

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет

(повне найменування факультету)

Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Дослідження особливостей технології вирощування виробів з

(назва теми)

нікелевих жароміцних сплавів методом плазмового наплавлення із
застосуванням присадного дроту»

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи ІФ-412м

Спеціальності 131 Прикладна механіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Відновлення та підвищення зносостійкості

деталей і конструкцій

САХНО С.С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ЛАПТЄВА Г.М.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ПЕТРИК І.А.

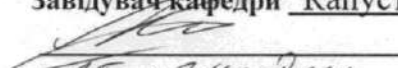
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний факультет
 Кафедра Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 131 Прикладна механіка
(код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Відновлення та підвищення зносостійкості
(назва освітньої програми (спеціалізації))
деталей і конструкцій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Капустян О.Є.


 «15» грудня 2023 року

З А В Д А Н Н Я
 НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

САХНО Сергій Сергійович

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Дослідження особливостей технології вирощування виробів з нікелевих жароміцних сплавів методом плазмового наплавлення із застосуванням присадного дроту»

керівник проєкту (роботи) канд.техн.наук, доцент ЛАПТЄВА Ганна Миколаївна,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «15» грудня 2023 року №509

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Креслення виробу, матеріал – жароміцний нікелевий сплав ЕП648-ВІ, вимоги до технології виготовлення.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз вихідних даних і технічне завдання на розробку;

2. Розробка методики дослідження і проведення експериментів; 3. Результати досліджень і їх застосування 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) 1.Зовнішній вигляд двигуна АІ-222 та місце розташування виробу; 2. Креслення виробу та характеристики матеріалу; 3. Визначення оптимальних параметрів режиму адитивного вирощування; 4. Мікроструктура матеріалу; 5. Механічні властивості матеріалу; 6. Фрактограми розривних зразків після механічних випробувань; 7. Схема та режими вирощування кільця корпусу внутрішнього ТВТ.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	ЛАПТЄВА Г.М. к.т.н, доцент	<i>16.10.2023</i>	<i>15.12.2023</i>

7. Дата видачі завдання « 16 » жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз вихідних даних	16.10 – 29.10	<i>викон</i>
2	Розробка методики дослідження	30.10 – 05.11	<i>викон</i>
3	Результати досліджень і їх застосування	06.11 – 26.11	<i>викон</i>
4	Охорона праці	27.11 – 03.12	<i>викон</i>
5	Графічна частина	16.10 – 03.12	<i>викон</i>

Студент(ка)

Саш
(підпис)

Сергій САХНО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

ГЛ
(підпис)

Ганна ЛАПТЄВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 111 с., 9 табл., 41 рис., 78 джерел.

АДИТИВНЕ ВИРОЩУВАННЯ, ДРОТЯНО-ДУГОВЕ АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО, ГОРЯЧІ ТРИЩІНИ, ЖАРОМІЦНІ СПЛАВИ, КІЛЬЦЕ КОРПУСУ ВНУТРІШНЬОГО ТВТ, ПЛАЗМОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ.

Об'єкт дослідження – технологічний процес адитивного вирощування кільця корпусу внутрішнього ТВТ двигуна AI-222 методом плазмового наплавлення з використанням присадного дроту.

Мета дипломного проекту – зниження трудомісткості та вартості виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ з жароміцного нікелевого сплаву EP648-VI завдяки розробленню технології адитивного вирощування методом плазмового наплавлення з використанням присадного дроту.

Методи дослідження – проведення експериментальних досліджень, макро- і мікроструктурний аналіз зразків, отриманих методом плазмового наплавлення. Виконання гарячого ізостатичного пресування для усунення гарячих трищін та підвищення механічних властивостей матеріалу, отриманого адитивним вирощуванням. Визначення механічних властивостей матеріалу з використанням стандартних методик на атестованому обладнанні.

Для виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ були підібрані оптимальні режими адитивного вирощування, а також подальшої обробки методом ГП для забезпечення заданих механічних властивостей. Розроблено технологію адитивного вирощування методом плазмового наплавлення на роботизованій установці.

Розроблено загальні заходи з техніки безпеки з охорони праці при розробленні технології та дослідженні зразків при роботі в дослідницькій лабораторії.

ABSTRACT

Explanatory note: 111 p., 9 tab., 41 fig., 78 sources.

ADDITIVE MANUFACTURING, WIRE-ARC ADDITIVE MANUFACTURING, HOT CRACKS, HEAT-RESISTANT ALLOYS, INNER TUBE HOUSING RING, PLASMA SURFACING.

