

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ІНСТИТУТ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ЗВАРЮВАННЯ імені Є.О.
ПАТОНА
КАФЕДРА СМАРТ-ТЕХНОЛОГІЙ З'ЄДНАНЬ ТА ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ**

"На правах рукопису"
УДК 621.791

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ І. В. Смирнов

“ ” _____ 2021 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 131 Прикладна механіка
на тему:**

«Обладнання для адитивного виробництва способом MAG»

Виконав: студент II курсу, групи ЗС-01мп
Максимчук Тарас

(підпис)

Керівник:
Професор, д.т. н., доцент Мінаков С. М.

(підпис)

Консультант з охорони праці:
Професор, д. т. н., Левченко О. Г.

(підпис)

Рецензент:
Доцент каф. зварювального виробництва,
к.т.н., Прохоренко О.В.

(підпис)

Нормоконтроль:
Інженер з навчального процесу,
Спіріна К.О.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2021 рік

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім.
Є.О.Патона

Кафедра смарт технологій інженерії з'єднань та поверхонь
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
програмою Технологічні системи інженерії з'єднань та поверхонь

Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Ігор СМІРНОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)
« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Максимчуку Тарасу Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації ***Обладнання для адитивного виробництва способом MAG***

науковий керівник дисертації Мінаков Сергій Миколайович, канд.техн.наук,
доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «15» листопада 2021 р. №3340-с

3. Об'єкт дослідження: адитивні технології з використанням MAG
зварювання

4. Вихідні дані: Поперечний переріз деталі, що наплавляється не менше
400x500 мм. Зварювальний дріт СВ-08Г2С діаметром 1,2 мм. Матеріал на
який направляється – сталь звичайної якості. Захисне середовище – CO₂.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

Провести аналіз способів адитивного виробництва металевих деталей;

Розробити установку для адитивного виробництва способом MAG;

Розробити новий механізм переміщення пальника по осі Z;

Розробити кріплення пальника;

Розробити кріплення деталей, що наплавляються у вертикальній площині із можливістю пересування по осі Y;

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____
Адитивні технології у виготовленні металевих виробів(3)
Обладнання для 3D наплавлення.....(1)
Механізм переміщення пальника по осі Z(1)
Формування шарів металу при наплавленні знизу вгору.....(2)
Формування шарів металу при наплавленні зверху вниз.....(2)
Розробка пропозицій на майбутнє(1)

7. Орієнтовний перелік публікацій: Тези студентської наукової конференції

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Проф., д.т.н., Левченко О. Г. зав. каф. охорони праці, промислової та цивільної безпеки		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз способів адитивного виробництва металевих деталей	05.11.2021 р.	
2	Розробка нового механізму переміщення пальника по осі Z	10.11.2021 р.	
2	Складання установки для 3D наплавлення	17.11.2021 р.	
3	Проведення досліджень формування наплавлених шарів знизу вгору	23.11.2021 р.	
4	Проведення досліджень формування наплавлених шарів зверху вниз	01.12.2021 р..	
5	Оформлення дисертації і передача її на кафедру	14.12.2021 р.	

Студент

(підпис)

Т.В.Максимчук
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

С.М.Мінаков
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

АНОТАЦІЯ

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-принтер, пальник, зварювальний дріт, 3D наплавлення, верстат із ЧПК, MAG зварювання, наплавлений шар.

Дисертація присвячена розробці обладнання для 3D наплавлення у вертикальному положенні способом MAG. Проведено аналіз існуючих адитивних способів зварювання; визначено їх основні переваги та недоліки. Визначено найперспективніші технології для адитивного виробництва. Проведено аналіз формування шарів металу при 3D – дуговому зварюванні. Запропоновано та розроблено нове обладнання для 3D наплавлення у вертикальному положенні на основі MAG зварювання. Розроблено механізм переміщення пальника по осі Z. Проведено випробування та аналіз розробленого обладнання шляхом наплавлення стінки у вертикальному положенні знизу – вверху та зверху – вниз. Запропоновано пропозиції для вдосконалення обладнання для 3D наплавлення.

Розроблено комплекс заходів із охорони праці для забезпечення нормальних умов праці без травматизму, пожеж, вибухів.

Обсяг пояснювальної записки складає 99 сторінок, ілюстрацій: 65, таблиць: 18.

ANNOTATION

Keywords: additive manufacturing, 3D printer, torch, welding wire, 3D surfacing, CNC machine, MAG welding, surfacing.

The dissertation is devoted to the development of equipment for 3D surfacing in the vertical position by MAG method. The analysis of existing additive welding methods is carried out; identified their main advantages and disadvantages. The most promising technologies for additive production have been identified. The analysis of formation of metal layers at 3D - arc welding is carried out. New equipment for 3D vertical surfacing based on MAG welding has been proposed and developed. The mechanism of movement of a torch on the Z axis which is fixed on a working table of the milling machine is developed. Tests and analysis of the developed equipment by surfacing the wall in a vertical position from bottom to top and from top to bottom are performed. A set of labor protection measures has been developed to ensure normal working conditions without injuries, fires and explosions.

The volume of the explanatory note is 99 pages, illustrations: 65, tables: 18.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ АДИТИВНИХ СПОСОБІВ ЗВАРЮВАННЯ	7
1.1. Формування шарів металу при 3D – дуговому зварюванні	30
ВИСНОВКИ ПО ГЛАВІ 1	37
2. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ 3D НАПЛАВЛЕННЯ	38
2.1. Зварювальний апарат RATON ProMIG-250-15-4	38
2.2. Механізм переміщення.....	40
2.3 Механізм переміщення пальника по осі Z.....	44
ВИСНОВКИ ПО ГЛАВІ 2.....	57
3. ВИПРОБУВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	58
ВИСНОВКИ ПО ГЛАВІ 3.....	72
4. ПРОПОЗИЦІЇ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ 3D НАПЛАВЛЕННЯ.....	73
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	75
5.1. Опис ідеї проекту.....	75
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту	76
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	77
6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	80
6.1. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів	80
6.2. Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці.....	82
6.3. Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях	88
ВИСНОВКИ	90
СПИСК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	92

ВСТУП

Адитивні технології або технології пошарового синтезу — сьогодні один із найбільш динамічних напрямів “цифрового” виробництва. Проведений економіко-правовий аналіз показав, що вони дозволяють значно прискорити виконання НДДКР і вирішення задач підготовки виробництва, виготовлення продукції. Технологія може підвищити рентабельність окремого виробничого підрозділу в середньому на 23% і зменшити виробничі бар’єри на 90%. Відповідно до динаміки розвитку, ринок адитивних технологій випереджає інші галузі [1].

Технології 3D-друку дозволяють створювати деталі складних геометричних фігур, які практично неможливо створити за традиційними технологіями. Великою перевагою є безвідходне виробництво, оскільки для виробництва продукту використовується стільки матеріалу, скільки необхідно. Адитивні технології дозволяють виготовити необхідні деталі в короткі терміни і заощадити значний час і гроші.

Сьогодні використовується ряд 3D-технологій – друку металевих виробів. Серед них найбільше поширення набули методи вибіркового лазерного плавлення (SLM), електронно - променевого плавлення (EBM), лазерного вирощування металевих 3D – об’єктів (DMD) та адитивні плазово – дугові зварювальні технології. Ці технології дорогі через їх цінне обладнання та матеріали, низьку продуктивність та обмежений розмір деталей. Крім того, використання цих методів унеможливорює виготовлення великогабаритних виробів.

Тому для розширення можливостей тривимірного друку металевих виробів важливо розробити нові методи адитивного виготовлення металевих виробів. До таких методів належать процеси зварювання MIG – MAG.

1. АНАЛІЗ АДИТИВНИХ СПОСОБІВ ЗВАРЮВАННЯ

На сьогоднішній день у світі існує велика різноманітність методів адитивного виробництва (табл.1) [2]. Основні відмінності даних методів полягають у способі нанесення матеріалу та виду використаного матеріалу.

Таблиця 1 - Основні методи адитивного виробництва

Метод	Технологія	Використовувані матеріали
Екструзійний	Моделювання методом пошарового наплавлення (FDM або FFF)	Термопластики (такі як полілактид (PLA), акрилонітрилбутадієнстирол (ABS) та ін.)
Дротовий	Виробництво довільних форм електронно - променевим плавленням (EBF)	Майже будь - які металеві сплави
Порошковий	Пряме лазерне спікання металів (DMLS)	Майже будь - які металеві сплави
	Електронно - променеве плавлення (EBM)	Титанові сплави, кобальт - хромові сплави, нержавіюча сталь, алюміній
	Вибіркове лазерне плавлення (SLM)	Титанові сплави, кобальт - хромові сплави, нержавіюча сталь, алюміній
	Вибіркове теплове спікання (SHS)	Порошкові термопластики
	Вибіркове лазерне спікання (SLS)	Термопластики, металеві порошки, керамічні порошки
Струйний	Струйний тривимірний друк (3DP)	Гіпс, пластики, металеві порошки, піщані суміші
Ламінування	Виготовлення об'єктів методом ламінування	Папір, металева фольга, пластикова плівка
Полімеризація	Стереолітографія (SLA)	Фотополімери
	Цифрова світлодіодна проекція (DLP)	Фотополімери

Для отримання металевих тривимірних деталей найбільш раціональними вважаються технології вибіркового лазерного плавлення (Selective Laser Melting – SLM), електронно-променевого плавлення (Electron-Beam Melting –

EBM) та лазерного вирощування металевих 3D – об'єктів (Direct Metal Deposition - DMD).

SLM (Selective Laser Melting) селективне (вибіркове) лазерне плавлення - новаторська технологія виготовлення складних за формою і структурою виробів з металевих порошків за математичними CAD-моделями [3].

Цей процес полягає в послідовному пошаровому розплавленні порошкового матеріалу за допомогою потужного лазерного випромінювання.

Переваги SLM:

- друк деталей складної геометрії без додаткової механічної обробки
- безвідходне виробництво
- виготовлення одночасно декількох деталей
- висока густина наплавленого матеріалу (до 90 %)

Недоліки SLM:

- висока вартість обладнання та обслуговування
- відносно низька продуктивність (не більше 10 см³/год)

Установка для створення об'ємних металевих виробів за методом SLM показано на рис.1 [4]. Схема процесу вибіркового лазерного плавлення та готові вироби на рис. 2 та рис. 3 відповідно.



Рисунок 1 - Установка для селективного лазерного плавления SLM®280HL має робочу камеру для виготовлення деталей з максимальними габаритами 280×280×365 мм і дозволяє використовувати запатентовану лазерну технологію [4].

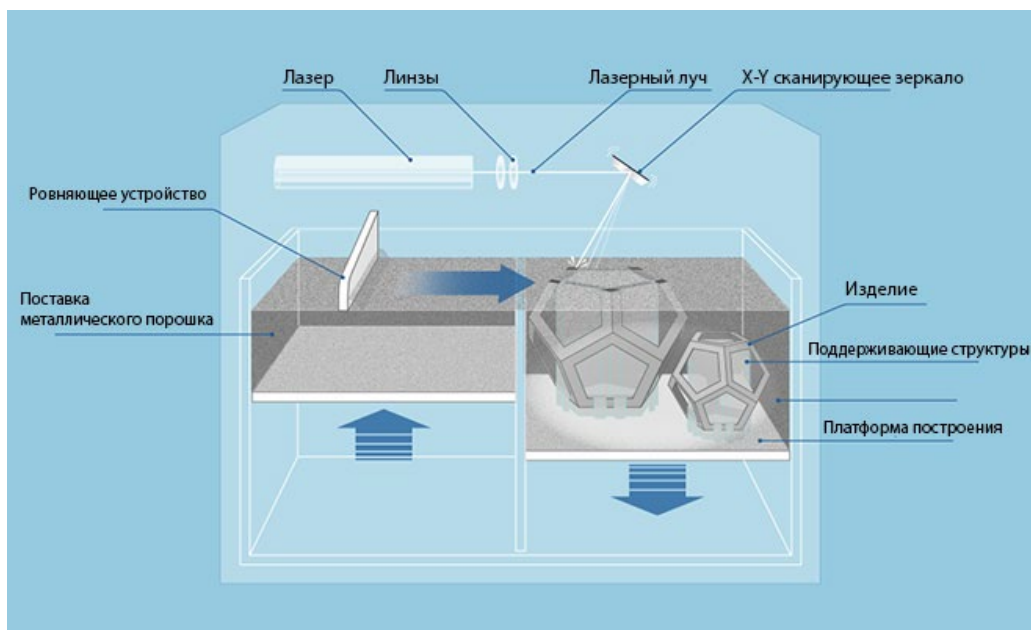


Рисунок 2 – Схема процесу вибіркового лазерного плавлення (Selective Laser Melting – SLM)



Рисунок 3 – Готові вироби виготовлені за принципом селективного лазерного плавлення (SLM)

EBM (Electron Beam Melting) електронно - променеве плавлення - інноваційний процес адитивного виробництва, в якому металевий порошок повністю розплавляється концентрованим пучком електронів.

Виробництво у вакуумній камері гарантує, що окислення не поставить під загрозу реактивні матеріали, такі як титан. Створення вакууму є необхідною умовою, щоб електрони не стикалися з молекулами газу [5].

В порівнянні з SLM технологія має такі переваги:

- відносно висока продуктивність (до 55-80 см³/год)
- ймовірність виникнення надлишкових напружень зводиться до мінімуму внаслідок температури в камері яка складає 700-1000 °С
- відсутність дорогоцінного обладнання (лазерних дзеркал і лінз)

До недоліків можна віднести необхідність спеціального покриття стримуючого рентгенівське випромінювання, яке виділяється при електронній плавці металу [6].

Установка для створення об'ємних металевих виробів за методом (EBM) показано на рис.4.



Рисунок 4 – Установка для створення об'ємних металевих виробів за методом EBM, Arcam EBM Spectra H, об'єм робочої зони становить Ø250x430 мм.

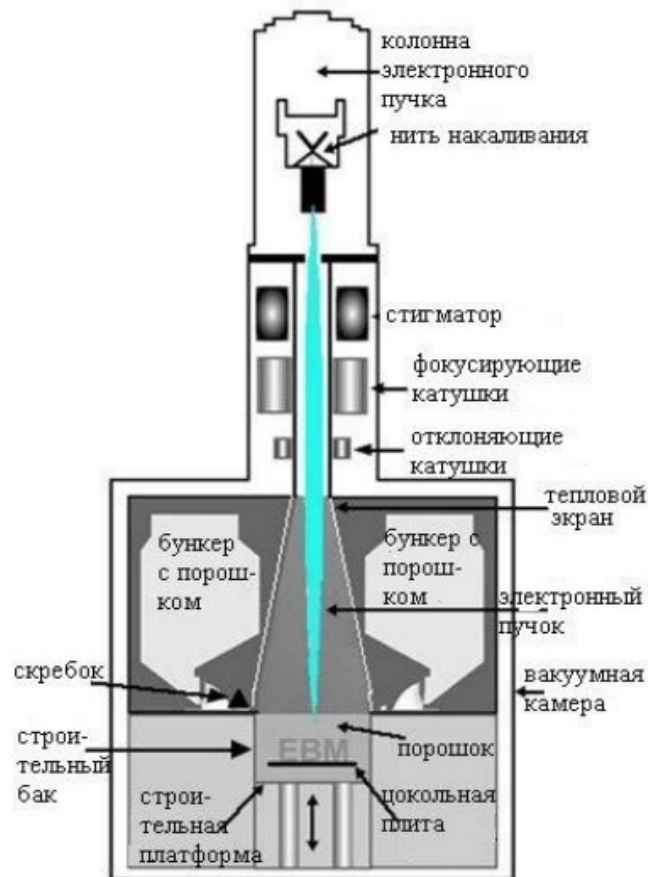


Рисунок 5 - Схема процесу електронно - променевого плавлення порошкового матеріалу

DMD (Direct Metal Deposition) лазерне вирощування металевих 3D – об'єктів – технологія 3D-друку, суть якої - розплавлений лазером металевий порошок, який подається в робочу зону плавлення. Ця технологія використовується для ремонту деталей, нанесення покриттів і безпосереднього виготовлення громіздких металевих виробів. Процес DMD дозволяє швидко змінювати склад металу шляхом інжекції в розплав різних типів металевих порошків.

Це дає можливість створювати гібридні металеві композити, яких ще не було на ринку [7].

Принцип роботи та процес виготовлення деталей показано на рис.6 та рис.7.

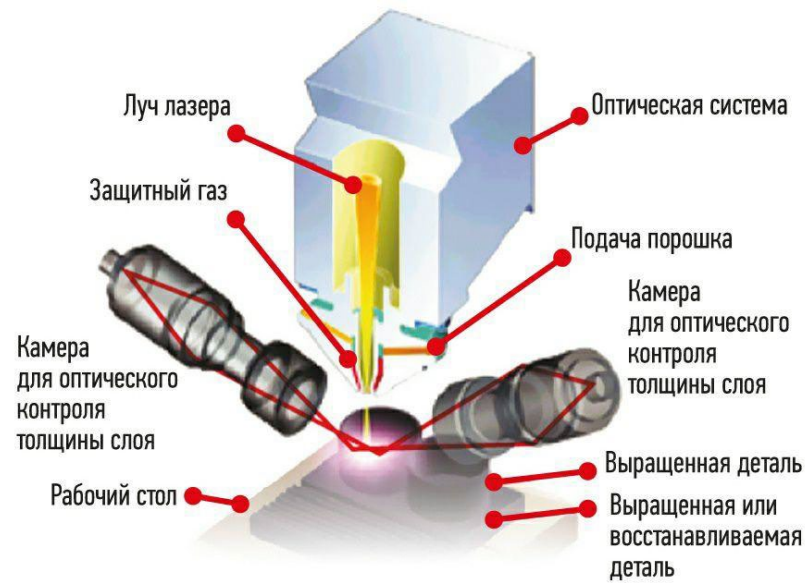


Рисунок 6 – Принцип роботи технології Direct Metal Deposition

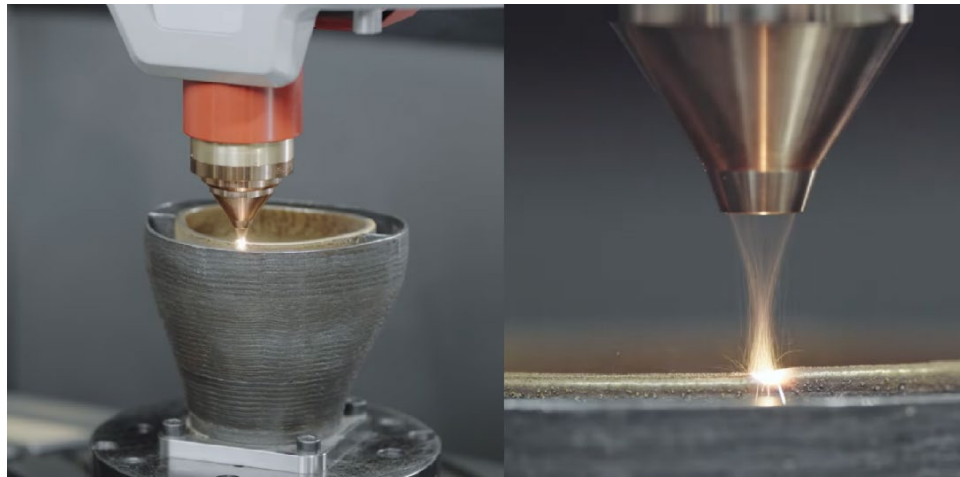


Рисунок 7 – Процес виготовлення конструкції за технологією Direct Metal Deposition

Не можна не згадати українську компанію «Червона хвиля», яка зробила прорив у 3D-друку металу. Їх установка унікальна і може перетворити аерокосмічну промисловість у всьому світі [8]. Технологія називається X-Beam 3D Metal Printing. Важливо те, що технологія, яка використовує дріт, дешевша, безпечніша та доступніша. Великою перевагою є висока продуктивність (до 2000 см³/год).

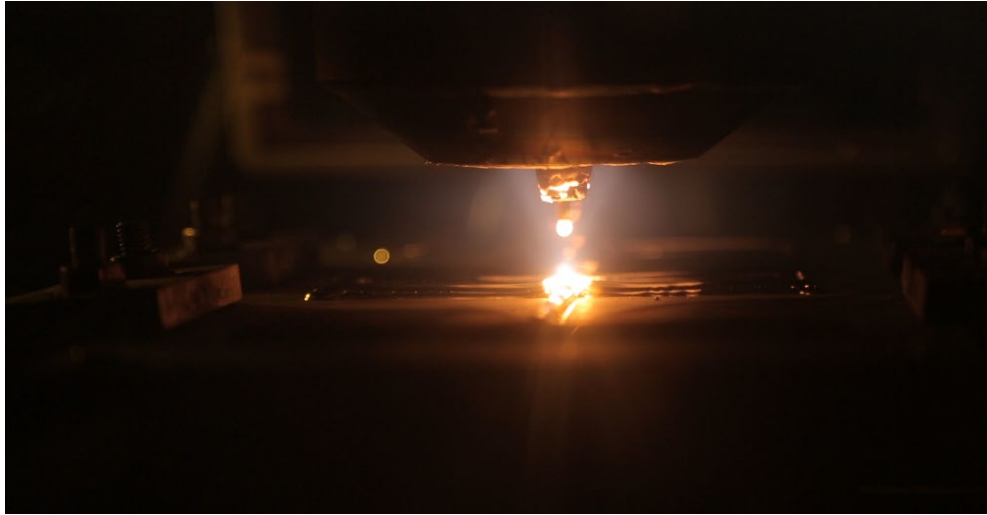


Рисунок 8 - 3D-друк газорозрядної електронної гармати [8]

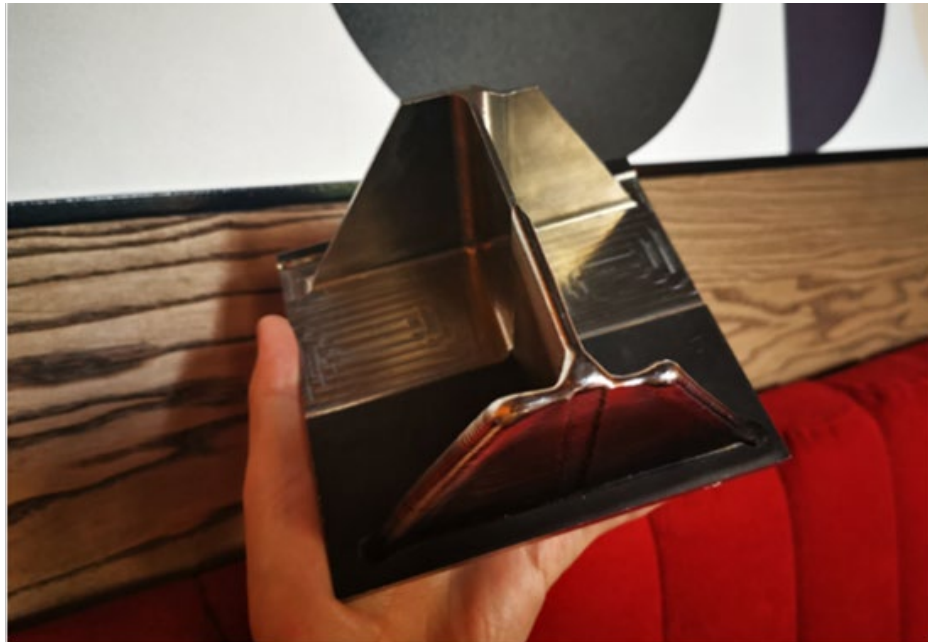


Рисунок 9 – Авіаційна деталь до та після механічної обробки, виготовлена за допомогою X-Beam 3D Metal Printing

Що стосується адитивних способів традиційного зварювання то вони майже нічим не поступаються технологіям, що описувалися вище. Матеріали і процеси, випробувані для отримання об'ємних металевих виробів пошаровим адитивним нарощуванням із застосуванням дугового зварювання наведено в табл.2 [9].

