

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»

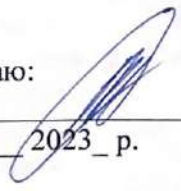
Освітньо-професійна програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

на тему: «Відновлення сталевих деталей адитивною технологією
пошарового плазмового наплавлення»

Шифр: МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАм -22-1  Віталій Щур

Керівник  д.т.н., проф. О.В. Диха

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ  Диха О.В.

2023_ р.

Хмельницький, 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»
Спеціалізація: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедрою ТАМ

Диха О.В.

" 15 " жовтня 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ

Щур Віталій Вікторович

1. Тема проекту:

«Відновлення сталевих деталей адитивною технологією пошарового плазмового наплавлення»

керівник проекту: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 15 серпня 2023р. № 28

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 15.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) Технічні умови на технологію плазмового напилення електродом що плавиться.
- 2) Річна програма ремонту деталей.
- 3) Матеріали переддипломної практики.
- 4) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз сучасних технологій адитивного наплавлення металів
2. Дослідження особливостей формування металевих виробів пошаровим плазмовим наплавленням
3. Розробка обладнання для адитивного виробництва металевих заготовок плазмовим наплавленням
4. Дослідження властивостей і структури металу, отриманого пошаровим плазмовим наплавленням

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2023р.

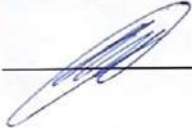
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз сучасних технологій адитивного наплавлення металів	1.11.2023	
2	Дослідження особливостей формування металевих виробів пошаровим плазмовим наплавленням	15.11.2023	
3	Розробка обладнання для адитивного виробництва металевих заготовок плазмовим наплавленням	1.12.2023	
4	Дослідження властивостей і структури металу, отриманого пошаровим плазмовим наплавленням	5.12.2023	
5	Оформлення презентаційних матеріалів	15.12.2023	

Студент

 Щур В.В.

Керівник роботи

 Диха О.В.

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 92 сторінок, кількість рисунків – 32, таблиць – 9, додатків – 2, кількість джерел згідно із переліком посилань – 77.
Студент гр. МТВАм-22-1 Щур Віталій

Тема «Відновлення сталевих деталей адитивною технологією пошарового плазмового наплавлення»

Дана магістерська дипломна робота спрямована на підвищення продуктивності та якості адитивного виробництва металевих виробів застосуванням плазмового наплавлення електродом, що плавиться.





Відповідно до мети вирішувались завдання:

1. Визначити вплив технологічних параметрів на закономірності формоутворення наплавленого валика при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться.
2. Розробити модель розрахунку геометричних параметрів одиночного валика при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться стосовно умов адитивного формування металевих виробів.
3. Дослідити процес пошарового плазмового наплавлення електродом, що плавиться, і розробити технологічні рекомендації для адитивного формування металевих виробів з високолегованих сталей аустенітного класу.
4. Дослідити структуру і властивості високолегованої сталі, отриманої пошаровою плазмовою наплавкою електродом, що плавиться.

Перелік ключових слів: плазматрон, наплавлення, сталь, електрод

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛІВ.....	10
1.1. Огляд технології адитивного формування металевих виробів пошаровим дуговим наплавленням.....	12
1.2. Плазмова наплавка електродом, що плавиться.....	21
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ПОШАРОВИМ ПЛАЗМОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ.....	29
2.1. Дослідження умов стійкого процесу плазмового наплавлення електродом, що плавиться, для адитивного формування металевих виробів.....	30
2.2. Дослідження теплових процесів при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться.....	33
2.3. Дослідження впливу параметрів плазмового наплавлення електродом, що плавиться, на геометричні розміри наплавленого валика.....	36
3. РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК ПЛАЗМОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ.....	41
3.1. Дослідження особливостей теплопередачі в кільцевому аноді плазмотрону.....	44

МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
		Щур Віталій		
		Диха		
		Бабак		
		Диха		
Відновлення сталевих деталей адитивною технологією пошарового плазмового наплавлення			Літ.	Аркуш
			4	92
ХНУ, гр. МТВАм-22-1				

3.2. Розробка плазмотрона для плазмового наплавлення електродом, що плавиться.....	46
3.3. Дослідження теплових навантажень у вузли плазмотрона при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться.....	51
3.4. Устаткування для пошарового формування виробів плазмовим наплавленням плавлячим електродом.....	53
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ І СТРУКТУРИ МЕТАЛУ, ОТРИМАНОГО ПОШАРОВИМ ПЛАЗМОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ.....	62
4.1.Дослідження заготовки, отриманої пошаровим плазмовим наплавленням плавлячим електродом, методами неруйнівного контролю.....	64
4.2.Дослідження хімічного складу наплавленого металу.....	65
4.3.Дослідження механічних властивостей наплавленого металу.....	66
Висновки.....	71
Список літератури.....	72
Додатки.....	81

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Вступ

Виготовлення складних габаритних металевих виробів з використанням традиційних технологій (лиття, кування, штампування та ін) стикається з великими труднощами і потребує значних ресурсів при виробництві. Адитивні технології дозволяють отримувати деталі різноманітної геометричної форми шляхом пошарового нанесення матеріалу на підкладку або елемент готового виробу, виходячи з цифрової моделі об'єкта, що значно скорочує витрати. Розробка та впровадження гібридних технологій, що поєднують у собі пошарове формування з подальшою термічною та механічною обробкою, є одним із перспективних шляхів розвитку машинобудування.

Існуючі методи адитивного виробництва базуються на технологіях плавлення вихідного матеріалу (DED, PBF, DMD та ін.). Технології пошарового формування виробів без плавлення матеріалу, що наноситься (листова ламінація, спікання, дифузійне нанесення матеріалу та ін.) складні, трудомісткі і застосовуються в основному в специфічних областях. Способи формування виробів пошаровим наплавленням відрізняються простотою і гнучкістю процесу.

Як джерела нагріву в адитивних технологіях застосовуються електронний промінь, лазер, електричні та плазмові дуги. Променеві технології застосовуються в основному для побудови малогабаритних точних виробів та відрізняються низькою продуктивністю. Дугові технології орієнтовані створення великогабаритних виробів із високим продуктивністю. При цьому знижується точність заготовок, що формуються, збільшуються припуски на подальшу механічну обробку [-4]. Підвищення продуктивності процесу при одночасному забезпеченні високої точності виробу є актуальним завданням.

Як вихідна сировина використовуються порошки, дроти, а також їх комбінації. Порошкові матеріали використовуються для створення малогабаритних виробів зі складною геометрією. Застосування присадних

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

дротів переважно для адитивного виробництва великогабаритних виробів щодо простої форми. Присадковий дріт є основним вихідним матеріалом для формування виробів дуговим наплавленням [3, 5, 6].

Аргонодуговая, механізована серед захисного газу, плазмова та інші способи наплавлення застосовуються в адитивному виробництві. Плазмова наплавка забезпечує ряд технологічних та економічних переваг: висока продуктивність, регулювання теплопередачі в широких межах і, як наслідок, управління глибиною та шириною проплавлення, структурою, складом та властивостями матеріалу, що формується. Осьова подача дроту сприяє підвищенню точності заготовки, що наплавляється. При цьому не потрібно застосовувати спеціальні пристрої для орієнтації подачі дроту щодо траєкторії наплавлення.

Плазмова наплавка електродом, що плавиться (плазма-МИГ) є гібридним процесом, що об'єднує дугову наплавку електродом, що плавиться, і плазмову наплавку. Процес має ряд переваг: високою стабільністю і продуктивністю, гнучким регулюванням параметрів наплавлення, відсутністю розбризкування, керованим краплепереносом присадкового металу та ін. При цьому відбувається ефективне руйнування і видалення оксидних плівок, покращується змочуваність і розтікання металу, що наплавляється за рахунок процесу катодного очищення. Спосіб плазма-МИГ поєднує в собі особливості висококонцентрованого джерела енергії, високу продуктивність та якість наплавлення, за порівняно низької вартості обладнання. Таким чином, створення технологій пошарового вирощування виробів вимагає докладного вивчення впливу умов виготовлення на експлуатаційні характеристики одержуваних заготовок. Отримання виробів із високими службовими характеристиками та мінімальним припуском на механічну обробку пов'язане з вирішенням великої кількості різноманітних завдань. Розміри ванни рідкого металу визначаються тепловою обстановкою в зоні впливу дуги, яка залежить від багатьох факторів: потужності дуги, швидкості наплавлення, діаметра і

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

швидкості подачі присадного дроту, поперечного перерізу стінки, що наплавляється, хімічного складу дроту, якості захисту та ряду інших. Підтримка теплового балансу у зоні обробки досить складне завдання. Для її вирішення необхідне поточне коригування режимних параметрів наплавлення або періодичне зупинення процесу для охолодження виробу, що наплавляється. Коригуванням режимних параметрів, в принципі, можна вийти на режим теплової рівноваги, при якому забезпечується стабільність процесу пошарового наплавлення. Необхідно враховувати те, що розміри ванни рідкого і перегрітого металу, зрештою, визначають структуру і властивості металу, а також якість захисту поверхні, що впливає на дефектність шарів, що наплавляються. Точність заготівлі, що формується, залежить від форми і розмірів валика, що наплавляється. Тому наявність достовірної математичної моделі наплавлення є ключовою ланкою процесу адитивного виробництва. при якому забезпечується стабільність процесу пошарового наплавлення. Необхідно враховувати те, що розміри ванни рідкого і перегрітого металу, зрештою, визначають структуру і властивості металу, а також якість захисту поверхні, що впливає на дефектність шарів, що наплавляються. Точність заготівлі, що формується, залежить від форми і розмірів валика, що наплавляється. Тому наявність достовірної математичної моделі наплавлення є ключовою ланкою процесу адитивного виробництва. при якому забезпечується стабільність процесу пошарового наплавлення. Необхідно враховувати те, що розміри ванни рідкого і перегрітого металу, зрештою, визначають структуру і властивості металу, а також якість захисту поверхні, що впливає на дефектність шарів, що наплавляються. Точність заготівлі, що формується, залежить від форми і розмірів валика, що наплавляється. Тому наявність достовірної математичної моделі наплавлення є ключовою ланкою процесу адитивного виробництва.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Виходячи з вищесказаного, метою магістерської роботи є підвищення продуктивності та якості адитивного виробництва металевих виробів застосуванням плазмового наплавлення електродом, що плавиться.

Завдання:

1. Визначити вплив технологічних параметрів на закономірності формоутворення наплавленого валика при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться.

2. Розробити модель розрахунку геометричних параметрів одиночного валика при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться стосовно умов адитивного формування металевих виробів.

3. Дослідити процес пошарового плазмового наплавлення електродом, що плавиться, і розробити технологічні рекомендації для адитивного формування металевих виробів з високолегованих сталей аустенітного класу.

4. Дослідити структуру і властивості високолегованої сталі, отриманої пошаровою плазмовою наплавкою електродом, що плавиться.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛІВ

Аддитивні технології згідно з ГОСТ Р 57558-2017 - це процес виготовлення деталей, який заснований на створенні фізичного об'єкта за електронною геометричною моделлю шляхом пошарового додавання матеріалу, на відміну від вичитувального (субтрактивного) виробництва (механічної обробки) та традиційного формоутворюючого виробництва (лиття, штампування).

Протягом останніх 30 років було розроблено понад 20 способів адитивного виробництва [7, 9]. Їх класифікують за такими критеріями:

- За видами застосовуваних матеріалів (пластмаси, метали, органічні матеріали тощо) та типів (порошкові, рідкі, дротяні тощо).

Вид і тип використовуваного матеріалу визначається виходячи з властивостей, галузі застосування, технології адитивного виробництва та ін. У машинобудуванні, аерокосмічній промисловості, суднобудуванні тощо, як правило, застосовуються металеві матеріали у вигляді порошків та суцільнометалевих дротів.

В основному для адитивного виробництва металевих виробів застосовують порошки з дисперсністю від 10 до 40 мкм. Також можуть застосовуватись порошки середньої дисперсності (40-250 мкм) та високодисперсні (0,1-10 мкм) [3, 10, 11]. Мінімальний розмір частинок порошків дозволяє отримувати тонкостінні вироби складної форми.

Присадочні дроти мають велику номенклатуру як за хімічним складом, так і за типорозмірами. Це зумовлено широким застосуванням дротів для зварювання та наплавлення. Використання дротяного матеріалу дозволяє позбавитися проблем, властивих порошкам. В якості додаткової переваги присадковий дріт має значно меншу питому площу поверхні, ніж порошкові матеріали, і менш схильна до окислення і поглинання вологи або забруднюючих речовин. Система подачі присадного дроту в зону наплавлення значно простіше і компактніше порошкового живильника.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- За типами використовуваних джерел підведення енергії.

Існують технології адитивного виробництва без розплавлення присадного матеріалу (листова ламінація, спікання, склеювання та ін.) та з розплавленням. При виготовленні заготовок з розплавленням присадного матеріалу найчастіше застосовуються променеві (електронний промінь і лазер) та дугові (електрична та плазмова дуга) джерела нагріву. Основні характеристики та можливості застосовуваних джерел нагріву представлені у таблиці 1.

Променеві джерела нагріву доцільно застосовувати для створення тонкостінних малогабаритних виробів зі складною геометричною формою. Способи адитивного виробництва на основі дугового наплавлення, разом з використанням дротяних присадних матеріалів, ефективні для створення габаритних виробів простої форми.

Таблиця 1.1 - Характеристики джерел нагріву, що застосовуються у процесах адитивного виробництва [7]

Джерело нагріву	Електронний промінь	Лазерний промінь	Електрична дуга
Енергоефективність, %	15-20	2-5	більше 90
Продуктивність процесу наплавлення, кг/год	3-9	1-2	до 10
Висота шару, що формується, мм	0,1-3	0,1-3	1-4
Мінімальна ширина створюваного елемента, мм	0,02-0,1	0,02-0,1	1,5-2,0
Захист зони побудови	вакуум (камера)	захисний газ	захисний газ (місцева)

		(місцева)	
Габарити виробу	обмежені розміром камери	без обмежень	без обмежень
Точність виробу	висока	висока	низька
Припуски на механічну обробку, мм	0,2-3	0-0,5	1-3
Орієнтовна вартість обладнання, млн/руб.	65-650	100-200	7-20

1.1. Огляд технології адитивного формування металевих виробів пошаровим дуговим наплавленням

Спосіб адитивного виробництва металевих виробів пошаровим дуговим наплавленням, що називається Wire Arc Additive Manufacture (WAAM), є одним з ключових ланок гібридного виробництва металевих виробів, яке включає в себе адитивні, субтрактивні та інші технологічні процеси. Схема процесу гібридного формування виробу із застосуванням WAAM показана на рисунку 1.

Нестійкість вільних електричних дуг, акумуляція тепла в металі, що наплавляється, та інші фактори, роблять процес формування виробу складним, мінливим і важко керованим. Геометрична точність та механічні властивості кінцевого продукту безпосередньо залежить від розмірної точності та способу формування кожного шару. Як видно з малюнка 1, моделювання форми одиночного валика є основою програмування виробничого процесу, а саме визначення кількості проходів та положення кожного валика [2-15].

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Геометрія наплавленого компонента формується за заданою ієрархією. Схема створення виробу показана на рисунку 2. Першим етапом задається геометрія одиночного валика. Після цього проводиться формування плоского шару. Далі здійснюється пошарове формування виробу. Таким чином, геометричні параметри одиночного валика (ширина, висота, профіль) є базовими елементами технології формування виробу.

Застосовуваний спосіб наплавлення повинен забезпечувати сталість форми та якості одиночного валика. Форма одиночного валика залежить від великої кількості факторів: властивостей матеріалу, теплової обстановки в зоні наплавлення, технологічних особливостей процесу та інших. Важливими умовами формування високоякісних багат шарових виробів є створення металургійного зв'язку за рахунок сплавлення з попереднім шаром, забезпечення оптимальної швидкості охолодження, як підкладки, так і наплавленого матеріалу, здійснення надійного захисту рідкого металу. При побудові багат шарової структури необхідно, щоб теплопокладання було достатнім для сплавлення присадного та основного металу. Надлишок тепла, що підводиться, сприяє надмірному проплаву попереднього шару і розтіканню зварювальної ванни. Недолік – відсутність сплавлення [8-20].

Визначення взаємозв'язків між формою валика та параметрами режиму наплавлення, включаючи моделювання всіх фізичних процесів, спричиняє утруднення. Найчастіше параметри наплавлення вибираються виходячи з досвіду або технічних рекомендацій.

Створення математичної моделі, що зв'язує профіль одиночного валика з параметрами наплавлення, є одним із ключових завдань розробки технології адитивного формування. Також важливо, щоб модель валика пов'язувала не тільки параметри процесу та геометрію валика, а також дозволяла робити вибір.

параметрів режиму наплавлення з урахуванням еволюції мікроструктури та механічних властивостей кінцевих виробів [2-15, 17-36].

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Існує велика кількість робіт, присвячених дослідженню геометрії одиночного валика, у тому числі – моделювання та передбачення основних параметрів валика [8, 26, 27, 33]. Однак, для WAAM отримані моделі виявилися частково або повністю непридатними. Це зв'язано з тим що:

1. Попередні дослідження базувалися на вимірі лише висоти та ширини валика, замість побудови повного профілю поперечного перерізу [23].
2. Відсутня аналіз помилок та перевірка точності надійним способом [27, 31].
3. Розглядається вплив тільки основних факторів при визначенні геометрії валика, а ефекти взаємодії цих факторів не враховуються [3].
4. Складні моделі, що враховують велику кількість різних фізичних взаємодій, потребують тривалого часу розрахунку [34].

