну та маніпулятора М77. Заміна шпильки на ШВП SFU 12-4 , що дає більшу точність наплавлення. Під'єднання двигуна на пряму до редуктора що дає швидкість обертання 40 об./хв. Було встановлення трьохкулачкового самоцентруючого патрона для кращої фіксації деталі.

4. Експериментальний розділ

За допомогою даного обладнання було наплавлено пів сферу. Наплавлення відбувалося на циліндричний виріб, трубу, яку зафіксували в трьох кулачковий самоцентруючий патрон (рисунок 5.1).



Рисунок 4.1 – Фіксація труби перед наплавленням

За допомогою мови програмування Python, яка генерувала G-код, було забезпечено рух пальника. Наплавлення відбувається з меншого діаметра напівсфери до найбільшого діаметру. На рисунку 4.2 зображено програма на Python і генерований нею G- code, на рисунку 4.3 вікно програми Linux CNC підчас відпрацювання програми наплавлення.

```

Python 3.5.3 Shell
File Edit Shell Debug Options Window Help

T1
G17
G54
G1 X0.000000 Y25.155445 Z8.750000 F1000
M00
M3
G1 A360.000000 F1309.617817
G1 X-0.183868 Y25.804964 Z9.125000 A720.000000 F2.547242
G1 X-0.383105 Y26.454483 Z9.500000 A1080.000000 F2.366272
G1 X-0.597773 Y27.104002 Z9.875000 A1440.000000 F2.210389
G1 X-0.827939 Y27.753521 Z10.250000 A1800.000000 F2.074794
M5
M00
M3
G1 X-1.073675 Y28.403040 Z10.625000 A2160.000000 F1.955837
G1 X-1.335058 Y29.052559 Z11.000000 A2520.000000 F1.850698
G1 X-1.612173 Y29.702078 Z11.375000 A2880.000000 F1.757160
G1 X-1.905108 Y30.351597 Z11.750000 A3240.000000 F1.673456
G1 X-2.213958 Y31.001116 Z12.125000 A3600.000000 F1.598164
M5
M00
M3
G1 X-2.538823 Y31.650635 Z12.500000 A3960.000000 F1.530123
G1 X-2.879810 Y32.300154 Z12.875000 A4320.000000 F1.468377
G1 X-3.237033 Y32.949673 Z13.250000 A4680.000000 F1.412133
G1 X-3.610611 Y33.599192 Z13.625000 A5040.000000 F1.360726
G1 X-4.000671 Y34.248711 Z14.000000 A5400.000000 F1.313595
M5
M00
M3
G1 X-4.407346 Y34.898230 Z14.375000 A5760.000000 F1.270264
G1 X-4.830777 Y35.547749 Z14.750000 A6120.000000 F1.230326
G1 X-5.271111 Y36.197268 Z15.125000 A6480.000000 F1.193430
G1 X-5.728505 Y36.846788 Z15.500000 A6840.000000 F1.159273
G1 X-6.203123 Y37.496307 Z15.875000 A7200.000000 F1.127594
M5
M00
M3
G1 X-6.695136 Y38.145826 Z16.250000 A7560.000000 F1.098163
G1 X-7.204727 Y38.795345 Z16.625000 A7920.000000 F1.070778
G1 X-7.732085 Y39.444864 Z17.000000 A8280.000000 F1.045263
G1 X-8.277410 Y40.094383 Z17.375000 A8640.000000 F1.021463
G1 X-8.840913 Y40.743902 Z17.750000 A9000.000000 F0.999238
M5
M00
M3
G1 X-9.422812 Y41.393421 Z18.125000 A9360.000000 F0.978467
G1 X-10.023339 Y42.042940 Z18.500000 A9720.000000 F0.959040
G1 X-10.642737 Y42.692459 Z18.875000 A10080.000000 F0.940859
G1 X-11.281261 Y43.341978 Z19.250000 A10440.000000 F0.923838
G1 X-11.939178 Y43.991497 Z19.625000 A10800.000000 F0.907898
M5
M00
M3
M5