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

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 високочастотне (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, можливість гнучко регулювати ширину шару, що нарощують

Принципова апаратно-структурна схема процесів отримання об'ємних металевих виробів пошаровим адитивним нарощуванням на основі зварювальних технологій показано на рис.10 [9].



Рисунок 10 - Принципова апаратно-структурна схема процесів отримання об'ємних металевих виробів пошаровим адитивним нарощуванням на основі зварювальних технологій

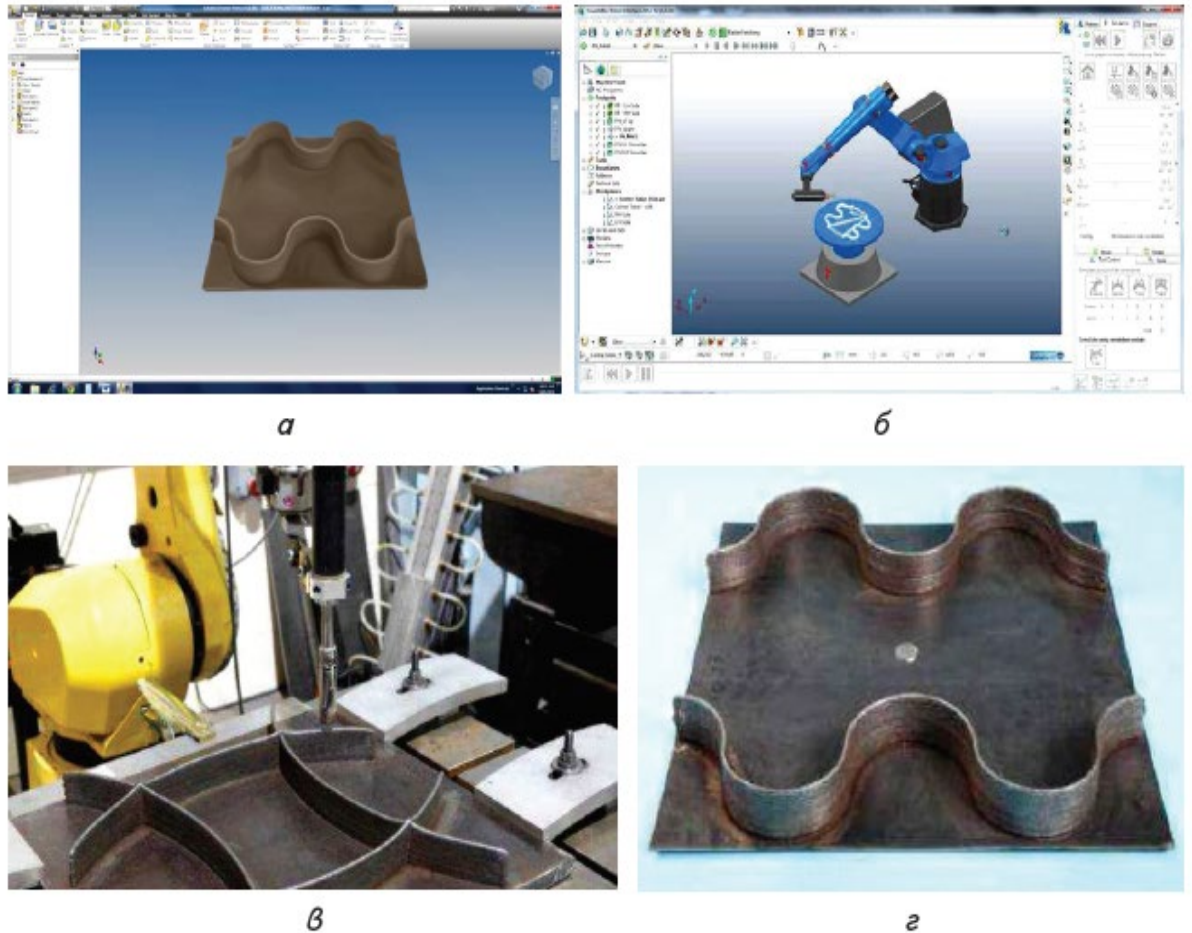


Рисунок 11 - Технологічний процес 3D друку об'ємних металевих виробів за методом Wire-Arc Additive Manufacturing: а) – комп'ютерне проектування деталі; б) – програмне забезпечення для 3-D позиціонера або робота з інтегрованим зварювальним устаткуванням; в) – роботизований комплекс зі зварювальною установкою; г) – готова деталь

WAAM можна визначити як сукупність процесів, призначених для виготовлення деталей, шляхом послідовного нанесення шарів за допомогою процесу дугового зварювання. Концепція адитивного виробництва дугового зварювання як засобу створення компонентів була вперше оголошена в 1990-х роках в Європі, про що повідомляють RIBEIRO, NORRISH [10] та SPENCER та інші [11]. Однією з перших публікацій про такий спосіб виробництва є патент BARKER [12] під назвою «Спосіб виготовлення декоративних виробів». Баркер запропонував використовувати процес зварювання MMA для виготовлення декоративних деталей (рис. 12). Таким чином, ідея отримання деталей

пошаровим наплавленням за допомогою зварювання, не нова, проте цей підхід широко використовується лише в останні два десятиліття.

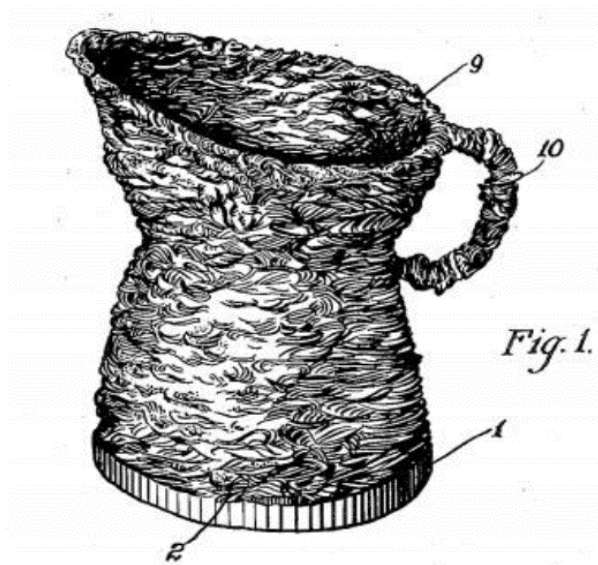


Рисунок 12 - Схема першого процесу WAAM, ідеалізованого Баркером [20], у 1920 р.

В Cranfield University (Великобританія) розроблено промисловий комплекс для реалізації адитивних зварювальних технологій (рис.13) [13].

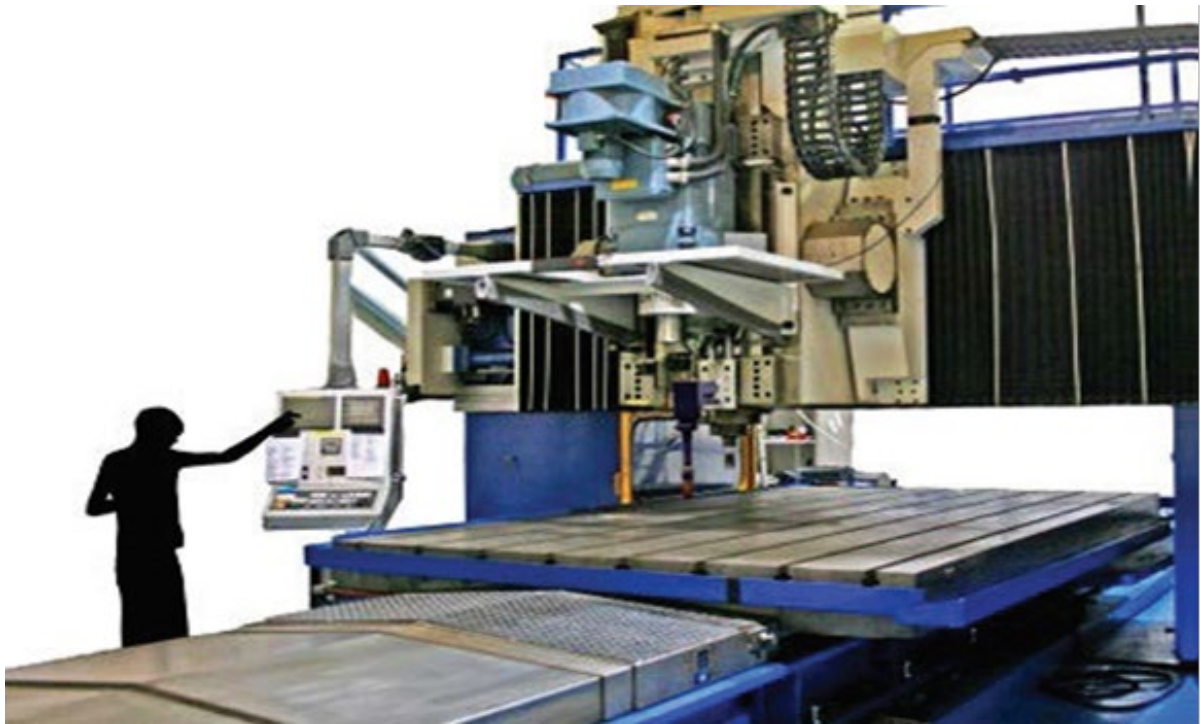


Рисунок 13 - Комплекс для реалізації зварювальних адитивних технологій, осевий комплекс з системою фрезерування.

Партнер компанії KUKA, Midwest Engineered Systems почав виробництво добавок з металу за допомогою багатовісних роботів від KUKA.

Результатом є більш гнучка система, яка різко скорочує витрати і час обробки в порівнянні з традиційними методами виготовлення, одночасно дозволяючи забезпечити поєднання різних видів металу в одному виробі [14].

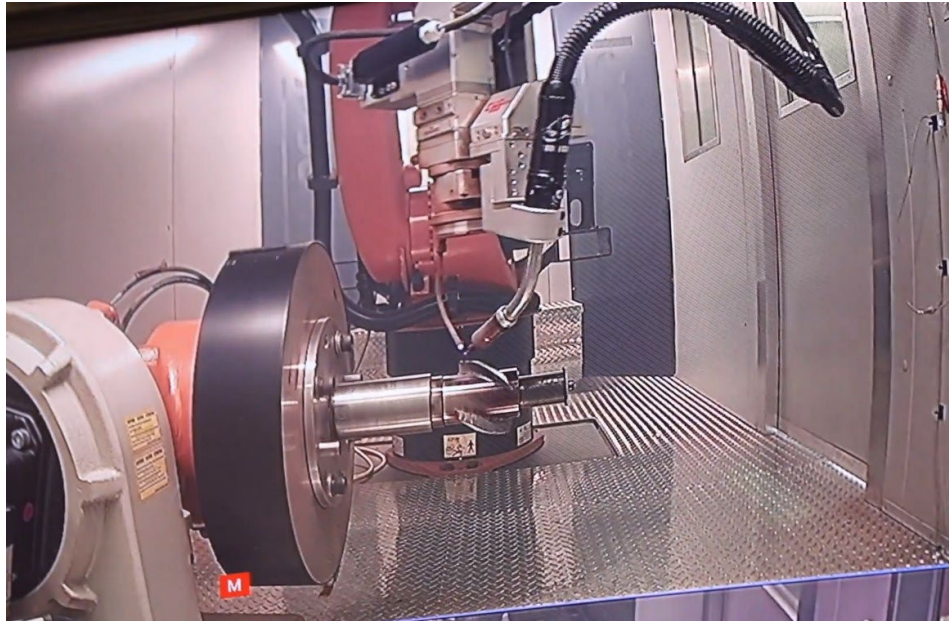


Рисунок 14 – Процес виготовлення деталі за допомогою KUKA Robotics.



Рисунок 15 – Приклади виготовлених деталей

Група компаній Damen Shipyards, RAMLAB, Promarin, Autodesk и Bureau Veritas об'єдналися для створення проекту WAAMPeller. Таку назву має гребний гвинт корабля Damen Stan Tug 1606, він був названий в честь

технології Wire-Arc Additive Manufacturing за допомогою якої і був створений. WAAMpeller діаметром 1300 мм, вагою близько 180 кг виготовлений із 298 шарів сплаву нікелю, алюмінію та бронзи. Після виготовлення гвинта були проведенні випробування за результатами яких WAAMpeller продемонстрував якість звичайного литого гвинта [15]. Процес виготовлення показано на рис.16.



Рисунок 16 - Процес виготовлення гвинта WAAMpeller методом Wire-Arc Additive Manufacturing.



Рисунок 17 - Надрукований на 3D-принтері гребний гвинт крупним планом [16].

Компанія Fronius розробила унікальну технологію CMT (Cold Metal Transfer) яку успішно використовують для створення об'ємних виробів із металу. Фізична суть процесу полягає у автоматичному керуванні руху зварювального дроту вперед і назад при виникненні короткого замикання (рис.18). Система негайно реагує на КЗ, викликаючи швидке відведення дроту і скорочуючи час підведення тепла в зварений шов [17].

Процес характеризується стабільним горінням дуги, відсутністю бризок, що зменшує тепловіддачу до основного металу, зменшуючи матеріальні та тимчасові витрати на 50%. Технологія також дозволяє гарантувати високу продуктивність і якість зварюваного матеріалу.

Компоненти установки CMT - процесу та процес створення об'ємного виробу показано на рис. 19 – рис. 20.

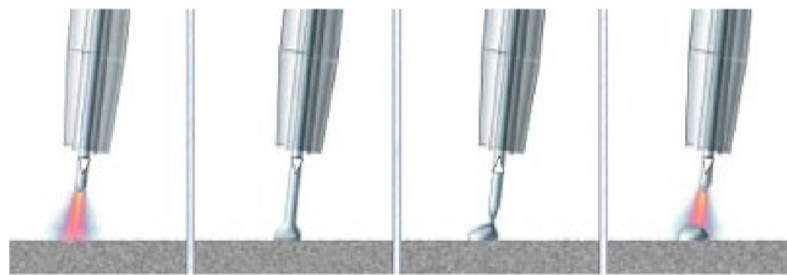


Рисунок 18 - Стадії перенесення металу в процесі CMT

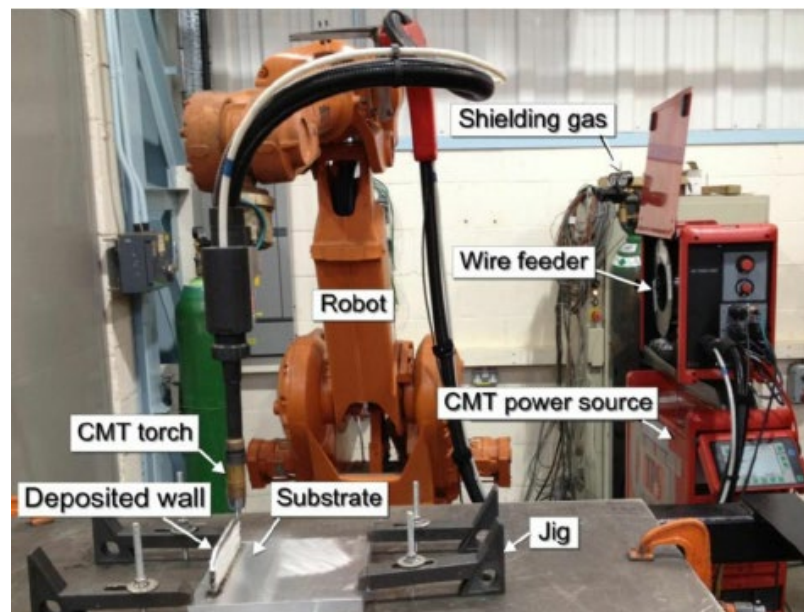


Рисунок 19 – Компоненти установки CMT- процесу створення об'ємного виробу

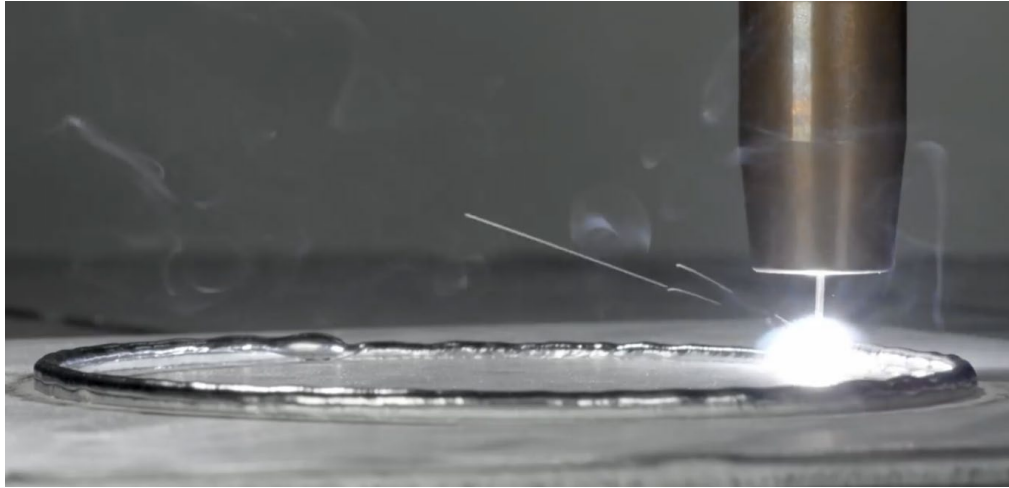


Рисунок 20 - Процес створення тривимірної деталі з використання технології Cold Metal Transfer

Важливо відмітити, що за допомогою методу Wire-Arc Additive Manufacturing можна створювати великогабаритні металеві конструкції.

Яскравим прикладом є компанія MX3D яка у співпраці з лабораторією Joris Laarman , Arup , ArcelorMittal , Autodesk , Heijmans , Lenovo , ABB , Air Liquide & Oerli , Plymovent , AMS та TU Delft створила перший у світі пішохідний міст з нержавіючої сталі за технологією 3D – друку методом дугового зварювання [20].

Продуктивність наплавлення складала понад 2кг/ год, на виготовлення конструкції було витрачено 1100 км зварювального дроту. Розміри мосту складають 12,3 м в довжину і 6,3 м в ширину, вага дорівнює 4,5 т. Міст пройшов ряд тестувань і перевірок по закінченню яких, 16 липня 2021 року його встановили над каналом Аудезейтс Ахтербургвал у Амстердамі. Ця розробка ще раз доводить, що 3D друк металом дає можливість виготовляти з різних матеріалів об'єкти складних геометричних форм і розмірів, що перевищує можливості звичайних промислових технологій.



Рисунок 21 - Виготовлення пішохідного мосту методом Wire-Arc Additive Manufacturing

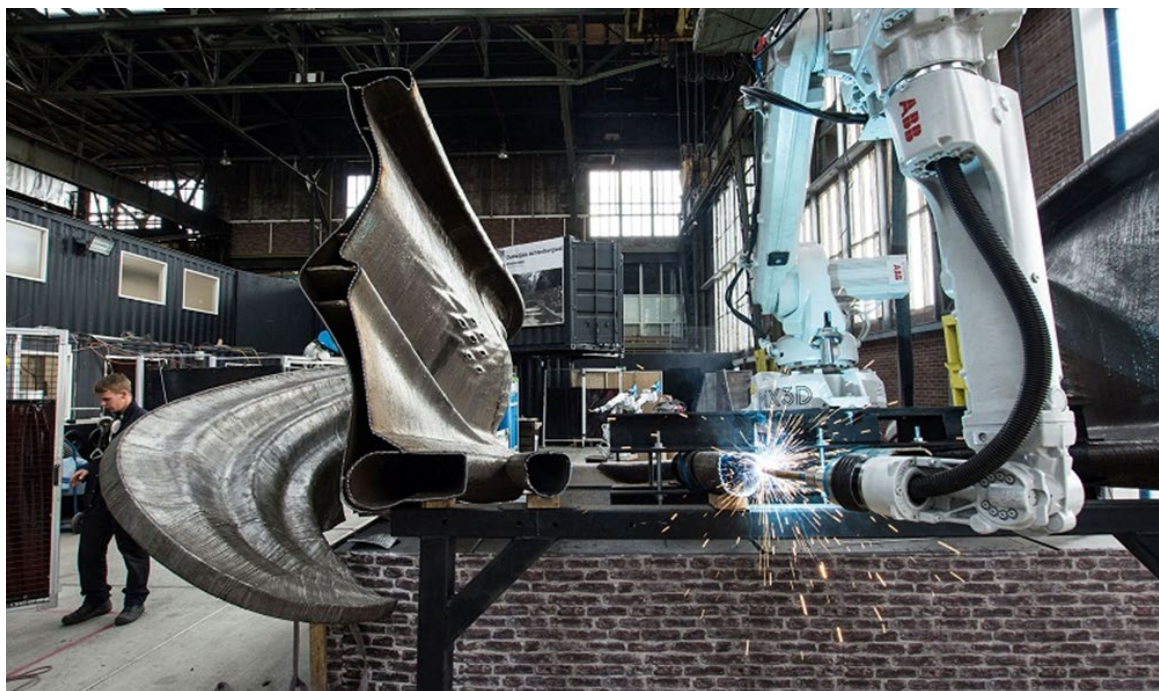


Рисунок 22 - Виготовлення пішохідного мосту методом Wire-Arc Additive Manufacturing



Рисунок 23 – Встановлений міст над каналом Аудезейтс Ахтербургвал у Амстердамі

Наймасштабніший виріб на сьогоднішній день, що друкується методом Wire-Arc Additive Manufacturing вважається космічна ракета Terran 1. Це аерокосмічний стартап американської компанії Relativity Space, яка поставила собі мету надрукувати на 3D-принтері аерокосмічну ракету включаючи паливні баки та двигуни. Розміри ракети складають: висота – 35 м, ширина 2,3 м, на низьку навколоземну орбіту вона зможе вивести до 1250 кг корисного вантажу [21].