При дослідженні та побудові геометричної моделі перерізу валика, як вхідні параметри процесу приймають струм дуги, швидкість подачі дроту, швидкість наплавлення, напруга дуги, діаметр дроту. Також застосовуються комплексні параметри: потужність дуги, відношення швидкості подачі дроту до швидкості наплавлення, погонна енергія та інші [7, 20, 21, 24, 26, 27, 29, 30, 32, 33-38].

Крім параметрів процесу слід враховувати низку таких факторів, як:

- зсув дроту від центру дуги, що може призвести до спотворення геометрії валика [32];
- температуру підкладки та попереднього шару [29, 30, 35, 36];
- зміна довжини дуги [29, 30, 35, 36];
- тепловміст краплі та характер перенесення присадного металу [9];
- швидкість охолодження [9].

Діапазони вхідних параметрів визначаються за допомогою попередніх експериментів. Режим наплавлення, при якому процес стабільний і без розбризкування, вважається оптимальним. Зміна швидкості наплавлення не

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

більше 0,2...1,2 м/с є ефективним способом управління формою валика. Встановлено, що при фіксованому значенні сили струму існує критична швидкість наплавлення, вище за яку відбувається утворення дефекту Humping («пилкоподібний шов») [7, 21, 28, 29, 34-36, 38].

Підвищення ККД процесу адитивного виробництва та скорочення виробничого циклу досягається шляхом підбору оптимального режиму наплавлення. При цьому кількість проходів має бути мінімально необхідною та достатньою для отримання кінцевої форми виробу. Це реалізується шляхом розрахунку та вибору оптимального профілю валика [4, 17, 33].

Процес формування шару є наплавлення одиночних валиків по траєкторії (див. Рисунок 3). Якість наплавленого шару визначається міжцентровою відстанню сусідніх валиків (d) та траєкторією наплавлення. Міжцентрова відстань визначає хвилястість шару. Надмірна хвилястість сприяє виникненню проблем при нанесенні наступного шару і здатна порушити процес створення виробу [39].

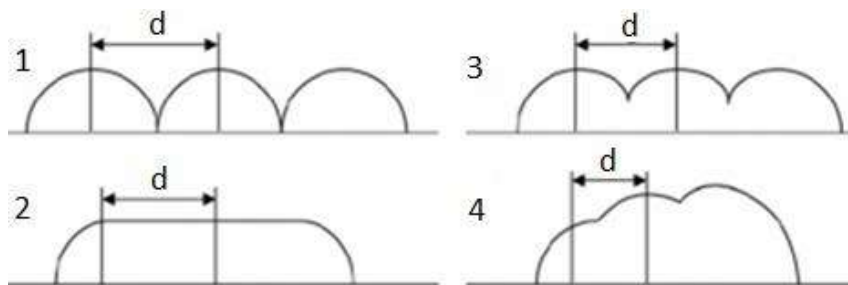


Рисунок 1.1. Вплив міжцентрової відстані на хвилястість наплавленої поверхні: 1 – загальний вигляд; 2 – надмірна відстань між валиками призводить до утворення западин між валиками; 3 – оптимальна відстань між валиками; 4 - недостатня відстань між валиками призводить до збільшення висоти наплавленого шару [39]

Усунути хвилястість шару можна такими способами:

1. Пошарова механічна обробка шляхом фрезерування наплавленого шару до площини [23, 40].
2. Управління процесом наплавлення на основі створеної математичної

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

моделі.

Основними моделями, що застосовуються в WAAM, є традиційна та тангенціальна.

У тангенціальній моделі ключовим етапом є розрахунок «критичної міжцентрової відстані» (d') для заданого профілю валика. Відповідно до запропонованої моделі, відстань $d' = 0,738e$ Коефіцієнт використання матеріалу за представленими моделями відповідає 75,7% (традиційна) та 84,1% (тангенціальна) [39].

Іншим важливим завданням є формування траєкторії руху пальника. При цьому необхідно враховувати особливості дугового процесу [26]:

1. Низька геометрична точність.
2. Спотворення геометрії валика на початковому та кінцевому ділянках пред'являють вимогу створення безперервної траєкторії наплавлення.

Для WAAM застосовуються такі траєкторії наплавлення, як растрова, контурна, гібридна та інші. Растрові шаблони переважні для отримання тонкостінних конструкцій, але призводять до зниження точності, жолоблення і великої анізотропії матеріалу. Метод контурного шляху знижує деформацію та анізотропію, проте має схильність до створення несплошностей. Траєкторія «середньоосової трансформації» дозволяє уникнути виникнення проміжків між наплавленими валиками і не призводить до утворення несплошностей [43].

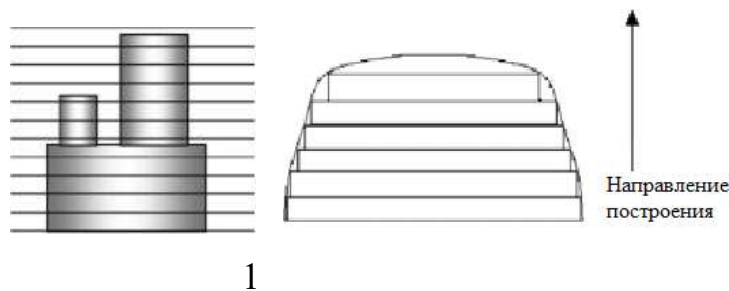


Рисунок 1.2. Причини зниження точності заготівлі: 1 – ефект неузгодженості; 2 – ефект «сходів» [44]

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Управління нарізкою моделі на плоскі шари (адаптивна стратегія нарізки) дозволяє зменшити невідповідність форми заготовлі та моделі: ефект неузгодженості та «сходів» (див. рис. 1.2) [44].

Основними проблемами побудови заготовок є [45]:

- накопичення тепла у наплавленому шарі;
- нерівномірність висоти шару, спричинена акумуляцією тепла;
- окислення наплавленого металу зі збільшенням висоти стінки;
- високі залишкові напруги та деформації.

Керування параметрами наплавлення дозволяє уникнути більшості негативних процесів при формоутворенні виробу, а також одержувати елементи різної конфігурації. Електромагнітна дія на наплавлену ванну дозволяє створювати елементи з кутом нахилу до 60° [2, 35, 46-54].

WAAM дозволяє виготовляти вироби з різних матеріалів: вуглецевих та легованих сталей, кольорових металів та їх сплавів (Al, Ti, Ni, Cu та ін.), а також із різнорідних матеріалів.

Для створення металевих виробів за технологією WAAM застосовуються різні способи дугового наплавлення.

Коротко розглянемо найбільш використовувані з них:

1. Механізована наплавка електродом, що плавиться, в середовищі захисного газу (MIG/MAГ) найчастіше застосовується для WAAM.

Перевагами способу MIG/MAГ є: осьова подача присадного дроту забезпечує високу точність наплавлення, мала кількість параметрів режиму сприяють простоті управління та автоматизації процесу, простота, доступність і низька вартість обладнання, наявність ефекту катодного очищення зони наплавлення через використання струму зворотної полярності, мінімальна зона структурної зміни металу

Однак процес має низку недоліків: велике тепловкладання, високе розбризкування присадного металу, використання активних газів вимагає наявність розкислювачів у присадних матеріалах. В результаті дії

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

розкислювачів на поверхні наплавленого металу утворюється шлак, який необхідно видаляти перед нанесенням наступного шару. Відсутність розкислювачів, у свою чергу, веде до розбризкування металу та утворення дефектів (пори, тріщини і т.д.). Процес МІГ/МАГ в основному ведуть на постійному струмі зворотної полярності, що унеможлиблює виробництво виробів з титанових сплавів.

Застосування МІГ/МАГ з імпульсним режимом зварювального струму сприяє зниженню розбризкування та підвищує керованість тепловкладенням [37].

2. Cold Metal Transfer (CMT) - модифікований варіант МІГ/МАГ процесу, що ґрунтується на механізмі керованого теплоукладання та масопереносу електродного металу. Процес CMT має мале теплоукладання у виріб, стабільну поведінку процесу та мінімальне розбризкування присадного металу. Недоліками CMT є висока залишкова пористість наплавленого металу та низька швидкість наплавлення (0,5-0,6 м/хв). Реалізація процесу потребує спеціального обладнання фірми Fronius.

3. Дугове наплавлення електродом, що не плавиться, в середовищі захисного газу (ТІГ). Застосування змінного струму дозволяє ефективно наплавляти алюмінієві сплави за рахунок ефекту катодного очищення робочої поверхні, але при цьому знижується ресурс роботи електрода, що не плавиться.

підвищується ризик утворення вольфрамових включень.

Основними недоліками ТІГ є: низька продуктивність, високий ризик руйнування електрода, що не плавиться (перегрів, дефект електрода, неякісний захисний газ та ін.) з наслідками виникнення вольфрамових включень у наплавленому металі, використання високочастотного розряду (потрібне екранування обладнання), висока залежність процесу подачі дроту. Присадний дріт повинен подаватися у зварювальну ванну строго під

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

певними кутами щодо стовпа дуги та наплавленої поверхні. В іншому випадку знижується точність наплавлення. [49, 72-88].

Спосіб мікро ТІГ дозволяє виготовляти малорозмірні заготовки, за рахунок дозованого розплавлення присадного металу [45].

4. Комбінований спосіб МІГ/МАГ+ТІГ (DE-GMAW) дозволяє керувати тепловкладенням у виріб і геометрією наплавленого валика за рахунок зміни величини струму дуги між електродами, що плавляться і не плавляться. Недоліками даного способу є неспіввісна подача електрода, що плавиться, і складність налаштування обладнання [31].

5. Особливість процесу Тандем МІГ/МАГ полягає в одночасному поданні двох присадних дротів у загальну зварювальну ванну, що підвищує продуктивність. Підвищене тепловкладання, розбризкування електродного металу, висока вартість спеціалізованого обладнання та складність його налаштування ускладнюють застосування даного процесу для WAAM [7].

6. Плазмова наплавка електродом, що не плавиться застосовується для адитивного формування виробів із титанових сплавів та високолегованих сталей. Плазмова наплавка схожа на ТІГ наплавлення і має такі ж переваги та недоліки. За рахунок стиснутої дуги плазмова наплавка має такі переваги, як високий ККД (до 95%) і висока гнучкість процесу. До недоліків плазмового наплавлення відносяться: велика кількість взаємозалежних параметрів процесу, динамічний вплив стовпа дуги на ванну рідкого металу, значне теплове вплив [38, 84, 98-106, 117].

Плазмова наплавка характеризується високою теплопередачею при пошаровому формуванні виробу. Однак мікроплазмова наплавка дозволяє отримувати валики, що наплавляються, за розмірами і величиною теплопередачі, порівнянним з променевими способами АП [8, 21, 32, 42, 54].

Порівняння способів дугового наплавлення, що застосовуються для WAAM, представлено в таблиці 2. Такі різновиди як мікроТІГ та

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

мікроплазмова

наплавлення мають низьку продуктивність (0,03-0,04 кг/год), і розглядати їх спільно з іншими дуговими способами недоцільно.

Таблиця 1.2 - Способи дугового наплавлення, що застосовуються для WAAM

Критерій	МІГ/МАГ	СМТ	ТІ Г	Плазмова наплавленн я	DE-GMAW	Тандем МІГ/МАГ
Кількість дуг	1	1	1	1	2	2
Тип дуги	Вільно палаюча	Вільно палаюч а	Вільно палаюча	Стиснена	Вільно палаюча	Вільно палаюча
Полярність струму дуги	Зворотній	Зворотній	Пряма	Пряма, зворотна	Зворотній	Зворотній
Рід струму дуги	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний
Можливість застосування імпульсного режиму	Є	Тільки керовани й	Є	Є	Є	Тільки керований
Тип електрода	Плавний	Плавний	Неплавиться	Неплавитьс я	Плавний	Плавний
Спосібподачі присадочної дроту	Аксіальни й	Аксіальни й	Бічний	Бічний	Неспіввісни й	Неспіввісни й
Кількість бризок металу	Багато	Дуже мало	Ні	Ні	-	-
Продуктивністьнаплавленн я, кг/год	2-8	1-3	1- 5	2-12	-	6-8

Порівнюючи способи, зазначені в таблиці 2, можна зробити такі висновки:

- Способи дугового наплавлення електродом, що плавиться, забезпечують велику продуктивність процесу, в порівнянні зі способами наплавлення неплавким електродом.

- Способи наплавлення електродом, що не плавиться, дозволяють наплавлений метал високої якості. При напавленні електродом, що плавиться, існує ймовірність наявності внутрішньої пористості металу, а також розбризування присадкового металу.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- Застосування спеціальних способів наплавлення дозволяє підвищити продуктивність та забезпечити гнучкість процесу. Однак для реалізації процесу потрібно спеціальне обладнання та достовірні технологічні рекомендації.

- Аксіальна подача присадного дроту є кращою, т.к. спрощується система подачі дроту і не потрібне точне налаштування та орієнтація подачі щодо траєкторії наплавлення.

Таким чином, існує проблема вибору: використовувати продуктивні способи наплавлення з ризиком утворення дефектів у наплавленому металі або застосовувати низькопродуктивні способи, що забезпечують високу якість наплавлення. Розробка способу наплавлення, що забезпечує одночасно високу якість наплавленого металу та продуктивність процесу, є актуальним завданням для WAAM.

Застосування комбінації кількох способів наплавлення або гібридних технологій (DE-GMAW, тандем MIG/MAG, SuperMIG, лазерно-дугове наплавлення та ін.) може стати прогресивним шляхом підвищення продуктивності та якості наплавлення. Перевага таких технологій полягає в тому, що поєднання різних процесів дозволяє отримувати ефекти, які неможливо досягти окремо. Слід зважати на те, що комбіновані процеси ускладнюють технологію наплавлення, а спеціалізоване обладнання має високу вартість.

1.2. Плазмова наплавка електродом, що плавиться

Плазмова наплавка електродом, що плавиться (плазма-МІГ) є перспективним процесом для пошарового формування металевих виробів. Цей гібридний процес поєднує в собі два дугові процеси: наплавлення електродом, що плавиться, і плазмову наплавку. Одночасне співвісне горіння двох дуг: плазмової дуги і дуги з плавиться (МІГ дуги) (див. Рисунок 1.2) є особливістю плазма-МІГ. У цьому кожна дуга живиться від

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

власного зварювального джерела.

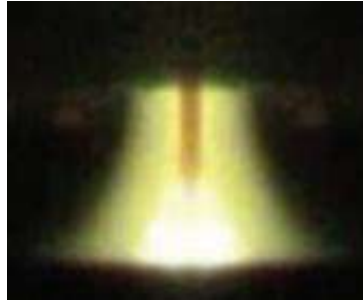


Рисунок 1.2. Горіння дуг при плазма-МІГ процесі

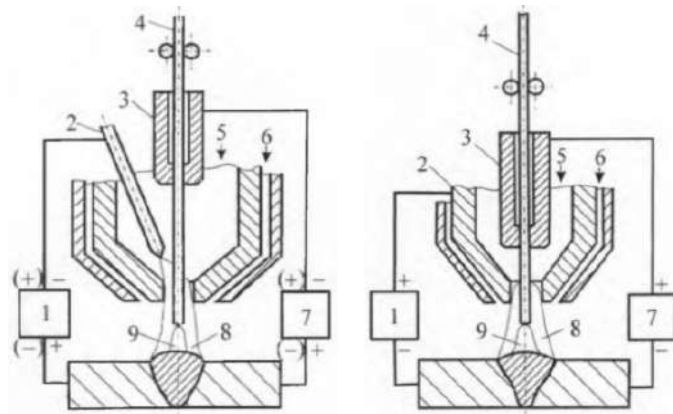
Спосіб плазма-МІГ застосовується для зварювання та наплавлення вуглецевих та легованих сталей, кольорових металів та сплавів, різнорідних матеріалів [19-27]. Даний спосіб використовується для зварювання корпусів і ємностей, відновлювального та зміцнюючого наплавлення прес-форм і клапанів і т.д. [19, 21, 23-27]. Як присадочні матеріали застосовують дроти як суцільного перерізу, так і порошкові [19, 28].

Спосіб плазма-МІГ був розроблений в 1972 році в Philips Research Laboratory Center (Нідерланди) [28, 29]. Дослідження плазма-МІГ здійснюються в багатьох університетах та підприємствах: ІЕС ім. Патона (Україна), Технічний університет Хемніц (Німеччина), Китайсько-український інститут зварювання (КНР), фірма ТВі (Німеччина), "ПЛАЗЕР" (Україна), Приазовський технічний університет (Україна) ІМС Soldagem (Бразилія).

На даний момент існує велика кількість різновидів способів плазмового наплавлення електродом, що плавиться [28-30].

Плазмова наплавка електродом, що плавиться, за способом генерації плазмової дуги має різновиди, представлені на рисунку 1.3.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23



а

б

Рисунок 1.3. Схеми плазмово-дугового наплавлення електродом, що плавиться: а – з неплавким вольфрамовим електродом; б - з кільцевим анодом; 1 – джерело живлення плазмової дуги; 2 - електрод, що не плавиться; 3 - струмопідвідний наконечник; 4 - електрод, що плавиться; 5 – плазмоутворюючий газ; 6 – захисний газ; 7 - джерело живлення дуги електрода, що плавиться; 8 – плазмова дуга; 9 - дуга електрода, що плавиться [28-30]

Процес плазма-МИГ зі стрижневим електродом, що не плавиться, відрізняється можливістю використання плазмової дуги прямої і зворотної полярності, а також непрямої дуги. Процес починають із запалювання плазмової дуги з подальшою подачею електрода, що плавиться. При цьому дуга з електрода, що плавиться, збуджується мимоволі. Недоліками даної схеми плазма-МИГ є необхідність точної орієнтації вольфрамового електрода для забезпечення співвісного горіння дуг, перегрів вольфрамового електрода при роботі на струмі зворотної полярності, складність виготовлення і обслуговування плазмотрона, великі габаритні розміри.