```

Рисунок 4.2 - Програма на Python і генерований нею G-code

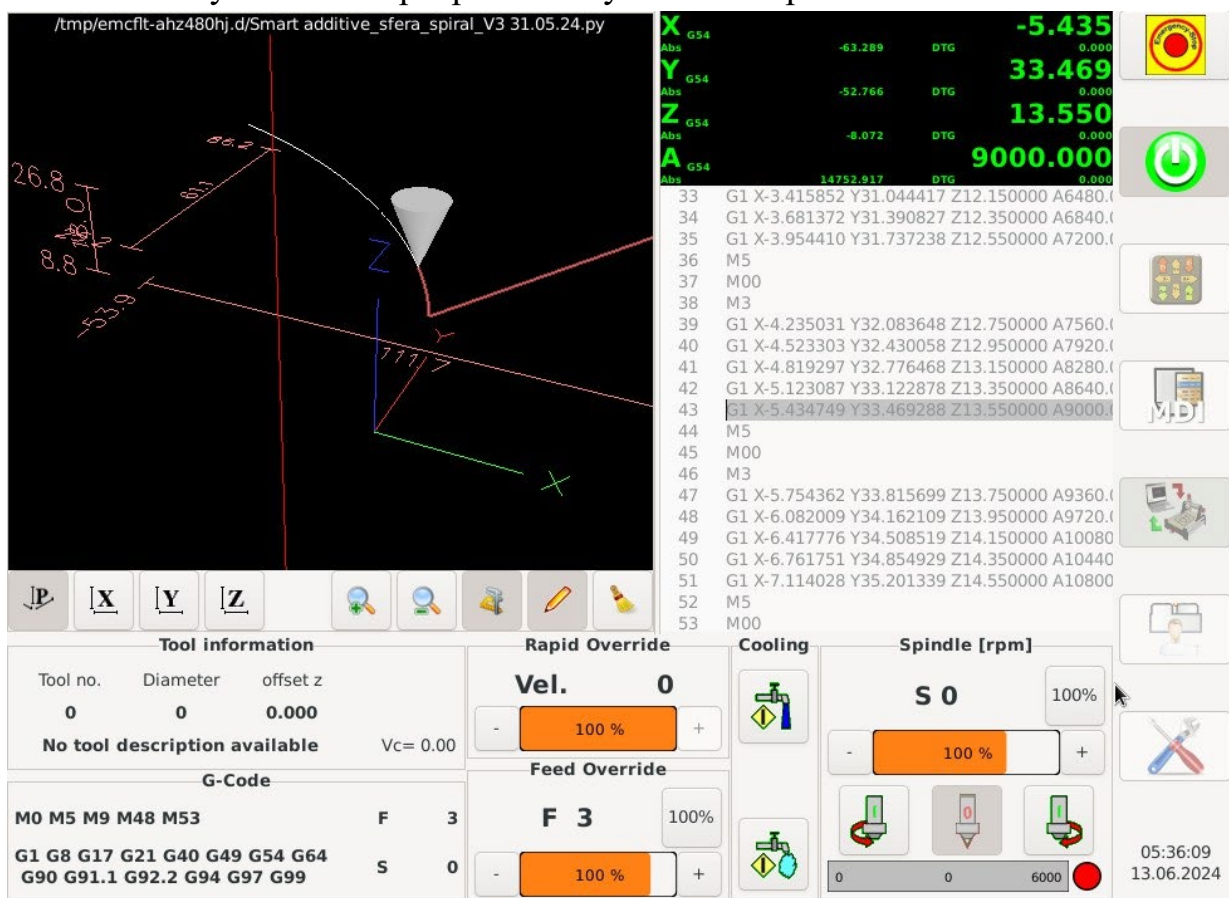


Рисунок 4.3 - Вікно програми Linux CNC підчас відпрацювання програми наплавлення



Рисунок 4.4 – Наплавлений виріб

Для першого (Рисунок 5.3) експерименту було використано трубу з діаметром 90 та товщиною 6 мм . Кількість проходів 20 з силою струму 90 - 100 А, лінійною швидкістю 60 м/год, та кутовою швидкістю яка змінювалась від діаметру наплавлення з 600 -300 рад/с. Швидкість обертання змінювалась таким чином, щоб забезпечити лінійну швидкість сталою.

Для наступних експериментів було використано вал діаметром 35 мм. В першому (Рисунок 5.4) випадку кількість проходів 25 з силою струму 90-95 А, лінійною швидкістю 90 м/год, та кутовою швидкістю яка змінювалась від діаметру наплавлення з 2000 -1000 рад/с , другий випадок (Рисунок 5.5) кількість проходів 45 з силою струму 90-100 А, лінійною швидкістю 60 м/год, та кутовою швидкістю яка змінювалась від діаметру наплавлення з 3500 -1500 рад/с



Рисунок 4.5 – Наплавлення на валу



Рисунок 4.6 – Наплавлення на валу

Було проведено заміри параметрів в експерименті на рисунку 5.5: висота наплавленого шару та температуру валу (T1, точка на відстані 30 мм від шва у в сторону незакріпленої частини, T2, точка на відстані 100 мм від шва, в сторону закріпленої частини)

Таблиця 4.1 Параметри експерименту

Проходи	T1, °C	T2, °C	Висота наплавленого шару, мм	Час паузи, t
0	21	21	0	0
5	60	23	3,4	1 хв.
10	90	30	4,3	55 с.
15	130	35	6,2	55 с.
20	200	50	8,6	1 хв. 15с.
25	220	55	9,3	1 хв, 30с.
30	230	78	12,1	55с.
35	260	83	13,9	1 хв, 20 с.
40	265	95	16	1 хв, 18 с.
45	270	110	17.3	-

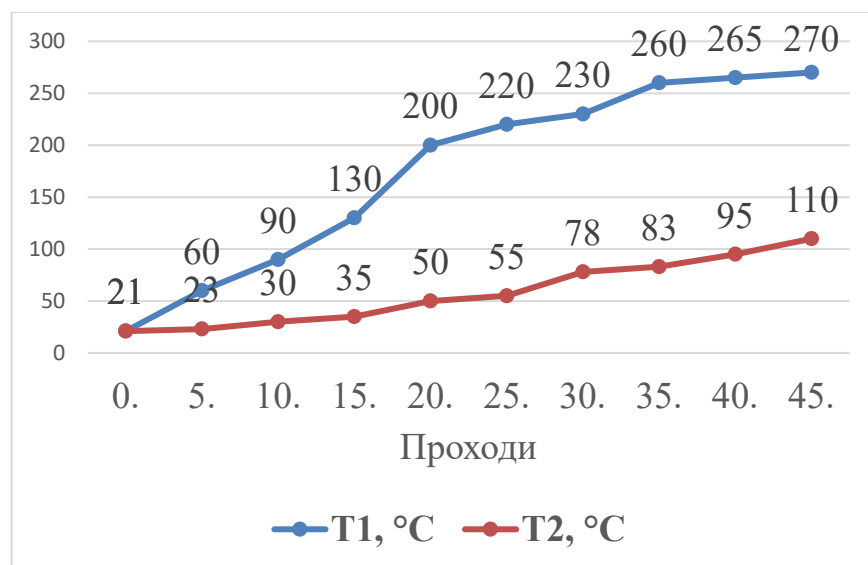


Рисунок 4.7 – Графік залежностей температури від проходів

Висновок до розділу

В даному розділі було показані експерименти наплавлення півсфери на трубі та валу. Під час наплавлення встановлено закономірності приросту температури, на відстані 30 мм від місця наплавлення приблизно після 35 проходу настає приріст температури суттєво зменшується що може свідчити про близькість стану тепло насичення . На відстані 100 мм процес відбувається по іншому температура зростає не надто швидко , що пояснюється як віддаленістю точки заміру від місця наплавлення і відведенням тепла через кулачки обертача.

5. Розробка стартап-проекту

5.1 Опис ідеї проекту

Стартап прагне запровадити високошвидкісний метод зварювання вдосконаленими установками адитивного MIG/MAG наплавлення: середовищі інертних газів (MIG) і в середовищі активних газів (MAG). MIG/MAG є найпоширенішим процесом зварювання, який дає змогу розвивати надзвичайно високу швидкість зварювання. Його можна використовувати вручну, механізовано або автоматизовано. Це робить його універсальним методом, який можна використовувати в зварювальному виробництві майже повсюдно, а саме в різних галузях машинобудування, автомобільній промисловості, на підприємствах, що займаються ремонтом і технічним обслуговуванням. Основна ідея проекту наведено у таблиці 6.1.