Виготовлення ракети проводиться великогабаритним 3D-принтером Stargate, як джерело живлення принтер використовує зварювальну дугу, витратний матеріал у вигляді зварювального дроту. Перша ступінь ракети надрукована з алюмінієвого сплаву, друга ступінь друкується з жароміцного матеріалу, спроможного витримувати високі температури при вході в щільні шари атмосфери.

Виготовлення ракет за допомогою 3D-принтера зумовлює низку переваг, а саме:

- зменшення кількості дороговартісного обладнання та конструкцій для побудови ракети;
- економічність (ракети виготовлені адитивними технологіями в 5 разів дешевші ракет виготовлених традиційними методами);
- автоматизація виробництва;
- відносно висока швидкість виготовлення;
- шорсткість поверхні не впливає на аеродинамічні властивості ракети;
- оптимізація конструкції, так як 3D-принтером можливо виготовити надскладну конструкцію всього з однієї деталі.

3D-принтер та процес адитивного виготовлення показано на рис. 24 – рис.25.



Рисунок 24 – 3D-принтер Relativity Stargate



Рисунок 25 – Процес нанесення металу за допомогою 3D-принтера Relativity Stargate

Окрім розглянутих електродугових технологій для друку тривимірних металевих виробів вивчається можливість застосування плазмових зварювальних технологій. Прикладом цього є результати дослідів, виконаних в Southern Methodist University (Техас, США) по вивченню процесу вирощування об'ємних виробів методом мікроплазмової порошкової пошарової наплавки [22].

Однією з характеристик є нерівномірний розподіл кристалічної структури металу, а саме крупнозерниста структура металу в нижній частині готового продукту і дрібнозерниста структура у верхній частині. Причиною цього є тепловий перегрів деталі. Це може призвести до внутрішніх напружень, пористості та інших дефектів. Установка та процес вирощування деталі показано на рис.26.

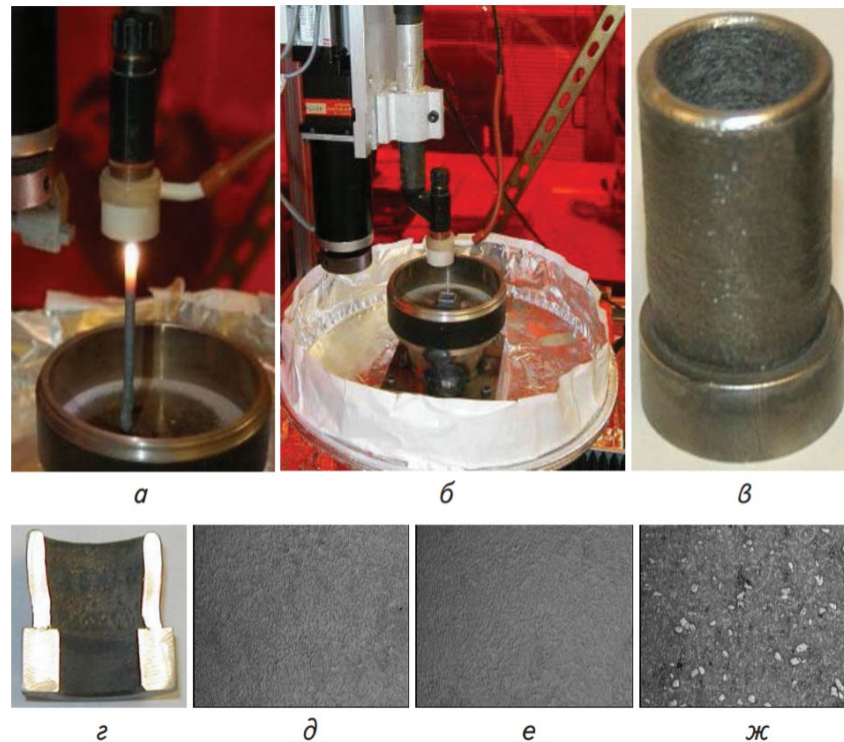


Рисунок 26 – Мікроплазмове порошкове вирощування об'ємних виробів [22]: а – процес вирощування; б – лабораторна установка; в – порожнистий однорідний циліндр (інструментальна сталь H13); г – поперечний переріз циліндра з градієнтною композитною структурою (інструментальна сталь H13 + карбід вольфраму); д – структура в верхній частині циліндра; е – структура в середній частині; ж – структура в нижній частині.

Плазмово - дугові зварювальні технології (Plasma Transferred Arc Welding – РТА) володіють більш широкими технологічними можливостями [23].

Для 3D-друку металевих виробів доцільно використовувати такі плазмово-дугові зварювальні технології, в яких використовується струмінь ламінарної плазми [24]. Також доцільно використовувати відомі технології плазмового наплавлення [25]. Для цього в інституті електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України у співпраці з Південно-Китайським технологічним університетом (м. Гуанчжоу, КНР) було спроектоване відповідне промислове обладнання [26].

Було розроблено недорогий і технологічний 3D-позиціонер змінних плазмових зварювально-наплавочних головок (рис.27).

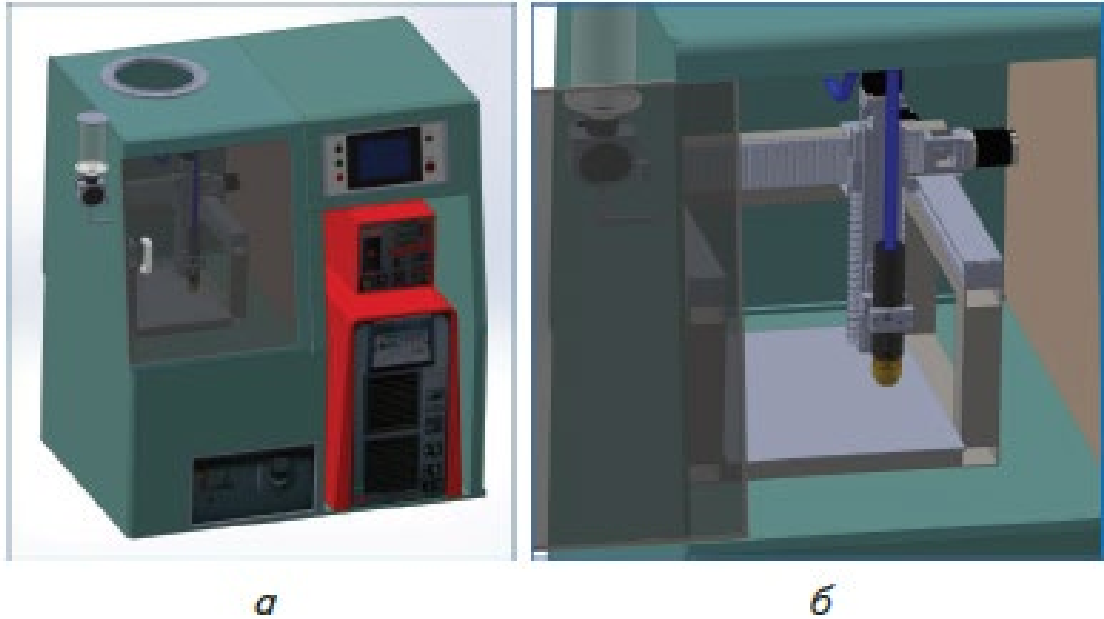


Рисунок 27 - Модель 3D-принтера для розробки нових плазмових технологій виготовлення об'ємних виробів: а – загальний вигляд; б – трикоординатний позиціонер плазмотрона

У якості витратного матеріалу використовуються, як порошки, так і дріт. До переваг обладнання відноситься підвищена точність, простота виготовлення деталей відносно великих розмірів.

Основні вузли 3D-принтера представлено на рис.28 – 29.

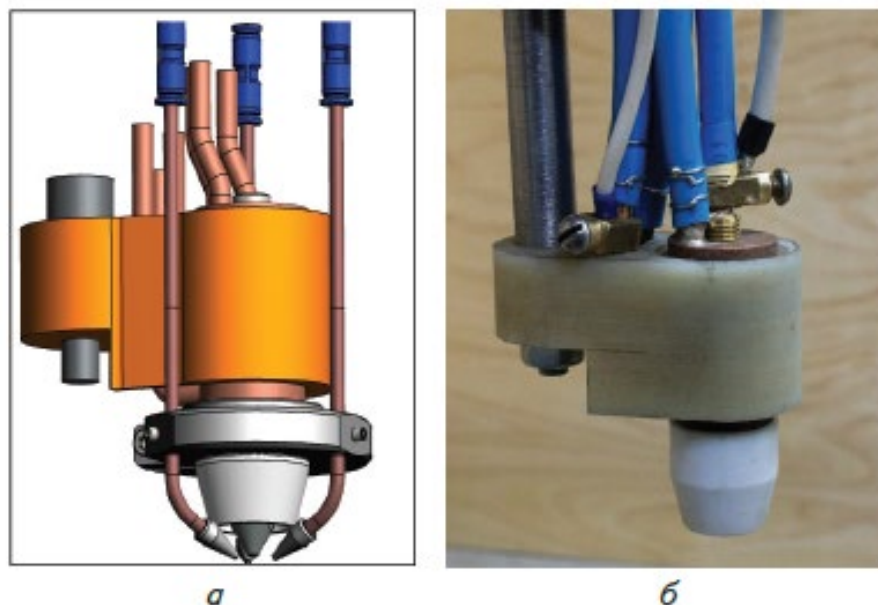


Рисунок 28 - Плазмотрон установки для 3D-друку: а - комп'ютерна 3D-модель; б – загальний вигляд

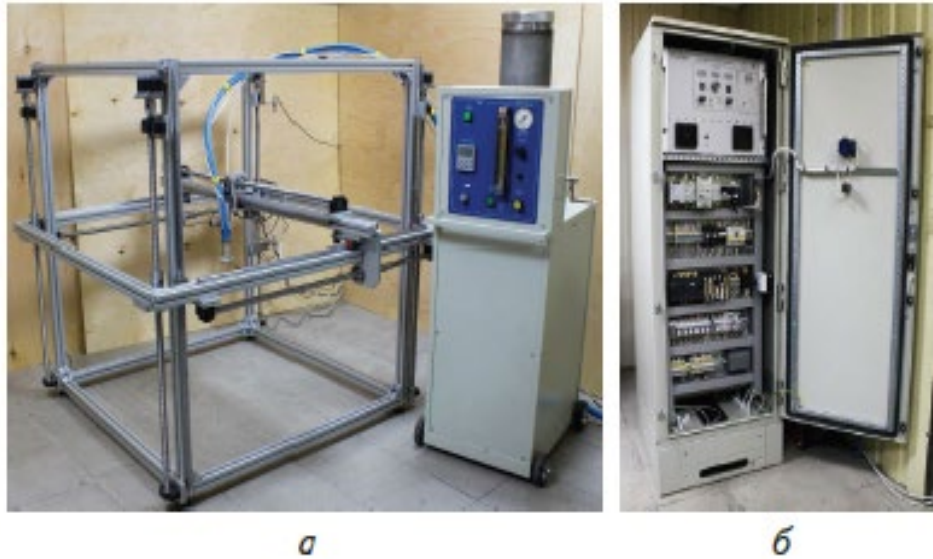


Рисунок 29 - Установка PLAZER 3D PW : а – маніпулятор з плазмотроном і дозатором-живильником; б – вигляд блоку живлення і керування з відкритою лицевою панеллю

Джерело живлення спроможне здійснювати 3D – друк за допомогою плазмового (струм до 120 А) та мікроплазмового (струм до 50 А) наплавлення. Робочий простір принтера складає 900×900×900 мм (рис. 27). Плазмотрон може працювати в режимах постійного, імпульсного струму прямої полярності та режимі різнополярних імпульсів [27] (рис. 28).

Система ЧПУ, яка об'єднана з джерелом живлення і пультом керування порошкового живильника керує процесом подачі порошку та позиціонуванням плазмотрона. Керування здійснюється за допомогою PLC-контролера.

У порівнянні з SLM технологія Plasma Transferred Arc Welding має такі переваги:

- Продуктивність на 1-2 порядки вища при однаковій потужності;
- Вартість обладнання нища в 3-10 раз;
- Можливість виготовляти деталі більших габаритних розмірів;
- Можливість використання порошку і дроту;
- Більш широка номенклатура матеріалів, які використовуються для 3D-друку (порошки, дріт, композиційні матеріали);

До недоліків можна віднести велику шорсткість поверхні та значні розміри термічного впливу.

Зважаючи на все сказане, я, вважаю, що найбільш перспективним в адитивних технологіях є використання механізованого зварювання у середовищі вуглекислого газу. Даний спосіб має такі переваги:

- Висока продуктивність;
- Знижена вартість обладнання;
- Простота автоматизації;
- Великий вибір витратного матеріалу за рахунок використання зварювального дроту для MAG – процесу з широким асортиментом: нержавіюча сталь, алюміній, леговані сталі, низьколеговані та нелеговані сталі, мідні сплави та інші;
- Економічність;
- Доступність;
- Можливість виготовлення великогабаритних виробів;
- Висока безпека технологічного процесу;
- Можливість друку деталей з паралельною механічною обробкою (фрезерування) на одному станку;

До основних недоліків даного способу входить:

- Достатньо великі розміри нарощуваного шару;
- Значні розміри зони термічного впливу;
- Значні втрати на розбризкування;

Що стосується механічних характеристик об'ємних деталей виготовлених даним способом, то по деяким параметрам властивості деталей близькі і навіть перевищують властивості деталей виготовлених за традиційними технологіями (табл. 3).

Таблиця 3 - Порівняльні механічні характеристики об'ємних деталей з титанового сплаву Ti-6Al-4V, отримані за допомогою адитивної зварювальної та традиційних технологій [28].

Метод виготовлення деталі	Показники			
	Межа текучості (МПа)	Межа міцності (МПа)	Подовження (%)	Тріщиностійкість (МПа* $\text{м}^{1/2}$)
Отримання виливки + гаряче ізостатичне пресування (Cast and HIP) - стандарт AMS 4985	824	896	6,0	75,0
Ковка	950	1034	11,7	-
3D друк із застосуванням дугового зварювання - WAAM	805-865	918-965	8,2-14,1	73,9

1.1. Формування шарів металу при 3D – дуговому зварюванні

Нестійкість електричної дуги, накопичення тепла в наплавленому металі та інші фактори роблять процес виготовлення виробу складним, мінливим і важкокерованим. Розміри і механічні властивості кінцевого продукту безпосередньо залежать від точності розмірів і способу формування кожного наплавленого шару.

Геометрія наплавленого компонента формується відповідно до заданого порядку. Схема створення виробу показана на рис. 30. Першим кроком є визначення геометрії одиничного валика. Потім утворюється плоский шар. Далі проводиться нашарування виробу. Таким чином, геометричні параметри окремого валика (ширина, висота, профіль) є основними елементами технології формування всього виробу.

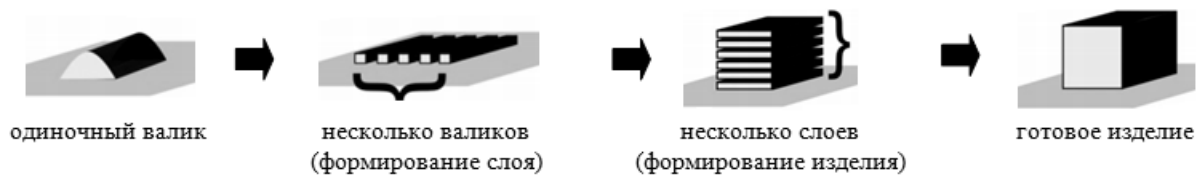


Рисунок 30 Алгоритм побудови виробу способом WAAM [29]

Застосована технологія наплавлення поверхні повинна забезпечувати постійність форми та якості одиничного валика. Форма окремого валика залежить від великої кількості факторів: властивостей матеріалу, теплових умов у зоні наплавлення, технологічних особливостей процесу та інших. Важливими передумовами для формування якісних багат шарових виробів є: отримання металургійного зв'язку шляхом сплавлення з попереднім шаром, забезпечення оптимальної швидкості охолодження як основи, так і наплавленого матеріалу, забезпечення надійного захисту рідкого металу. При наплавленні багат шарової конструкції необхідно, щоб введення тепла було достатнім для сплавлення присадкового матеріалу і матеріалу основи. Надмірне введення тепла сприяє надмірному проплавленню попереднього шару і розтікання зварювальної ванни [30].

Дослідженню геометрії окремого валика, включаючи моделювання та прогнозування основних параметрів валика, присвячено багато робіт [30, 31, 32, 33]. Однак, для WAAM, отримані моделі виявилися частково або повністю непридатними. Це відбувається тому, що:

1. Попередні дослідження спираються на вимірювання лише висоти та ширини валика, а не на побудові повного профілю поперечного перерізу [34].
2. Немає надійного аналізу помилок чи перевірки точності [32, 35].
3. При визначенні геометрії валика враховується лише вплив основних факторів, а ефекти взаємодії цих факторів не враховуються [36].
4. Складні моделі, що враховують велику кількість різних фізичних взаємодій, потребують довготривалого розрахунку [37].

При дослідженні та побудові геометричної моделі перерізу валика в якості вхідних параметрів процесу використовуються струм дуги, швидкість

подачі дроту, швидкість наплавлення, напруга дуги, діаметр дроту. Використовуються також комплексні параметри: потужність дуги, відношення швидкості подачі дроту до швидкості наплавлення, погонна енергія та інші [38,39].

Крім параметрів процесу, слід враховувати ряд факторів, таких як [35, 40, 41] :

- зміщення дроту від центру дуги, що може призвести до спотворення геометрії валика;
- температура основи та попереднього шару;
- зміна довжини дуги;
- тепловміст краплі та тип перенесення зварювального присадкового металу;
- швидкість охолодження.

Діапазони вхідних параметрів визначаються за допомогою попередніх випробувань. Оптимальним вважається режим наплавлення, при якому процес проходить стабільно і без бризок. Зміна швидкості наплавлення в межах 0,2 ... 1,2 м/с є ефективним способом контролю форми валика.

Підвищення ККД процесу аддитивного виробництва та зниження виробничого циклу досягається вибором оптимального режиму наплавлення. При цьому кількість проходів має бути мінімально необхідною і достатньою для збереження кінцевої форми виробу. Це робиться шляхом розрахунку та вибору оптимального профілю валика [42].

Основними проблемами при побудові деталі є [43]:

- накопичення тепла в наплавленому шарі;
- нерівномірна висота шару через накопичення тепла;
- окислення наплавленого металу зі збільшенням висоти стінки;
- високі внутрішні напруження та деформації.

Контроль параметрів наплавлення дозволяє уникнути більшості негативних процесів у формуванні виробу, а також отримувати елементи різної конфігурації.

В 2015 році в НГТУ ім. Р. Е. Алексеева (Нижній Новгород) на кафедрі "Технологія та обладнання машинобудування" на базі лабораторії "Нанотехнології в машинобудуванні" було проведено експеримент по наплавленню деталей по різних траєкторіях.

Наплавлення проводили на вертикально-фрезерному верстаті ГФ2171С6 з системою ЧПК ФМС3000. До верстату підключили зварювальний апарат для механізованого зварювання MIG/MAG ПМ 4.33, джерело ДС 400.33 М та зварювальний пальник [44].

Експерименти проводили за трьома траєкторіями, самі траєкторії та результати показані на рис. 31.

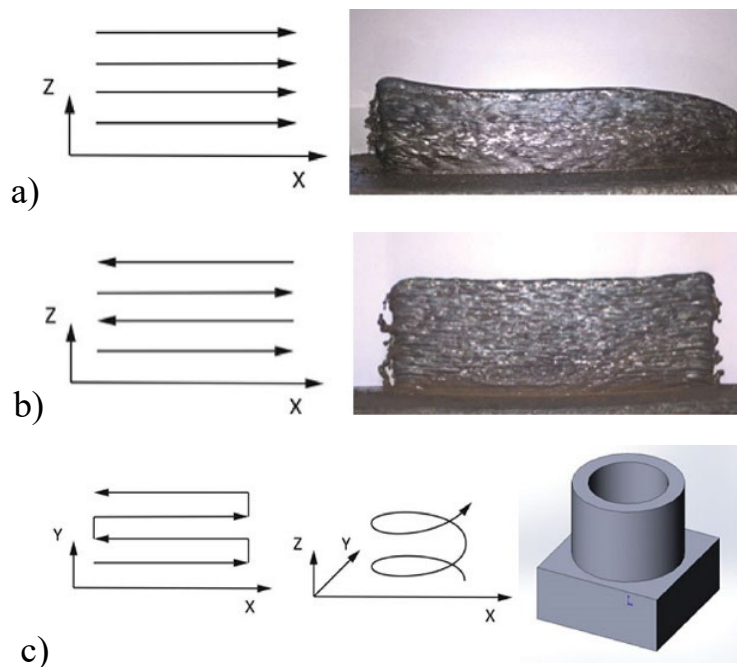


Рисунок 31 Траєкторії наплавлення та відповідні їм зразки

Згідно з рис. 31а, наплавлення здійснювали таким чином, що пальник переміщали з одного боку (зліва направо). Зроблено 28 шарів, товщина кожного шару 1,63 мм, загальна висота стінки по центральній частині 45,8 мм, ширина стінки 6 мм. Із зображення наплавленого зразка видно, що висота стінки на початку траєкторії вище, ніж в кінці. Цей ефект викликаний тим, що зварювальний валик утворюється за зварювальною ванною, а перед зварювальною ванною металу менше. При укладанні, шар за шаром, накопичується надлишок металу на початку нанесення і дефіцит металу в

передній частині зварювальної ванни, при цьому висота стінки відповідно вище на початку і нижче в кінці. Цей ефект негативно впливає на розмірні властивості деталі, але його можна легко усунути, використовуючи іншу траєкторію друку.