Різновиди методу плазма-МИГ зі стрижневим електродом, що не плавиться, показані на рисунку 1.4 [28].

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

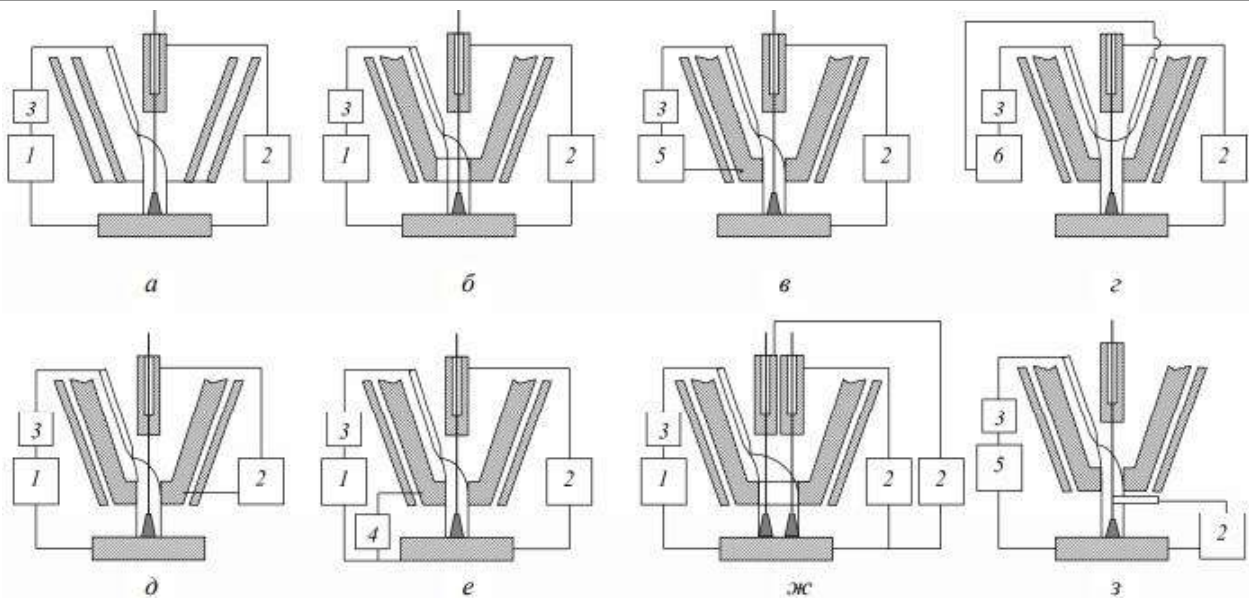


Рисунок 1.4. Схеми плазма-МІГ з стрижневим електродом, що не плавиться:

а- з широким соплом; б - з асиметричним соплом; в – із непрямою плазмовою дугою; г – з плазмовим струменем змінного струму; д - з непрямою дугою плавиться електрода; е – з додатковим струмом із сопла; ж - з двома електродами, що плавляться; з - з нижнім розташуванням струмопідводу до електроду, що плавиться; 1 – джерело живлення стиснутої дуги «електрод-виріб»; 2 - джерело живлення дуги електрода, що плавиться; 3 – осцилятор; 4 – джерело живлення стиснутої дуги «сопло-виріб»; 5 - джерело живлення стиснутої дуги "електрод-сопло"; 6 – джерело живлення "електрод-електрод"; [28]

Використання мідного кільцевого анода з водяним охолодженням є прогресивним шляхом розвитку технології плазма-МІГ (рисунок 8, б). При цьому збільшується допустима потужність плазмової дуги, підвищується стабільність плазмової дуги, зменшується виліт дротяного електрода, спрощується конструкція та підвищується надійність плазмотрона. Плазмова дуга зворотної полярності дозволяє реалізувати ефект катодного очищення зони наплавлення [28, 130].

Даний спосіб плазма-МІГ має два різновиди: без стабілізуючого сопла

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

та зі стабілізуючим соплом (див. рисунок 10).

Роботу плазма-МІГ наплавлення без стабілізуючого сопла зазвичай починають із збудження МІГ дуги шляхом короткого замикання присадного дроту на виріб. Плазмова дуга між кільцевим анодом та виробом загоряється мимоволі через 0,1 с. Можливість збудження плазмової дуги високочастотним розрядом між кільцевим анодом та стабілізуючим соплом. Щоб уникнути подвійного дугоутворення, спочатку подається стабілізуючий газ (як пусковий), а після видування дуги – плазмоутворюючий [30, 32]. Застосування високочастотного розряду потребує відповідної системи захисту електронного обладнання [31].

1. Підвищення теплової потужності та стабільності горіння плазмової дуги за рахунок додаткового обтиснення стінками каналу сопла та потоком стабілізуючого газу [21, 30].

2. Варіюючи поєднання подачі плазмоутворюючого і стабілізуючого газів можна впливати на характер перенесення електродного металу, а зміною складу газів можна активно керувати металургійними процесами в зоні наплавлення [28-130].

3. Збільшення вильоту дротяного електрода призводить до його додаткового нагрівання та підвищення продуктивності наплавлення (до 35 кг/год) [21, 128, 133]. Приєднання додаткового зварювального джерела між кільцевим анодом та стабілізуючим соплом дозволяє підвищити продуктивність наплавлення до 45 кг/год [34].

Однак при цьому ускладнюється конструкція плазмотрону, збільшуються його габаритні розміри та маса.

Плазмова наплавка електродом, що плавиться, характеризується гнучкістю процесу. Це обумовлено великою кількістю параметрів режиму та простотою їх регулювання. Параметри процесу умовно поділяються на конструктивні та технологічні [28]. До першої групи належать параметри, пов'язані з конструкцією плазмотрона (див. Рисунок 12): довжина плазмоутворюючого каналу кільцевого анода (h_a), довжина каналу

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

стабілізуючого сопла (h_c), діаметри кільцевого анода (d_a) та стабілізуючого сопла (d_c), відношення діаметрів кільцевого анода та стабілізуючого сопла ($\psi = d_a/d_c$), відстань між кільцевим анодом та стабілізуючим соплом (h_{ac}).

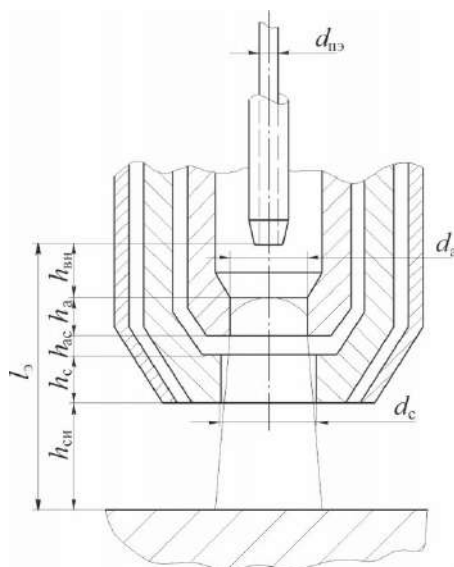


Рисунок 1.5. Схема плазмотрону для плазма-МІГ процесу: $d_{пз}$ – діаметр електрода, що плавиться, d_a – діаметр кільцевого анода, d_c – діаметр стабілізуючого сопла, $l_э$ – виліт електроду, що плавиться, $h_{свн}$ – відстань між зрізом стабілізуючого сопла і вирібом, h_c сопла

До основних технологічних параметрів відносяться: сила струму плазмової дуги ($I_{пд}$) і дуги електрода, що плавиться ($I_{пэ}$), діаметр електрода, що плавиться ($d_{пэ}$), швидкість подачі плавлячого електрода ($V_{пэ}$), склад і спосіб подачі технологічних газів, витрата плазмоутворюючого ($Q_{пг}$) і стабілізуючого газу ($Q_{сг}$) [28].

Стабільність плазма-МІГ процесу спостерігається у широкому діапазоні технологічних параметрів режиму. Про процес стійкого горіння можна судити як візуально, і по ширині зони катодного очищення. При стабільному горінні, що встановилося, плазмова дуга має стовп, приблизно рівний діаметру отвору анода, при $I_{пд} = 100-250$ А ($d_a = 8$ мм). При менших струмах, за $d_a = 8$ мм, стабільність горіння плазмової дуги порушується. Передбачається, що активні плями дуги займають лише частину кільцевого

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

аноду каналу. При $I_{pd} < 80$ А ширина зони катодного очищення ставати непостійною (змінюється не більше 5-10мм) [19, 125].

У певних випадках можливе шунтування всього струму плазмової дуги на електрод, що плавиться (рисунок 1.6). При цьому виникає режим подвійного дугоутворення, що може спричинити аварійну ситуацію. Стабільний процес плазма-МІГ протікає за умови [35]:



Рисунок 1.6. Схема плазма-МІГ: 1 – стабільний процес, 2 – порушення процесу (виникнення другої дуги). $E_{ст}$ – градієнт потенціалу стовпа плазмової дуги; L_n – ділянка вильоту електрода, що у контакті з плазмою; U_k - катодне падіння напруги від струму плазмової дуги; U_a - анодне падіння напруги на торці електрода, що плавиться; U_b – падіння напруги на вильоті, що плавиться електрода [35]

Зазначається, що з $Q_{пг} > 5$ л/хв ($I_{pd} = 80$ А) відбувається порушення стійкого горіння плазмової дуги через нерівномірної іонізації газового потоку [36].

Незважаючи на переваги, процес плазмового наплавлення електродом, що плавиться, не отримав широкого застосування через відсутність надійного серійного обладнання [28, 130].

Аналізуючи представлену інформацію, можна зробити висновок, що спосіб плазмового наплавлення електродом, що плавиться, має переваги по продуктивності і якості наплавленого металу, в порівнянні зі способами, що застосовуються при WAAM. Наявні технологічні рекомендації для плазмового наплавлення електродом, що плавиться, більшою мірою

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

підходять для зварювання і традиційного наплавлення на форсованих режимах (високі значення зварювальних струмів і швидкостей). Застосування таких режимів для адитивного формування мало- та середньогабаритних виробів неминуче спричинить перегрів виробу та утворення дефектів. Пошук режимів плазма-МІГ наплавлення, при яких забезпечується висока продуктивність пошарового формування виробів, та оптимальна якість наплавленого металу є актуальним завданням.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ПОШАРОВИМ ПЛАЗМОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

Спосіб плазмового наплавлення плавиться для адитивного формування металевих виробів в даний час не використовується (мало досліджений). Це як з особливостями самого процесу, і зі специфічними умовами пошарового формування металевих заготовок. Процес плазма-МИГ дуже стійкий в діапазонах «форсованих» режимів зі струминним і пароструминним переносом металу електрода, що плавиться. Ці режими характеризуються високими потужностями дуг, великою продуктивністю та теплопередачею у виріб. Такі режими не завжди прийнятні для пошарового формування заготовок із заданим профілем та малою товщиною стінок. Утворюється ванна рідкого металу значних габаритів та маси. Це спричиняє проблеми з утриманням ванни, захистом її хвостової частини, формуванням якісного бездефектного металу та ін.

Стабільність плазмового наплавлення плавящимся електродом характеризується:

1. просторовою та тимчасовою стійкістю горіння двох дуг;
2. незмінністю швидкості плавлення і форми перенесення металу електрода, що плавиться;
3. безвідмовною тривалою роботою плазмотрону в заданому режимі;
4. сталістю формування наплавлюваного валика заданих розмірів при високій якості матеріалу, що наплавляється.

Метою цього розділу є визначення граничних умов стійкості процесу плазмового наплавлення електродом, що плавиться стосовно умов адитивного формування металевих виробів і встановлення закономірностей формоутворення наплавленого валика при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

2.1. Дослідження умов стійкого процесу плазмового наплавлення електродом, що плавиться, для адитивного формування металевих виробів.

Робота проводилася на експериментальному обладнанні з використанням плазмотрону.



Рисунок 2.1. Експериментальний плазмотрон

Зварювальний апарат Foxweld INVERMIG 350E застосовувався для живлення МІГ-дуги, зварювальний апарат Кедр ARC-319 – для плазмової дуги. Основні параметри обладнання наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 - Основні характеристики зварювальних апаратів

Зварювальний апарат	FoxWeld 5706 Invermig 500E	Кедр ARC-319
Напруга холостого ходу,	70	70
Зварювальний струм, А	до 320 (100% ПВ)	40-250 (100% ПВ)
Зварювальна напруга,	15,5-39,0	-

Як плавиться електрода використовувався дріт ОК Autrod 308LSi (ESAB). Вибір матеріалу обґрунтований у розділі 4. Плазмоутворюючим та захисним газом був аргон першого сорту за ГОСТ 10157-2016.

Схема досліджуваного процесу плазмового наплавлення електродом, що плавиться без стабілізуючого сопла показана на рисунку 2.2.

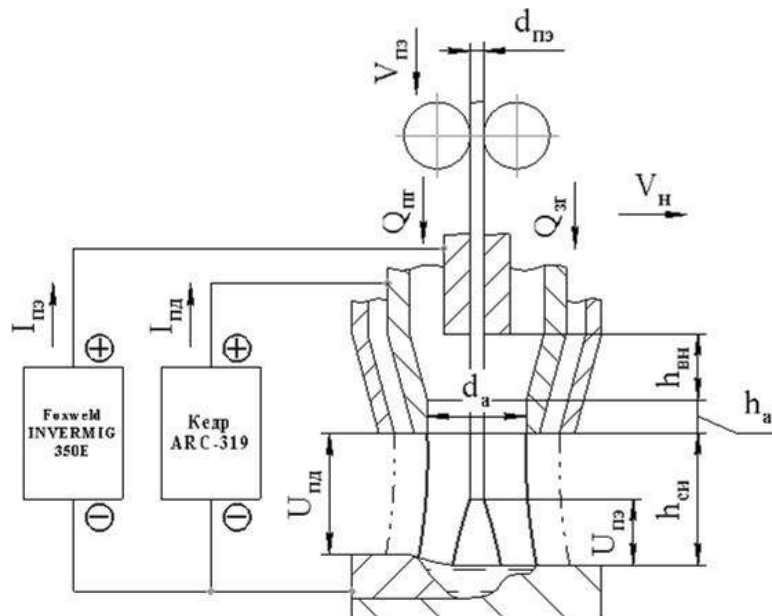


Рисунок 2.2. Схема процесу плазмового наплавлення електродом, що плавиться:

Швидкість подачі дроту наводиться як параметр, що варіюється, замість струму МІГ дуги у зв'язку з тим, що ці два параметри пропорційно взаємопов'язані. Збільшення швидкості подачі електрода, що плавиться, відповідно призводить до зростання струму МІГ дуги. Крім цього, швидкість подачі присадного дроту є основним параметром управління режимом наплавлення в зварювальних апаратах, що серійно випускаються.

Експериментальний пошук граничних режимів стійкого плазма-МІГ процесу виявив закономірності, представлені на рисунках 16-18.

При діаметрі каналу кільцевого анода $d_a = 6$ мм мінімальний $I_{пд}$ становить 80 А, а при $d_a = 8$ мм - мінімальний $I_{пд} = 100$ А (див. рисунок 16). При дослідженні плавлення електродного дроту при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться

При плазмовому наплавленні електродом, що плавиться, можливі різні види перенесення електродного металу. Експерименти, проведені з дослідження впливу параметрів режиму плазмового наплавлення дротом ОК Autrod 308LSi (ESAB) діаметром $d_{пэ} = 1,2$ мм, показали принципову можливість різних форм перенесення електродного металу, що узгоджується з результатами відомих досліджень. При низькій напрузі МІГ

дуги (до 22В) при $V_{пэ}$ до 5 м/хв має місце великокрапельне перенесення електродного металу з коротким замиканням або без нього (рисунок 2.3 а). Поверхня наплавленого валика має грубу лускатість.

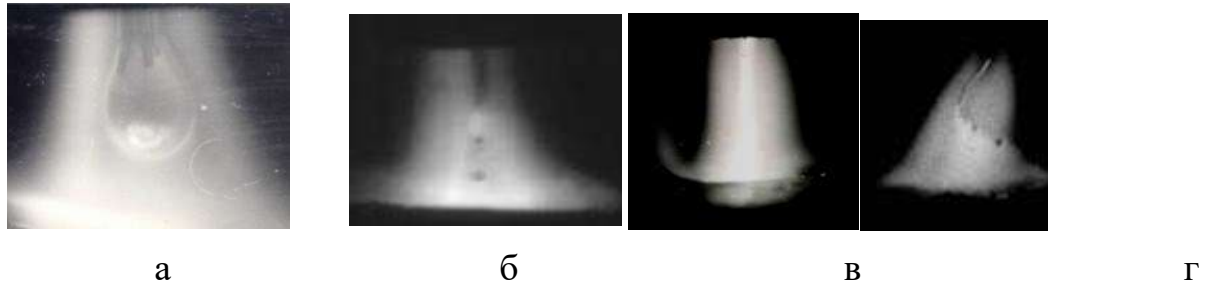


Рисунок 2.3. Види перенесення електродного металу: а – крупнокрапельний, б – дрібнокрапельний, в – струминний, г – обертальний

При напрузі МІГ дуги 28 В і $V_{пе}$ більше 5 м/хв спостерігається дрібнокрапельне перенесення (рисунок 2.3, б). При збільшенні $I_{пд}$ зі 100 до 200 А розмір крапель зменшується до 03-05 мм. Використання імпульсного струму електрода, що плавиться, спрощує перехід до дрібнокрапельного переносу.