The object of research is the technological process of additive growth of the ring of the internal fuel assembly of the AI-222 engine by plasma surfacing using filler wire.

The purpose of the thesis project is to reduce the labor intensity and cost of manufacturing rings of the internal fuel assembly from the heat-resistant nickel alloy EP648-VI by developing the technology of additive growth by plasma surfacing using filler wire.

Research methods – experimental studies, macro- and microstructural analysis of samples obtained by plasma surfacing. Performing hot isostatic pressing to eliminate hot cracks and improve the mechanical properties of the material obtained by additive growth. Determination of the mechanical properties of the material using standard methods on certified equipment.

Optimal modes of additive growth and subsequent GIP treatment were selected for the manufacture of the inner fuel element housing ring to ensure the specified mechanical properties. The technology of additive growth by plasma surfacing on a robotic installation was developed.

The general safety measures for labor protection during the development of technology and the study of samples during work in the research laboratory were developed.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз вихідних даних і технічне завдання на розробку	12
1.1 Призначення, конструкція і матеріал кільця корпусу внутрішнього ТВТ	12
1.2 Вибір способу виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ	16
1.3 Аналіз літературних даних з адитивного виробництва металевих виробів	18
1.3.1 Огляд технології адитивного формування металевих виробів пошаровим дуговим наплавленням.....	24
1.3.2 Способи дугового наплавлення, що застосовуються для адитивного виробництва.....	30
1.3.3. Плазмове наплавлення неплавким електродом	36
1.4 Формулювання цілей і завдання на проведення дослідження	39
2 Розробка методики дослідження і проведення експериментів.....	42
2.1 Визначення оптимальних параметрів режиму вирощування та виготовлення зразків.....	42
2.2 Гаряче ізостатичне пресування і термообробка зразків	43
2.3 Металографічний аналіз.....	44
2.4 Механічні випробування.....	46
2.5 Фрактографічний аналіз.....	47
3 Результати досліджень і їх застосування	48
3.1 Механізми зміцнення та морфологія фаз високолегованих нікелевих сплавів.....	48
3.2 Визначення оптимальних параметрів режиму прямого вирощування методом плазмового наплавлення.....	52

3.3	Дослідження мікроструктури матеріалу, отриманого прямим вирощуванням методом плазмового наплавлення до і після ГП	59
3.4	Механічні властивості матеріалу, отриманого прямим вирощуванням методом плазмового наплавлення до і після ГП	66
3.5	Технологія виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ методом прямого вирощування плазмовим наплавленням	74
3.6	Контроль якості виробів отриманих прямим вирощуванням методом плазмового наплавлення	80
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	83
4.1	Аналіз потенційних небезпек	83
4.2	Заходи по забезпеченню техніки безпеки	85
4.2.1	Захист працівників у робочій зоні	85
4.2.2	Заходи з електробезпеки	86
4.2.3	Заходи безпеки при виконанні процесів дослідження	89
4.2.4	Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці	92
4.2.5	Заходи по забезпеченню пожежної безпеки	93
4.3	Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях	95
	Висновки	100
	Перелік джерел посилання	102

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АВ – Адитивне виробництво;
- ГП – Гаряче ізостатичне пресування;
- ГТД – Газотурбінний двигун;
- КВТ – Компресор високого тиску;
- ККД – Коефіцієнт корисної дії;
- ПЗ – Поздовжній;
- ПО – Поперечний;
- ТВТ – Турбіна високого тиску;
- ТПГ – Дугове наплавлення неплавким електродом в середовищі захисного газу;
- ТНТ – Турбіни низького тиску;
- ТО – Термообробка;
- СМТ – Cold Metal Transfer;
- GMAW – Дугове зварювання плавким електродом у захисному газі;
- GTAW – Дугове зварювання неплавким вольфрамовим електродом у захисному газі;
- PAW – Плазмово-дугове зварювання;
- SLS – Селективне лазерне спікання;
- WAAM – Адитивні технології з використанням дугового джерела нагріву.

ВСТУП

Виготовлення складних габаритних металевих виробів з використанням традиційних технологій (лиття, кування, штампування та ін.) стикається з великими труднощами і потребує значних ресурсів під час виробництва.

Нині дедалі більший інтерес викликають технології створення об'ємних твердотільних виробів способами адитивного пошарового нарощування. На відміну від традиційних, так званих субтрактивних, технологій, які передбачають виготовлення виробу шляхом відсікання від заготовки «зайвого» матеріалу, адитивні дозволяють створювати геометрію виробу пошарово з мінімальними його витратами [1].