На рис. 31b показана траєкторія, за якою здійснювався друк із змінним напрямком руху: спочатку зліва направо, а потім справа наліво. На рис. 54б також показано зразок, отриманий вздовж цієї траєкторії. За обраною траєкторією було виготовлено 46 шарів, товщина кожного шару – 1,63 мм, загальна висота стіни по центральному перерізу – 74,9 мм, ширина стінки – 6 мм. Як видно з рисунку, зразок не демонструє виражених перепадів висоти по краях. Це пояснюється тим, що дефіцит металу в кінці траєкторії компенсується надлишком металу на початку, коли укладається наступний шар.

На рис. 31с показана модель заготовки і набір траєкторій для її друку. За траєкторією (рис.31b) наплавили зразок у вигляді паралелепіпеда, на ньому виготовили циліндр по траєкторії, що представляє собою спіраль з кроком витка на величину шару. Висота паралелепіпеда становить 27 мм, для цього виготовили 5 шарів товщиною 4,45 мм. Висота циліндра становила 32 мм, для наплавлення був обраний крок витка 1,6 мм. Фото зразка показано на рис. 32.



Рисунок 32 Наплавлений зразок, що пройшов механічну обробку верхньої площини

Юрій Єгоров випускник кафедри смарт технологій з'єднань та інженерії поверхонь КПІ ім. Ігоря Сікорського, у своїй магістерській дисертації провів

експерименти по наплавленню стінки з сплаву Al-Mg5. Експерименти проводили за допомогою установки з ЧПК та обладнання GMAW Fronius CMT[45].

Загальними параметрами для всіх експериментів були:

- Зварювальний дріт = AWS/SFA 5.10 ER5356 (Al-Mg5);
- Виліт зварювального дроту = 15 мм;
- Захисний газ = Ar;
- Швидкість подачі дроту = 4,9 м/хв.

Експерименти проводились для знаходження оптимального діапазону швидкостей формування шарів металу. Експериментальним шляхом було знайдено нижню межу швидкості (42 см/хв). Для знаходження верхньої межі швидкості провели експеримент зі зміною швидкості наплавлення з кроком 52,5 см/хв. Нанесення здійснювалось на два попередньо нанесених шари на підкладку з постійною швидкістю 42 см/хв. Це було зроблено для того щоб забезпечити умови, подібні до тих, які мали стійкі шари наплавленої стінки. Як видно з рисунку 33а, на відрізку зі швидкістю наплавлення 200 см/хв спостерігаються значні хвилі. Однак, оскільки ця особливість була не дуже зрозуміла, було вирішено виконати ще одну стінку на новій підкладці (рис. 33b). З другої підкладки чітко видно, що верхня межа швидкості наплавлення лежить між 147,5 та 200 см/хв.

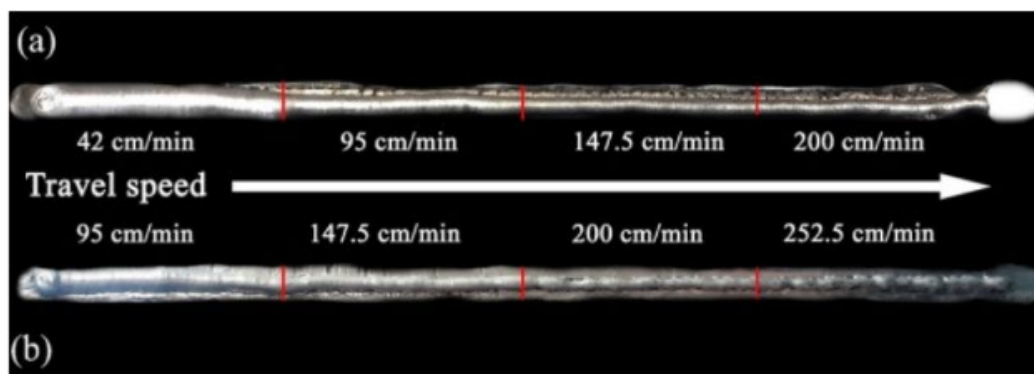


Рисунок 33 Вид зверху двох підкладок з 1-го етапу експериментів: (а) швидкість руху від 42 до 200 см/хв; і (b) швидкість руху від 95 до 252,5 см/хв (середній струм 81 А і напруга 12,5 В).

Для того, щоб звузити вищезазначений показник, було наплавлено 3 стінки (рис.34). Швидкість наплавлення сповільнювали з кроком 5 см/хв, починаючи з 185 см/хв (найближче до 200 см/хв, де було виявлено хвилястість). З рисунку 57 видно, що лише під час третього випробування було досягнуто стінки без хвилястості на верхній поверхні. Тому можна припустити, що для використаних параметрів, можна проводити наплавлення зі швидкістю від 42 см/хв до 175 см/хв. З рисунку також видно, як незначна зміна швидкості наплавлення впливає на геометрію наплавленого валика.



Рисунок 34 WAAM 14-шарові стінки, побудовані з високою швидкістю наплавлення: (a) 185 см/хв; (b) 180 см/хв; і (c) 175 см/хв (середній струм 81 А і напруга 12,5 В)

ВИСНОВКИ ПО ГЛАВІ 1

Проаналізувавши описану інформацію можна підсумувати, що всі експерименти по наплавленню металевих деталей проводились в нижньому положенні. У цьому положенні розплавлений метал шару під дією сили тяжіння намагається розпливтись по площині перпендикулярної до сили тяжіння. Це призводить до збільшення ширини та зменшення висоти наплавленого валика, що є негативним фактором для 3D наплавлення.

Для 3D наплавлення важливо отримати тонку стінку деталі із якомога більшою висотою валика. Для цього було б добре не боротись із силою тяжіння, а її використовувати. Це можна зробити, якщо проводити наплавлення деталі у вертикальному положенні. При цьому, під дією сили тяжіння зварний валик повинен витягуватись і отримуватись тонка стінка деталі.

Розробці обладнання для 3D наплавлення у вертикальному положенні присвячена наступна глава 2.

2. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ 3D НАПЛАВЛЕННЯ

У даній дисертації запропоновано розробити обладнання для адитивного виробництва способом MAG. В основу обладнання входить апарат для механізованого зварювання у середовищі вуглекислого газу та модернізований фрезерувальний верстат із ЧПК.

Фрезерувальний верстат з числовим програмним керуванням дозволяє керувати рухом пальника, по осях X та Y. Наплавлення тривимірної деталі буде здійснюватися за допомогою інверторного цифрового апарата для механізованого зварювання PATON ProMIG-250-15-4.

2.1. Зварювальний апарат PATON ProMIG-250-15-4



Рисунок 35 – Зварювальний апарат для механізованого зварювання PATON ProMIG-250-15-4

Інверторний цифровий апарат PATON ProMIG-250-15-4 - це апарат професійного використання, призначений для механізованого зварювання («MIG/MAG»), ручного дугового зварювання («ММА»), аргонодугового зварювання («ТИГ»), з постійним струмом, в середовищі захисних газів і

сумішей. Пристрій ProMIG-250-15-4 має повністю цифровий метод управління, що пропонує його універсальність і широкі можливості для точного 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 значно підвищує мобільність та зручність при роботі в режимах ММА та TIG [46].

Таблиця 4. Технічні характеристики: апарата для механізованого зварювання PATON ProMIG-250-15-4.

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

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

У комплект поставки 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 сталевих дроту та 2-х діаметрів алюмінієвого дроту, штуцер для швидкознімного з'єднання газового шлангу, інструкція з експлуатації.

2.2. Механізм переміщення

Для забезпечення руху зварювального пальника, який зварює деталь за заданим програмним алгоритмом, використовується механізм переміщення модернізованого фрезерного верстата з числовим програмним керуванням. Універсальний сверлильно-фрезерний настільний верстат призначений для виконання фрезерної, свердлильної та іншої обробки осьовими та дисковими ріжучими інструментами для заготовок з металу, сплавів, органічних матеріалів, дерев.

Конструктивно заснована на базовій моделі DM-X3, яка має ряд переваг і доповнень, таких як: можливість нахилу і роботи головки шпинделя в горизонталі, наявність на торці шпиндельної бабки дисплея цифрової індикації частоти обертання, напрямки, і ін. з простим керуванням через блок сенсорних кнопок.

Технічні характеристики фрезерувального верстату вказано у Таблиці 5 [47].

Таблиця 5 - Технічні характеристики верстату із ЧПК

Модель	DM-SX3
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

Комп'ютерна модель модернізованого фрезерувального верстату із ЧПК показано на рис. 36.



Рисунок 36 - Комп'ютерна модель фрезерувального верстата із ЧПК

Алгоритм переміщенням зварювального пальника здійснюється за допомогою програми Mach3. Вікно програми показано на рис. 37.

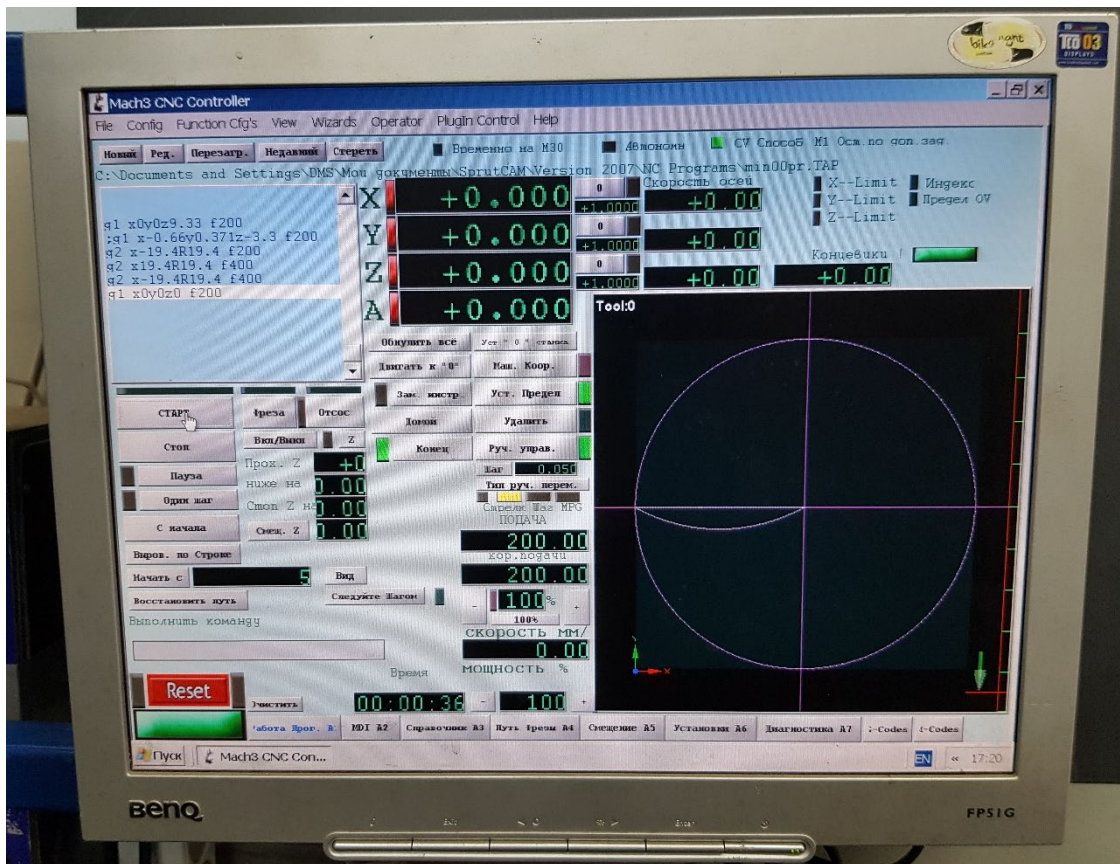


Рисунок 37 - Вікно програми Mach3

Програма Mach3 розроблена для автономного контролю верстатів з числовим програмним керуванням. Кожний сучасний комп'ютер та ноутбук сумісний з Mach3, завдяки цьому її можна застосовувати як на підприємствах, так і в домашніх умовах.

Через ПК можна:

- автоматизувати робочий інструмент;
- керувати рухом робочого інструменту;
- контролювати переміщення за заданою траєкторією.

Основними перевагами цієї програми є:

- широкі функціональні можливості;
- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс;
- грамотний принцип керування.

2.3 Механізм переміщення пальника по осі Z

Для наплавлення у вертикальному положенні треба, щоб пальник переміщався по трьох осях X, Y, Z. Штатне переміщення осі Z фрезерного верстата для цього не підходить. Тому виникла задача розробити механізм переміщення пальника по осі Z разом із осями X та Y. Механізм переміщення пальника по осі Z треба розмістити на столі переміщення X та Y. Для усунення забруднення брызками металу при зварюванні механізм переміщення пальника по осі Z добре було б зробити нижче напрямних X та Y (тобто внизу). Додавання нової осі Z із переміщенням 500 мм дозволить виготовлення деталей максимальні розміри яких 400x500x200 мм. Найменший розмір є по осі Y (200мм) він не обмежує наплавлення, бо наплавлену деталь можна відсувати по осі Y кожний раз на 200 мм і отримати теоретично безмежної довжини деталі перерізом 400x500мм.

Для закріплення механізму до столу верстата, ми виготовили кронштейн з профільної труби та двох кутників 40x40 мм. Спочатку відповідно до розмірів лінійних направляючих (які будуть встановлюватись на кронштейн) ми вирізали дві частини профільної труби далі визначивши оптимальну ширину кронштейна вирізали дві рівних за розмірами частини тієї ж профільної труби.

Виготовлені деталі зварювали механізованим зварюванням в середовищі CO₂, спочатку симетричними точками для запобігання деформацій, а потім повністю зварювали деталі (рис.38).

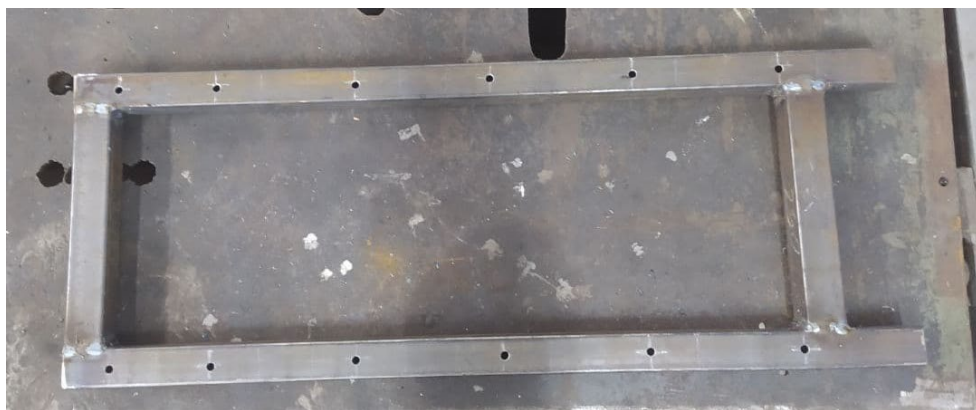


Рисунок 38 – Вертикальна частина кронштейна

Наступним кроком було визначення довжини кутників, щоб кронштейн був закріплений якомога ближче до столу верстата. Це дає можливість зменшити навантаження на кріплення робочого столу верстата. Вирізвавши кутники потрібних розмірів, ми просвердлили отвори для закріплення кронштейна.

Для зварювання кронштейна, кутники за допомогою болтів закріпили до столу верстата, частину з профільних труб до кутників зафіксували струпщинами, далі виставивши між деталями кут 90° симетричними точками зварювали. Для забезпечення жорсткості конструкції між кутниками приварили квадратну трубу 40×40 , також укріпили конструкцію металевими пластинами (рис.39). Конструкція кронштейна виконана в такій формі, що зона де буде відбуватися наплавлення знаходиться якомога нище. Це зроблено для того щоб вберегти вузли верстата від зварювальних бризок.



Рисунок 39 – Кронштейн для закріплення осі Z

При розробці конструкції було задумано до кронштейну закріпити фанеру товщиною 20 мм, на яку буде закріплено дві лінійні направляючі по яких за допомогою лінійних підшипників (карок) буде переміщуватись фанера з зварювальним пальником (рис.40). Але в процесі виготовлення ми відмовились від цієї ідеї, оскільки механізм мав би велику вагу. Так як конструкція не мала деформацій ми закріпили лінійні направляючі безпосередньо на профільних трубах (рис.41).

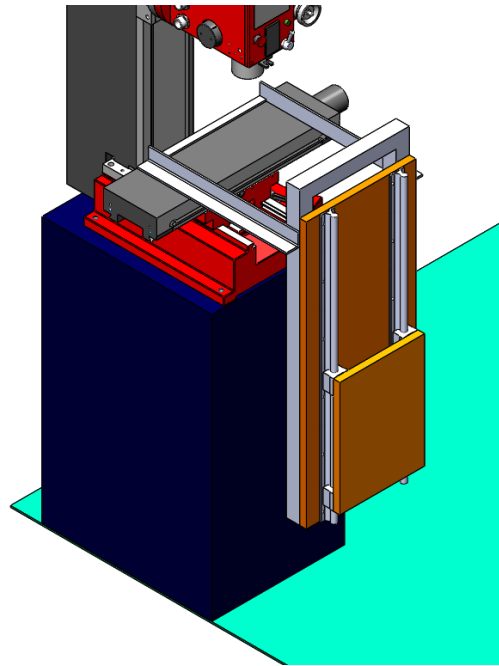


Рисунок 40 – Компютерна модель початкового варіанту конструкції



Рисунок 41 – Кронштейн з закріпленими лінійними направляючими

Як направляючі ми використали лінійний вал на опорі SBR16, довжиною 800 мм. Це оптимальний варіант за ціновою категорією для наших потреб. Для закріплення направляючих ми використали подовжені гвинти M5, що з'єднують опору з лінійним валом (рис. 42).

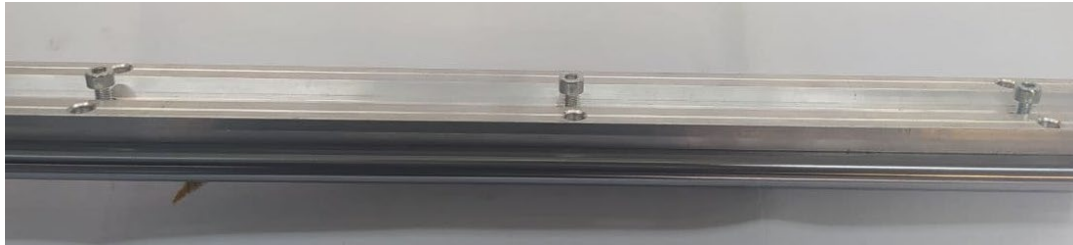


Рисунок 42 – Лінійний вал з опорою з'єднані гвинтами

Лінійне переміщення по направляючих забезпечують 4 каретки. Каретки ми закріпили на дерев'яній пластині товщиною 20 мм. За допомогою фрезерувального верстату з ЧПК просвердлили отвори в фанері та профрезерували місця під каретки в одній площині (рис.43). Відстань між каретками вибрали таку, щоб робочий хід по осі Z складав 500мм. Каретки до фанери закріпили гвинтами M5x35мм (рис.44).

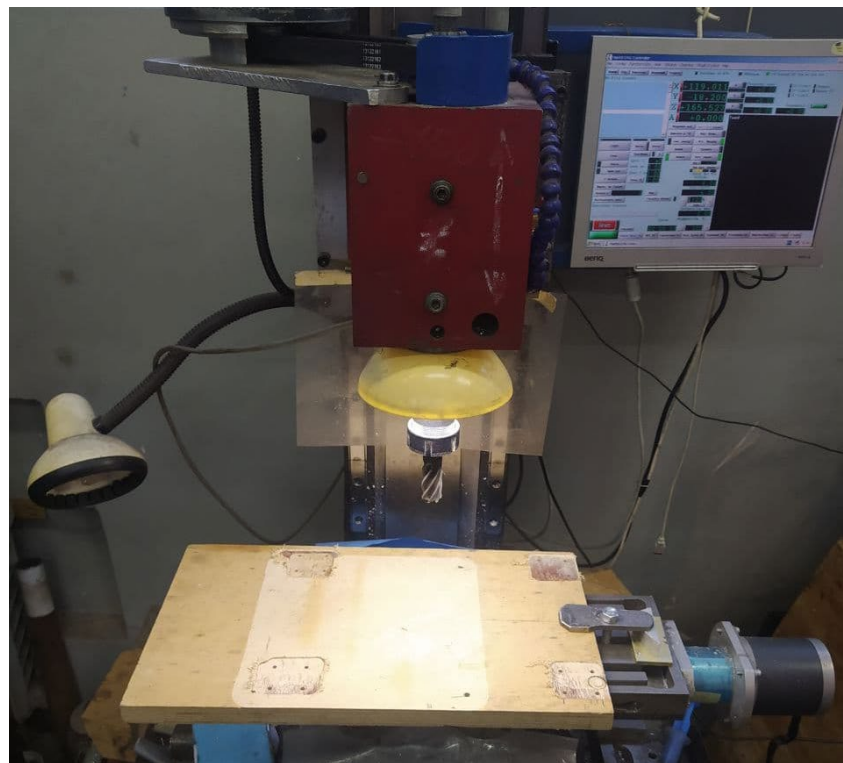


Рисунок 43 – Фрезерувальний верстат з ЧПК профрезерував та просвердлив отвори каретки



Рисунок 44 – Розроблений кронштейн з закріпленими направляючими та пластиною з каретками

Наступним кроком було визначення яким чином забезпечити зворотно-поступальний рух пластини з каретками відносно направляючих. Було запропоновано два варіанти: кульково-гвинтова передача (ШВП) та звичайна різьбова шпилька з масивною бронзовою гайкою. Ми використали різьбову шпильку М16 з гайкою. Це пояснюється тим, що в нашій конструкції відсутнє велике навантаження, а вага бронзової гайки та пальника під дією сили тяжіння забезпечать плавність руху та відсутність люфту.

Для надійної фіксації шпильки ми використали кінцеву опору BF12 яку закріпили вгорі кронштейна, а кульковою опорою зафіксували різьбову шпильку внизу (рис. 45).

Після фіксації шпильки було виготовлено бронзову гайку та вифрезеровано лиску відповідних розмірів для хорошого прилягання гайки до дерев'яної пластини. Закріпили гайку до пластини за допомогою двох алюмінієвих кутників (рис.46,47).