При подальшому збільшенні $V_{пэ}$ ($I_{пэ}$) відбувається перехід до струминного перенесення (рисунок 2.3). При цьому краплі переносяться строго вздовж осі плазмотрону.

Зі збільшенням вильоту електрода за подальшого зростання $V_{пэ}$ ($I_{пэ}$) відбувається перехід до обертального перенесення електродного металу (рисунок 19, г). Краплі рідкого металу переміщуються спіраллю в межах діаметра плазмової дуги.

Дуга з плавиться є основним джерелом проплавлення основного металу при струмі МІГ дуги менше 250А. Встановлено, що частота перенесення крапель впливає на глибину проплавлення. Управління параметрами процесу наплавлення дозволяє отримувати різні форми проплавлення (див. рисунок 20) [20, 128, 137].

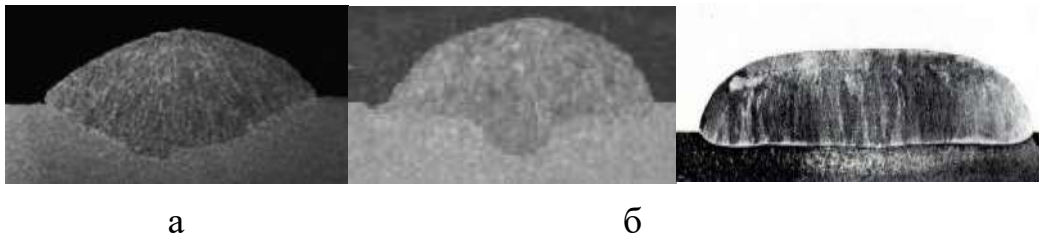


Рисунок 2.4. Види проплавлення при плазма-МІГ наплавлення; позначення

а – при великокапельному перенесенні; б – при дрібнокрапельному та струминному перенесенні; в - при дузі, що обертається [20, 128, 137, 138]

При способі плазма-МІГ можливі різні схеми горіння МІГ дуги (див. рис. 21). Залежно від різниці потенціалів між точками К (анодна область МІГ дуги; торець плавиться електрода) і С (анодна область плазмової дуги; канал кільцевого анода), на яку впливає виліт електрода, що плавиться, дуга може горіти між торцем плавиться електрода і виробом1 (, а) або між торцем електрода, що плавиться, і плазмовою дугою (рисунок 21, б). Дуга з електрода, що плавиться, горить: при $U_K < U_C$ - між торцем електрода і плазмовою дугою, при $U_K > U_C$ - між торцем електрод і виробом [28].

З малюнків 19, 20 видно, що для зменшення проплавлення та зниження частки основного металу в наплавленому валику переважно проводити наплавлення при великокапельному та дрібнокрапельному перенесенні електродного металу. З іншого боку, дрібнокрапельне перенесення характеризується високими значеннями швидкості подачі присадного дроту та струму МІГ дуги. При цьому збільшуються розміри ванни рідкого металу, що створює проблеми якісного формування стінок виробу.

2.2. Дослідження теплових процесів при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться

Якість та стабільність формування наплавленого валика визначається рядом процесів: тепловою обстановкою в зоні наплавлення, перенесенням електродного металу, параметрами процесу та ін.

При плазмовому наплавленні електродом, що плавиться, тепла

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

потужність надходить у виріб за рахунок виділення в катодній області - $41\pm 3\%$, за допомогою випромінювання і конвекції - $34\pm 3\%$, шляхом перенесення краплями електродного металу - $25\pm 5\%$. Передбачається, що тепло плазмової дуги становить близько 75% від загального тепла заготовці, що передається. При цьому плазмова дуга не істотно впливає на глибину проплавлення [19, 125, 134, 137].

Відомо, що середня температура плазмової аргонної дуги ($\approx 13000^\circ\text{C}$) у 2 рази вище, ніж температура МІГ дуги ($\approx 6500^\circ\text{C}$) [22, 124].

Передбачається, що тепловий потік у виріб від плазмової дуги з кільцевого анода має мінімум осі дуги, з чим важко погодитися. Одночасна дія плазмової дуги та МІГ дуги створюють складний профіль теплового потоку, показані на рисунку 2.5.

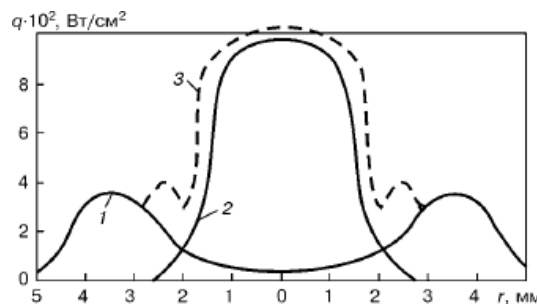


Рисунок 2.5. Розподіл теплового потоку у виробі при процесі плазма-МІГ: 1 – профіль теплового потоку плазмової дуги прямої полярності (кільцевий електрод – катод), 2 – профіль теплового потоку МІГ дуги, 3 – сумарний профіль теплового потоку, q – тепловий потік, r – відстань від осі плазмотрону

Термічний цикл при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться, відрізняється від традиційних зварювальних процесів (рисунок 24). Зміна швидкості нагрівання обумовлено підігрівом зони наплавлення переднім фронтом плазмової дуги. Пік нагрівання пов'язаний з впливом МІГ дуги та перегрітих крапель електродного металу.

Глибина проплавлення металу підкладки, розмір ванни рідкого металу, форма і розміри валика, що наплавляються визначаються тепловою

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

обстановкою в зоні наплавлення. Безпосередній вимір теплопередачі у виріб при плазмовому наплавленні плавиться електродом технічно важко реалізується. Однак можна виконати порівняльну оцінку теплопередачі у виріб при плазмовій обробці струмом зворотної полярності в одному дуговому режимі та при плазмовій обробці двома дугами зворотної полярності (див. рис. 2.6).

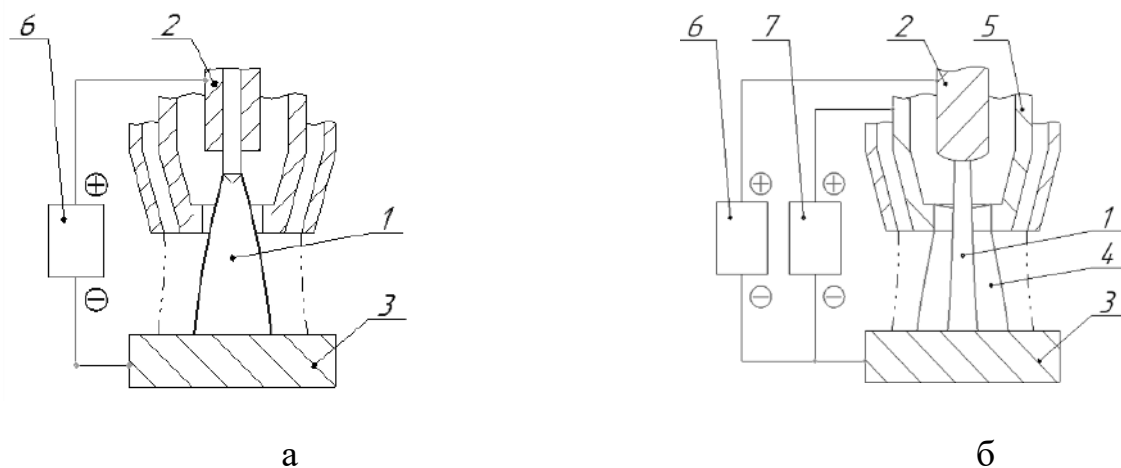


Рисунок 2.6. Схеми роботи плазмотрону в одному дуговому (а) та двох дуговому (б) режимі; 1-електрод-анод, 2-плазмоутворююче сопло (кільцевий анод), 3-виріб, 4-джерело живлення дуги сопло-виріб, 5-джерело живлення електрод-виріб, 6- плазмова дуга, що горить з сопла (кільцевого анода) на виріб 7-плазмова дуга, що горить з електрода-анода на виріб.

Плазмова дуга прямої дії зворотної полярності 1 горить між мідним водоохолоджуваним анодом 2 і виробом 3. Плазмова дуга прямої дії зворотної полярності 4 горить між соплом (кільцевим анодом) 5 і виробом 3. Живлення дуг 1 і 4 виробляється відповідно джерел. Схема роботи плазмотрона у двох дуговому режимі близька до схеми горіння дуг при плазмовій наплавці електродом, що плавиться з розташуванням торця плавиться електрода всередині плазмотрона. Використовуючи мідний водоохолоджуваний імітатор виробу калориметруванням, можна визначити теплопередачу у виріб при двох дуговому режимі роботи. Методика

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

калориметрування докладно описано у розділі 3.

Режимні параметри проведення експериментів подано у таблиці 2.1.

I_1 -сила струму стиснутої дуги палаючої з електрода-анода плазмотрону на виріб, I_2 - сила струму стисненої дуги палаючої з сопла - кільцевого анода плазмотрона на виріб, d_c - діаметр плазмоутворюючого сопла, $Q_{п} = 5,0$ л/хв, витрата плазм $Q_з = 6,0$ л/хв витрата захисного газу, h_{c-i} - відстань від зрізу сопла до виробу.

Таблиця 2.1 - Параметри режиму роботи плазмотрона в одному та дводуговому режимі

Режим роботи плазмотрону	h_{c-i} , мм	d_c , мм	I_1 , А	I_2 , А
Одне дуговий режим	8,0	6,0	50-200	-
Двох дуговий режим	8,0	6,0	60-150	50-180

Результати експериментів представлені у табл. 6. U_{ec} - падіння напруг плазмової дуги ділянці електрод - сопло U_{ci} - падіння напруг плазмової дуги ділянці сопло - виріб, U_{ei} - падіння напруг плазмової дуги ділянці електрод - виріб; $P_{із}$ - обмірювана теплопередача у виріб; P_1 , P_2 - потужність першої та другої дуги; P_a - Виміряна теплопередача в електрод - анод; P_c - виміряна теплопередача в плазмоутворююче сопло; P_{ac} - частина теплопередачі в плазмоутворююче сопло від другої дуги (при роботі сопла як кільцевий анод).

2.3. Дослідження впливу параметрів плазмового наплавлення електродом, що плавиться, на геометричні розміри наплавленого валика.

Багато параметрів процесу дозволяє гнучко керувати формою наплавленого валика. Гібридна дія дуг створюють своєрідні умови процесу наплавлення (рисунок 2.7).

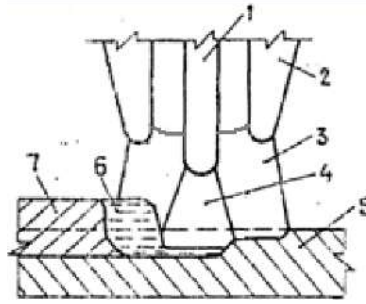


Рисунок 2.7 Схема зони плазмового наплавлення електродом, що плавиться: 1 - плавиться електрода, 2 - кільцевий анода, 3 - плазмова дуга, 4 - дуга, що плавить електрода, 5 - основний метал, 6 - ванна рідкого металу, 7 - наплавлений валик

Передній фронт плазмової дугої підігриває та очищає, за рахунок явища катодного очищення, зону наплавлення. Висока щільність струму та енергії у катодних плямах забезпечує поверхнєве розплавлення зони наплавлення на глибину 0,1-0,3 мм. При цьому поліпшується змочуваність поверхні, що наплавляється металом електрода і збільшується ширина наплавленого валика. Ширина зони впливу перевищує діаметр каналу кільцевого анода на 1-2 мм і залежить від струму, напруги та швидкості переміщення. Великий діаметр плазмової дугої забезпечує катодне очищення поверхні розплавленого металу та гарний захист під дугою, але при цьому збільшується ширина та довжина рідкої ванни, що потребує якісного захисту зони наплавлення.

Зі збільшенням струму плазмової дугої зростає ширина валика, а висота валика та його опуклість зменшуються, поверхня валика вирівнюється. Однак зі збільшенням струму І_{пд} більше 200А може відбуватися формування асиметричного валика (рисунок 2.8). Асиметричне формування створюється впливом електромагнітних сил у ванні розплавленого металу та магнітним дуванням. Збільшення діаметра кільцевого анода з 9 до 12 мм знижує ефект динамічного впливу на рідкий метал ванни та покращує якість наплавленого валика.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

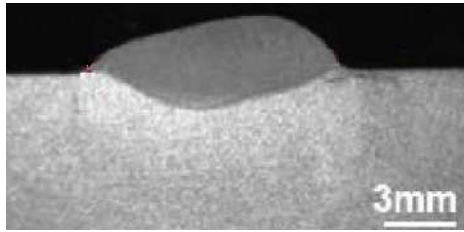


Рисунок 2.8. Асиметричний профіль наплавленого валика

Зміна кута нахилу плазмотрона впливає профіль валика, як показано рисунку 2.9.

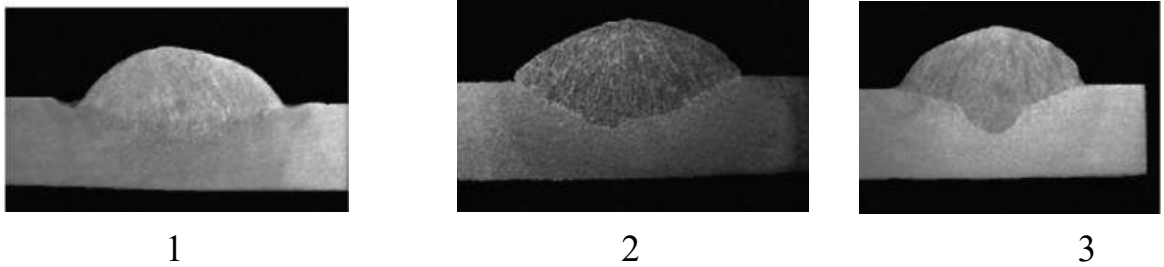


Рисунок 2.9. Форми валиків при наплавленні: 1 - кутом вперед, 2 - перпендикулярно лінії наплавлення, 3 - кутом назад

Дисперсійний аналіз впливу параметрів плазма-МІГ процесу на геометрію валика показав, що найбільш значущими факторами, що впливають на ширину валика (у міру зменшення значущості) є швидкість подачі дроту, швидкість переміщення і напруга МІГ дуги. На висоту валика впливають (у міру зменшення значущості) швидкість подачі дроту, напруга МІГ дуги, швидкість наплавлення та струм плазмової дуги.

Плазмова наплавка електродом, що плавиться, є гнучким багатофакторним процесом. Нераціональна комбінація параметрів режиму може призвести до формування несприятливої форми валика або різноманітних дефектів. Детальне вивчення впливу режимних параметрів при пошаровій наплавці на геометричні розміри валика, а також визначення меж стабільного формування валика, необхідне для прогнозування процесу плазмового наплавлення електродом, що плавиться. Геометричні параметри валиків: ширину (e), висоту (g) та глибину проплавлення (b), а також якість наплавленого металу визначали на макрошліфах. Значними режимними параметрами плазма-МІГ є: швидкість подачі електрода, що плавиться

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

($V_{пэ}$), напруга МІГ дуги ($U_{пэ}$), швидкість наплавлення (V_H) і струм плазмової дуги ($I_{пд}$). Ці параметри цілеспрямовано змінювалися із заданим кроком. Інші режимні параметри було зафіксовано одному рівні: $d_a = 8$ мм, $Q_{пг} = 5$ л/мин (100% аргон), $Q_{зг} = 15$ л/мин (100% аргон), $h_{си} = 8-12$ мм. Результати експериментів показано рисунку 2.10.

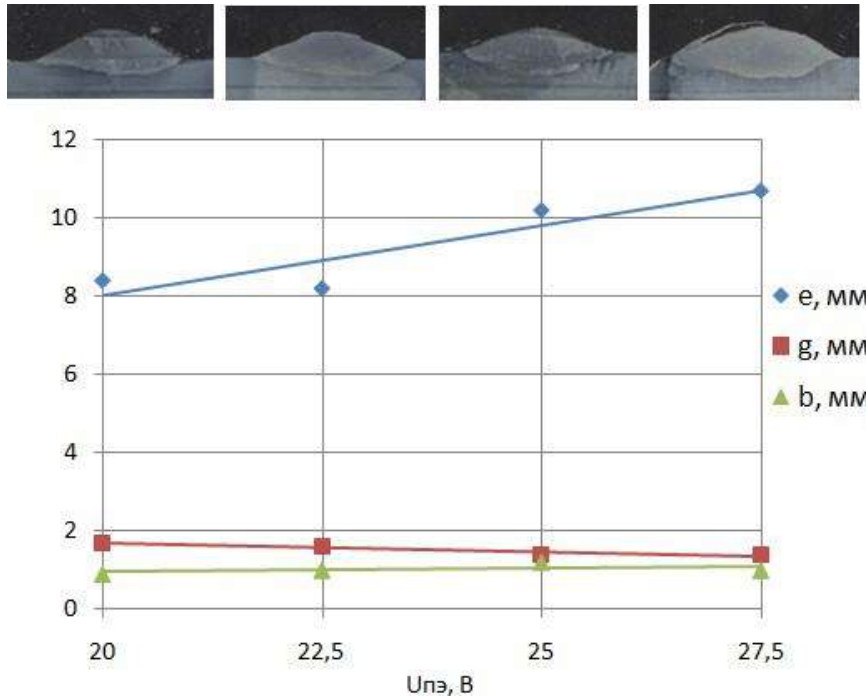


Рисунок 2.10. Вплив $U_{пэ}$ на форму (згори) та розміри валика
($I_{пд} = 100$ А, $V_{пэ} = 4$ м/хв, $V_H = 0,6$ м/хв)

При доборі граничних значень параметрів режиму плазма-МІГ наплавлення керувалися такими міркуваннями:

Максимальна ширина валика не перевищує діаметр кільцевого анода на понад 2 мм (для $d_a = 8$ мм максимальна допустима ширина валика повинна бути не більше 10 мм). В іншому випадку не гарантується якісне сплавлення металу валика з підкладкою.