Таблиця 5.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ідея проекту надати повний спектр адитивних послуг модернізованим устаткуванням MIG/MAG	1. Будівництво	Інженерні послуги (3D наплавлення металевих виробів). Звернувшись до нас клієнти мають змогу отримати високу продуктивність та якість зварного шва. При наплавленні заповнюваних проходів у товстостінних виробів, даний процес дозволяє отримати високі значення

Наплавлення		продуктивності. Наплавлення дозволяє збільшити міцність, зносостійкість і корозійну стійкість деталей, а також відновити їх геометричну форму. Ідеально підходить для роботизованого зварювання.
	2. Промисловість	Звернувшись до нас, клієнти отримують можливість перевірити конструкцію деталей та оптимально наплавити їх. Наплавлення усіх стандартних конструкційних матеріалів, таких як низьковуглецеві, низьколеговані і високолеговані сталі, алюмінію та його сплавів, а також деяких інших металів і сплавів. Комфорт під час експлуатації: дозволяють працювати у будь-якому просторовому положенні, а також контролювати шов та стежити за його формуванням. Зварювання тонких пластин (товщиною більше 0,5 мм).

Залежно від виробничих завдань, матеріалу та специфіки виробів, проведено аналіз спектру послуг користувачам, аналіз потенційних технічних та економічних переваг ідей використання MIG/MAG наплавлення, яке отримало широку прихильність в середовищі професіоналів-зварювальників, перед пропозиціями конкурентів. Аналіз дозволив встановити, що основними конкурентами на ринку є:

1. 3D Systems - Виробник промислових 3D-принтерів, зокрема, для друку металами. Вони пропонують широкий спектр рішень для адитивного виробництва в різних галузях.
2. EOS (Electro Optical Systems) - Німецька компанія, яка спеціалізується на промисловій 3D-друку металами та полімерними матеріалами. Вони розробляють свої системи для адитивного виробництва металевих компонентів.
3. Renishaw - британська інженерна компанія, яка виробляє металеві 3D-принтери. Вони забезпечують адитивне виробництво високоякісних металевих деталей для аерокосмічної, медичної та інших галузей.

Техніко-економічних показників які присутні в даному проєкті та проєктах конкурентів є швидкість наплавлення, точність наплавлення, міцність швів, естетичність наплавленої деталі.

За визначеними показниками проведено порівняння з компаніями конкурентами і результати представлено у таблиці 2.

Проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) послуги конкурентів			
		Мій проект	Конкурент 3D Systems	Конкурент EOS	Конкурент Renishaw
1.	Швидкість наплавлення	S	N	W	W
2.	Точність наплавлення	S	S	N	N
3.	Міцність швів	S	W	N	N
4.	Естетичність наплавленої деталі	N	N	S	S

Пропонований проєкт демонструє сильні характеристики щодо швидкості, точності наплавлення та міцності швів, що є його основними перевагами. Однак, естетичність наплавленої деталі є нейтральною, що може бути поліпшено для підвищення конкурентоспроможності.

Конкурент 3D Systems має сильну сторону, щодо точності наплавлення, але слабку щодо міцності швів, що є слабким місцем у порівнянні з даним проєктом та іншими конкурентами. Естетичність наплавленої деталі у них є нейтральною.

Конкуренти EOS та Renishaw мають нейтральну щодо точності наплавлення, сильну щодо естетичності наплавленої деталі, що робить їх сильними конкурентами у цих аспектах.

Проте застосування зварювання вдосконаленими установками адитивного MIG/MAG наплавлення у машинобудівній галузі та автомобільній

промисловості на першому місці стоїть швидкість, точність наплавлення та міцність швів. Таким чином, для підвищення конкурентоспроможності даного проєкту варто звернути увагу на покращення естетичних характеристик наплавленої деталі, зберігаючи при цьому сильні сторони у швидкості, точності наплавлення та міцності швів.

5.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

У цьому розділі розглянуто, як можна реалізувати ідею проєкту, що показано в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 - Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Технології 3D наплавлення металевих виробів з використанням модернізованих устаткувань MIG/MAG наплавлення	Технологія 3D виробництва металевих виробів які збільшують якість швів і розширюють сферу застосування обладнання із застосуванням газів: - гелію, що дозволяє отримувати більшу глибину провару; - суміші Ar і He, що збільшує глибину	Наявна	Доступна

		провару і стабільність дуги; - Ar + CO ₂ + O ₂ - в співвідношенні 8%, 20%, 5% для створення нероз'ємних з'єднань чорних металів.		
2.	Надання повної регламентації проспекту матеріалів для виготовлення деталі та матеріалів для наплавлення	Надання широкого наплавлення	Наявна	Доступна
		Дослідження та зазначення параметрів наплавлення для форм деталей	Наявна	Доступна

За результатами аналізу можна зробити висновок, що можливості технологічної реалізації проєкту щодо використання модернізованих устаткувань MIG/MAG наплавлення які оптимізують процес і сприяють утворенню надійних, міцних і естетичних нероз'ємних з'єднань, та методи реалізації є можливими.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Основними гравцями ринку є приватні виробничі відділи, які діють лише у власних компаніях та організаціях, що надають послуги у зварювальній справі з використанням технологій 3D наплавлення металевих виробів та універсального обладнання, здатного з'єднувати абсолютно всі метали.

Таблиця 5.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Наявність обмежень для входу	Необхідність закупівлі матеріалів, устаткування для наплавлення. Забезпечення технологією наплавлення. Маркетинг продукції.
3	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ, ISO

Зараз ринок формується. Економічна ситуація в Україні та поступовий вступ України до Європейського Союзу призвели до використання модернізованих устаткувань MIG/MAG наплавлення. Мета технологічних процесів та комплексів які використовуються при MIG/MAG наплавленні, відновленні та зміцненні деталей — одержання виробів з необхідними властивостями при найвищих техніко-економічних показниках, без особистої участі людини. Соціальний аспект технологічних процесів та комплексів, припускає звільнення людини від безпосереднього виконання функцій керування процесами зварювання і наплавлення та передачу цих функцій автоматичним пристроям, що в останні роки здобуває все більшу значимість.

Сьогодні процеси MIG/MAG використовують у багатьох промислових сферах: від підприємств важкої та помірно важкої промисловості (суднобудівні підприємства, виробники сталевих конструкцій, трубопроводів та герметичних контейнерів) до невеликих майстерень, які займаються ремонтом та технічним обслуговуванням. Процес MIG/MAG наплавлення

вимагає використання захисного газу, який створює захисну оболонку, що запобігає взаємодії наплавлювального матеріалу з атмосферним повітрям. Це допомагає уникнути утворення дефектів і забезпечує високу якість наплавленого шару.