Адитивні технології дають змогу отримувати деталі різноманітної геометричної форми шляхом пошарового нанесення матеріалу на підкладку або елемент готового виробу, виходячи з цифрової моделі об'єкта, що істотно скорочує витрати.

У виробництві газотурбінних двигунів (ГТД) останніми роками відбуваються революційні зміни, пов'язані зі створенням і розширенням застосування нових технологій, здатних докорінно поліпшити якісні показники випущених виробів і умови виробництва. Їх називають пріоритетними, ключовими або критичними технологіями. До таких технологій, зокрема, належать технології безпосереднього отримання тривимірних об'єктів на основі математичної моделі виробу [2].

Інтерес авіаційно-космічної галузі до адитивних технологій виникає саме як альтернатива традиційним технологічним методам виробництва функціональних деталей. Це новий підхід до проектування та виготовлення деталей порівняно з традиційними методами. Основні переваги заміни традиційних технологій виготовлення деталей на адитивні процеси полягають у зниженні на порядок часу виробничого циклу дрібносерійного виробництва; скорочення та спрощення технологічних ланцюжків.

Найбільш поширеним і широко використовуваним є метод селективного лазерного спікання SLS (Selective Laser Sintering), що дає змогу пошарово створювати зі спеціального порошкового матеріалу об'ємні металеві вироби складної геометрії. Створення таких виробів традиційними методами викликає великі труднощі, і коефіцієнт використання матеріалу в цьому випадку невеликий.

Водночас установки для селективного лазерного спікання є дорогими і складними пристроями. Впровадження адитивних технологій у виробничих умовах викликає суттєві труднощі.

Перспективним напрямком є використання дугових зварювальних технологій для пошарового адитивного наплавлення металевих виробів. Дугові технології орієнтовані на створення великогабаритних виробів із високою продуктивністю. При цьому знижується точність формованих заготовок, збільшуються припуски на подальшу механічну обробку [3]. Підвищення продуктивності процесу при одночасному забезпеченні високої точності одержуваного виробу є актуальним завданням.

Як вихідну сировину використовують порошки, дроти, а також їхні комбінації. Порошкові матеріали застосовуються для створення малогабаритних виробів зі складною геометрією. Застосування присадних дротів переважно для адитивного виробництва великогабаритних виробів відносно простої форми. Присадний дріт є основним вихідним матеріалом для формування виробів дуговим наплавленням [3].

Найпоширенішими серед дугових технологій, які застосовують під час адитивного вирощування, є три: GMAW (Gas Metal Arc Welding) – дугове зварювання плавким електродом у захисному газі, GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) – дугове зварювання неплавким вольфрамовим електродом у захисному газі, PAW (Plasma Arc Welding) – плазмово-дугове зварювання. Усі вони належать до WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – адитивних технологій з використанням дугового джерела нагріву та дротяного присадного матеріалу [5].

Найбільший інтерес представляє розробка адитивних технологій на основі PAM, тому що таке зварювання набуває дедалі більшого поширення на підприємствах завдяки своїй відносно високій продуктивності, ступеню механізації та можливостям управління процесом, а також широкій номенклатурі дротів для зварювання і наплавлення найрізноманітніших матеріалів і сплавів.

Плазмове наплавлення забезпечує низку технологічних та економічних переваг: висока продуктивність, регулювання теплопередачі в широких межах і, як наслідок, управління глибиною та шириною проплавлення, структурою, складом і властивостями формованого матеріалу [5].

Під час виробництва сучасних ГТД основними матеріалами для виготовлення деталей гарячого тракту є жароміцні нікелеві сплави. Під час адитивного виробництва заготовок із нікелевих жароміцних сплавів однією з основних проблем є поява так званих гарячих тріщин у процесі вирощування. Гарячі тріщини можуть мати руйнівний вплив на працездатність деталей, особливо під час циклічного навантаження. Це складна проблема, викликана безліччю металургійних реакцій у поєднанні з наявністю залишкових напружень. Шляхом контролю параметрів процесу вирощування ці ефекти можуть бути пом'якшені, що зменшує ризик виникнення гарячих тріщин. Крім того, оскільки повне усунення дефектів малоімовірно лише за допомогою оптимізації процесу, необхідно розглянути подальшу обробку заготовок після адитивного вирощування з використанням гарячого ізостатичного пресування (ГІП).