Аналіз отриманих залежностей дозволяє сформулювати діапазони параметрів режиму наплавлення. Варто відзначити, що збільшення $V_{пэ}$ і V_H вище за певні межі веде до формування асиметричного профілю валика. Визначення максимальної швидкості наплавлення, коли він стійко формується валик, вимагає дослідження з урахуванням впливу всіх

значимих параметрів процесу.

Таблиця 2.2 - Значення параметрів плазма-МІГ наплавлення

Параметр	Інтервал
Іпд, А	100-160
Vн, м/хв	min 0,5
Vпэ, м/хв	4-8
Uпе, В	20-25 (при Vпэ = 4-5 м/хв) 25-30 (при Vпэ = 5-8 м/хв)

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

3. РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК ПЛАЗМОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

Обладнання для адитивного виробництва є складним багатофункціональним комплексом. Установки для WAAM можуть мати різне виконання: портална установка, роботизований комплекс, багатофункціональний гібридний комплекс і т.д.

Для забезпечення необхідних технологічних операцій до складу обладнання для WAAM може входити [40]:

1. Устаткування для наплавлення. Специфіка та комплектація обладнання залежить від застосовуваного способу наплавлення (ТІГ, МІГ/МАГ, СМТ тощо). Наплавне обладнання повинне відповідати жорстким вимогам щодо надійності та забезпечувати роботу при 100% ПВ на всіх режимах пошарового формування виробів.

2. Системи позиціонування та переміщення виробу та наплавної головки. Призначенням даного обладнання є просторове розташування заготовки та наплавної головки та їх взаємного переміщення по заданій траєкторії для виконання наплавних робіт у зручному положенні (як правило - нижньому).

3. При необхідності обладнання для пошарового зміцнення наплавленого металу. Для зниження теплових деформацій та залишкових напруг, підвищення механічних властивостей, подрібнення зернистості та отримання ізотропної структури наплавленого металу застосовують прокатку, проковування та ультразвукову дію.

4. Устаткування для забезпечення необхідного температурного режиму. При формуванні заготовок з різних сталей і сплавів кольорових металів, а також геометрично складних виробів необхідно дотримуватись певних температур попереднього та супутнього підігріву. З іншого боку, потрібно ефективно відводити надлишки тепла при наплавленні, щоб уникнути

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

перегріву

металу, зростання зварювальної ванни та зниження (або усунення) часу охолодження заготовки між нанесенням шарів. Для цього застосовуються столи, що охолоджуються, обдування формованої заготовки та ін.

5. Вимірювальне та контрольне обладнання. Вимірювальне обладнання (3D сканери) застосовується для визначення висоти наплавлення, хвилястості шару та розмірів кінцевого виробу. Контроль отриманої заготовки на наявність внутрішніх дефектів проводиться з допомогою томографії.

Серед усього набору перерахованого обладнання ключовим елементом комплексу для пошарового формування заготовок є наплавне обладнання. Відсутність надійного та доступного обладнання ставить під сумнів можливість отримання якісного виробу пошаровим наплавленням. Для реалізації технології плазмового наплавлення центральною ланкою є плазмотрон. На сьогоднішній день існує велика різноманітність плазмотронів для плазмового наплавлення електродом, що плавиться, з кільцевим анодом і аксіальною подачею дротяного електрода. Більшість конструкції плазмотронів розраховані на реалізацію способу плазмового наплавлення плавиться електродом зі стабілізуючим соплом.

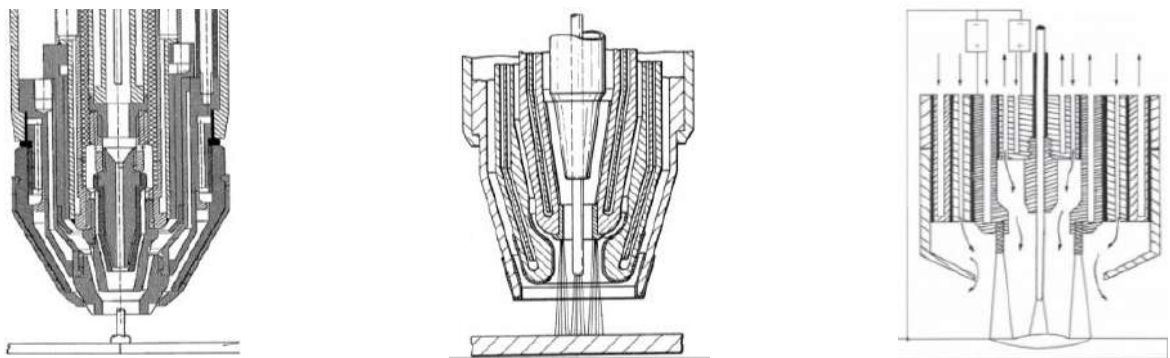


Рисунок 3.1. Схеми компонування плазмотронів для

плазмового наплавлення електродом, що плавиться

Розробкою плазмотронів для плазмового зварювання та наплавлення електродом, що плавиться, за індивідуальним замовленням займаються

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

фірми ТВІ (Німеччина) та ТОВ НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) (див. Рисунок 40). Дані плазмотрони є габаритними конструкціями і призначені для реалізації способу плазмового зварювання плавящимся електродом зі стабілізуючим соплом. Застосування даних плазмотронів для адитивного виробництва стримується складністю конструкції, обслуговування та експлуатації. Крім того, такі плазмотрони мають підвищені габарити, що звужує можливості їх застосування для адитивного виробництва.

Відсутність серійно випускаються плазмотронів для плазмового наплавлення електродом, що плавиться, дефіцитність і висока вартість запасних частин для наявних плазмотронів - все це стримує впровадження цього прогресивного процесу в адитивному виробництві металевих виробів.



1



2

Рисунок 3.2. Плазмотрони для реалізації процесів плазма-МІГ: 1 – виробництва фірми ТВІ, 2 – виробництва фірми ТОВ НВЦ «ПЛАЗЕР»

Таким чином, метою даного розділу є розробка плазмотрона і створення на його основі комплексного обладнання для реалізації плазмового наплавлення плавящимся електродом в області адитивного виробництва металевих виробів.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

3.1. Дослідження особливостей теплопередачі в кільцевому аноді плазмотрону

Плазмотрон повинен забезпечувати можливість тривалої роботи у потрібному режимі. Ресурс роботи плазмового пальника визначається тривалістю експлуатації основних теплонавантажених вузлів. Електрод-анод зазнає значно більших навантажень, ніж електрод-катод. Ресурс роботи анодного вузла визначається конструктивними особливостями та ефективністю системи охолодження та, у свою чергу, визначає надійність плазмотрона. Конструкція анода визначає схему компоновання плазмотрону та його розміри.

Найкращий варіант, при якому забезпечується тривала безаварійна робота кільцевого анода, це рівномірний розподіл анодної плями по всій площі кільцевої поверхні. Однак при діаметрі циліндричного отвору більше 6 мм досягти цього складно. Тому забезпечують примусове переміщення анодної плями дуги внутрішньої циліндричної поверхні кільцевого анода зовнішнього магнітного поля (приводить до ускладнення конструкції плазмотрона і збільшення поперечних габаритів). Локальна прив'язка анодної плями призводить до підплавлення анода та передчасного виходу його з ладу

Для створення надійного плазмотрона, що забезпечує тривалу безперервну роботу, необхідно знати теплопередачу в кільцевий анод у широкому діапазоні зміни параметрів режиму при одночасній роботі двох дуг, що дозволить встановити вимоги до потужності системи охолодження анода та плазмотрону в цілому та розробити, по можливості, надійну конструкцію мінімальними габаритами.

Вивченню теплопередачі у стрижневі аноди плазмотронів та розробці присвячено достатню кількість досліджень. Знання теплового балансу на стрижневому електроді-аноді плазмотрона дозволяє встановити необхідну потужність системи охолодження анода для необхідної потужності плазмової дуги.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Необхідно провести порівняльні дослідження теплопередачі в стрижневий та кільцевий електрод-анод плазмотрону для одного та двох дугових режимів роботи плазмотрону.

Дослідження теплопередачі проводили в наступній послідовності: спочатку визначали теплопередачу в плазмоутворююче сопло при роботі плазмотрона в режимі нестерпної дуги (сопло в цьому випадку є кільцевим анодом); далі визначали теплопередачу в стрижневий анод під час роботи плазмотрону в режимі зворотної полярності струму; потім - у двох дуговому режимі при роботі дуг на зворотній полярності струму (дуга зі стрижневого анода і кільцевого) і при роботі плазмотрона в режимі плазма-МИГ. Тепловкладення визначали методом калориметрування.

Діаметр мідного стрижневого анода - 10 мм, витрата плазмоутворюючого газу, $Q_{пг} = 4-5$ л/хв, діаметр плазмоутворюючого сопла, $d_c = 6$ мм. Постійними параметрами процесу при дослідженні тепловкладання в кільцевій анод при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться, були: $Q_{пг} = 5$ л/хв, $Q_{зг} = 10$ л/хв, $V_{пэ} = 4$ м/хв.

Виявлено, що кільцевий анод сприймає в 1,5-2 рази більше теплового навантаження, ніж стрижневий анод за однакових струмів плазмової дуги зворотної полярності. Причинами такої розбіжності можуть бути кілька факторів:

1. При роботі плазмотрона в режимах непрямої дуги та плазма-МИГ кільцевий анод відчуває додаткове нагрівання від випромінювання стовпа дуги та від нагрітого виробу.

2. Плазмоутворюючий газ, при проходженні вздовж стрижневого електрода додатково охолоджує його.

Зважаючи на дію цих факторів, можна припустити, що форма анода не суттєво впливає на величину тепловкладання в нього.

Форма анода впливає на розподіл густини струму плазмової дуги. На стрижневому електроді - анодна область локалізується з його торці, що викликає інтенсивну ерозію електрода. При використанні кільцевого

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

електрода – анодна область плазмової дуги рівномірно розподіляється на всій поверхні кільцевого каналу. При цьому знижується щільність струму, зменшується зношування електрода і підвищується ресурс роботи плазмотрона.

Встановлено, що граничне теплове навантаження на кільцевий анод становить 2200-2400 Дж. При цьому відбувається локальне розплавлення плазмоутворювального каналу. При плазмовому наплавленні електродом, що плавиться, теплове навантаження на кільцевий анод при $I_{pd} = 140$ А становить $Q_{au} = 1200-1300$ Дж. Граничне навантаження $Q_{au} = 2200-2400$ Дж при якій руйнується анод на 83-85% вище, ніж при плазма-МІГ на плавці.

Дослідження теплових процесів при різних варіантах горіння дуг (рисунок 45) також показує, що плазмоутворююче сопло плазмотрона руйнується при великих теплових навантаженнях, ніж при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться [49-53]. Таким чином можна судити про наявність достатнього запасу міцності плазмотрона. А при струмах плазмової дуги до 140А можна робити плазмову наплавку плавиться при 100% ПВ. Для безаварійної роботи режимі ПВ = 100% потужність системи охолодження кільцевого анода становити щонайменше 2 кДж.

Таким чином, при проектуванні плазмотрона з кільцевим анодом для плазмового наплавлення електродом, що плавиться, система охолодження кільцевого анода повинна відповідати встановленим вимогам. Крім того, повинно бути забезпечене надійне охолодження струмопідводу електрода, що плавиться, і плазмоутворюючого сопла, при надійній електричній ізоляції всіх вузлів плазмотрона.

3.2. Розробка плазмотрона для плазмового наплавлення електродом, що плавиться

Проектування плазмотрону є складним завданням. Необхідно враховувати безліч різних, а часом і взаємно протилежних вимог. При цьому конструкція плазмотрона повинна бути простою, надійною і забезпечувати легкість заміни деталей, що швидко зношуються (кільцевий

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

анод і контактний наконечник). Усі деталі повинні бути максимально простою геометричною формою, а їх виготовлення не повинно мати складних та трудомістких технологічних операцій, таких як зварювання, паяння, склеювання тощо. [28, 147, 148].

Плазмотрон повинен мати надійну систему охолодження, яка здатна ефективно відводити тепло від найбільш схильних до нагрівання деталей (кільцевий анод, контактний наконечник, захисне сопло). Слід використовувати роздільну систему охолодження для кільцевого анода і струмопідвідного наконечника. Це дозволить виключити шунтування струму через рідину, що охолоджує. Необхідно враховувати, що в процесі експлуатації канали системи охолодження схильні до ризику засмічення. Це з використанням технічної води, що містить велику кількість домішок [28]. Ці домішки схильні до осадження на стінках каналів можуть вступати в хімічну реакцію з матеріалом деталей. При цьому утворюються оксидні відкладення, які знижують ефективність охолодження і з часом можуть повністю перекривати канали. Схема робочої частини плазмотрона з основними конструктивними параметрами представлена на рисунку 46.

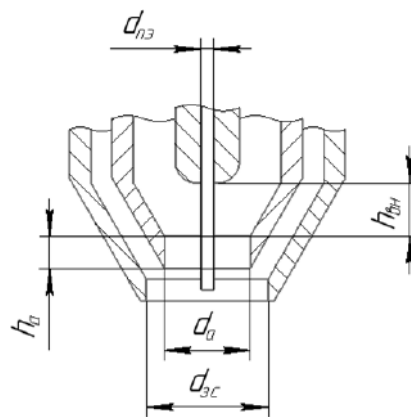


Рисунок 3.3.. Схема плазмотрону: $d_{пэ}$ – діаметр електрода, що плавиться, d_a – діаметр кільцевого анода, $d_{зс}$ – діаметр захисного сопла, h_a – довжина каналу кільцевого анода, $h_{вн}$ – відстань між контактним наконечником і кільцевим анодом

Діаметр електрода, що плавиться ($d_{пэ}$) визначається діаметром

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

стандартного зварювального (наплавного) дроту, що застосовується для МІГ наплавлення, - 1,0-1,6 мм. Зазначені діаметри дроту застосовуються зі стандартними струмопровідними наконечниками, які мають найменший розмір різьблення - М6. Дроти меншого діаметра мають малу жорсткість при аналогічному вильоті, що може негативно позначитися на точності наплавлення. Малий переріз дроту негативно позначається на продуктивності наплавлення та стабільності плавлення. Дріт діаметром більше 1,6 мм вимагають ведення процесу наплавлення на великих значеннях струму. При цьому зростає теплоукладання у виріб.

Діаметр кільцевого анода (d_a) встановлюється в межах 6-10 мм (див. розділ 1, розділ 1.2). При d_a менше 6 мм підвищується ризик торкання стінки каналу анода дротом. При d_a більше 10 мм необхідно збільшувати витрату плазмоутворюючого газу. Також необхідно використовувати більше значення струму плазмової дуги для забезпечення необхідної густини струму.

Діаметр захисного сопла ($d_{зс}$) повинен бути більше ширини валика, що наплавляється, і зони термічного впливу. Виходячи з даних, отриманих у розділі 2, діаметр захисного сопла має бути не менше 18 мм.

Відстань між контактним наконечником та кільцевим анодом ($h_{вн}$) вибирається виходячи з умови безаварійної роботи плазмотрона. До аварійної ситуації може призвести розплавлення та приварювання присадного дроту на торці наконечника, розплавлення контактного наконечника, надмірне розігрівання контактного наконечника, через що відбувається закусування присадкового дроту.

Класичним матеріалом виготовлення струмопровідних деталей пальників (сопла, електродні вузли тощо.) є технічна мідь марки М0, М1. Чиста мідь має високу електропровідність ($59,5 \times 10^6$ См/м) і теплопровідність (≈ 390 Вт/(м·К)). До недоліків міді можна віднести високу щільність (8,9 кг/м³) та складність обробки різанням (через високу в'язкість). Виходячи з властивостей матеріалу, вирішено виготовляти з міді

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

лише теплонавантажені та/або струмопровідні деталі (контактний наконечник, кільцевий анод, захисне сопло). Інші струмопровідні деталі прийнято виготовляти з латуні, яка легше обробляється різанням і в середньому на 10% дешевше за мідь М1.

Як матеріал для діелектричного ізолятора застосовуються такі пластмаси як Фторопласт-4 і Поліамід-6. Однак ці матеріали мають невеликий температурний діапазон експлуатації, а при нагріванні втрачають жорсткість і схильні до деформації під навантаженням. Також дані пластмаси не стійкі до дії ультрафіолетового випромінювання.

В якості альтернативи вищевказаним матеріалам було обрано Zedex-410.