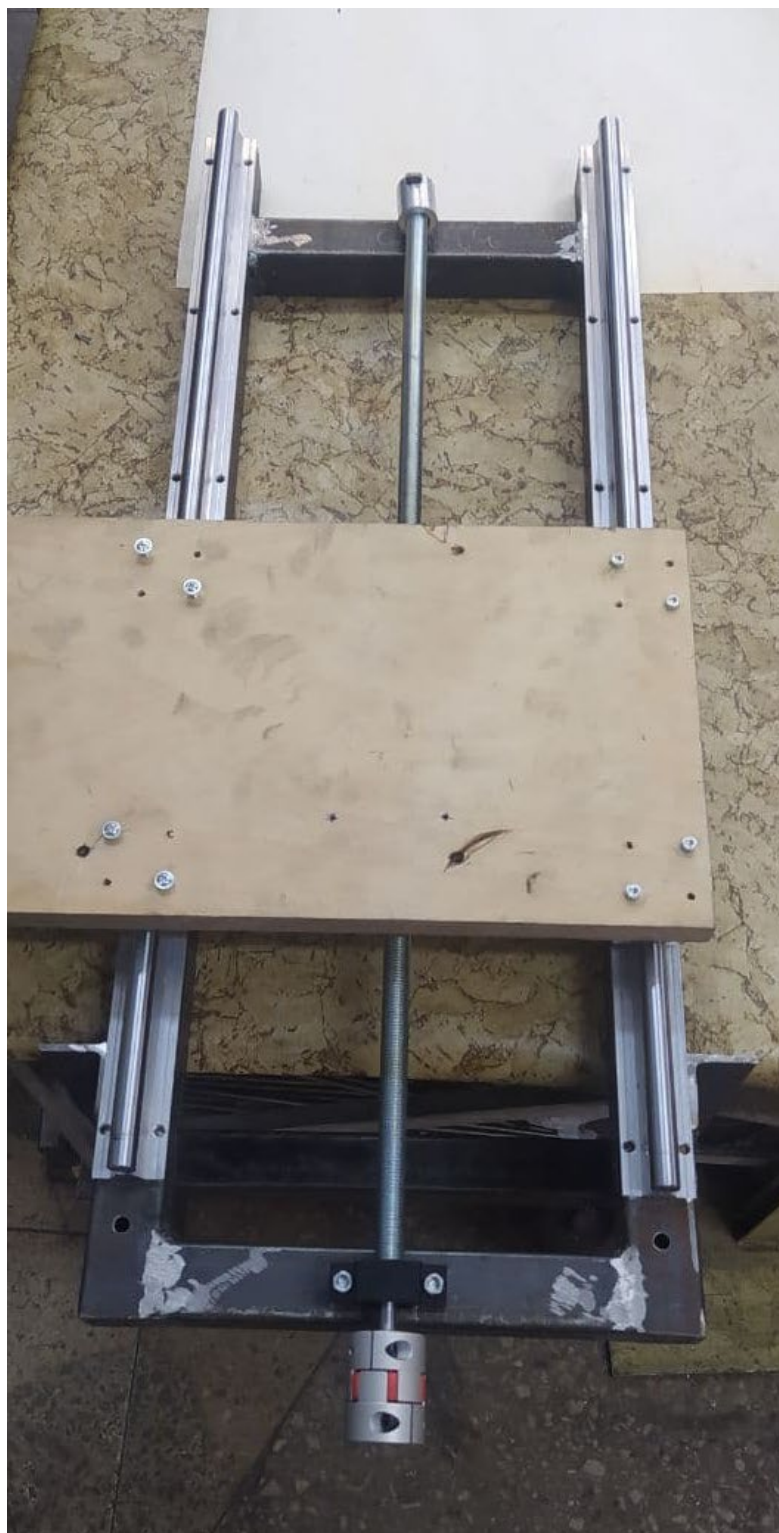


Рисунок 45 – Кронштейн з закріпленою різьбовою шпилькою M16



Рисунок 46 – Бронзова гайка закріплена на фанері з каретками

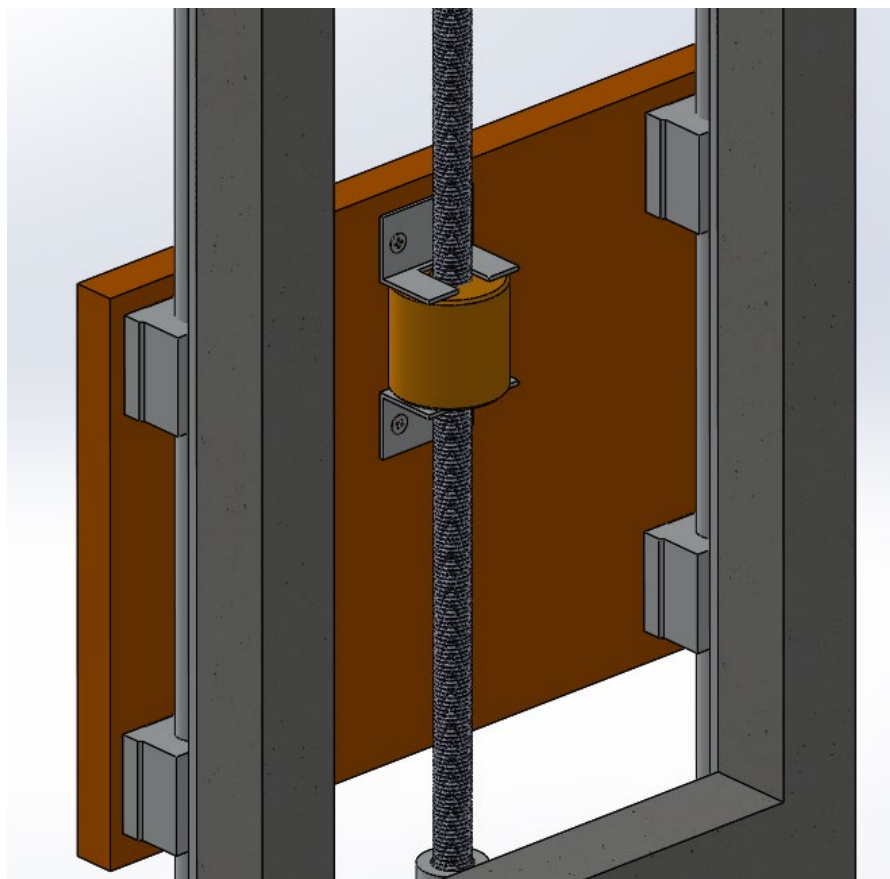


Рисунок 47 – Комп'ютерна модель закріпленої бронзової гайки

Приводом у нашій конструкції буде кроковий двигун Nema 23. Передумовою для такого рішення стали такі можливості крокового двигуна:

- високі швидкості пуску, зупинки, реверсу;
- вал повертається відповідно до команди керуючого пристрою на заданий кут;
- чітка фіксація положення після зупинки;
- підтримання максимального крутного моменту на низьких швидкостях;
- незначна маса двигуна.

Технічні характеристики крокового двигуна Nema 23 вказано в таблиці 6.

Таблиця 6 - Технічні характеристики крокового двигуна Nema 23

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

Для закріплення двигуна на кронштейні було продумано два варіанта кріплення: завдяки кутників приварених до кронштейна та за допомогою різьбових шпильок і пластини. Ми вибрали варіант зі шпильками так, як це кріплення дає можливість більш точніше виставити двигун відносно центральної шпильки.

Для початку в алюмінієвій пластині просвердлили отвори під центральний вал двигуна та шпильки. Далі за допомогою гвинтів та самозажимних гайок двигун прикріпили до пластини. Гнучкою муфтою з'єднали вал крокового двигуна та центральну різбову шпильку. Гайками відрегулювали потрібну висоту двигуна і за допомогою заклепок закріпили пластину з двигуном до кронштейна. Для згладжування неспіввісності між валом двигуна і різбовою шпилькою ми використали гнучку кулачкову муфту 6х8. Закріплений двигун зображено на рисунку 48.

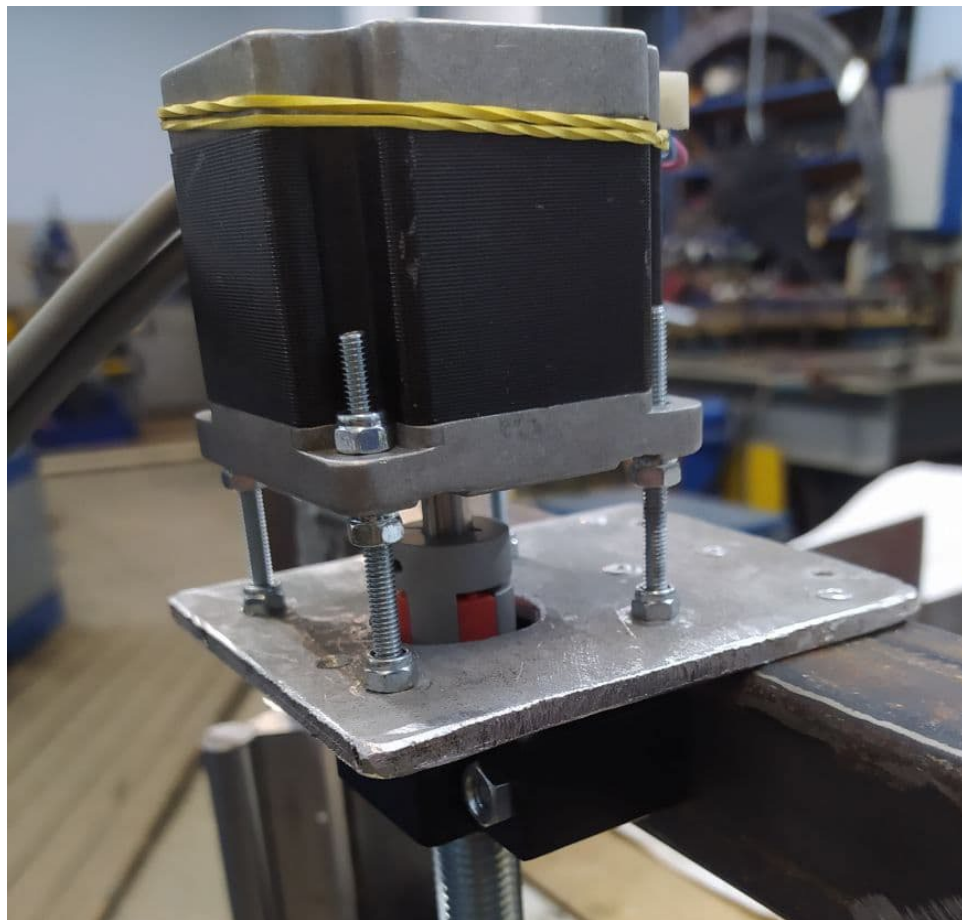


Рисунок 48 – Закріплений кроковий двигун

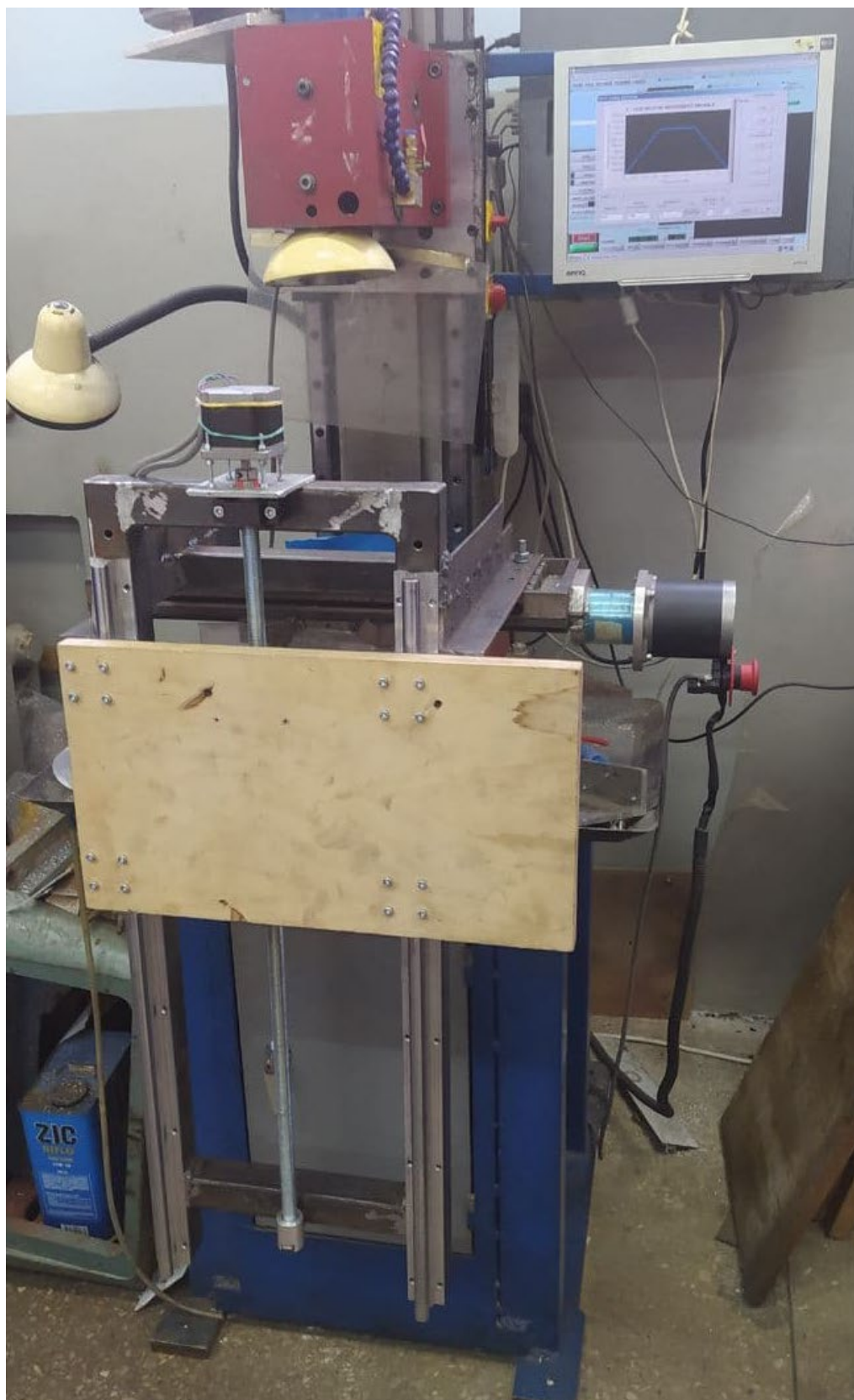


Рисунок 49 – Розроблена конструкція на верстаті з ЧПК

Зварювальний пальник MAG необхідно жорстко закріпити на верстаті, щоб уникнути можливих коливань у різні сторони під час процесу наплавлення. Для цього у двох дерев'яних брусках було вифрезеровано паз по формі зварювального пальника (рис.50).



Рисунок 50 – Дерев'яні бруски з пазом для фіксації пальника

До дерев'яної пластини, що рухається по осі Z кріпимо алюмінієвий кронштейн за допомогою болтів. Поміщаємо пальник в пази та закріплюємо до встановленого кронштейну болтами. Пальник кріпимо таким чином, щоб сопло було розташовано перпендикулярно до площини в якій будемо проводити наплавлення. Закріплений пальник зображено на рисунку 51.

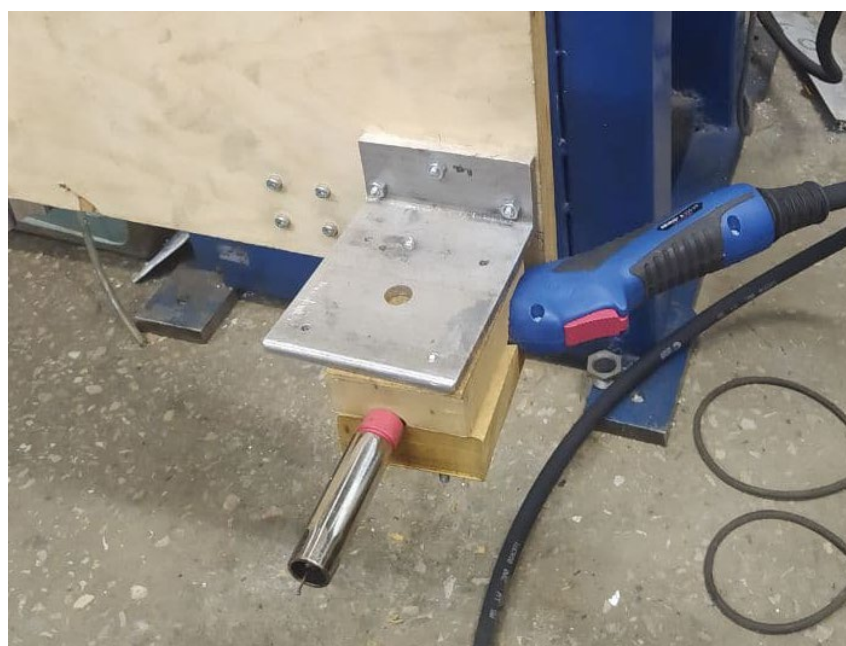


Рисунок 51 – Закріплений зварювальний пальник

Деталь на якій будемо проводити наплавлення потрібно закріпити жорстко для уникнення деформацій та перпендикулярно до зварювального пальника. Тому для закріплення використовуємо деталь від строгального верстату з Т-подібними пазами та болти з шайбами. Для зручнішого користування деталь розмістили на металевий візок (рис. 52).



Рисунок 52 – Деталь для наплавлення



Рисунок 53 – Розроблене обладнання для адитивного виробництва способом
MAG



Рисунок 54 – Комп'ютерна модель розробленого обладнання для адитивного
виробництва способом MAG

ВИСНОВКИ ПО ГЛАВІ 2

Запропоновано та розроблено нове обладнання для 3D наплавлення у вертикальному положенні на основі MAG зварювання. Основою цього обладнання є: модернізований фрезерувальний верстат із ЧПК, який виконує роль механізму переміщення зварювального пальника; апарат для механізованого зварювання у середовищі захисних газів RATON™ ProMIG-250-15-4 у ролі джерела живлення та механізму подачі зварювального дроту. Програмне керування відбувається за допомогою персонального комп'ютера із встановленим додатком Mach 3.

Так як штатне переміщення осі Z фрезерувального верстата відбувається окремо від переміщення по осях X, Y, було розроблено новий механізм переміщення пальника по осі Z. Розроблений механізм забезпечує переміщення зварювального пальника з максимальним ходом по : $X = 400$ мм; $Y = 200$ мм ; $Z = 500$ мм.

Така конструкція обладнання дозволяє наплавляти деталі перерізом 400x500 мм довжиною 200 мм. Відсунувши візок по осі Y ще на 200 мм можемо отримати довжину 400 мм. Таку процедуру можна проводити необмежену кількість разів, що дозволить зварювати деталі перерізом 400x500мм теоретично необмеженої довжини.

Випробуванню та аналізу розробленого обладнання присвячена наступна глава 3.

3. ВИПРОБУВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОГО ОБЛАДНАННЯ

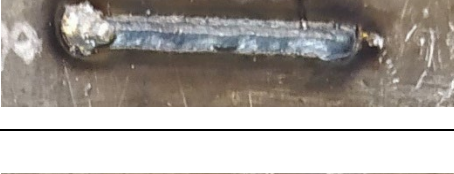
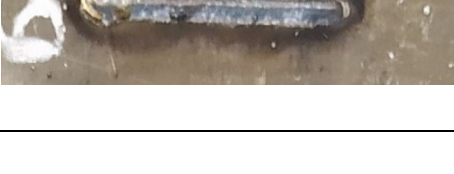
Було проведено експерименти по наплавленню валика у вертикальному положенні знизу вверху. Для порівняння результатів з експериментами по наплавленню валика у нижньому положенні було використано однакові незмінні параметри. Експерименти проводились на металевій пластині товщиною 5 мм, дротом 08Г2С Ø1.2мм, при таких незмінних параметрах режиму: $U_{зв}=20В$; $V_{под.}=2$ м/хв; $I_{зв}=100А$. Виліт зварювального дроту – 8мм.

Дослідження проводилися наступним чином: режим наплавлення залишався незмінним, проте змінювалася швидкість переміщення пальника. Це робиться для того щоб визначити вплив швидкості наплавлення на формування геометричних розмірів наплавлених шарів, а також визначити при якій із швидкостей наплавлення, найбільш сприятливі умови для якісного формування наплавлених шарів.

Результати експериментів по наплавленню валика у нижньому положенні наведено у таблиці 7. Результати експериментів по наплавленні валика у вертикальному положенні знизу вверху наведено у таблиці 8.

Таблиця 7 – Результати експериментів по наплавленню валика у нижньому положенні

Швидкість наплавлення, мм./хв.	Ширина шва, мм.	Висота шва, мм.	Зображення шва
100	10.34	3	
200	7.5	2.2	

			
300	6.42	2.02	
400	5.64	1.64	
500	5.16	1.56	
600	4.34	1.52	
700	3.64	1.42	
800	3.04	1.4	
900	2.74	1.28	

1000	2.6	1.16	
------	-----	------	--

Вплив швидкості наплавлення на висоту та ширину валика показано на рис. 55.