Споживча поведінка замовника дуже важлива для початку реалізації проєкту, оскільки репутація залежить від довіри потенційних покупців. З цієї причини, крім просування наших послуг у соціальних мережах та інтернеті, необхідно підтримувати хорошу репутацію. Перш за все, це гарантується високою якістю обслуговування клієнтів, що призводить до довгострокової співпраці з кількома клієнтами. Конкуренти можуть помітити ці позитивні зміни і також співпрацювати з нашим проєктом.

Тенденція до зниження полягає в тому, що все це пов'язано з кризою та військовими діями. В даний час економіка України знаходиться в процесі подолання кризи, в результаті чого розвиток ринку консалтингу відбувається повільно. Але цей ринок, ймовірно, буде швидко розвиватися в майбутньому, оскільки Україна вступила в зону вільної торгівлі з Європейським союзом. Це може призвести до безлічі проблем на українському ринку, оскільки необхідно стандартизувати продукцію, вироблену відповідно до вимог ЄС.

Географічне розташування споживачів на цьому ринку неоднорідне по всьому світу. Більшість споживачів знаходяться в країнах, що розвиваються. Тому ринки адитивних технологій є дуже перспективними. Основна мета багатьох компаній-конкурувати з іншими конкурентами.

Цього можна досягти за рахунок підвищення якості продукції, що випускається, зниження виробничих і експлуатаційних витрат на обладнання та створення асортименту нових продуктів.

Оскільки розробки нового обладнання, завжди бере до уваги побажання та зауваження зварювальників для того, щоб створити універсальний апарат, здатний задовольнити запити навіть найвибагливішого фахівця. Це гармонійне поєднання складних технологій, простого інтуїтивного керування та високої ефективності. Даний проєкт передбачає співпрацю із замовником

відповідно до його вимог при збереженні інтелектуальної власності замовника. У загальному, MIG/MAG наплавлення є ефективним і надійним методом для відновлення та покращення металевих деталей.

Таблиця 5.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги до споживачів до товару
1.	Потреба в інноваційних високоефективних проєктах	Будівництво	Необхідність виготовлення продукції за стандартами	Міцне та швидкісне наплавлення деталі
2.	Потреба в ефективному ремонті та відновленні обладнання	Промисловість	Спрямованість на зменшення простоїв та покращення продуктивності обладнання	Висока якість ремонту і можливість наплавлення складних форм деталей

Отже визначивши потенційні групи клієнтів, проведемо аналіз ринкового середовища: складемо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проєкту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 6.6-6.7)

Таблиця 5.6. Фактори загрози.

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Фінанси	Витрати на матеріали (присадний дріт) та устаткування .	Закупівля оптом матеріалів , кредит.
2.	Низька подача напруги під час воєнного стану	Швидкість подачі присадного дроту поєднується з величиною сили струму	Використання потужних генераторів
3.	Конкуренція	Підприємства по 3D наплавленню (3D Systems, EOS, Renishaw) в яких новітні та модернізовані технології для виготовлення деталі	Дослідження та впровадження нових технологій наплавлення

Таблиця 5.7. Фактори можливостей.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на 3D устаткування	Розширенням промисловості наплавлення деталей та впровадженням нових технологій виготовлення продукції, 3D наплавлення металом стає все більш актуальним.	Розширення попиту на виготовлення продукції.
2	Технологічність	Застосування різних методів для адитивного наплавлення	Впровадження нових методів наплавлення, збільшення собі вартості продукту та продуктивності.
3	Роботизація	Можливість використання роботизоване обладнання.	Впровадження роботів для виготовлення продукції

Ринкове середовище для адитивних технологій є гнучким і конкурентним, що відкриває широкі можливості для зростання. Ключовими факторами успіху є інновації, висока якість продукції, ефективне після продажне обслуговування та здатність швидко реагувати на мінливі потреби ринку. Ретельний аналіз ринку допоможе вам краще зрозуміти його вимоги та адаптувати свою бізнес-стратегію для досягнення конкурентної переваги.

Проведемо фінальний етап ринкового аналізу можливостей впровадження проекту за складенням SWOT-аналізу.

Таблиця 5.8 - SWOT- аналіз стартап-проекту.

Сильні сторони:	Слабкі сторони:	Можливості:	Загрози
Виготовлення індивідуальної та якісної продукції.	Високі витрати на устаткування та матеріали.	Зростання попиту 3D наплавлення	Конкуренція
Доступність, простота в обслуговуванні	Обмеженість у масовому виробництві	Різноманітність методів виготовлення продукції	Фінансові можливості
Роботизація		Застосування роботизованого обладнання	

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки, які представлені в таблиці 5.9, (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та вкажемо орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Таблиця 5.9. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Пошук інвесторів, партнерство, кредит.	Середня	5-8 місяців
3	Ефективна маркетингова кампанія	Висока	4-8 місяців

6. Охорона праці

Будь-яке зварювання має виконуватися з дотриманням норм безпеки. Процеси плавки, наплавлення і зварювання металів – джерело утворення небезпечних і шкідливих факторів, які впливають на організм людини.

Постійно винаходять все нові і нові способи поліпшення галузі, оскільки вони радикально змінюють і покращують виробництво. Також в список нових методів входять адитивні технології. Адитивна технологія – це поетапне додавання шару для створення певної деталі, що набагато вигідніше і зручніше, ніж виготовлення деталі цілком, а також дає можливість виготовляти деталі складної і незвичайної форми.

Однак, оскільки новий метод – це нова технологія, а нова технологія небезпечна для робітників та навколишнього середовища, необхідно дотримуватися вимог охорони праці при виконанні самого завдання.

Основною темою даного дипломного проєкту є адитивне MIG/MAG наплавлення в середовищі захисного газу (CO_2) можна сказати, що відбувається зварювання в середовищі захисного газу.

Мета цього розділу – розробити заходи безпеки для MIG/MAG наплавлення, а також захистити працівників та запобігти небезпечним та надзвичайним ситуаціям.

6.1. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

У даному підрозділі розглянемо шкідливі та небезпечні фактори для наплавлення, тобто джерело енергії у вигляді зварювальної дуги в захисних газах. Як і в будь-якому іншому виробництві, необхідно скласти план безпеки і чітко його дотримуватися. За допомогою цієї технології існує безліч небезпечних і шкідливих факторів а тому в таблиці 7.1 наведу інтенсивність того чи іншого фактору.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори за природою дії поділяються на 4 групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [12].

Таблиця 6.1 - Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при наплавленні.