- Робоча температура: від -70°C до $+180^{\circ}\text{C}$ ($+200^{\circ}\text{C}$).
- Висока стабільність розмірів (до $+180^{\circ}\text{C}$ твердий, жорсткий, міцний).
- Максимальне водопоглинання становить 0,6%, зміна розмірів у своїй - трохи більше 0,25%.
- Висока стійкість до УФ-випромінювання.

Для ізоляції порожнин та каналів плазмотрону використовуються кільця за ГОСТ 9833-73 з термостійкого фторкаучуку (ІРП-1287) з робочим інтервалом температур від $-20\dots+200^{\circ}\text{C}$.

Як комплектуючі матеріали та деталі для підведення комунікацій (токопідведення, водяне охолодження, подача захисного та плазмоутворюючого газів) прийнято максимально використовувати стандартні елементи. Струмopідведення здійснюється за шлейфами зі стандартними роз'ємами для ручних водоохолоджуваних пальників для МІГ та ТІГ зварювання. Подача води та газів проводиться по пластикових трубках та/або гумових шлангах перетином не менше $2,5\text{ мм}^2$. Всі комунікації укладені в єдиний рукав, що захищає їх від ультрафіолетового випромінювання та зіткнення з гарячими предметами.

У загальному вигляді конструкція плазмотрона для плазмового наплавлення плавящимся електродом являє собою сукупність ряду вузлів і

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

деталей: електродний вузол, анодний вузол, захисне сопло та ін. та руйнування плазмотрону. Використання кількох ізоляторів для поділу кожного елемента плазмотрону збільшує загальну кількість деталей і неминуче призводить до збільшення габаритних розмірів. Тому було прийнято рішення використати один загальний ізолятор, на якому монтуватимуться основні вузли плазмотрону.

Вхідні та вихідні комунікації розташовуються на верхньому торці плазмотрону. Дане рішення сприяє зменшенню габаритних розмірів пальника, при цьому шланги не піддаються тепловому впливу від нагрітого металу та ультрафіолетового випромінювання від зварювальних дуг, забезпечується простота монтажу плазмотрону до кронштейна, а також можливість кріплення додаткового обладнання до його корпусу.

В результаті дослідно-конструкторських досліджень було спроектовано та виготовлено плазмотрон, показаний на Рисунок 3.4.



1

2

Рисунок 3.4. Плазмотрон для процесу плазма-МІГ без стабілізуючого сопла:

1 - у зборі; 2 – у розібраному вигляді

Плазмотрон складається з найпростіших у виготовленні деталей, з'єднаних між собою переважно за рахунок різьбових з'єднань. Зварювання та паяння при виготовленні пальника не застосовуються. Несучим

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

елементом є ізолятор, до якого приєднуються вхідні та вихідні штуцери, електродний вузол, анодний вузол та інші деталі. Струмopідведення для електрода, що плавиться, і кільцевий анод мають незалежне пряме водяне охолодження, виконане у вигляді кільцевих каналів. Відведення тепла із захисного сопла здійснюється за рахунок непрямого водяного охолодження. Підведення струму до електрода, що плавиться забезпечується через контактний наконечник для МІГ зварювання з приєднувальним різьбленням М6. При цьому можлива заміна контактного наконечника без повного розбирання плазмотрона.

3.3. Дослідження теплових навантажень у вузли плазмотрона при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться

Для підтвердження відповідності розробленого плазмового пальника вимогам технічного завдання, а також оцінки технологічних можливостей, необхідно виконати дослідження теплових навантажень на основні вузли – електродний вузол та кільцевий анод. Дослідження теплових навантажень проводилося за методикою калориметрії, запропонованої раніше.

Дослідження теплопокладання у вузли плазмотрона є складним завданням через одночасного горіння двох дуг. Для оцінки теплопокладання кожної дуги застосовувалася така методика дослідження:

1. Вимірювання теплопередачі у вузли під час роботи плазмотрона як МІГ.
2. Вимірювання теплопередачі у вузли при роботі плазмотрона в режимі плазма-МІГ.
3. Аналіз впливу кожної електричних дуг.

Основними параметрами режиму, що варіюються, були $U_{пэ}$, I_a , $V_{пэ}$. Фіксованими параметрами були: відстань від торця кільцевого анода до поверхні, що наплавляється, становила 10-12 мм, $Q_{пг} = 5$ л/хв (аргон), $Q_{зг} = 15$ л/хв (аргон), $d_a = 8$ мм, $d_{пе} = 1,2$ мм.

Через те, що електродний вузол і захисне сопло мають загальну

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систему охолодження, то справжні дані про теплову потужність, що отримується електродним вузлом, можуть відрізнятися від виміряних. Крім непрямого водяного охолодження, захисне сопло додатково охолоджується потоком захисного газу. У зв'язку з цим було прийнято припущення, що теплові навантаження, що сприймаються захисним соплом, компенсуються охолодженням потоком газу і не суттєво впливають на тепловкладання в електродний вузол.

Розглянемо розподіл тепла, що надходить у плазмотрон при роботі в режимі МІГ (див. рис. 48). Загальний тепловий потік електродний вузол залежить від кількості тепла, що передається за рахунок теплопередачі (q_1) і випромінювання (q_2). Тепловий потік q_1 включає тепло, що утворюється при проходженні струму через дротяний електрод, і тепло, що виділяється в анодній ділянці дуги. Анодний вузол зазнає теплового навантаження від випромінювання дуги q_3 . Залежно від параметрів процесу, які визначають потужність і довжину дуги, змінюватиметься інтенсивність тепловкладання у вузли плазмотрона.

При $U_{пэ} \geq 35В$ дуга з електрода, що плавиться, горить на рівні торця кільцевого анода. При цьому підвищується тепловкладання в кільцевий анод у 2-3 рази. Це пояснюється збільшенням частки теплової енергії, що отримується від дуги кільцевим анодом за допомогою конвекції та випромінювання. При малій напрузі ($U_{пэ} < 30 В$), коли дуга горить за межами кільцевого анода, збільшення потужності дуги не чинить теплового впливу на кільцевий анод. При $U_{пэ} = 30 В$ ($V_{пэ} = 6-7 м/хв$) фіксується вплив електричної дуги на нагрівання кільцевого анода. При $U_{пэ} = 35$ (дуга горить на зрізі кільцевого анода), зафіксовано максимальне значення теплової потужності, що надходить в анодний вузол, $Р_{ау} \approx 231 Дж$. Варто відзначити, що при зростанні $I_{пэ}$ з 175 до 215 А величина $Р_{ау}$ залишається відносно незмінною.

Результати дослідження свідчать, що довжина МІГ дуги суттєво впливає на тепловкладання в кільцевий анод.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Розглянемо розподіл теплової потужності у вузлі плазмотрона при плазма-МІГ процесі (рисунок 51). Електродний вузол відчуває додаткове теплове впливу за рахунок випромінювання плазмової дуги та виділення тепла в дроті присадки через шунтування струму плазмової дуги. Анодний вузол відчуває теплове навантаження від випромінювання плазмової дуги та від тепла, що виділяється в анодній ділянці. При плазма-МІГ наплавці, як і при МІГ процесі можливе розтягування дуги з відповідною зміною величини теплових потоків.

Теплопередача в струмопідведення плавиться при зміні параметрів дуги з плавиться і плазмової дуги змінюється не значно. Максимальна теплова потужність електродний вузол склала не більше 438 Дж. Це можна пояснити відсутністю конвективної теплопередачі від обох дуг за рахунок обдування плазмоутворюючим газом. Роль теплопередачі випромінюванням від дуг так само не велика. Це, можливо, пов'язані з малими розмірами джерела випромінювання. Збільшення U_{pe} в інтервалі 25-30 призводить до зростання P_{au} на 10%, а збільшення I_{pd} в інтервалі 100-140 А - на 5-15%. Зменшення P_{au} із збільшенням $V_{пз}$, ймовірно, пов'язане із зміною виду перенесення електродного металу.

Максимальне теплоукладання в анодний вузол становить не більше 1400 Дж, що нижче за граничне допустиме значення (див. рис. 44). Таким чином, конструкція нового плазмотрона здатна забезпечувати тривалу роботу на оптимальних параметрах режиму (встановлених в главі 1) плазмового наплавлення електродом, що плавиться. Аналіз даних експериментів показує, що частка впливу плазмової дуги на теплопередачу в кільцевий анод при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться, становить близько 90%.

3.4. Устаткування для пошарового формування виробів плазмовим наплавленням плавлячим електродом

Установки для адитивного виробництва можуть компоуватися з

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

урахуванням різних складових. Обладнання для плазмового наплавлення повинне відповідати вимогам сумісності з будь-яким типом комплексів для адитивного виробництва металевих виробів. Простота конструкції та малі габарити розробленого плазмотрона дозволяють використовувати його на різному устаткуванні як для WAAM, так і для звичайної наплавки. Розроблений плазмотрон для плазмового наплавлення електродом, що плавиться, використаний при створенні різних типів обладнання для адитивного виробництва металевих виробів і пройшов дослідно-виробничі випробування в їх складі:

1. Консольна установка показана рисунку 3.5.



а



б

Рисунок 3.5. Портальна установка для пошарового наплавлення: а – загальний вигляд, б – прототип плазмотрона для плазмового наплавлення електродом, що плавиться

За основу було взято спеціалізовану консольно-зварювальну установку з числовим управлінням СКСУ-1500. Технічні характеристики установки наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Параметр	Значення
Робочий простір (ДхШхВ), м	2,0х1,0х0,3
Швидкість переміщення, м/хв	до 8,0
Наявність поворотної осі	так
Частота обертання планшайби	0,12-2,5 об/хв
Максимальне навантаження на робочий стіл, кг	до 1000
Вантажопідйомність обертача (ном/макс), кг	300/600

Зварювальні апарати FoxWeld 5706 Invermig 500E та Будівельник-300P використовувалися для живлення МПГ дуги та плазмової дуги відповідно. Технічні характеристики зварювальних апаратів показані у таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Основні характеристики зварювальних апаратів

Зварювальний апарат	FoxWeld 5706 Invermig 500E	Будівельник-300P
Напруга холостого ходу,	70	85
Зварювальний струм, А	до 320 (100% ПВ)	40-250 (100% ПВ)
Зварювальна напруга,	15,5-39,0	-

Наплавлення складає основі керуючої команди, для написання якої використовується G-code. Контроль установкою виконується за допомогою програмного пакета Mach3.

Даний тип установки призначений для формування виробів великої довжини (понад 1 м). Комплектування установки обертачем забезпечує можливість вирощування тіл обертання складного профілю.

На рисунку 3.6 показано деталь, отриману на консольній (після механічної обробки).

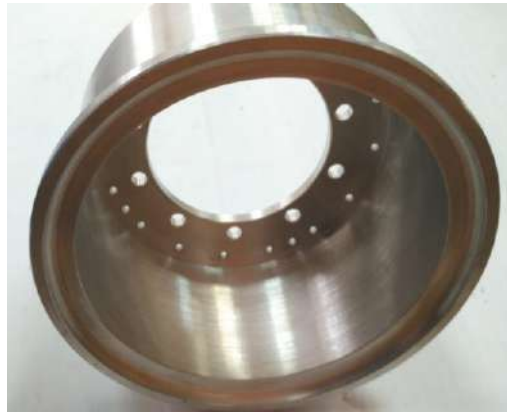


Рисунок 3.6. Обичайка, отримана пошаровим плазмовим наплавленням електродом, що плавиться

2. Роботизований комплекс на базі маніпулятора Fanuc Arc Mate 100iC/12 та позиціонера Arc Positioner B-82535RU01 (див. рис. 55). Розроблений комплекс дозволяє одержувати вироби складної форми з розташуванням елементів у різних просторових положеннях.



Рисунок 3.7. Компонування обладнання для WAAM на базі роботизованого комплексу

Конструкція плазмотрона дозволяє використовувати допоміжне обладнання та джерела живлення для дуги електрода, що плавиться, розроблені для роботизованої МІГ зварювання. У представленому варіанті використовується обладнання для СМТ наплавлення фірми Fronius. Як наплавне обладнання застосовується зварювальний апарат TPS 4000 СМТ з блоком подачі VR 7000 СМТ (МІГ дуга) та Будівельник-300Р (плазмова

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

дуга). Технічні характеристики зварювальних апаратів показані у таблиці 3.3.

Управління комплексом здійснюється контролером R-30iB Plus. Програмний комплекс Roboguide та спеціально розроблена програма-ретранслятор використовуються для управління робота.

Таблиця 3.3. Основні характеристики зварювальних апаратів

Зварювальний апарат	TPS 4000 CMT	Будівельник-300P
Напруга холостого ходу,	70	85
Зварювальний струм, А	до 320 (100% ПВ)	40-250 (100% ПВ)
Зварювальна напруга,	14,2-34,0	-



Рисунок 3.8. Заготівлі деталей (сердечник - ліворуч, імпеллер - праворуч), створені на роботизованому комплексі

На рисунку 3.8 показані приклади деталей отриманих пошаровою плазмовою наплавкою електродом, що плавиться.

3. Багатофункціональний гібридний центр для адитивного виготовлення деталей (див. рис. 57) створений в результаті спільної роботи об'єднання "Гібридне адитивне виробництво". До складу об'єднання входять: Пермський національний дослідницький політехнічний університет, ТОВ "Центр ЕЛТ", ПАТ "Протон-ПМ", ТОВ "ІНКОР" та ТОВ "МІП "КАТ". Устаткування зібране на базі універсального триосьового вертикального

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

обробного центру JETJMD-48.

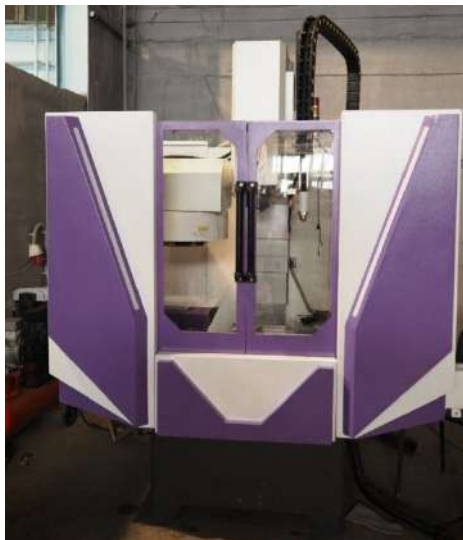


Рисунок 3.9. Багатофункціональний комплекс АТ-300 (зовнішній вигляд)

Загальні характеристики обробного центру наведено у таблиці 3.4. Управління центром здійснюється вбудованою системою ЧПУ на базі контролера Siemens 808DAdvance.

Таблиця 3.4. – Характеристики обробного центру JETJMD-48

Модель із ЧПУ Siemens 808D Advance	JMD-48STA CNC
Розміри столу, мм	600 x 300
Максимальні переміщення осями XxYxZ, мм	400 x 300 x 500
Потужність шпинделя, кВт	3,7
Частота обертання шпинделя, об/хв	8000
Точність позиціонування, мм	0,005
Повторюваність, мм	0,005
Максимальне навантаження на стіл, кг	80
Відстань шпиндель-стіл, мм	80-580
Відстань шпиндель-стійка, мм	260
Габаритні розміри ДхШхВ, мм	2068 x 2361 x 2140
маса, кг	1840



Рисунок 3.10. Робоча зона (а) та навісне обладнання (б)

Компонування комплексу включає в себе обладнання для плазмового наплавлення електродом, що плавиться, обладнання для ударної обробки (зміцнення) наплавленого металу, фрезерне обладнання для механічної обробки заготовок.

Для здійснення функції пошарового зміцнення заготовки, що наплавляється, на колону верстата був встановлений пневматичний молоток, конструкція якого була доопрацьована відповідним чином для забезпечення монтажу. Пневматичний молоток підключається до загальної пневматичної магістралі обробного центру з використанням електричного клапана, керування яким здійснюється за допомогою наявних цифрових виходів контролера Siemens 808D. Управління включенням та вимкненням молотка виконується безпосередньо з керуючої програми. Точка кріплення молотка до обробного центру обрана таким чином, щоб у вимкненому стані робочий вузол молотка (зубило) знаходився нижче за площину шпинделя, але вище за площину стандартної оправки. Це дозволяє позбавитися необхідності підйому (при деактивації) і опускання (при активації) молотка в процесі роботи установки. Монтаж пневматичного молотка та плазмотрону здійснено таким чином, щоб їх робочі вузли знаходилися на одній осі по відношенню до шпинделя. Для забезпечення функції підйому та опускання плазмотрона на висоту, необхідну для здійснення процесу наплавлення із заданими параметрами, використовується стандартний

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

пневмоциліндр (див. рис. 3.11).

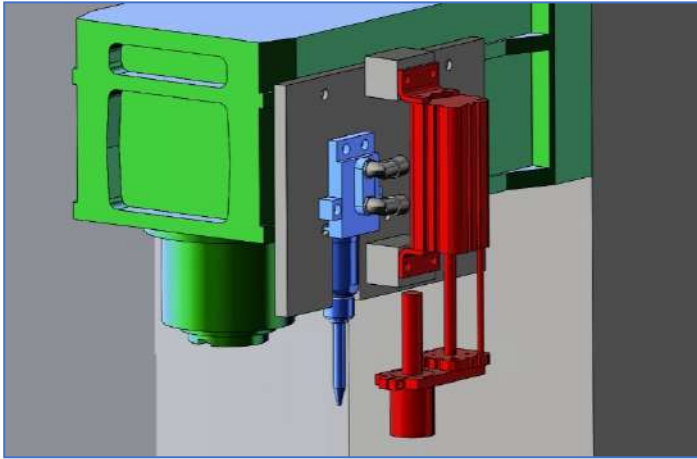


Рисунок 3.11. Розташування навісного обладнання: схема (а) та загальний вигляд (б)

У рамках проекту для генерації керуючих програм використовуються стандартні програмні продукти (слайсери), які застосовуються для 3D принтерів. Найбільш підходящим для завдань тривимірного наплавлення слайсером за підсумками проведеного аналізу був визначений слайсер Simplify3D, що володіє найбільшою кількістю необхідних параметрів, що настроюються, а також великою кількістю стратегій заповнення і швидкістю роботи для великих вихідних моделей. Вихідним файлом для роботи слайсера є STL-модель об'єкта, що формується. Результуючим файлом, одержуваним за підсумками роботи, є готова програма пошарового наплавлення на мові G-code. Приклад такої траєкторії для одного з шарів виробу, що наплавляється, а також кореспондуючого йому коду керуючої програми наведені на рисунку 60.