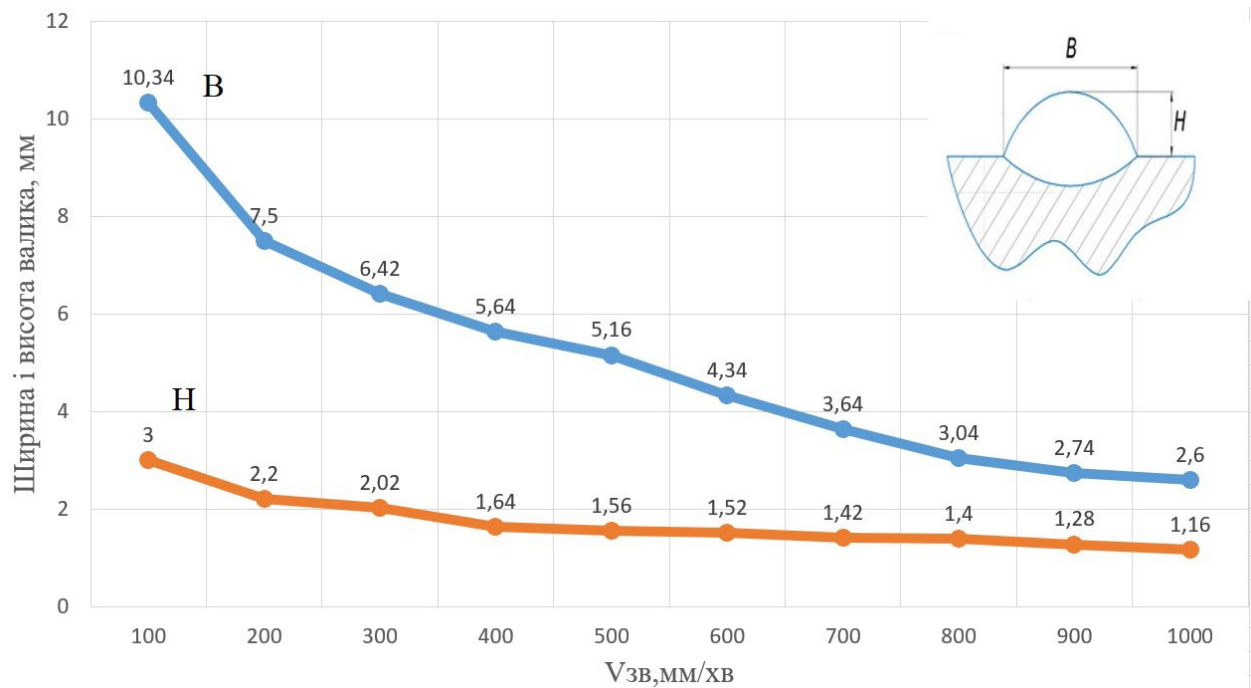


Рисунок 55 – Вплив швидкості наплавлення на висоту валика при наплавленні у нижньому положенні

Таблиця 8 – Результати експерименту при наплавленні у вертикальному положенні знизу вгору

Швидкість наплавлення, мм./хв.	Ширина шва, мм.	Висота шва, мм.	Зображення валика
100	7.6	5.4	

200	-	-	
300	-	-	

При швидкості наплавлення 100 мм./хв. валик наплавлений у вертикальному положенні значно переважав у розмірах, оскільки мав меншу ширину і більшу висоту ніж валик наплавлений у нижньому положенні. При збільшені швидкості наплавлення до 200мм./хв.; 300мм./хв. спостерігається погане формування валика, рідкий метал нерівномірно розподіляється по довжині зварного валика утворюючи напливи. З отриманих результатів видно, що параметри які застосовувались для наплавлення у нижньому положенні не підходять для наплавлення валика у вертикальному положенні.

Для підбору режиму наплавлення було проведено експерименти при яких збільшили потужність зварювального апарату. Наплавлення проводили у вертикальному положенні знизу вгору на таких параметрах режиму: $U_{зв}=21В$; $V_{под.}= 2,8$ м/хв; $I_{зв}=110А$. Виліт зварювального дроту – 8мм. Результати експериментів наведено у таблиці 9.

Таблиця 9 – Результати експериментів при збільшені потужності

Швидкість наплавлення, мм./хв.	Ширина шва, мм.	Висота шва, мм.	Зображення валика
100	6.4	6	

200	—	—	
300	—	—	

З отриманих результатів видно, що при збільшенні потужності наплавлення, формування зварного валика погіршилось, спостерігаються значні напливи металу і проплавлення підкладки. Тому ми вирішили провести експерименти зменшивши параметри режиму. Наплавлення проводили у вертикальному положенні знизу вверху: $U_{зв}=19$ В; $V_{под.}= 2$ м/хв; $I_{зв}=95$ А. Виліт зварювального дроту – 8 мм. Результати експериментів наведено у таблиці 10.

Таблиця 10 – Результати експериментів при зменшенні потужності

Швидкість наплавлення, мм./хв.	Ширина шва, мм.	Висота шва, мм.	Зображення валика
80	10.2	3.6	
100	8.3	3.8	

150	6.8	3.9	
200	4.5	3.6	
300	—	—	
400	—	—	

Вплив швидкості наплавлення на висоту та ширину валика показано на рис. 56.

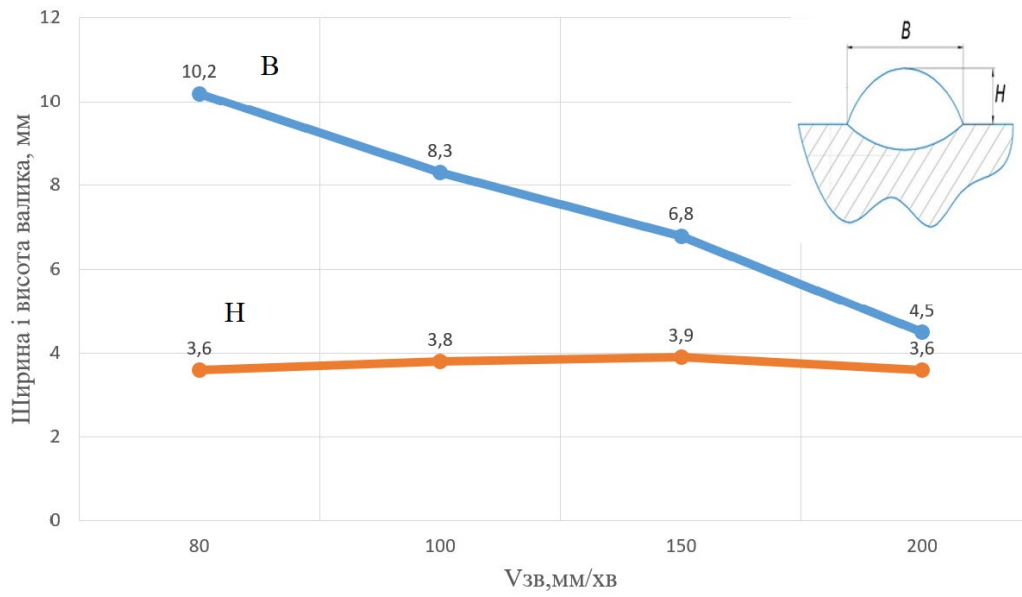


Рисунок 56 – Вплив швидкості наплавлення на висоту валика при наплавленні у вертикальному положенні знизу вверху

При швидкостях наплавлення 80 мм./хв.; 100 мм./хв.; 150 мм./хв. спостерігається хороше формування зварного валика. Серед них при швидкості 150 мм./хв. геометричні розміри наплавленого шару є найкращими. При швидкості 200 мм./хв. вже помітна хвилястість поверхні, а при швидкостях 300 мм./хв. і 400 мм./хв. присутні напливи.

Тому наплавлення багатошарової деталі у вертикальному положенні знизу вверху ми вирішили проводити на швидкості 150 мм./хв. яка дає змогу отримати наплавлений шар необхідних нам геометричних розмірів.

Після підбору режиму наплавлення, було проведено експеримент по наплавленню стінки довжиною 60 мм. на пластину товщиною 5 мм. Експеримент проводився дротом 08Г2С Ø1.2мм. при таких незмінних параметрах режиму: $U_{зв}=19В$; $V_{под.}=2\text{ см/с}$; $I_{зв}=95А$. Виліт зварювального дроту – 8мм. Було наплавлено 3 шари металу, після проходження кожного шару палик відводився на 3.9 мм. тобто на висоту валика при швидкості наплавлення 150мм/хв. Отримані результати показано на рис. 57.

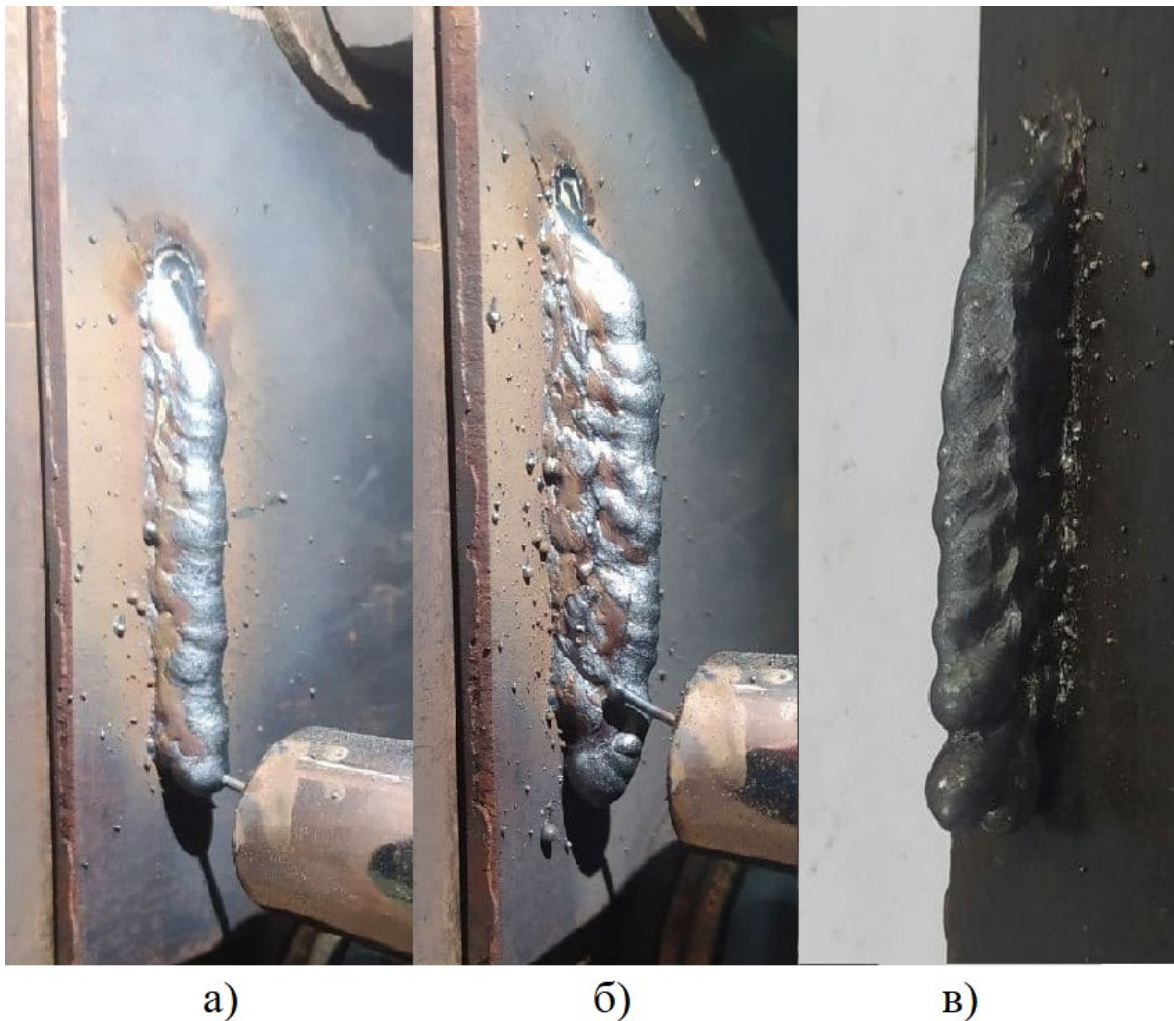


Рисунок 57 – Наплавлення стінки довжиною 60 мм., а) один наплавлений шар; б) два наплавлених шари; в) три наплавлених шари

Провівши експеримент можемо сказати, що процес наплавлення проходив стабільно. Висота напавленої стінки складає 10.5мм ширина 7.6 мм. Після наплавлення третього шару виліт зварювального дроту збільшився на 1.4 мм, це пов'язано з тим, що перший валик наплавлявся на холодну підкладку, а всі наступні на підігрітий метал. Цей процес потрібно контролювати регулюючи виліт з наплавленням кожного шару. При напавленні знизу вверх рідкий метал, що утворюється у зварювальній ванні під дією сили тяжіння періодично витікає вниз, і утворюються напливи у нижній частині напавленого валика.

Для вирішення питання з напливами ми провели ряд експериментів по напавленню валика у вертикальному положенні зверху вниз. Напавлення

проводили на пластину товщиною 5 мм, дротом 08Г2С Ø1.2мм. при таких незмінних параметрах режиму: $U_{зв}=19В$; $V_{под.}= 2$ м/хв; $I_{зв}=95А$. Виліт зварювального дроту – 8мм. Результати експериментів наведено у таблиці 11.

Таблиця 11 – Підбір режимів наплавлення при наплавленні зверху – вниз.

Швидкість наплавлення, мм./хв.	Ширина шва, мм.	Висота шва, мм.	Зображення валика
100	10.4	2.4	
150	8.3	2.7	
200	7	2.5	
250	6	2.3	
300	5.2	2.2	
350	4.7	2.2	

400	4.4	2	
450	4.1	1.9	
500	3.6	1.7	

Вплив швидкості наплавлення на висоту та ширину валика показано на рис. 58.

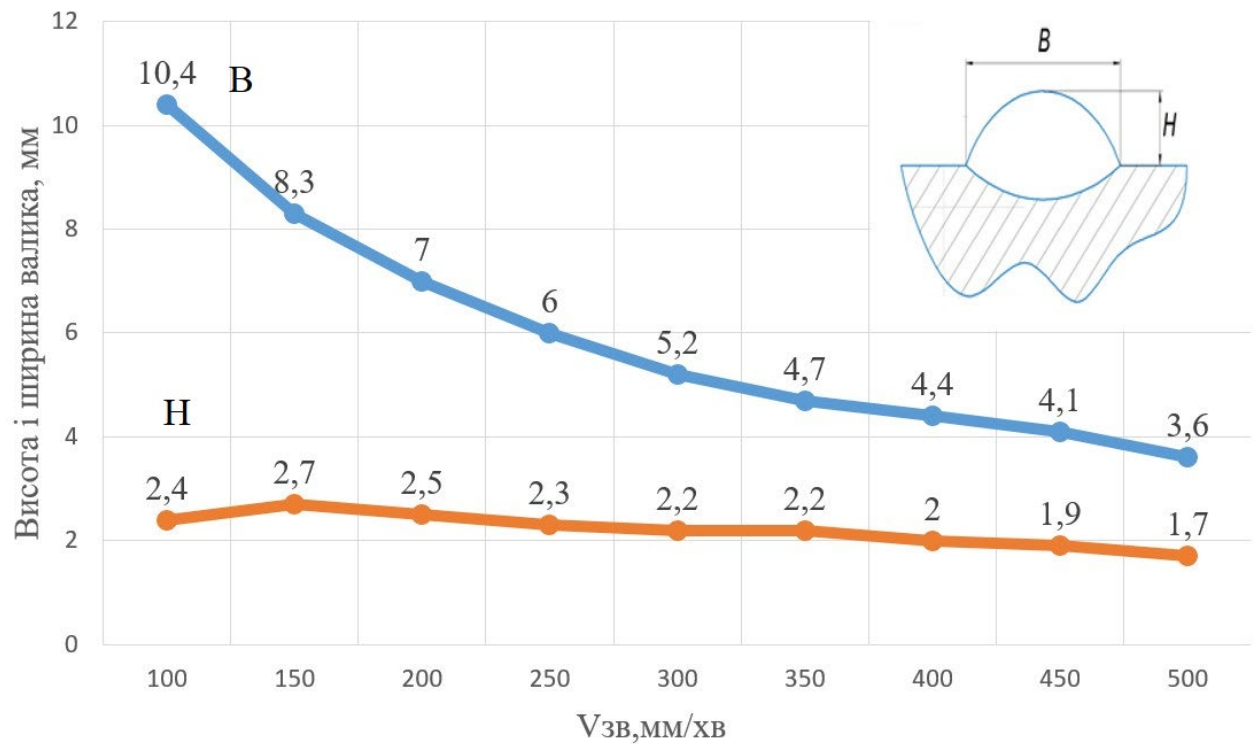


Рисунок 58 – Вплив швидкості наплавлення на висоту валика при наплавленні у вертикальному положенні зверху вниз

З отриманих результатів можна сказати, що при наплавленні у вертикальному положенні зверху вниз збільшився діапазон швидкостей наплавлення. Також немає напливів характерних для наплавлення знизу вверх.

При швидкостях наплавлення 150 мм./хв.; 200 мм./хв.; 250 мм./хв.; 300 мм./хв.; 350 мм./хв. спостерігається найкраще формування наплавленого валика. При швидкості 100 мм./хв.; через перегрів металу, валик виходить досить широким і низьким. Починаючи зі швидкості 400 мм./хв. формування наплавленого валика погіршується і появляється хвилястість. Досліди проводились на металевій пластині в умовах хорошого тепловідводу. Для того щоб забезпечити умови тепловідводу близькі до реального наплавлення багат шарової деталі ми вирішили повторити експеримент і наплавити валики на металевий пруток перерізом 10х10 мм. Наплавлення проводили при швидкостях 250 мм./хв.; 300 мм./хв.; 350 мм./хв.; 400 мм./хв. оскільки саме вони забезпечують наплавлений шар необхідних нам геометричних розмірів. Результати експериментів наведено у таблиці 12.

Таблиця 12 – Результати експериментів при наплавленні на пруток 10х10 мм.

Швидкість наплавлення, мм./хв.	Ширина шва, мм.	Висота шва, мм.	Зображення валика
250	6.6	2.2	
300	6	2	
350	5.4	1.9	

			
400	4.6	1.8	

Вплив швидкості наплавлення на висоту та ширину валика показано на рис. 59.

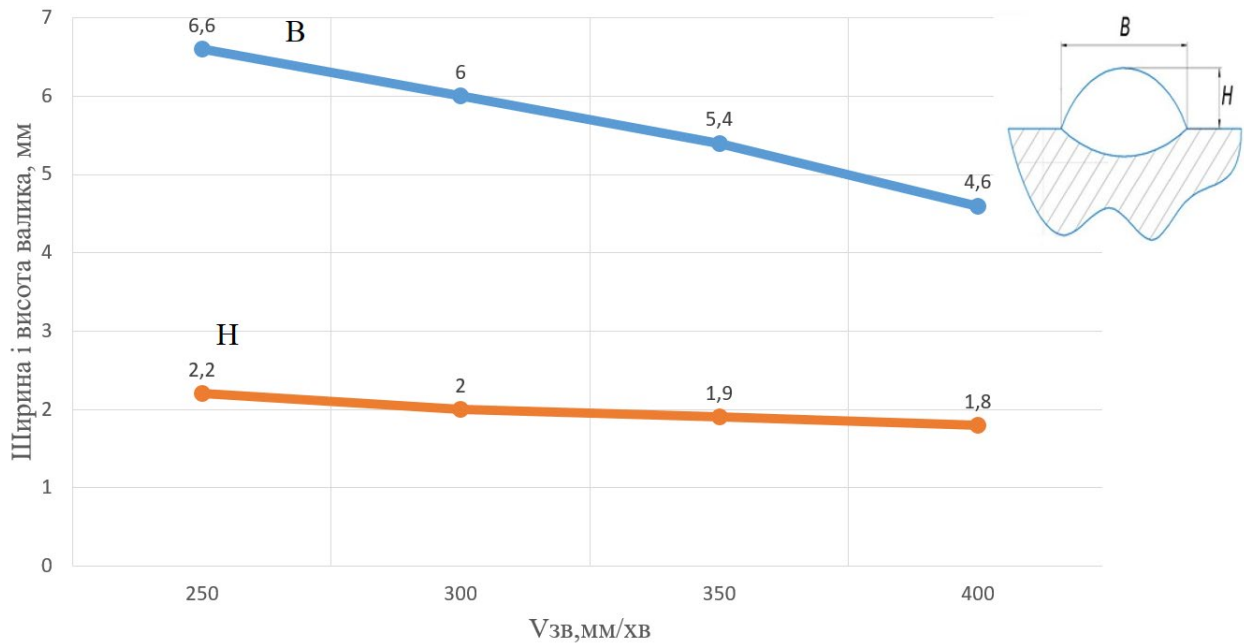


Рисунок 59 – Вплив швидкості наплавлення на висоту валика при напавлені на пруток 10x10 у вертикальному положенні зверху вниз

Дослід показав, що при напавлені на пруток, ширина напавлених валиків збільшилась, а висота трохи зменшилась. Таким чином ми спостерігаємо вплив тепловідводу на формування напавленого валика. Виходячи із результатів проведених експериментів, встановлюємо, що напавлення необхідно проводити на швидкості 250 мм/хв., яка дає змогу отримати напавлений шар необхідних нам геометричних розмірів.

Після підбору режиму напавлення було проведено експеримент по напавленню стінки 60 мм. на пруток перерізом 10x10 мм. Експеримент

проводився дротом 08Г2С Ø1.2мм. при таких незмінних параметрах режиму: $U_{зв}=19В$; $V_{под.}=2м/хв$; $I_{зв}=95А$. Виліт зварювального дроту – 8мм. Було наплавлено 8 шарів металу, після проходження кожного шару проводився замір висоти наплавленого шару і регулювання вильоту. Таким чином зберігався постійний виліт зварювального дроту. Наплавлення проводили на швидкості 250мм/хв. Отримані результати показано на рис. 60.

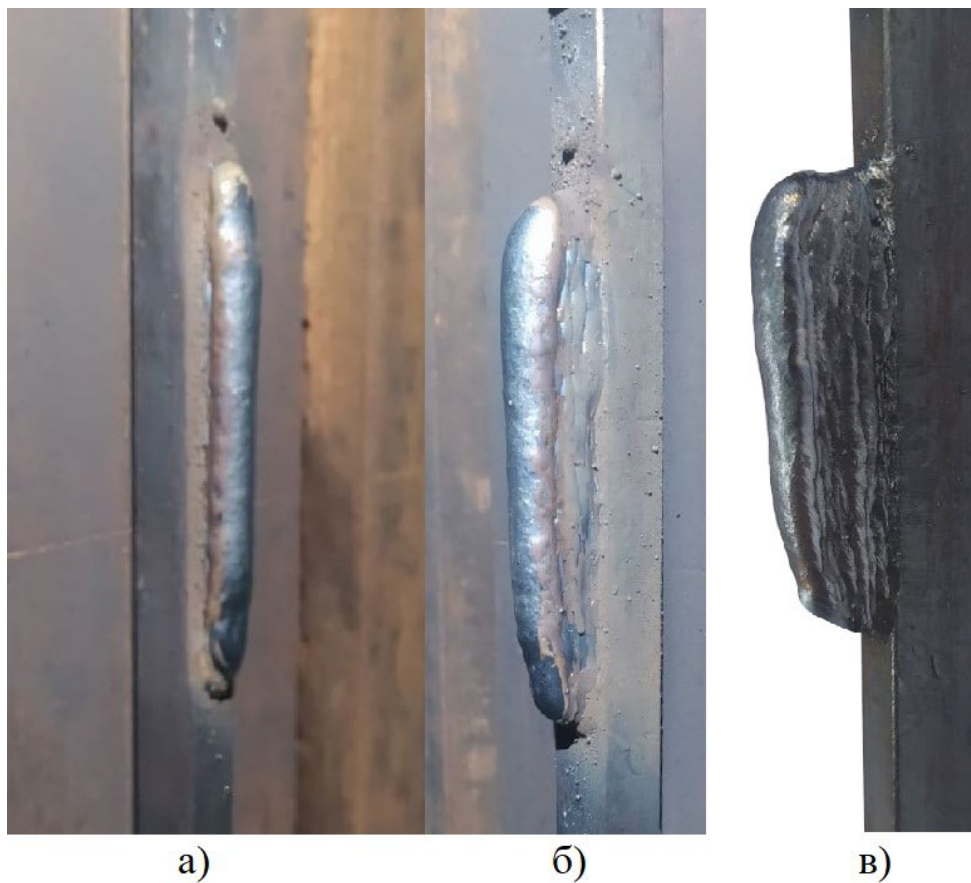


Рисунок 60 – Наплавлення стінки у вертикальному положенні зверху вниз: а) 3 наплавлених шари; б) 6 наплавлених шарів; в) 8 наплавлених шарів

Зміна висоти стінки зі збільшенням наплавлених шарів показано на рис. 61.