ШНВФ для наплавлення в CO ₂		Інтенсивність фактора
Шкідливі виробничі фактори	Шкідливі речовини	++
	Ультрафіолетове випромінювання	+
	Видиме випромінювання	++
	Інфрачервоне випромінювання	+
	Електромагнітні поля	-
	Магнітні поля	-
	Іонізуючі випромінювання	-
	Шум	-
	Ультразвук	-
	Статичне навантаження руху	+
Небезпечні виробничі фактори	Електричний струм	++
	Іскри, бризки і види розплавленого металу	-
	Механізми і вироби, що рухаються	+
	Системи, які знаходяться під тиском, що не дорівнює атмосферному	+

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

Хімічно небезпечних та шкідливих факторів є зварювальні аерозолі (пил), за станом дії: токсичні, подразнюючі, за шляхом проникнення в організм через: органи дихання, шкірні покриви та слизові оболонки.

Фізичні фактори, рухомі частини виробничого обладнання, гострі краї та нерівності заготовок, інструментів, підвищена температура обладнання, матеріалів, температура та вологість повітря, підвищена яскравість світла,

підвищений рівень випромінювання (електромагнітних, іонізуючих, ультрафіолетових), електробезпека.

До психофізіологічних факторів: фізичні статичні перевантаження, нервово-психічні навантаження, монотонність праці.

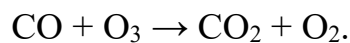
Біологічні не відносяться до факторів адже при наплавленні дуже зрідка виникають, або взагалі відсутні.

Під час процесу необхідно забезпечити максимальний захист органів зору і дихання, так як весь пар і яскраве світло від дуги є небезпечним, а для випарів чітко продумані вентиляції. Отже можна сказати, що цей процес має високий рівень небезпеки та шкідливості через його специфічні методи роботи.

Гази, що утворюються під час MIG/MAG наплавлення

Основною причиною утворення токсичного монооксиду вуглецю при зварюванні в CO_2 є дисоціація останнього при високій температурі зварювальної дуги: $\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ [11].

При виході із зони високих температур монооксид вуглецю знову з'єднується з киснем і озоном, перетворюючись в діоксид вуглецю:



Монооксид вуглецю може утворюватися також при відновлюванні вуглецю з його діоксиду металом і в результаті термічної дисоціації газоутворюючих карбонатів у складі шлакоутворюючих компонентів зварювальних матеріалів.

Монооксид азоту з'являється в результаті високотемпературного окиснення азоту повітря, яке оточує дугу: $\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}$.

Під впливом ультрафіолетового випромінювання дуги монооксид азоту окиснюється киснем повітря до отруйного діоксиду азоту: $2\text{NO} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}_2$ [49].

При зварюванні в CO_2 дуга горить в атмосфері цього газу, тому інтенсивність утворення оксидів азоту дуже невелика порівняно з монооксидом вуглецю.

Озон утворюється з кисню повітря і захисного газу під дією ультрафіолетового випромінювання дуги: $3\text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{O}_3$.

У початковий момент зварювання його концентрація висока, але потім він реагує з оксидом азоту, утворюючи діоксиди азоту та кисень:



При використанні зварювальних матеріалів, до складу яких входить фтористий кальцій або інші компоненти, що вміщують фтор, в повітрі спостерігається фтористий водень та тетрафтористий кремній. Фтористий водень з'являється в газовому середовищі при температурі вище 2000°C в результаті взаємодії фтористого кальцію з водяною парою: $\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} + 2\text{HF}$.

Потім при взаємодії фтористого водню з діоксидом кремнію, присутнім у складі зварювальних матеріалів, утворюється газоподібний тетрафтористий кремній: $\text{SiO}_2 + 4\text{HF} \rightarrow \text{SiF}_4\uparrow + \text{H}_2\text{O}$.

За наявності у складі шлакоутворюючої основи зварювальних матеріалів діоксиду титану в повітрі з'являється газоподібний тетрафтористий титан TiF_4 . При зварюванні титану під флюсами, які вміщують фтор, (наприклад, при вмісті у флюсі фтористого лантану) також утворюється тетрафтористий титан: $3\text{Ti} + 4\text{LaF}_3 \leftrightarrow 4\text{La} + 3\text{TiF}_4\uparrow [11]$.

CO_2 в півтора рази важчий за повітря – тому може накопичуватись в нижніх шарах приміщення, внаслідок цього знижувати вміст необхідного для дихання кисню в зоні дихання і призвести до отруєння людини.

Значення положення пальника при MIG/MAG наплавленні

При MIG/MAG наплавленні велике значення має також положення пальника по відношенню до зварюваної деталі та напрям наплавлення. Наплавлення може виконуватися вертикально, кутом вперед і кутом назад:

Кутом назад – пальник позиціонується так, що напрямок подачі електродного дроту був протилежним до напрямку переміщення пальника. Досягається висока стабільність дуги і знижується розбризкування металу. Застосовується для з'єднання товстого металу, при цьому досягається велика

глибина проплавлення, за рахунок концентрації тепла у зварювальній ванні. Крім того, зварювальник бачить зварювальну ванну, що дозволяє підвищити якість зварювання.

Кутом вперед – напрямок подачі електродного дроту збігається з напрямком руху пальника. Застосовується для з'єднання тонкого металу, при цьому досягається менша глибина проплавлення, зварний шов більш широкий, зварювання відбувається з більшою швидкістю завдяки спеціальному розподіленню тепла.

Вертикальне зварювання – напрям подачі електродного дроту перпендикулярний до напрямку руху пальника. Техніка зварювання використовується переважно в автоматичному обладнанні або в умовах необхідності. Утворюється вузький зварний шов при малій глибині проплавлення.

Слід зазначити, що для зміни способу зварювання не потрібно змінювати напрямок переміщення пальника, досить змінити його нахил.

6.2. Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Кут нахилу переміщення пальника

Вуглекислий газ CO_2 забезпечує досить глибоке проплавлення, тому популярний при зварюванні товстого металу. До недоліків зварювання в середовищі вуглекислого газу можна віднести менш стабільну зварювальну дугу, яка веде до збільшеного розбризкування. Зазвичай використовується для напівавтоматичного MAG зварювання короткою дугою і MAG зварювання порошковим дротом.



Рисунок 6.1 – Кут нахилу 5°-15°

Кут нахилу від 5° до 15° ідеально підходить для зварювання і забезпечує хороший рівень контролю над зварювальною ванною (рисунок 7.1.)