Генерація програм для етапів механічної обробки виробу здійснюється з використанням будь-якої доступної САМ-системи, що підтримує виведення керуючої програми у форматі, придатному для контролерів Siemens 808D. У проекті використовувалася САМ-система Autodesk Power Mill. При необхідності генерація керуючої програми етапу

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

механічної обробки може бути здійснена безпосередньо з інтерфейсу контролера установки.

На рисунку 3.12. представлені фото етапів одержання виробу на створеному гібридному комплексі.



Рисунок. 3.12

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ І СТРУКТУРИ МЕТАЛУ, ОТРИМАНОГО ПОШАРОВИМ ПЛАЗМОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

У магістерській роботі показано можливість формування виробів на прикладі високолегованої сталі аустенітного класу. Дані сталі мають широку сферу застосування: хімічне та нафтохімічне машинобудування, харчова промисловість, суднобудування, криогенна техніка тощо. Аустенітні сталі, крім високих властивостей міцності, мають високу корозійну стійкість і жаростійкість. Метою даного розділу є дослідження структури і властивостей матеріалу, отриманого пошаровою плазмовою наплавкою електродом, що плавиться. Для об'єктивної оцінки проводилися порівняння властивостей аналогічних матеріалів, отриманих способами плазмового наплавлення електродом, що не плавиться, на струмах прямої і зворотної полярності, а також властивостей матеріалу, отриманого традиційними методами (лиття, кування та ін.). Як матеріал для дослідження можливості застосування способу плазмового наплавлення плавящимся електродом для пошарового формування металевих виробів була використана високолегована сталь аустенітного класу марок 12X18H10T та 04X19H9. Сталь 12X18H10T застосовується для виробів, що працюють у розведених розчинах азотної, оцтової, фосфорної кислот, розчинах лугів і солей, під тиском і при температурі від $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$, а за наявності агресивних середовищ до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сталь 04X19H9 рекомендується використовувати для виготовлення зварних конструкцій працюючих в контактi з азотною кислотою або в азотнокислих середовищах при підвищених температурах, а також виробів, що працюють в середовищах з більш високою агресивністю, ніж сталі 12X18H10T і 12X18H12T, та виробів, що піддаються.

Як вихідний матеріал для наплавлення використовувався дріт марки 12X18H10T і зварювальний дріт ОК Autrod 308LSi (ESAB) діаметром 1,2

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

мм. Даний дрiт є зарубiжним аналогом вiтчизняного дроту Св-04Х19Н9 ГОСТ 2246-70. Дрiт призначений для зварювання деталей зi сталей марок 04Х18Н10 (закордонний аналог - AISI 304), 08Х18Н10, AISI 321 та подiбних до них. Наплавнi роботи виконувались з застосуванням розробленого плазмотрону. Параметри режиму були обранi з умови стабiльного формування одиночного валика (див. роздiл 2): $I_a = 100\text{A}$, $U_{пе} = 25\text{ В}$, $V_{пэ} = 6\text{ м/хв}$, $V_n = 1\text{ м/хв}$, $d_a = 8\text{ мм}$, $Q_{пг} = 5\text{ л/ хв}$, $Q_{зг} = 15\text{ л/хв}$. При побудовi траєкторiї наплавлення використовувалися значення геометричних розмiрiв валика, визначених за допомогою отриманої моделi моделi профiлю валика (див. роздiл 2). Пiсля наплавлення поверхня кожного шару очищала до металевого блиску, а заготовля охолоджувалася до температури не бiльше 100°C . Для дослiдження отриманого металу методами неруйнiвного контролю було виготовлено зразок з розмiрами $200 \times 15 \times 20\text{ мм}$ (25 шарiв). Заготовлi для проведення руйнiвного контролю та визначення корозiйних властивостей мали вигляд вертикальних стiнок з розмiрами $150 \times 20 \times 90\text{ мм}$ (115 шарiв). Фото заготовок показано рисунку 4.1.



а

б

Рисунок 4.1. Фото заготовель для дослiдження методами неруйнiвного контролю (а) та визначення структури та властивостей металу (б)

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пiдпис	Дата		64

4.1. Дослідження заготовки, отриманої пошаровим плазмовим наплавленням плавящимся електродом, методами неруйнівного контролю

Для проведення контролю наплавленого зразка, його верхню та бічні сторони фрезерували (рисунок 62, а). Наплавлений зразок досліджували такими способами неруйнівного контролю: візуальний огляд, рентгенографічний та ультразвуковий контроль та контроль поверхні проникаючими речовинами (пенетрантами).

При візуальному огляді оброблених поверхонь видимих поверхневих дефектів (пори, неметалеві включення, несплавлення та інших.) виявлено були.

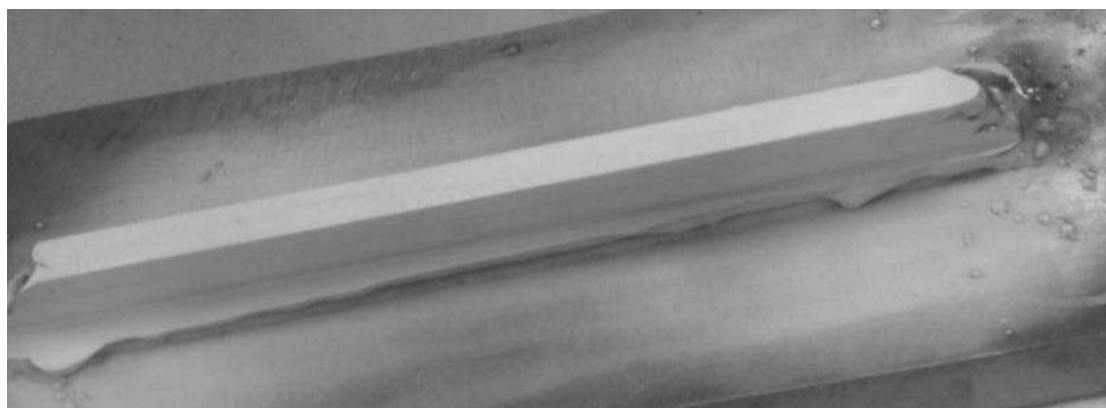


Рисунок 4.2. Контроль зразка кольоровою дефектоскопією
Рентгенографічне дослідження зразка проводили із застосуванням

Далі проводилося дослідження поверхні металу кольоровою дефектоскопією з метою виявлення гарячих та холодних тріщин, розшарування. Як реактиви використовувалися: пенетрант SHERWIN DP-55, очищувач SHERWIN DR-60, проявник SHERWIN D-100. За підсумками контролю за дефектами не виявлено. На рисунку 4.2 показано поверхню зразка після нанесення проявника.

імпульсного рентгенівського апарату МОНОСКАНТМЗ. Для перегляду

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

знімка використовувався комплекс аналізу рентгенографічних зображень «СКРІНТЕСТ 35». Рентгенографічний контроль (див. Рисунок 64) показав відсутність внутрішніх дефектів типу пір, несплавлень і шлакових включень в отриманому металі.



Рисунок 4.3. Рентгенографічний знімок наплавленого металу

Для проведення контролю застосовувався ультразвуковий дефектоскоп А1214- Експерт (переносний), ультразвуковий товщиномір А-1210, набір атестованих п'єзоелектричних перетворювачів, набір зразків для налаштування дефектоскопа та набір стандартних зразків для налаштування чутливості. Як контактну рідину використовувався «Аквагель» для ультразвукової діагностики. В результаті дослідження тріщин, несплавлень, розшарування виявлено не було.

При проведенні ультразвукового контролю було виявлено ефект сильного розсіювання та згасання ультразвукових хвиль. Причиною цього може бути наявність у наплавленому металі анізотропної крупнозернистої структури.

4.2. Дослідження хімічного складу наплавленого металу

Хімічний склад металу наплавленого визначали за допомогою рентгенофлуоресцентного спектрометра ALPHA SERIESTM Альфа-2000. Виміри проводили за висотою наплавленого зразка у трьох місцях: верхня частина, середня частина та нижня частина (2-5 мм від зони сплаву з підкладкою). Хімічний склад металу, визначений результаті дослідження, представлений у табл. 4.1.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Таблиця 4.1 - Зміст основних легуючих елементів у металі

Зразок	Зміст основних хімічних речовин елементів, %				Примітка	
	Fe	Cr	Ni	Mn		
Дріт OK Autrod 308LSi	Основа	19,5	9,6	2,0	Відповідно до сертифікату (Див. додаток 1)	
Сталь 04X19H9	Основа	17,0- 19,0	9,0- 11,0	≤ 2,0	ГОСТ 5632	
Плазма-МІГ наплавлення		67,6	19,6	10,6	1,8	Верх
		67,6	19,8	10,5	1,8	Центр
		67,7	19,5	10,7	1,6	Низ

Метал, отриманий способом пошарового плазмового наплавлення, за хімічним складом відповідає вимогам ГОСТ 5632-72 для металів, отриманих традиційними металургійними способами. Відсотковий вміст хімічних елементів у наплавленому металі приблизно однаковий по всій висоті зразка. Склад наплавленого металу, отриманого плазмовою наплавкою електродом, що плавиться забезпечує більш рівномірний розподіл по шарах легуючих елементів у порівнянні з плазмовою наплавкою на струмі прямої полярності, і відповідає хімічному складу присадкового дроту. Цей результат свідчить, що значного вигорання легуючих елементів немає.

4.3. Дослідження механічних властивостей наплавленого металу

При адитивному формуванні виробів отриманий метал повинен відповідати необхідним характеристикам міцності. Як правило, вони повинні бути не нижче властивостей матеріалу, отриманого традиційними

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

способами (лиття, кування тощо). Зразки щодо механічних випробувань матеріалу вирізалися за схемою, показаної рисунку 4.4.

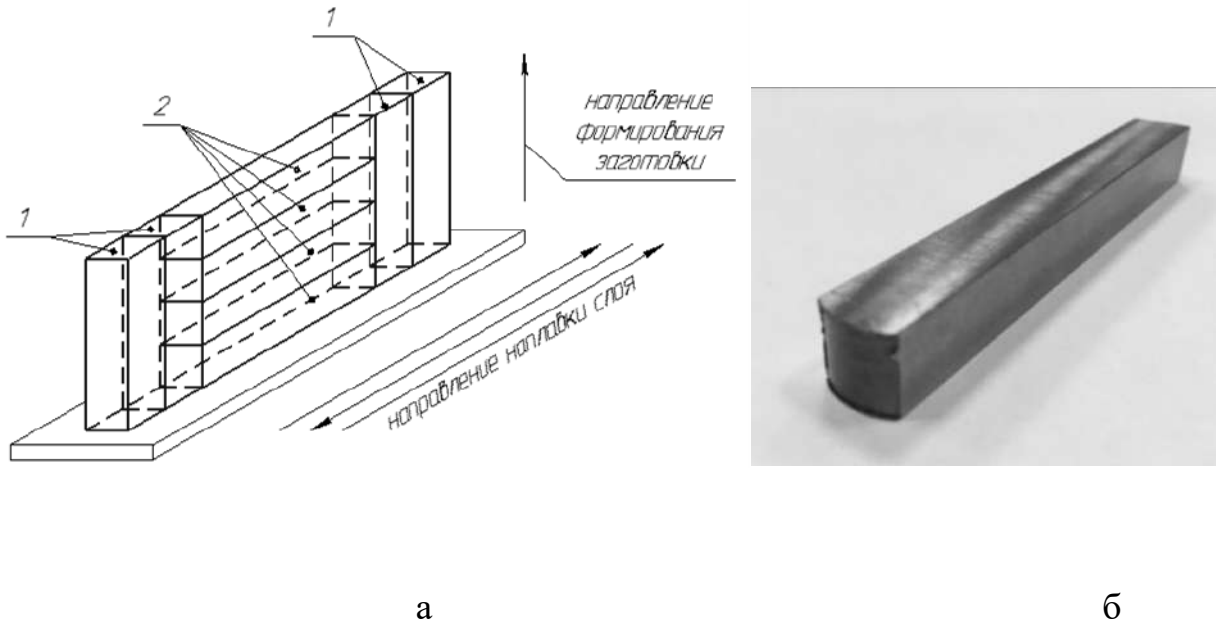


Рисунок 4.4. Схема вирізки зразків для дослідження механічних характеристик матеріалу: а – схема вирізки зразків (1 – поперек шарів, 2 – вздовж шарів), б – фото зразка

Підготовка та випробування зразків на розтягування виконувалася згідно з ГОСТ 1497-84. Схеми випробування зразків на ударну в'язкість представлені рисунку 71.

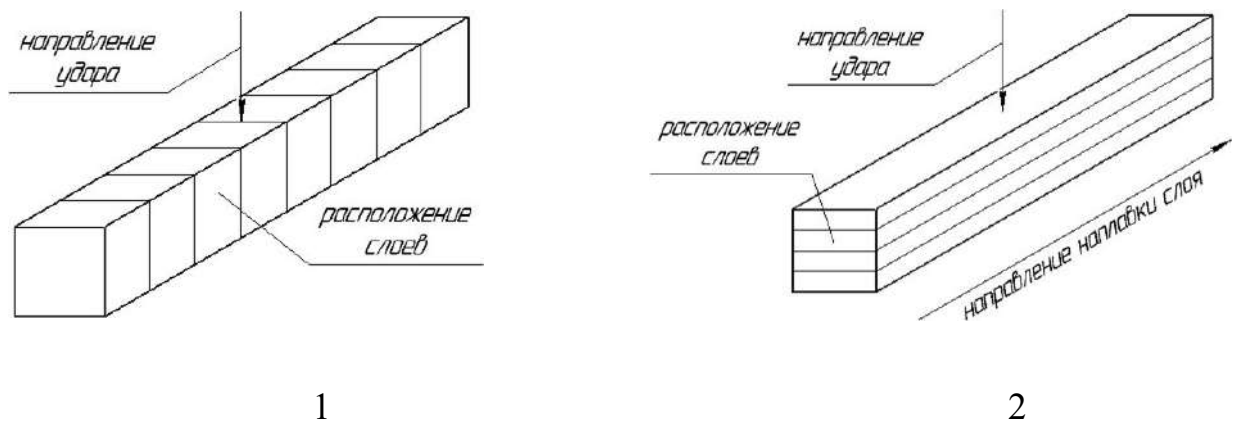


Рисунок 4.5. Схеми випробування зразків на ударний вигин: 1 – уздовж наплавлених шарів, 2 – поперек наплавлених шарів

Результати механічних випробувань для матеріалу ОК Autrod 308LSi (04X19H9) наведено у таблиці 20 [58-160]. Для порівняння механічних

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

властивостей було взято дані з відповідних ГОСТ при температурі 20°C.

Таблиця 4.2 – Механічні властивості сталі 04X18Н9

Матеріал	Бв, МПа	б02, МПа	δ, %	КСУ, кДж/м2
Плазма-МІГ наплавлення (вздовж шарів)	520	234	42,4	251
Плазма-МІГ наплавлення (поперек шарів)	503	222	45,6	164
Сталь 04X18Н10 ГОСТ 25054-81	≥ 441	≥ 157	38- 40	-
Сталь 04X18Н10 ГОСТ 5949-75 (загартування T = 1020-1100 °C)	≥440	≥155	≥40	-

Матеріал, отриманий пошаровим плазмовим наплавленням електродом, що плавиться, задовольняє вимогам стандартів для сталі 04X18Н10.

Зразки після випробування на ударний вигин показано рисунку 4.6.



Рисунок 4.6. Зразки після випробування на ударний вигин

Злам зразків свідчить про пластичну руйнацію. Анізотропія механічних властивостей наплавленого металу в поздовжньому та поперечному напрямі наплавлення становить трохи більше 10%. Однак метал заготовки

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

має різну ударну в'язкість щодо розташування шарів. Ударна в'язкість металу в поздовжньому напрямку шарів у 1,5 рази більша, ніж у поперечному. Для сталей аустенітного класу рекомендується виконувати термообробку (загартування/аустенізацію) для зняття залишкової напруги, підвищення пластичності та поліпшення стійкості до корозії (загальної, міжкристалітної, ножової). У таблиці 4.3 наведено результати механічних випробувань заготовок із сталі 12Х18Н10Т, отримані пошаровим наплавленням до і після термічної обробки. Для наочності результати відображені малюнки 4.5-4.6.