1 АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ І ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА РОЗРОБКУ

1.1 Призначення, конструкція і матеріал кільця корпусу внутрішнього ТВТ

У даній роботі розглядається кільце корпусу внутрішнього турбіни високого тиску (ТВТ) двигуна АІ-222 (рис. 1.1), призначеного для навчально-тренувальних і навчально-бойових літаків типу ЯК-130 та ін. Є перспектива використання цих двигунів у безпілотних літальних апаратах [6].



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд двигуна АІ-222

Двигун АІ-222 є двоконтурним турбореактивним двигуном, виконаним за двовальною схемою. У цих ГТД частина потоку повітря потрапляє за класичною схемою в газогенератор, а інша холодна частина проходить через другий зовнішній контур, створюючи тим самим основну тягу, що знижує витрату пального і шум двигуна. Відношення кількості повітряного потоку, що прокачується через зовнішній і внутрішній контур, називається ступенем двоконтурності.

Двигун складається з вентилятора, розділового корпусу 8 (рис. 1.2) з коробкою 23 приводів, компресора 9 високого тиску (КВТ), камери згоряння 11,

турбіни 20 високого тиску (ТВТ), турбіни 19 низького тиску (ТНТ), опори 16 турбіни, стікача 18 і насадка 17 реактивного сопла. Відповідно до двовальної схеми двигун має два самостійні ротори:

- низького тиску (НТ), що складається з ротора вентилятора, встановленого на двох підшипниках, і ротора ТНТ, встановленого на одному підшипнику, що спирається через евольвентне шліцьове з'єднання на ротор вентилятора;

- високого тиску (ВТ), що складається з роторів КВТ і ТВТ, які жорстко з'єднані один з одним і встановлені на двох підшипниках, один з яких - міжвальний, встановлений між роторами ТВТ і ТНТ.

Ротори НТ і ВТ мають різні оптимальні для них частоти обертання і пов'язані між собою тільки газодинамічним зв'язком. Під час запуску двигуна стартер розкручує тільки ротор високого тиску.

Конструкцію двигуна виконано з урахуванням забезпечення принципу модульного (блокового) збирання. Двигун розділений на 12 основних модулів, кожен з яких – закінчений конструктивно технологічний вузол і може бути демонтований і замінений на двигуні без розбирання сусідніх модулів в умовах авіаційно-технічних баз, крім головного модуля.

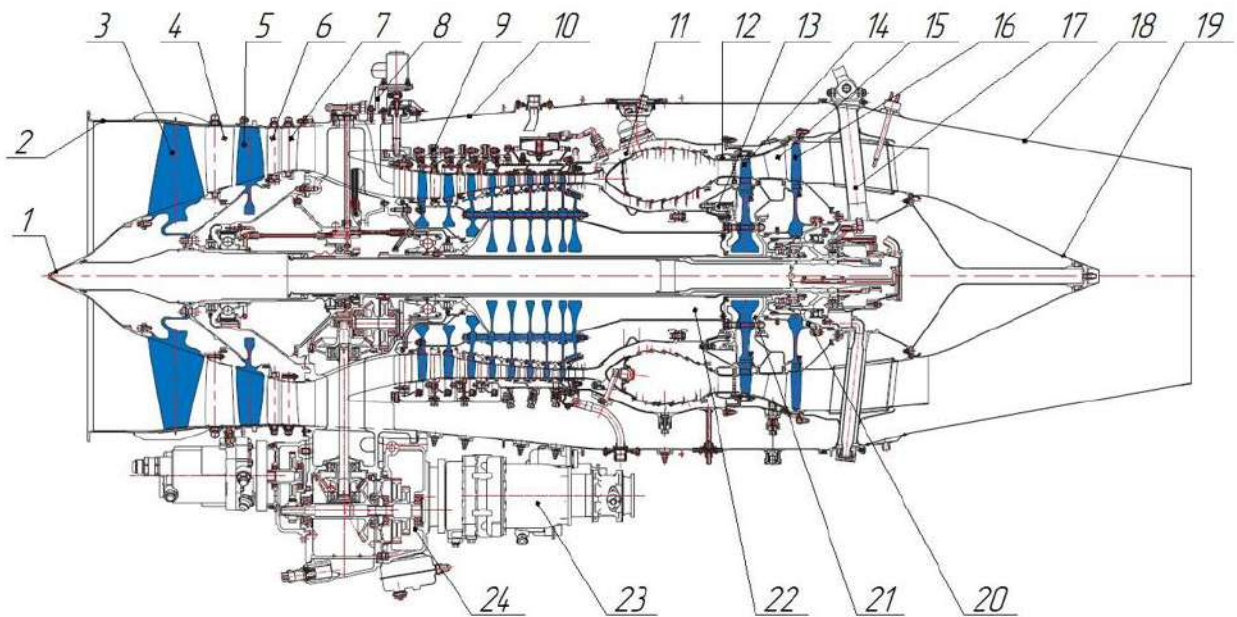
Модульність конструкції двигуна забезпечує можливість відновлення його справності заміною деталей і вузлів в умовах експлуатації.