Кут нахилу більший, ніж 20° , призведе до нестабільного горіння дуги, поганого перенесення металу, меншої глибини проплавлення, а також, великого розбризкування (рисунок 6.2.)



Рисунок 6.2 – Кут нахилу більше 20°

Вимоги до експлуатації установок адитивного MIG/MAG наплавлення

Обладнання для зварювання має високі вимоги до експлуатації. Воно повинно завжди бути підключене до мережі, а обслуговуванням повинен займатися тільки електротехнічний персонал з відповідним класом допуску. Блоки живлення приладдя мають бути підключені до мережі напругою не більше 600 В. На всіх роз'ємах, що мають відношення до мережі, повинна бути відповідна позначка "МЕРЕЖА" та "НЕ ВМИКАТИ БЕЗ ПОТРЕБИ".

Кожне металеве обладнання, яке має контакт з електричною мережею, обов'язково повинно бути заземлене для забезпечення безпеки персоналу. Перед початком роботи необхідно ретельно перевірити електричне обладнання на наявність дефектів, таких як неправильна ізоляція, розірвані кабелі заземлення, а також перевірити роботоздатність трансформаторів і екстреної зупинки.

Таблиця 6.2 – Проблеми при MIG/MAG наплавленні, причини їх виникнення та методи усунення

Проблема	Причини проблеми.	Методи усунення
Занадто велике розбризкування	1. Занадто велика швидкість подачі дроту. 2. Занадто велике значення зварювальної напруги. 3. Неправильна полярність зварювання. 4. Занадто великий виліт дроту. 5. Забруднення на поверхні зварюваного металу. 6. Забруднення зварювального електродного дроту. 7. Неправильно відрегульована подача захисного газу.	1. Встановити меншу швидкість подачі. 2. Зменшити значення напруги зварювання. 3. Встановити полярність, відповідну до способу зварювання. 4. Наблизити зварювальний пальник до виробу, оптимальний виліт складає 10-15 мм. 5. Очистити поверхню деталі, що зварюється до металевого блиску і знежирити її. 6. Використовувати чисті зварювальні матеріали згідно ДСТУ 2246-80 без слідів масляних забруднень та іржі. 7. Перевірити правильність під'єднання газових шлангів від балона та

		апарату. Переконатися, що сам балон відкритий і налаштувати витрату захисного газу в діапазоні 8-12 літрів на хвилину.
В процесі зварювання дріт впирається в деталь без плавлення	1. Занадто великий виліт дроту. 2. Занадто низьке значення напруги при наплавленні. 3. Занадто велика швидкість подачі дроту. 4. Відсутній електричний контакт між деталлю та клемою маси «-». 5. Неправильно обраний присадковий дріт.	1. Наблизити зварювальний пальник до виробу, оптимальний виліт складає 10-15 мм. 2. Встановити значення напруги зварювання згідно з технологією зварювання. 3. Встановити меншу швидкість подачі дроту. 4. Перевірити з'єднання. 5. Обрати дріт згідно до технології зварювання.
Надмірне проплавлення	1. Надмірне тепловкладення.	1. Зменшити значення зварювальної напруги, відрегулювати швидкість подачі дроту.
Нестабільна подача дроту	1. Неправильно встановлені параметри зварювання. 2. Занадто довгий шланговий пакет пальника.	1. Встановити режим зварювання згідно технологічної карти. 2. Для малих діаметрів дроту (0,6-0,8 мм) і для

	3. Неправильний розмір направляючого каналу пальника.	дроту з м'яких металів (сплави алюмінію) рекомендується використовувати пальники зі шланговим пакетом довжиною не більше 3м. 3. Замінити направляючий канал відповідно до дроту який використовується.
--	---	---

Вентиляція при використанні установок MIG/MAG наплавлення.

Якщо під час роботи установок концентрації шкідливих речовин (аерозолі і газів) у повітрі робочої зони не відповідають вимогам гігієнічних регламентів хімічних речовин у повітрі робочої зони [14], необхідно облаштовувати місцеву витяжну вентиляцію.

Вентиляція – процес повітрообміну у виробничих приміщеннях, який забезпечує нормовані значення параметрів мікроклімату та чистоту повітря. При проектуванні вентиляції необхідно дотримуватися таких вимог:

1. Вентиляція повинна забезпечувати необхідну чистоту повітря та параметри мікроклімату виробничого приміщення в відповідності з нормами «Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони» № 1596 від 14.07.2020 р.

2. Загальнообмінна вентиляція повинна забезпечувати ефективний баланс між об'ємами повітря, що надходять в приміщення та видаляються з нього.

3. Система вентиляції не повинна створювати додаткових шкідливих і небезпечних факторів (переохолодження, перегрів, шум, вібрація, пожежовибухонебезпека).

4. Вентиляційне обладнання не повинно заважати рухові внутрішньоцехового транспорту, знижувати продуктивність праці, впливати на якість зварювання.

5. Вентиляція повинна забезпечувати економічність та надійність при експлуатації [24].

При значних об'ємах виробничих приміщень, невеликій кількості працюючих та наявності постійних робочих місць технічно обґрунтовано та економічно доцільно використовувати витяжну місцеву вентиляцію. Система місцевої витяжної вентиляції використовується для уловлювання та витягування шкідливих виділень в місці їх утворення, що в свою чергу запобігає їх поширенню по всьому приміщенню від окремих апаратів або машин.

Конструкції місцевих відсмоктувачів можуть бути повністю закритими, напіввідкритими чи відкритими. Найбільш ефективними є закриті відсмоктувачі. До них належать кожухи та камери з відсмоктувачами, які герметично чи щільно закривають обладнання. Різновидом місцевої витяжної вентиляції є аспірація, яка служить для видалення шкідливих речовин з місця їх утворення шляхом відсмоктування забрудненого повітря від герметизованого обладнання.

Якщо з технічних причин такі конструкції застосовувати неможливо, то використовуються напіввідкриті та відкриті відсмоктувачі: витяжні зонти і панелі, а також інші пристрої.

Над обладнанням з вертикальними потоками нагрітого забрудненого повітря установлюють зонти (рис. 6.3 а), при наявності горизонтальних потоків повітря – бортові відсмоктувачі. Кут розкриття зонта – не більше 60° . Допускається збільшувати його до 90° . Для витягування аерозолів та газів від відкритих джерел забруднень на підприємствах установлюють також відсмоктуючі панелі (рис. 6.3 б) .