Таблиця 4.3 – Механічні властивості сталі 12Х18Н10Т

Матеріал	Бв, МПа	Б02, МПа	δ, %
Плазма-МІГ наплавлення (без термообробки)	525	218	49
Плазма-МІГ наплавлення (загартування)	539	221	47
Плазмова наплавка, пряма полярність (без термообробки)	552	326	54
Плазмова наплавка, пряма полярність (загартування)	555	300	50
Плазмова наплавка, зворотна полярність (без термообробки)	541	320	54
Плазмова наплавка, зворотна полярність (загартування)	550	300	49
Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 25054-81 (загартування)	≥ 510	≥ 196	35- 38
Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-75 (загартування)	≥ 510	≥ 196	≥ 40

Проведення аустенізації після формування заготівлі з 12Х18Н10Т

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

сприяє невеликому підвищенню міцності та пластичності. Міцні характеристики металу, отриманого пошаровим плазмовим наплавленням електродом, що плавиться, нижче, ніж у аналогічного матеріалу, отриманого пошаровим плазмовим наплавленням неплавким електродом на струмах прямої і зворотної полярності

Випробувані сталі відносяться до жаростійких жаростійких сталей. Для оцінки можливості застосування виробів з матеріалів, отриманих пошаровою плазма-МІГ наплавленням, проводилися випробування при підвищеній температурі. Механічні властивості матеріалу за температури 500 °С наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. - механічні властивості зразків з 12Х18Н10Т при Т = 500 °С

Зразок	Бв, МПа	б02, МПа	δ, %	ψ, %
Плазма-МІГ наплавлення (без термообробки)	278	147	36	67
Плазма-МІГ наплавлення (загартування)	272	129	36	67

Результати дослідження тривалої міцності сталі 12Х18Н10Т, отриманої багатошаровим плазмовим наплавленням плавящимся електродом представлені в таблиці 23.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Висновки

1. Визначено оптимальні режими плазмового наплавлення електродом, що плавиться, для пошарового формування металевих виробів, а також виявлено закономірності формоутворення наплавленого валика від режимних параметрів.
2. Встановлено вплив технологічних параметрів на характер взаємного горіння дуг і перенесення електродного металу при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться.
3. Встановлено особливості теплопередачі в плазмотрон і виріб при плазмовому наплавленні електродом, що плавиться.
4. Розроблено плазмотрон для плазмового наплавлення електродом, що плавиться, що забезпечує надійність роботи в умовах адитивного виробництва металевих виробів. На базі розробленого плазмотрона можливе компонування обладнання для адитивного виробництва з різними функціональними можливостями.
5. Показана можливість застосування плазмового наплавлення плаваючим електродом для адитивного формування металевих виробів на прикладі високолегованої аустенітної сталі (04X19H9, 12X18H10T).

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Список літератури

1. Louvis, E. Selective laser melting of aluminum components [Текст] / E. Louvis, P. Fox, CJ Sutcliffe // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211.- pp. 275-284.
2. Qiu, C. На роль melt flow in surface structure and porosity development during selective laser melting [Текст] / C. Qui [et al.] // Acta Materialia. - 2015. - Vol. 96. - pp. 72-79.
3. Kapil, S. Hybrid Layered Manufacturing using Tungsten Inert Gas Cladding [Текст] / S. Kapil, [et al.] // Progress in Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 1. - №1. - pp. 79-91.
4. Zhang, Y. Build Orientation Optimization для Multi-Part Production в Additive Manufacturing [Текст] / Y. Zhang [et al.] // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2017. – Vol.28. - №6. - pp. 1393–1407.
5. Ding, D. Wire-feed additive manufacturing of metal components: технології, розвитку та майбутні інтереси [Текст] / D. Ding [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2015. - Vol. 81. – pp. 465-481.
6. Martina, F. Investigation of Benefits of Plasma Deposition for Additive Layer Manufacture of Ti-6Al-4V [Текст] / F. Martina [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol.212. - pp. 1377-1386.
7. Yilmaz, O. Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review [Текст] / O. Yilmaz, AA Uglu // Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2016. – Vol.230. - pp. 1781-1798.
8. Song, YA 3D welding and milling: II-optimization of the 3D welding process, використовуючи experimental design approach [Текст] / YA Song, S. Park , SW Chae // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 2005. – Vol. 45. - pp. 1063–1069.
9. Szost, BA Comparative Study of additive manufacturing techniques:

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components [Текст] / BA Szost [et al.] // Mater. Des. – 2016. – Vol. 89. - pp. 559-567.

10. Cao, Y. Overlapping model 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. - №3. - pp. 641-645.

11. Alberti, EA Additive manufacturing: role welding in this window of opportunity [Текст] / EA Alberti, LJ Silva, ASCM D'Oliveira // Weld. Int. – 2016. – Vol. 30. - №6. - pp. 413-422.

12. Ding, D. Bead modeling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing [Текст] / D. Ding [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. – 2016. – Vol. 36. – pp. 32-42.

13. Somashekara, MA Investigations в ефект weld-deposition pattern на residual stress evolution for metallic additive manufacturing [Текст] / MA Somashekara [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2017. – Vol. 90. - № 5-8. - pp. 2009-2025.

14. Jhavar, S. Enhancement of Deposition Quality in Micro-plasma Transferred Arc Deposition Process [Текст] / S. Jhavar, NK Jain, CP Paul // Mater. Manuf. Process. – 2014. – Vol. 29. - №8. - pp. 1017-1023.

15. Kovacevic, R. Process Control of 3D Welding as Droplet-Based Rapid Prototyping Technique [Електронний ресурс] / R. Kovacevic, H. Beardsley. - Електрон. дано. (4.1 Мб). - Int. Solid Free. Fabr. Symp. – 1998. – pp. 57–64. Режим доступу - <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/581>.

16. Zhou, X. Три-dimensional numerical simulation arc i metal transport в arc welding based additive manufacturing [Текст] / X. Zhou [et al.] // Int. J. Heat Mass Transf. – 2016. – Vol. 103. – pp. 521-537.

17. Jhavar, S. Розробка мікро-плазмової трансмісії arc (μ -РТА) wire deposition process для додаткових лай, що застосовуються додатків [Текст] /

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

S. Jhavar, NK Jain, CP Paul // J. Mater. Process. Technol. – 2014. – Vol. 214. - №. 5. - pp. 1102-1110.

18. Xiong, J. Fabrication inclined thin-walled parts в multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition [Текст] / J. Xiong [et al.] // J. Mater. Process. Technol. - 2016. - Vol. 240. - pp. 397-403.

19. 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.

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

21. Ding, D. А практичний метод планування методології для wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures [Текст] / D. Ding [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. – 2015. – Vol. 34. – pp. 8-19.

22. Gu, J. Діяльність inter-layer studeed 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.

23. Colegrove, PA Microstructure i residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling [Текст] / PA Colegrove [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2013. – Vol. 213. - pp. 1782-1791.

24. Xiong, J. Heat propagation circul thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding [Текст] / J. Xiong [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2018. – Vol. 251. - pp. 12-19.

25. Wang, H. Solid Freeform Fabrication Базований на Micro-Plasma Powder Deposition [Електронний ресурс] / H. Wang, W. Jiang, RKM Valant - Електрон. дано. (471 Кб). - Res. Cent. Adv. Manuf. South. Methodist Univ. – 2003. – pp. 6–8. Режим доступу

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

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

26. Wang, H. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW [Текст] / H. Wang [et al.]// J. Mater. Process. Technol. – 2004. – Vol. 148. - №1. - pp. 93–102.
27. Yang, D. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW заснований на additive manufacturing [Текст] / D. Yang, C. He, G. Zhang // J. Mater. Process. Technol. – 2016. – Vol. 227. - pp. 153-160.
28. Nikam, SH Thermal modeling geometry of single-track deposition in micro-plasma transfered arc deposition process [Текст] / SH Nikam, NK Jain, S. Jhavar // J. Mater. Process. Technol. – 2016. – Vol. 230. - pp. 121-130.
29. 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.
30. Montevecchi, F. Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process [Текст] / F. Montevecchi [et al.] // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 55. - pp. 109-114.
31. Zhang, YM Weld позиціонування-базований швидкий prototyping: A preliminary study [Текст] / YM Zhang [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2003. – Vol. 135. – pp. 347-357.
32. Bai, X. Modeling of moving induction heating used as secondary heat source in weld-based additive manufacturing [Текст] / X. Bai, H. Zhang, G. Wang // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2015. – Vol. 77. - № 1-4. - pp. 717-727.
33. Youheng, F. Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel [Текст] / F. Youheng [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2017. – Vol. 91. - № 1-4. - pp. 301-313.
34. Xiong, X. Новий метод прямого металу prototyping: hybrid plasma deposition and milling [Текст] / X. Xiong, Z. Haiou, W. Guilan // Rapid Prototyp. J. – 2008. – Vol. 14. - №1. - pp. 53–56.
35. Gu, J. Wire+Arc Additive Manufacturing of Aluminum

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

[Електронний ресурс] / J. Gua [et al.]. - Електрон. дано. (853 Кб). - SFF Symp. Austin Texas. – 2014. – pp. 451-458. Режим

36. Ding, J. Розробка ламінального потоку місцевої shielding device for wire + arc additive manufacture [Текст] / D. Ding [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2015. – Vol. 226. - pp. 99-105.

37. Karunakaran, KP Low cost integration additive and subtractive process for hybrid layered manufacturing [Текст] / KP Karunakaran [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. – 2010. – Vol. 26. – pp. 490-499.

38. Jhavar, S. Experimental investigation on geometrical aspects of micro-plasma deposited tool steel for repair applications [Текст] / S. Jhavar, CP Paul, NK Jain // Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. – 2014. – Vol. 32. – P. 1460347 (9 pages).

39. Ding, D. Multi-bead overlapping model для robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) [Текст] / D. Ding [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. – 2015. – Vol. 31. – pp. 101-110.

40. Shi, X. Selective laser melting-wire arc additive manufacturing hybrid fabrication of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties [Текст] / X. Shi [et al.] // Mater. SCI. Eng. A. – 2017. – Vol. 684. – pp. 196-204.

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

42. Spencer, JD Швидкий prototyping металеві частини з трьох dimensional welding [Текст] / JD Spencer, PM Dickens, WC Wykes // Mech. EJ Eng. Manuf. – 1998. – Vol. 212. - pp. 175-182.

43. Zhang, YM Automated system for welding-based rapid prototyping [Текст] / YM Zhang [et al.] // Mechatronics. - 2002. - Vol. 12. – pp. 37-57.

44. Song, YA 3D поглинання та milling: Part Ia direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes [Текст] / YA Song [et al.] // Int. J. Mach. Tools Manuf.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

– 2005. – Vol.45. - №9. - pp. 1057–1062.

45. Abe, T. Dissimilar metal deposition with stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing [Текст] / T. Abe, H. Sasahara // *Precis. Eng.* – 2016. – Vol. 45. - pp. 387-395.

46. Chen, X. Мікроструктури та механічні властивості аустенітичної стійкої сталі 316L виробляється за допомогою gas metal arc additive manufacturing [Текст] / X. Chen [et al.] // *Mater. SCI. Eng. A.* – 2017. – Vol. 703. - pp. 567-577.

47. Xiong, J. Vision-sensing and bead width control of single-bead multi-layer part: Material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing [Текст] / J. Xiong [et al.] // *J. Clean. Prod.* – 2013. – Vol. 41. – pp. 82-88.

48. Xiong, J. Online measurement of bead geometry в GMAW- базується additive manufacturing [Текст] / J. Xiong, G. Zhang // *Meas. SCI. Technol.* – 2013. – Vol. 24. – P. 115103 (7pp).

49. Cong, B. A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy За допомогою Cold Metal Transfer Process / B. Cong [et al.]. - Електрон. дано. (10.14 Мб). - *Appl. SCI.* – 2017. – Vol. 7. – № 3. – P. 275.

50. Aiyiti, W. Investigation of overlapping parameters of MPAW- based rapid prototyping [Текст] / W. Aiyiti [et al.] // *Rapid Prototyp. J.* – 2006. – Vol. 12. - №3.
- pp. 165-172.

51. Ribeiro, AF Rapid prototyping процеси з використанням металу безпосередньо / AF Ribeiro, J. Norrish // *B Proceedings of Seventh Annual Solid Free. Fabr. Symp. Austin.* -1996. – Vol. 10. – pp. 249-256.

52. Xiong, J. Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing [Текст] / J. Xiong, G. Zhang // *J. Mater. Process. Technol.* – 2014.
- Vol. 214. - №4. - pp. 962-968.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

53. Bai, XW Electromagnetically confined weld-based Additive Manufacturing [Текст] / XW Bai, HO Zhang, GL Wang // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 6. – pp. 515-520.

54. Haselhuhn, AS In situ формування субстратних виконань механізмів для gas metal arc weld metal 3-D printing [Текст] / AS Haselhuhn [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2015. – Vol. 226. - pp. 50-59.

55. Venturini, G. Optimization of WAAM Deposition Patterns для T-crossing Features [Текст] / G. Venturini [et al.] // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 55. - pp. 95-100.

56. Haden, CV Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties [Текст] / CV Haden [et al.] // Addit. Manuf. – 2017. – Vol. 16. – pp. 115–123.

57. Li, Y. Наповнені шпильки для розрядження моделі для wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts [Текст] / Y. Lee [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2018. – Vol. 252. - pp. 838-848.

58. Almeida, P. Innovative process model of Ti-6Al-4V Additive Layer manufacturing using cold metal transfer (CMT) [Текст] / P. Almeida, S. Williams // Solid Free. Fabr. Symp. – 2010. – pp. 25–36.

59. Dwivedi, R. Automated torch path planning використовуючи polygon subdivision для solidní freeform fabrication based on welding [Текст] / R. Dwivedi, R. Kovacevic // J. Manuf. Syst. – 2004. – Vol. 23. - №4. - pp. 278-291.

60. Xiong, J. Modeling шпильки роздільної системи і overlapping beads з experimental validation для robotic GMAW-базований швидкий manufacturing [Текст] / J. Xiong [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. – 2013. – Vol. 29. – pp. 417-423.

61. Ding, D. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation [Текст] / D. Ding [et al.] // J. Clean. Prod. – 2016. – Vol. 133. – pp. 942-952.

62. Xiong, J. Forecasting process parameters for GMAW-based rapid

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

manufacturing using closed-loop iteration based on neural network [Текст] / J. Xiong [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2013. – Vol. 69. - №1-4. - pp. 743-751.

63. Panchagnula, JS Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing [Текст] / JS Panchagnula, S. Simhambhatla // Robot. Comput. Integr. Manuf. – 2018. – Vol. 49. - pp. 194-203.

64. Xiong, J. Bead geometry prediction for robotic GMAW-базується швидке керування через neural network і двостороння регресування analysis [Текст] / J. Xiong [et al.] // J. Intell. Manuf. – 2014. – Vol. 25. - №1. - pp. 157-163.

65. Xu, X. Oxide accumulation effects на wire + arc layer-by-layer additive manufacture process [Текст] / X. Xu [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2018. – Vol. 252. - pp. 739-750.

66. Suryakumar, S. Розробка технологічних властивостей предметів побудови через повний розклад [Текст] / S. Suryakumar [et al.] // Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. – 2013. – Vol. 227. - №8. - pp. 1138-1147.

67. Kapil, S. Hybrid-layered manufacturing using tungsten inert gas cladding [Текст] / S. Kapil [et al.] // Prog. Addit. Manuf. – 2016. – Vol. 1. - № 1-2. - pp. 79–91.

68. Ma, Y. Діяльність interpass temperature on in situ alloying and additive manufacturing of titanium aluminides using gas tungsten arc welding [Текст] / Y. Ma [et al.] // Addit. Manuf. – 2015. – Vol. 8. – pp. 71-77.

69. Shen, C. Fabrication of Fe-FeAl Functionally Graded Material За допомогою Wire-Arc Additive Manufacturing Process [Текст] / C. Shen [et al.] // Metall. Mater. Trans. B. – 2016. – Vol. 47. - №1. - pp. 763-772.

70. Shen, C. Fabrication of iron-rich Fe-Al intermetallics використовуючи wire-arc additive manufacturing process [Текст] / C. Shen [et al.] // Addit. Manuf. – 2015. – Vol. 7. - pp. 20–26.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

71. Bermingham, MJ Controlling microstructure i properties of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V with trace boron additions [Текст] / MJ Bermingham [et al.] // Acta. Mater. – 2015. – Vol. 91. – pp. 289-303.

72. Yin, B. Діяльність CaF₂ монтажу на макро/мікроструктури та механічні властивості wire i arc additive виконані Ti-6Al-4V components [Текст] / B. Yin [et al.] // Mater. Lett. – 2017. – Vol. 190. – pp. 64–66.

73. Wang, F. Microstructure i механічні властивості wire i arc additive manufactured Ti-6Al-4V [Текст] / F. Wang [et al.] // Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. SCI. – 2013. – Vol. 44. - №2. - pp. 968-977.

74. Wang, F. Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding [Текст] / F. Wang [et al.] // Mater. SCI. Eng. A. – 2016. – Vol. 676. - pp. 395-405.

75. Mereddy, S. Grain refinement of wire arc additively manufactured titanium by addition of silicon [Текст] / S. Mereddy [et al.] // J. Alloys Compd. – 2017. – Vol. 695. - pp. 2097-2103.

76. Shen, C. In-depth štúdiá механічних властивостей для Fe₃Al заснована ізоляція aluminid fabricated використовуючи wire-arc additive manufacturing process [Текст] / C. Shen [et al.] // Mater. SCI. Eng. A. – 2016. – Vol. 669. - pp. 118-126.

77. Ma, Y. Вплив результатів післявиробництва важливих заходів на g-TiAl всі виробляються з GTAW-базовані додаткові процеси управління [Текст] / Y. Ma [et al.] // Mater. SCI. Eng. A. – 2016. – Vol. 657. - pp. 86-95.

					МРТАМ 23. 22373.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81