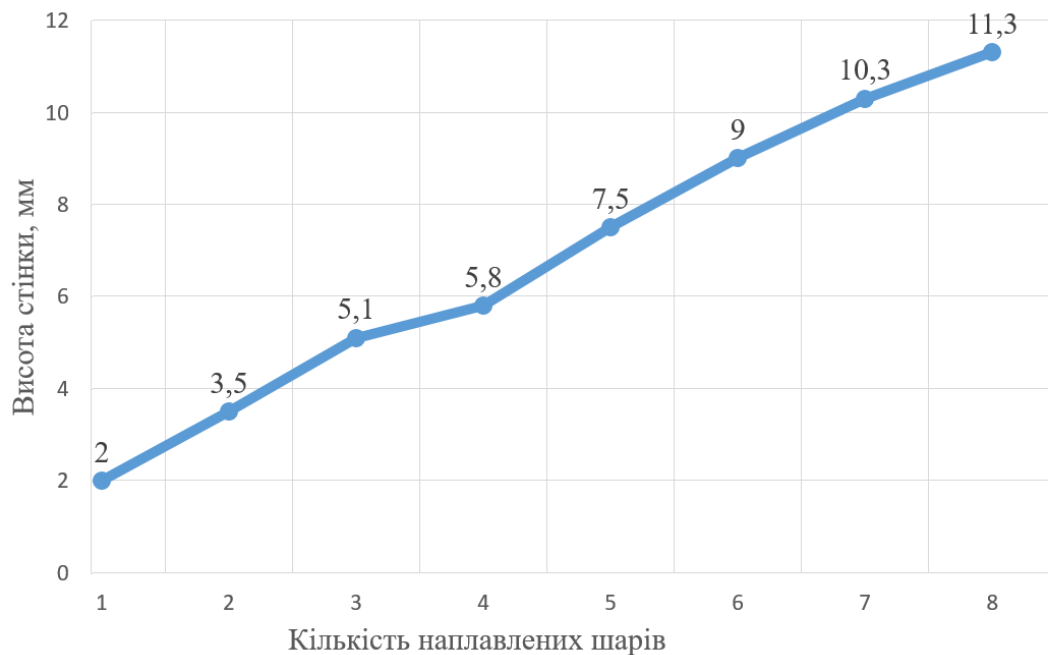


Рисунок 61 – Зміна висоти стінки зі збільшенням наплавлених шарів

Процес наплавлення проходив стабільно, спостерігалось гарне формування наплавлених шарів. Висота наплавленої стінки рівномірно збільшувалась. Після четвертого проходу ми помітили зменшення висоти шару і зробили паузу – 1 хв., процес нормалізувався. Причиною цього є перегрів деталі і осідання металу. Для уникнення цього ефекту після кожного наступного шару проводилась пауза 1 хв. Також ми зіштовхнулись з проблемою запалювання дуги. Причиною цього стало накопичення шлаку SiO_2 на початку зварювання. Для вирішення цієї проблеми деталь після кожного проходу очищалась металевою щіткою. З рисунку видно, що у нижній частині деталі відсутні напливи характерні для наплавлення знизу вгору. Загалом можна сказати, що процес формування металевої стінки проходив краще у положенні зверху вниз.

ВИСНОВКИ ПО ГЛАВІ 3

1. Умови формування наплавленого валика в нижньому та вертикальному положенні дуже сильно відрізняються. Це пояснюється розтіканням по площині рідкого металу в нижньому положенні, що призводить до великої ширини і малої висоти. Наплавлення у вертикальному положенні призводить до зменшення ширини і збільшення висоти внаслідок витягування ванни у вертикальному положенні силою тяжіння.

2. Формування при наплавленні зверху вниз і знизу вверх суттєво відрізняються. Найбільш придатним є наплавлення зверху вниз, воно має більше технологічні можливості формування наплавленого валика. При наплавленні знизу вверх рідкий метал, що утворюється у зварювальній ванні під дією сили тяжіння періодично витікає в низ, і утворюються напливи у нижній частині наплавленого валика. При наплавленні зверху вниз зварювальна ванна також стікає вниз і попадає в нову зварювальну ванну. Цей процес відбувається квазістабільно і призводить до стабільного формування валика.

3. Підложка на якій починається наплавлення має велике значення у процесі відводу тепла. Використання пластини у якості підложки не доцільно в наслідок великого тепловідводу у пластину. Запропоновано у якості підложки використовувати квадратний пруток. Який імітує 7 шарів вже наплавленого металу.

4. ПРОПОЗИЦІЇ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ 3D НАПЛАВЛЕННЯ

Для того, щоб покращити процес наплавлення тривимірної деталі, запропоновано такі пропозиції по вдосконаленню розробленого обладнання:

1. При виготовленні тривимірної деталі, положення наплавлення може змінюватись при цьому змінюються і умови формування наплавленого шару. Щоб забезпечити незмінні умови формування ми пропонуємо, при переході у інше просторове положення не переміщувати зварювальний пальник, а повертати саму деталь. Поворотний стіл з кроковим двигуном повинні забезпечити поворот деталі за заданим алгоритмом (рис. 62).

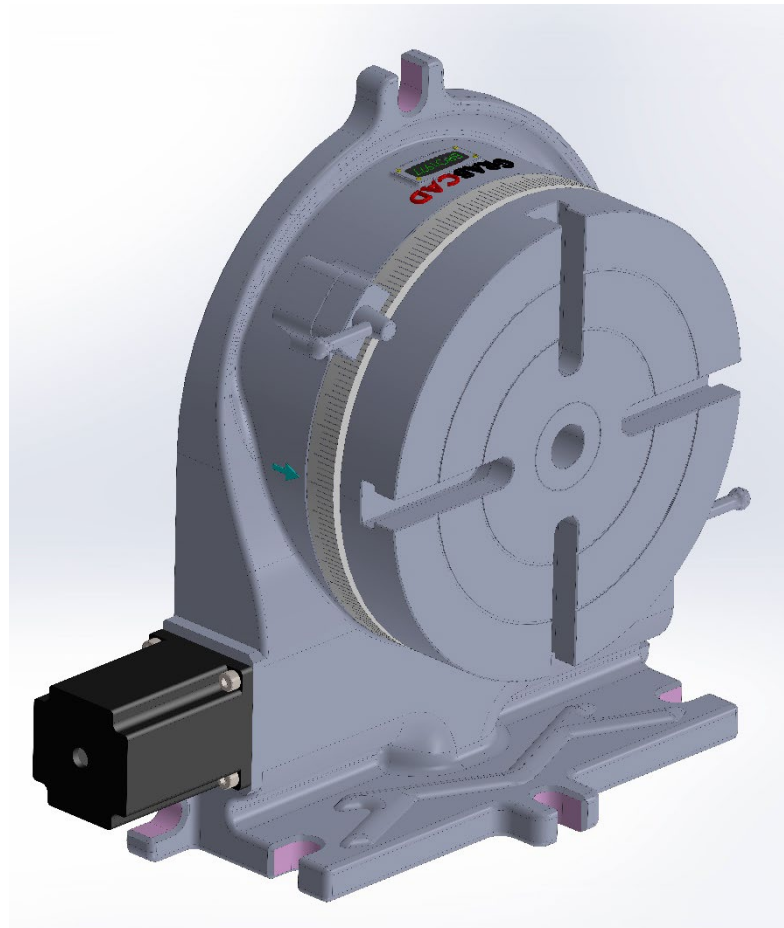


Рисунок 62 – Поворотний стіл з кроковим двигуном

2. Для виготовлення деталей, розмір яких по осі Y більше 200 мм, ми пропонуємо встановити направляючі рейки по яких буде переміщуватись металевий візок з деталлю. Тобто наплавивши деталь до максимального

розміру по осі Y, візок з деталлю можна переміщувати з кроком 200 мм і продовжувати процес наплавлення. Використання направляючих дозволить переміщати деталь не порушуючи співвісність між деталлю і зварювальним пальником.

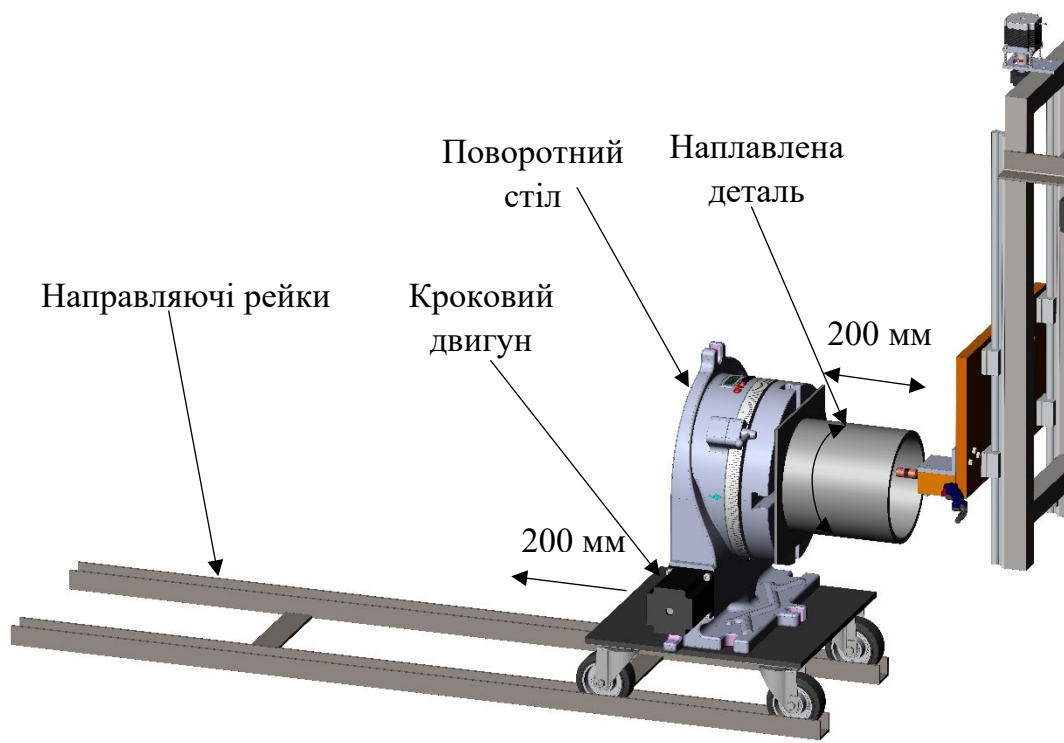


Рисунок 63 – Комп'ютерна модель удосконаленого обладнання

5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

5.1. Опис ідеї проекту

Стартап прагне запровадити новітні технології у всіх сферах людської діяльності, від малих до середніх і великих компаній. Основна ідея проекту наведено у таблиці 13.

Таблиця 13 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ідея проекту надати повний спектр аутсорсингових сервісів та послуг	1. Інженерні послуги (3D друк металевих виробів)	Звернувшись до нас клієнт має змогу виготовляти металеві деталі дешевше ніж за допомогою лиття.
	2. Дослідження та аналіз	Звернувшись до нас клієнт отримує можливість перевірити конструкцію деталі та провести оптимізацію.
	4. Розробка програмного забезпечення	Звернувшись до нас клієнт отримує програмні рішення оптимальні для його обладнання для 3D друку.

Такий підхід дозволяє надавати користувачеві повний спектр послуг. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї над пропозиціями конкурентів. Встановлено перелік техніко-економічних властивостей і характеристик ідеї; визначається попереднє коло конкурентів, які вже є на ринку, і збирається інформація про значення техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів; проведено 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 14).

Таблиця 14 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

п/п	Характеристики ідеї	(потенційні) послуги конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1.	Інженерні послуги	має	немає	має	має	-	-	+
2.	Дослідження	має	має	має	немає	-	-	+
3.	Розробка програмного	має	має	немає	немає	-	-	+

Встановлено перелік слабких, сильних і нейтральних характеристик і властивостей ідеї потенційних послуг, які ляжуть в основу формування їх конкурентоспроможності.

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

У цьому розділі було розглянуто, як можна реалізувати ідею проекту, що показано в таблиці 15.

Таблиця 15 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Інженерні послуги (3D друк металевих виробів)	Технологія 3D – виробництва металевих виробів	Наявна	Доступна

2.	Надання повного спектру	Створення веб сайту	Потрібно розробити	Доступна
	аутсорсингових сервісів та послуг	Оренда офісу для роботи персоналу.	Наявна	Доступна

За результатами аналізу видно, що можливості технологічної реалізації проекту, та методи реалізації є можливими.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Основними гравцями ринку є приватні виробничі відділи, які діють лише у власних компаніях та організаціях, що надають інженерно-консультаційні послуги.

Таблиця 15 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап – проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
3	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Масштабність
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ, ISO

Наразі ринок будується. Економічна ситуація в Україні та поступовий вступ України до Європейського Союзу вимагають реструктуризації наших компаній, підвищення конкурентоспроможності промисловості та впровадження нових інноваційних технологій та інвестицій.

Для опису ринку консалтингового інжинірингу було використано дослідження по ємності консалтингового ринку в Україні, млн. дол. за рік рисунок 64.

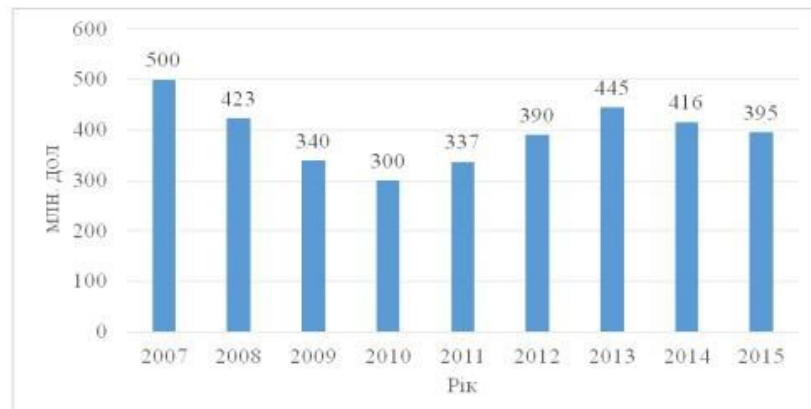


Рисунок 64 - Ємність консалтингового ринку в Україні

Проведений аналіз вказує що наразі консалтингові послуги мають тенденцію спаду, все це пов'язано з кризою в 2010, 2012 роках та військові дії на сході на початку 2014 року.

Ринок консалтингових послуг розвивається переважно після кризи. Українська економіка наразі перебуває у процесі подолання кризи, внаслідок чого розвиток ринку консалтингу розвивається повільно. Однак у майбутньому цей ринок може швидко розвиватися, оскільки Україна увійшла до зони вільної торгівлі з Європейським Союзом. Це може призвести до низки проблем на українському ринку, оскільки вироби, виготовлені за вимогами ЄС, потребують стандартизації.

Географічне розташування споживачів на цьому ринку неоднорідне в усьому світі. Більшість споживачів у країнах, що розвиваються. Тому ринок інжинірингу, аудиту та аутсорсингу є дуже перспективним. Основна мета багатьох компаній – конкурувати з іншими конкурентами, тобто компанії повинні бути конкурентоспроможними.

Цього можна досягти за рахунок підвищення якості продукції, що виробляється, зниження виробничих і експлуатаційних витрат обладнання, створення нового асортименту продукції та багато іншого.

Конкуренція на цьому ринку низька, оскільки ця діяльність нова. Наш проект передбачає співпрацю із замовником відповідно до його вимог зі збереженням інтелектуальної власності замовника. Роботи, проведені за бажанням замовника, не розголошуються. Ми також можемо запропонувати нашим клієнтам власні розробки, оновлення та інновації на вигідних умовах.

Канали збуту ринку машинобудування в основному знаходяться у великих містах з розвиненою промисловістю. А саме в Києві, Дніпрі, Харкові, Львові та ін. Споживча поведінка клієнтів наразі має велике значення для старту проекту, адже від довіри потенційних покупців залежить репутація нашої компанії. З цієї причини, крім просування наших послуг у соціальних мережах та Інтернеті, необхідно підтримувати хорошу репутацію. Насамперед, це може бути гарантовано високою якістю послуг для клієнтів, що веде до довгострокової співпраці з кількома клієнтами. Ваші конкуренти можуть помітити ці позитивні зміни, а також співпрацювати з нашим проектом.

Таблиця 16 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Потреба в інноваційних високоефективних проектах	Виробничі машинобудівні компанії	Необхідність виготовлення продукції за стандартами	-якість, -швидкість, -доступність.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Сучасний розвиток науки та техніки вносить принципові нововведення в усі сфери матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси та використовувані матеріали, предмети та знаряддя праці.

Дуже часто при виробництві продукції виникають ситуації коли на робітників та навколишнє середовище можуть впливати шкідливі та небезпечні виробничі фактори. Саме тому питання охорони праці є важливим і актуальним при розробці технологічних процесів і у промисловості в цілому.

У дипломній дисертація розробляється установка для 3D-наплавлення із використанням механізованого зварювання у середовищі вуглекислого газу (CO₂).

Мета даного розділу – розробка комплексу заходів з охорони праці при зварюванні в середовищі захисного газу для забезпечення нормальних умов праці без травматизму, пожеж, вибухів, аварій та ін.

6.1. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Розглянута технологія 3D друку використовує метод дугового зварювання, тож вимагає дотримання певного комплексу правил безпеки праці, які повинні знаходити відображення в технологічних картах і строго дотримуватися при виконанні зварювальних робіт.

Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами, що виникають при дуговому зварюванні є [48]:

Таблиця 17. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори при ультразвуковому зварюванні

Шкідливий фактор	Значення фактору
Шкідливі речовини	-
Випромінювання у оптичному діапазоні (ультрафіолетове випромінювання, видиме випромінювання, інфрачервоне випромінювання)	++
Електромагнітні поля	++
Статичне навантаження руху	-
Ультразвук	-
Магнітні поля	-
Іонізуючі випромінювання	-
Шум та вібрація	++
Іскри, бризки і викиди розплавленого металу	++
Системи які знаходяться під тиском, що не дорівнює атмосферному	-
Механізми і вироби, що рухаються	+
Електричний струм	++

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

Під час роботи зварювальних установок рівні звукового тиску на робочих місцях повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99 [49], а обладнання, що застосовується, ДСТУ 2817-94 [50]. Робота на зварювальних установках повинна виключати можливість безпосереднього контакту з деталями, що друкуються, а також можливість безпосереднього зорового

контакту із зоною горіння електричної дуги під час роботи обладнання. 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 [53], необхідно облаштовувати місцеву витяжну вентиляцію.

6.2. Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Вентиляція – процес повітрообміну у виробничих приміщеннях, який забезпечує нормовані значення параметрів мікроклімату та чистоту повітря.

При проектуванні вентиляції необхідно дотримуватися таких вимог [54]:

1. Вентиляція повинна забезпечувати необхідну чистоту повітря та параметри мікроклімату виробничого приміщення в відповідності з ДСН 3.3.6.042-99 [55].

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.

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.

Над обладнанням з вертикальними потоками нагрітого забрудненого повітря установлюють зонти (рис. 65 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. 65 б).

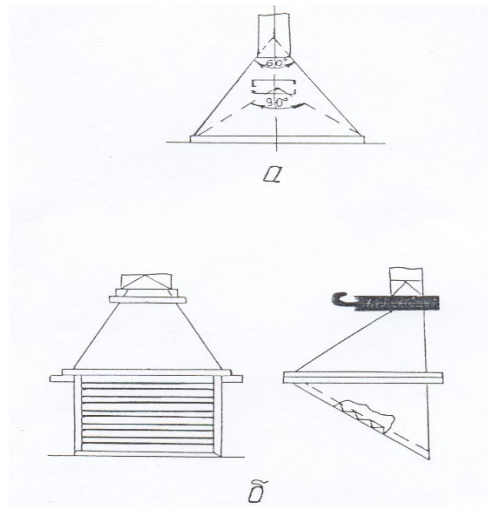


Рисунок 65 - Основні конструкції місцевої витяжної вентиляції: а – зонт; б – панель рівномірного відсмоктування

Швидкість повітря в отворі відсмоктувача розраховують за формулою:

$$V_0 = 8 \cdot V_x \cdot (x/d)^2 = 11.52 \text{ м/с},$$

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

d – діаметр вхідного отвору, м.

Витрати повітря, що видаляється відсмоктувачем, визначаються за формулою:

$$L_M = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0 = 1658 \text{ м}^3/\text{год},$$

де V_0 – швидкість повітря в отворі відсмоктувача, м/с;

F_0 – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача.

Мікроклімат

Під мікрокліматом виробничих приміщень розуміють клімат внутрішнього середовища цих приміщень, який визначається діючими на

організм людини температурою, вологістю та швидкістю руху повітря, а також температурою оточуючих поверхонь.

Мікроклімат, або метеорологічні умови, у промислових умовах визначаються наступними параметрами: температурою повітря ($^{\circ}\text{C}$), відносною вологістю (%) та швидкістю руху повітря на робочому місці (м/с).

Основні вимоги до параметрів мікроклімату встановлено в ДСН 3.3.6.042-99 [56].

Температура повітря в приміщенні визначається температурою зовнішнього повітря і тепловою енергією, що виділяється усередині приміщення. Джерелами теплоти в даному приміщенні є люди, електроустаткування, а також освітлювальні прилади. Зовнішнім джерелом надлишкового тепла є сонячна радіація у світлий час доби.