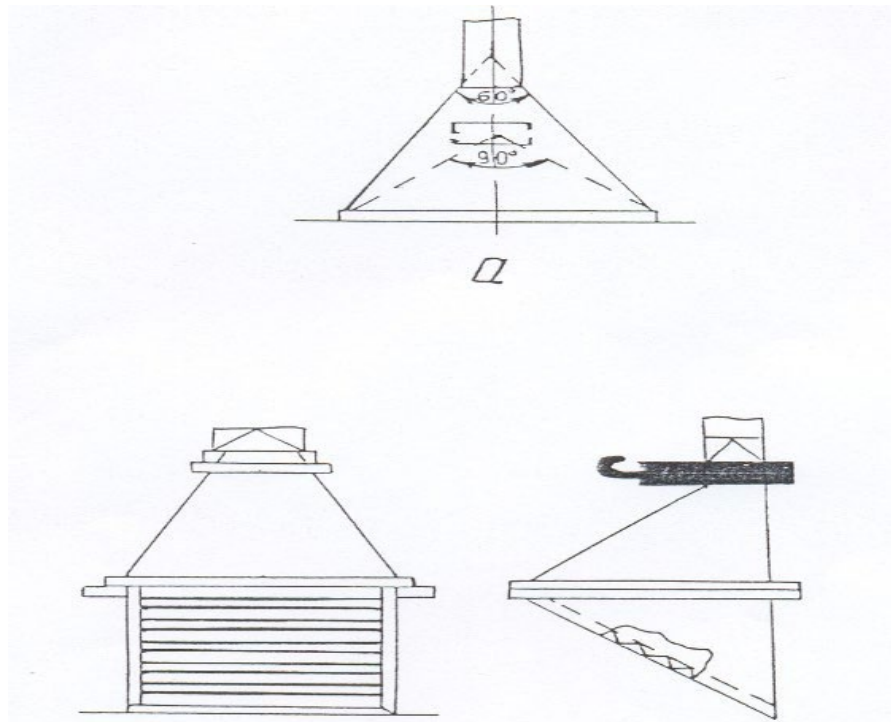


Рисунок 6.3 – Основні конструкції місцевої витяжної вентиляції: а – зонт; б – панель рівномірного відсмоктування

Швидкість повітря в отворі відсмоктувача розраховують за формулою:

$$V_o = 8 \cdot Vx \cdot (x/d)^2 = 11,52 \text{ м/с},$$

де x – відстань від вхідного отвору воронки до зони зварювання, м;

d – діаметр вхідного отвору, м.

Витрати повітря, що видаляється відсмоктувачем, визначаються за формулою:

$$L_M = 3600 \cdot F_o \cdot V_o = 1658 \text{ м}^3/\text{год},$$

де V_o – швидкість повітря в отворі відсмоктувача, м/с;

F_o – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача.

Останнім часом для технологічних процесів, в яких джерело забруднення може змінювати своє місце розташування (наприклад, зварювання великогабаритних деталей), широке впровадження знаходять нові конструкції систем місцевої вентиляції:

- підйомно-поворотні пристрої місцевого відсмоктування, приєднані до централізованої системи, по якій забруднене повітря видаляється

вентилятором з приміщення;

- підйомно-поворотні пристрої місцевого відсмоктування, що повертають очищене повітря в приміщення;
- консольно-поворотні пристрої місцевого відсмоктування, приєднані загальним повітроводом до фільтра, що забезпечує повернення очищеного повітря в приміщення;
- переносні вентиляційні агрегати (вентилятори з гнучкими шлангами);
- пересувні фільтровентиляційні агрегати (ФВА);
- портативні пересувні ФВА;
- витяжні пристрої, вмонтовані в зварювальне обладнання [24].

Вимоги до організації робочих місць

Облаштування робочих місць повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99 [20].

Робоче місце. Зварювання повинно проводитися в сухих приміщеннях з вологістю повітря не більше 80%. Температура навколишнього середовища повинна знаходитися в діапазоні від мінус (-) 10° до плюс (+) 40°С. Не можна проводити зварювальні роботи на відкритому повітрі, в місцях, незахищених від впливу прямих сонячних променів і дощу, не допустиме попадання води і пари всередину апарату. Зварювання в подібних місцях і в місцях, де присутні їдкі хімічні гази, заборонено. Зварювання в місцях, з сильним повітряним потоком заборонено.

Обладнання. Зварювальне обладнання охолоджується за допомогою системи примусового повітряного охолодження. Перед початком роботи потрібно переконатися в тому, що вентиляційні решітки апарату відкриті. Вільна зона навколо обладнання повинна бути не менше 30 см. Хороша вентиляція – одне з найбільш важливих умов для нормальної роботи і продовження терміну служби установок адитивного MIG/MAG наплавлення.

Напруга мережі живлення. Установки адитивного MIG/MAG наплавлення здійснює автоматичну компенсацію напруги мережі живлення в допустимому діапазоні. Якщо рівень напруги виходить за допустимі межі, це

може привести до поломки обладнання, тому потрібно звертати увагу на зміну напруги. При коливанні напруги мережі більше ніж на 15%, потрібно припинити зварювання і вимикайте апарат.

Захист від перегріву. Захист від перегріву спрацьовує, якщо має місце перевантаження устаткування через занадто довгий час зварювання, тоді відбувається мимовільне автоматичне відключення апарату. У цьому випадку немає необхідності заново вмикати апарат. Необхідно дати вбудованій системі охолодження охолодити внутрішні вузли апарату, зачекати, коли згасне світлодіод перегріву, після чого знову продовжити роботу.

Захист від ураження електричним струмом. Щоб уникнути ураження електричним струмом, установка адитивного MIG/MAG наплавлення повина бути надійно заземлена. Категорично заборонено торкатися до вихідного контактного затискача під час проведення зварювальних робіт.

Вимоги до застосування засобів індивідуального захисту

У наш час в буденному житті кожної людини може статися багато небезпечних ситуацій, тому дуже важливо не нехтувати правилами і вимогами для власного захисту, особливо в промисловості, де зварювальні технології також мають свої власні особливості. Саме тому працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту, які прописані у ДСТУ 7239:2011 [13].

В першу чергу потрібно захистити легкодоступні та відкриті частини тіла від бризків, пилу та інших факторів, які можуть нашкодити працівникам. Для цього необхідно використовувати спеціальний костюм «зварювальна роба», а також захист органів дихання, який відповідає вимогам стандарту ДСТУ EN 133:2005. [14].

Нажаль роба не захищає все тіло повністю, а саме руки тому від бризків підчас зварювання, та зачистки металу після, необхідно користуватися рукавичками ДСУ EN 420-2017 [14].

Також слід не забувати що так само як руки роба не захищає очі тому для захисту зору та обличчя також потрібно дотримуватися вимог ДСУ EN

169-2001 [54], та використовувати захисний щиток.

Вимоги до виробничих приміщень

Зварювання повинне проходити в повному захисті для людей а тому потрібно огородити місце зварювання прозорим щитом висотою до 2-х метрів [41].

Залежно від розмірів приміщення потрібно дотримуватися загально прийнятих норм розміщення приладдя у будинках адміністративного та побутового призначення ДБН В.2.2-28:2010 [42]. Ширина проходів навколо будь-яких установок і приладів повинна бути не менше 1 метра. Зварювання є небезпечним з точки зору пожежної безпеки, тому слід звернути увагу на підлогу. Бризки від зварювання мають високу температуру і можуть легко підпалити приміщення, тому необхідно використовувати матеріали з низькою теплопровідністю. Для забезпечення безпеки пересування потрібна рівна поверхня, щоб уникнути спотикань через нерівності, а також неслизька, щоб знизити ризик падінь та травм.

Зварювання є дуже трудомісткою роботою, тому необхідно постійно контролювати температуру в приміщенні та забезпечувати подачу свіжого повітря. Є два способи вирішення цієї проблеми: якщо повітря подається через вентиляцію, температура не повинна опускатися нижче +20°C. Однак, якщо подачі повітря недостатньо, необхідна примусова подача чистого повітря в приміщення, а також окремо до захисної маски зварника. Дивитись ДСН 3.3.6-042-99 [18]. Проте якщо мікроклімат приміщення не відповідає вимогам ДСН 3.3.6-042-99 [18]. то потрібно захистити виконавця від цих небезпек спеціальним захисним костюмом.

За вимогами ДСН 3.3.6.039-99 . потрібно дотримуватись норми загальної та локальної вібрації. Та норм виробничого шуму, ультразвуку, інфразвуку [11].

Освітлення приміщень та робочих місць для зварювання слід вибирати між прямим точковим освітленням, яке направлене безпосередньо на місце зварювання, або забезпеченням якісного місцевого освітлення. Вимоги подані

у ДБН В.2.5.28-2006 .

Пожежна безпека

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [24], приміщення для зварювання підлягає категорії Г (матеріали в розплавленому стані), через те що робочий процес відбувається з розплавленим металом, що супроводжується іскрами та полум'ям .

Дотримання пожежної безпеки ДБН В.2.5-13-98 [24], забезпечує:

- запобігання спалаху ізоляції при КЗ за рахунок максимального струменевого захисту;
- запобігання утворення горючого середовища за рахунок надійної герметизації обладнання, обмеженням застосування і зберігання горючих і вибухонебезпечних речовин;
- застосування пожежної сигналізації з датчиком (ИДФ-І, ДПД і др.); - використанням вогнегасників (клас пожежі В): ОХП-10, ОХВП-10, ОВП-7, ОХ-7, ОП-10А;
- для класу пожежі Е вогнегасники типу УО, ОП-10А (вибрати тип і кількість відповідно до НАПБ Б.01.008-2018 [24]).

Висновок

Розділ з охорони праці містить багато важливих заходів для забезпечення безпеки умов праці, які надзвичайно важливо дотримуватися. В рамках цього розділу було визначено заходи безпеки для зварювання в захисному газі, зокрема пожежну безпеку, використання засобів індивідуального захисту і вимоги до них, а також вимоги щодо електробезпеки на робочих місцях і вентиляції. Завдяки цим вимогам створюються безпечні умови праці для працівників.

Список використаної літератури

1. DIY Metal 3D Printer [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hackaday.com/2021/11/23/ender-3-meets-mig-welder-to-make-a-metal-benchy-kind-of/>
2. RIBEIRO, F.; NORRISH, J. Metal based rapid prototyping for more complex shapes. Biennial international conference on “Computer Technology in Welding”. p. 1–11, 1996
3. SPENCER, J. D.; DICKENS, P. M.; WYKES, C. M. Rapid prototyping of metal parts by three- dimensional welding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. v. 212, p. 175– 182, 1998. / [Електронний ресурс]. – <https://doi.org/10.1243/0954405981515590>
4. BARKER, R. US Patent US1533300A. Method of making decorative articles, 1920.
5. MX3D Bridge / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mx3d.com/projects/mx3d-bridge/>
6. Cold Metal Transfer (CMT) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://blog.iqb.ua/waampeller-case/>
7. Пішохідний міст зі сталі, надрукований на 3D-принтері. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/3281848-nadrukovanij-na-3dprinteri-persij-stalevij-mist-vidkrili-v-amsterdami.html>
8. МЕХАНІЗОВАНЕ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ В АКТИВНИХ ГАЗАХ Навчальний посібник з підготовки до кваліфікаційних випробувань зварників. (ДСТУ ISO 9606-1:2016) І.А.Краско В.В.Лисак
9. Зварювання MIG/MAG: високошвидкісний метод зварювання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnohiiyi/svit-zvaryuvannya/mig-mag-zvaryuvannya>
10. PATON ProMIG-250-15-4 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://allo.ua/ua/svarochnye-poluavtomaty/svarochnyj-poluavtomat-paton-psi-250-rro-15-html?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwte-

[vBhBFEiwAQsv_xZogBp-TuXerPCAzeoq1xvNQJGNAw9fp7n7I2I30KRqn-oIvmZQpMBoCijjsQAvD_BwE](#)

11. Охорона праці та цивільний захист / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний та ін. // За ред. О. Г. Левченка. – К.: Основа, 2019. – 8 с
12. НПАОП 28.0-1.37-14. Правила охорони праці при нанесенні металопокриттів.
13. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування.
14. НПАОП 0.00-6.18-04. Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки.
15. ДСТУ EN 954-1:2003. Безпечність машин. Елементи безпечності систем керування. Частина 1. Загальні принципи проектування.
16. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки адміністративного та побутового призначення.
17. ДСН 3.3.6-042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
18. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.
19. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
20. ДБН В.2.5.28-2006. Природне та штучне освітлення.
21. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки
22. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
23. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
24. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс] : навч.

посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» спец. 131 Прикладна механіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. Г. Левченко. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 362 с.

Додатки

1. Специфікація ЗВ01.12.03.000
2. Специфікація ЗВ01.12.04.000