Таблиця 18. Параметри мікроклімату

Сезони року	Параметри мікроклімату					
	Оптимальні			Фактичні		
	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Вологість, %	Швидкість повітря, м/с	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Вологість, %	Швидкість повітря, м/с
Теплий	23-25	40-60	0,1	23-25	40-5!	0,1
Холодний	22-24	40-60	0,1	22	40-5!	0,1

У приміщеннях з використанням зварювальної техніки рекомендується застосування тільки оптимальних показників мікроклімату, тобто таких, при яких людина відчуває себе комфортно. У табл. 11. наведені оптимальні значення параметрів мікроклімату.

Освітлення

Освітлення робочого місця - важливий фактор для створення нормальних умов праці. Практично виникає необхідність освітлення як природним, так і штучним світлом. Штучне освітлення, необхідне як важливий фактор для приближення нічних умов праці до денних.

Штучне і природне освітлення приміщення повинно забезпечувати деяким параметрам. Характеристика зорової роботи - середня точність (0,5 - 1 мм), підрозряд зорової роботи - IVa.

Виникає необхідність освітлення як природним, так і штучним світлом. Для забезпечення освітлення від природного світла створюють прогавини для пропускання світла. Для створення достатнього освітлення поля зору робітника, рівномірно розподіленим світловим потоком, використовують штучне освітлення.

Згідно з ДБН В.2.5-28:2018 [57], природне та штучне освітлення при зварювальних апаратах нормативним показникам відповідають газорозрядні лампи високого тиску, метало генні лампи типу ДРИ та ДРЛ.

Вони мають високу світловіддачу (до 100 лм/Вт) та кращий спектральний зміст світла.

Для оптимізації виробничого освітлення передбачають:

- використовувати газорозрядні джерела світла, що дає можливість підвищити рівень освітлення при зварювальних роботах до 300 лк, при загальному освітленні без зайвих витрат електроенергії;
- очищення світильників та вікон від забруднення один раз на 3 місяці;
- фарбування стін титановими та цинковими білилами з високим

коефіцієнтом відбивання для видимого світла за низьким коефіцієнтом для ультрафіолетових променів. На робочих місцях суміжне освітлення - природне та штучне, штучне відбувається лампами ДРЛ. Фарбування обладнання та приміщень для зварювання повинні бути світлих тонів з дифузійним відбиттям світла. При виконанні зварювальних робіт в загальному приміщенні місця для зварювання повинні обмежуватися ширмами.

Шум та вібрація

Згідно з ДНАОП 5.1.30-2.17-85 [58] захист від шуму повинен досягатися розробкою шумобезпечної техніки, застосування засобів і методів колективного захисту по ДСТУ 7239:2011 [59].

Захист від виробничого шуму має велике значення. Шум несприятливо діє на організм людини та знижує виробництво праці. Шумом називається будь-який небажаний, неприємний для сприйняття людиною звук. Основним джерелом шуму механічного походження є механізми з рухомими частинами. Джерелом аеродинамічного шуму є вентиляційна установка, а джерелом електромагнітного - робота випрямляча.

За часовою характеристикою шум є постійним (рівень звуку за 8-годинний робочий день змінюється не більш як на 6 дБ). Рівень шуму не перевищує допустиме значення 78 дБ.

Під вібрацією розуміють складні коливання в механічних системах. Згідно з ДСТУ 2300-93 “Вібрація. Терміни та визначення”[60] під вібрацією розуміють рух точки або механічної системи, при якому відбувається почергове зростання та спадання під час значення хоча б однієї координати.

Рухомі механізми та машини

Причинами травматизму від рухомих механізмів зварювання, управління та регулювання можуть бути: невідповідність переміщення органів управління переміщенню робочого інструменту, недостатній захист рухомих частин систем керування, невиконання правил техніки безпеки. В даній установці причини травмування зведено до мінімуму. Система управління розміщена на корпусі установки, вона заземлена, органи керування поміщено у непровідну панель. Система керування відповідає ДСТУ EN 60947-5-1:2015 [61]. Опір ізоляції головних і допоміжних кіл в межах одного приладу керування не менш 12.5 МоМ. Ступінь захисту пульту керування IP 11 за ДСТУ ІЕС 60529:2019 [62]. Рухомим механізмом установки є зварювальна головка на супортах, складально-зварювальне пристосування та підвід газу. При технологічному процесі можливе травмування персоналу рухомими частинами обладнання.

Засобами індивідуального захисту є спецодяг, до якого входять чоловічий костюм за ДСТУ EN ISO 13688-2001 [63] із брезентової парусини,

взуття та захисний шолом. До засобів колективного захисту за ДСТУ 7239:2011 [64] входить огорожа навколо комплексу.

Електробезпека

Всі приміщення поділяються по ступені враження людини електричним струмом. Дане приміщення належить до класу підвищеної небезпечності.

Основними причинами враження людини електричним струмом є: випадковий дотик до струмоведучих частин (коло протікання струму: рука-тіло-земля), поява напруги на металевих ділянках оснащення в результаті пошкодження ізоляції або помилкової дії працівника.

Навчання персоналу безпечним прийомам роботи мають проводитись відповідно НПАОП 40.1-1.21-98 [65]. Для захисту людини від напруги на струмоведучих частинах обладнання встановлене захисне заземлення за ДСТУ 7237:2011 [66], яке знімає також статичну електрику.

Для заземлення використовуємо схему TN-C-S. За цієї системи заземлення захисний провідник і робочий нуль до введення в будівлю об'єднані (PEN), на введенні роблять повторне заземлення, після якого їх поділяють на PE і N.

Систему TN-C-S рекомендують для споруджуваних будинків.

Важливо і те, що для багатьох старих вітчизняних пристроїв характерно міцне з'єднання корпусу з нулем. При приєднанні таких пристроїв до мережі з TN-C-S (TN-S) можливе відключення захисту по струму витоку.

При застосуванні системи TN-C-S необхідно надійне повторне заземлення, також заземлюють всі провідні частини і конструкції будівлі.

З цією метою на вході в будівлю влаштовують так звану головну заземлюючу шину, тобто клемник. Його з'єднують з повторним заземленням будинку і приєднують до нього нерозривними провідниками металеві елементи і конструкції: арматурний каркас, труби, металеві ґрати, профілі і т.п.

Згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [67] виробниче приміщення належить до категорії Г. (Категорія Г - до цієї категорії відносять виробництва, в яких використовують негорючі речовини та матеріали у гарячому, розжареному,

розплавленому станах, процеси обробки які супроводжуються виділенням променистої теплоти, полум'я, які спалюються або утилізуються у вигляді палива).

Зварювальні роботи повинні проводитися згідно з ДСТУ Б В.2.2-29:2011 [68], з типовими правилами пожежної безпеки для промислових підприємств.

Приміщення, в яких виконується механізоване дугове зварювання побудовані з елементів конструкцій по II категорії протипожежної безпеки. Мінімальний ступінь вогнестійкості II. Для будівель цієї категорії межа вогнестійкості несучих стін, колон - 2 години, площадок сходів - 1 година та зовнішніх стін з навісних панелей, перегородок - 0,25 год.

Для облицювання стін та дерев'яних конструкцій застосовано штукатурку вапняно - цементну товщиною 20 мм. Для підвищення вогнестійкості будівлі, стіни фарбують спеціальними фарбами. Це паста ВПМ, яка в умовах звичайної експлуатації захищає металеві конструкції від корозії, а при пожежі вспучується і в результаті збільшення їх термічного опору підвищується межа вогнестійкості.

6.3. Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

6.3.1. Пожежна безпека

Можливими причинами пожежі в приміщенні є: несправність електроустаткування, а також порушення протипожежного режиму (використання побутових нагрівальних приладів, паління).

Для забезпечення пожежної безпеки встановлюють датчики (ИДФ, ДИП). Також в приміщенні встановлені сигналізації ручної дії. Для ліквідації пожежі самотужки в робочому приміщенні знаходяться вогнегасники (ОП-50 або ОУ-25 в кількості 2шт).

Для кожного підприємства, об'єкта на основі типових правил пожежної безпеки промислові підприємства розробляють свої, окремі протипожежні інструкції.

Шляхи евакуації людей у випадку пожежі для даного приміщення відповідають встановленим нормам:

- Двері відчиняються на зовні;
- Висота дверного прорізу складає 2м (норма 2м);
- Ширина дверного прорізу 1м (норма 0,8 м).

У приміщенні суворо заборонено палити і користуватися побутовими нагрівальними приладами, про що свідчать знаки та таблички безпеки (ДСТУ EN ISO 7010:2019 [21]) встановлені на стінах приміщення.

6.3.2. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробією електричної напруги на корпус зварювальної установки, необхідно терміново вимкнути рубильник і повідомити про це майстра або начальника ділянки.

У випадку потрапляння людини під напругу, необхідно відключити зварювальну установку від мережі, покласти потерпілого на дерев'яний настил підклавши під голову ватник та викликати швидку допомогу. Якщо необхідно, надати потерпілому першу допомогу.

У випадку загорання зварювальної установки, відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

Кожен робітник або особа, яка виявила пожежу або загорання, зобов'язаний:

- негайно сповістити про це пожежну охорону;
- приступити до гасіння пожежі наявними засобами пожежогасіння;
- викликати на місце пожежі посадових осіб.

У випадку отримання травми необхідно повідомити майстра або начальника ділянки та звернутися у медичний пункт за допомогою.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз існуючих адитивних способів зварювання; визначено їх основні переваги та недоліки. Визначено найперспективніші технології для адитивного виробництва. Зроблено висновки, що всі експерименти по наплавленню металевих деталей проводились в нижньому положенні. У цьому положенні розплавлений метал шару під дією сили тяжіння намагається розпливитись по площині перпендикулярної до сили тяжіння. Це призводить до збільшення ширини та зменшення висоти наплавленого валика, що є негативним фактором для 3D наплавлення. Вирішено проводити наплавлення деталі у вертикальному положенні. При цьому, під дією сили тяжіння зварний валик повинен витягуватись і отримуватись тонка стінка деталі.

Запропоновано та розроблено нове обладнання для 3D наплавлення у вертикальному положенні на основі MAG зварювання. Основою цього обладнання є: модернізований фрезерувальний верстат із ЧПК, який виконує роль механізму переміщення зварювального пальника; апарат для механізованого зварювання у середовищі захисних газів PATON™ ProMIG-250-15-4 у ролі джерела живлення та механізму подачі зварювального дроту. Програмне керування відбувається за допомогою персонального комп'ютера із встановленим додатком Mach 3.

Так як штатне переміщення осі Z фрезерувального верстата відбувається окремо від переміщення по осях X, Y, було розроблено новий механізм переміщення пальника по осі Z. Розроблений механізм забезпечує переміщення зварювального пальника з максимальним ходом по: $X = 400$ мм; $Y = 200$ мм ; $Z = 500$ мм.

Така конструкція обладнання дозволяє наплавляти деталі перерізом 400x500 мм довжиною 200 мм. Відсунувши візок по осі Y ще на 200 мм можемо отримати довжину 400 мм. Таку процедуру можна проводити необмежену кількість разів, що дозволить наплавляти деталі перерізом 400x500мм теоретично необмеженої довжини.

Проведено ряд експериментів по підборі режимів наплавлення у вертикальному положенні. По даних експериментів було встановлено на яких режимах найкраще проводити наплавлення. Проведено наплавлення стінки довжиною 60 мм. у вертикальному положенні знизу вверх та зверху вниз.

Формування при напавленні зверху вниз і знизу вверх суттєво відрізняються. Найбільш придатним є наплавлення зверху вниз, воно має більше технологічні можливості формування напавленого валика. При напавленні знизу вверх рідкий метал, що утворюється у зварювальній ванні під дією сили тяжіння періодично витікає в низ, і утворюються напливи у нижній частині напавленого валика. При напавленні зверху вниз зварювальна ванна також стікає вниз і попадає в нову зварювальну ванну. Цей процес відбувається квазістабільно і призводить до стабільного формування валика.

Запропоновано пропозиції для вдосконалення обладнання для 3D наплавлення:

- для закріплення деталі використовувати поворотний стіл;
- для переміщення деталі по осі Y встановити направляючі рейки.

Розроблено стартап проект по темі дисертації та комплекс заходів із охорони праці для забезпечення нормальних умов праці без травматизму, пожеж, вибухів.

Я вважаю MAG зварювання одним із найперспективніших у адитивному виробництві, а наплавлення тривимірних деталей у вертикальному положенні перспективною ідеєю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина) / Г.О. Андрощук // Наука, технології, інновації. — 2017. — № 2 (2). — С. 29-36. — Бібліогр.: 17 назв. — укр.
2. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку / Г.О. Андрощук // Наука, технології, інновації. — 2017. — № 1 (1). — С. 68-77. — Бібліогр.: 17 назв. — укр.
3. Технология селективного лазерного плавления (SLM) / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://blog.iqb.ru/slm-technology/#print>
4. SLM 280HL — установка для селективного лазерного плавления / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.informdom.com/metalloobrabotka/2016/5/slm-280hl-ustanovka-dlya-selektivnogo-lazernogo-plavleniya.html>
5. Как работает технология электронно-лучевого плавления EBM в 3D-печати? / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.digispace.ru/news/chto-takoe-ebm-elektronno-luchevoe-plavlenie-v-3d-pechati.html>
6. Новый 3D-принтер Arcam EBM Spectra H позволяет работать с тугоплавкими авиационными сплавами / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/novyy-3d-printer-arcam-ebm-spectra-h-pozvolyaet-rabotat-s-tugoplavkimi-aviatsionnymi-splavami/>
7. Технология DMD — прямое нанесение металла / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/dmd_tech/
8. Киевские инженеры печатают титановой проволокой [Електронний ресурс].- ЛІГА. Tech. Режим доступу: <https://tech.liga.net/technology/interview/titan-v-3d-kievskie-injenery-pechatayut-iz-provoloki-detali-airbus>
9. Colegrove, P. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology [Text] / P. Colegrove, S. Williams. — Cranfield

University, 2013. – 42 p. – Available at: <https://www.xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf>

10. RIBEIRO, F.; NORRISH, J. Metal based rapid prototyping for more complex shapes. Biennial international conference on “Computer Technology in Welding”. p. 1–11, 1996.

11. 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. / [Электронный ресурс]. – <https://doi.org/10.1243/0954405981515590>

12. BARKER, R. US Patent US1533300A. Method of making decorative articles, 1920.

13. Colegrove, P. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology [Text] / P. Colegrove, S. Williams. – Cranfield University, 2013. – 42 p. – Available at: <https://www.xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf>

14. 3D Printing in Metal With Robots / [Электронный ресурс]. – ютуб.ком. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=p0QM6nzNYnM&feature=youtu.be>

15. Выпущен первый в мире гребной винт, созданный на 3D-принтере / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/company/iqb_technologies/blog/446470/

16. Выпущен первый в мире гребной винт, созданный на 3D-принтере / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.iqb.ru/waampeller-case/>

17. Сварка СМТ делает невозможное возможным принтере / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.informdom.com/metall Obrabotka/2009/3/svarka-smt-delaet-nevozmozhnoe-vozmozhnym.html>

18. 3D-принтер печатающий металлом / [Электронный ресурс]. – Печатник.ком. Режим доступа: <https://pechatnick.com/news/vo-francii-izobreten-3d-printer-pechataushii-titanom-stalu-i-drygimi-vidami-metalla-video>

19. Students Combine Prusa i3 Printer with a MIG Welder to Create an Affordable Metal 3D Printer [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://3dprint.com/23868/cheap-metal-3d-printer-welder/>
20. MX3D Bridge / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mx3d.com/projects/mx3d-bridge/>
21. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dnews.ru/1041584/relativity-space-anonsirovala-polnostyu-mnogorazovuyu-raketu-terran-r-napechatannuyu-na-3dprintere>
22. Kovacevic R. Development of MultiFab Machine For Rapid Manufacturing/Repair [Text] / R. Kovacevic // The 2003 CTMA Symposium. – Salt Lake City, USA, 2003. – Available at: <https://www.smu.edu/>
23. Alhuzaim A. F. Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture [Text] / A. F. Alhuzaim. – Montana Tech of the University of, 2014. – 246 p.
24. Патон Б. Е. Микроплазменная сварка [Текст] / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко и др. – К: Наукова Думка, 1979. – 262 с.
25. Гладкий П. В. Плазменная наплавка [Текст] / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев. – Киев: Экотехнология, 2007. – 292 с.
26. Korzhik V. N. 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review) [Text] / V. N. Korzhik, V. Y. Khaskin, A. A. Grinyuk, V. I. Tkachuk et. al. // The Paton Welding Journal. – 2016. – Vol. 2016, Issue 6. – P. 117 – 123. doi: 10.15407/tpwj2016.06.20
27. Гринюк А. А. Унифицированный плазмотрон для сварки сжатой дугой неплавящимся электродом [Текст]: міжнар. Конф. / А. А. Гринюк, В. Н. Коржик, А. А. Бабич, В.И. Ткачук, С. И. Иелешенко // Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні – PoliWeld – 2016. – 2016. – С. 43 – 49.
28. Colegrove, P. A. High Pressure Interpass Rolling of Wire + Arc Additively Manufactured Titanium Components [Text] /P. A. Colegrove, F. Martina, M. J. Roy, B. A. Szost, S. Terzi, S. W. Williams et. al. // Advanced Materials Research. – 2014. –Vol. 996. – P. 694–700. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.996.694

29. Somashekara, M.A. Investigations into effect of weld-deposition pattern on residual stress evolution for metallic additive manufacturing [Текст] / M.A. Somashekara [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2017. - Vol. 90. - No 5–8. - pp. 2009–2025.
30. Jhavar, S. Enhancement of Deposition Quality in Micro-plasma Transferred Arc Deposition Process [Текст] / S. Jhavar, N.K. Jain, C.P. Paul // Mater. Manuf. Process. - 2014. - Vol. 29. - No 8. - pp. 1017–1023.
31. Gu, J. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys [Текст] / J. Gu [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2016. - Vol. 230. – pp. 26-34.
32. Colegrove, P.A. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling [Текст] / P.A. Colegrove [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2013. - Vol. 213. - pp. 1782-1791.
33. Suryakumar, S. Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing [Текст] / S. Suryakumar [et al.] // CAD Comput. Aided Des. - 2011. - Vol. 43. - pp. 331-344.
34. Liberini, M. Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing [Текст] / M. Liberini [et al.] // Procedia CIRP. - 2017. - Vol. 62. - pp. 470– 474.
35. Yang, D. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing [Текст] / D. Yang, C. He, G. Zhang // J. Mater. Process. Technol. - 2016. - Vol. 227. - pp. 153–160.
36. Szost, B.A. A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components [Текст] / B.A. Szost [et al.] // Mater. Des. - 2016. – Vol. 89. – pp. 559-567.
37. Montevecchi, F. Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process [Текст] / F. Montevecchi [et al.] // Procedia CIRP. - 2016. - Vol. 55. - pp. 109–114.

38. Zhou, X. Three-dimensional numerical simulation of arc and metal transport in arc welding based additive manufacturing [Текст] / X. Zhou [et al.] // Int. J. Heat Mass Transf. - 2016. - Vol. 103. - pp. 521-537.

39. Wu, Y. Mechanically assisted droplet transfer process in gas metal arc welding [Текст] / Y. Wu, R. Kovacevic // Proc. Instn. Mech. Engrs. Part B: J. E. Manuf. - 2001. - Vol. 216. - pp. 555–565.

40. Wang, H. Solid Freeform Fabrication Based on Micro-Plasma Powder Deposition [Электронный ресурс] / H. Wang, W. Jiang, R.K.M. Valant – Электрон. дан. (471 Кб). - Res. Cent. Adv. Manuf. South. Methodist Univ. - 2003. - pp. 6–8. Режим доступа –

<https://pdfs.semanticscholar.org/e843/81a31dc4cf5f1ea2c1b3eb0b3f146528f9de.pdf>

41. Zhang, Y.M. Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study [Текст] / Y.M. Zhang [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2003. - Vol. 135. - pp. 347- 357.

42. Cao, Y. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process [Текст] / Y. Cao [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. - 2011. - Vol. 27. - No 3. - pp. 641–645.

43. Toshihide, H. Freeform Fabrication Method of Alloys and Intermetallic Compounds by 3D Micro Welding [Текст] / H. Toshihide, K. Soshu // Trans. JWRI. - 2008. - Vol. 37. - No 2. - pp. 63–68.

44. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://ritm-magazine.ru/ru/public/3d-pechat-na-metallorazhishchem-oborudovanii>

45.[Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
https://www.researchgate.net/publication/332490383_Balancing_WAAM_Production_Costs_and_Wall_Surface_Quality_through_Parameter_Selection_A_Case_Study_of_an_Al-Mg5_Alloy_Multilayer-Non-Oscillated_Single_Pass_Wall

46.Сварочный полуавтомат PATON™ ProMIG-250-15-4/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://paton.ua/ru/zvaryvalniy-nap-vavtomat-paton-promig-250-15-4>

47.Сверлильно-фрезерный станок DM-SX3 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://cncstanki.ru/shop/UID_121.html

48. Левченко О. Г. Охорона праці та цивільний захист: навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія». – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 337 с. – [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31215>.

49. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку

50. ДСТУ 2817-94 Система стандартів безпеки праці. Апарати електричні комутаційні на напругу до 1000 В. Вимоги безпеки.

51. ДСТУ 12.1.012:2008 Система стандартів безпеки праці. Вібраційна безпека. Загальні вимоги/

52. ДСТУ 12.2.061:2009 Система стандартів безпеки праці. Устаткування виробниче. Загальні вимоги безпеки до робочих місць

53. Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони, N 741/35024 від 03.08.2020 р.

54. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях: рекомендації до виконання розділу магістерської дисертації [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» (зварювальні та споріднені спеціалізації) / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. Г. Левченко. – Електронні текстові дані (1 файл: 110 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 30 с.39. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень

55. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення

56. ДНАОП 5.1.30-2.17-85 Вібрація ручних машин. Норми. Вимоги безпеки

57. ДСТУ 7239:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація

58. ДСТУ 2300-93. Вібрація

59. ДСТУ EN 60947-5-1:2015 Пристрої комплектні розподільчі низьковольтні.
60. ДСТУ IEC 60529:2019 Ступені захисту, забезпечувані корпусами
61. ДСТУ EN ISO 13688:2016 Одяг захисний. Загальні вимоги
62. ДСТУ 7239:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація
63. ДСТУ 2489-94. Система стандартів безпеки праці. Контактне зварювання. Вимоги безпеки
64. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів
65. ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту
66. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою
67. ДСТУ Б В.2.2-29:2011 Будівлі підприємств. Параметри.
68. ДСТУ EN ISO 7010:2019 Графічні символи. Кольори та знаки безпеки. Зареєстровані знаки безпеки