Турбіна складається з одноступеневої турбіни 20 високого тиску й одноступеневої турбіни 19 низького тиску, опори 16 турбіни, реактивного насадка 17 і стікача 18.

Турбіна 20 високого тиску (ТВТ) – охолоджувана, осьова, реактивна, одноступенева, складається зі статора і ротора. Статор ТВТ складається з соплового апарата 12 ТВТ, зовнішнього корпусу, проставок над робочими лопатками і внутрішнього корпусу 13 з елементами лабіринтових ущільнень. Лопатки соплового апарату 12 ТВТ охолоджені й об'єднані в сектори.

Ротор ТВТ складається з робочого колеса 14, лабіринтового диска, цапфи задньої і переднього екрана. Колесо ротора містить диск і робочі лопатки, зафіксовані ущільнювальним диском. Робочі лопатки ТВТ литі охолоджені.

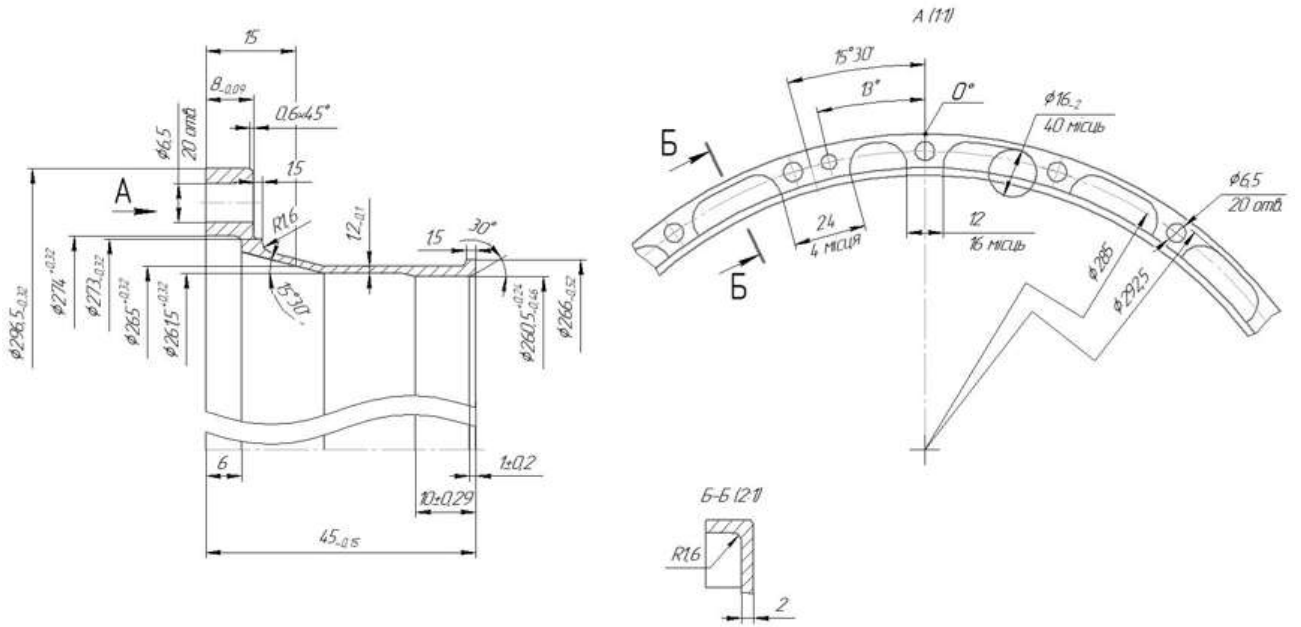
Опора ротора ТВТ – міжвальна, між задньою цапфою ротора ТВТ і валом ротора ТНТ, виконана з роликівим підшипником [6].



1 – кок; 2 – корпус вентилятора; 3 – колесо 1-ї ст. вентилятора; 4 – направляючий апарат 1 ст.; 5 – колесо 2-ї ст. вентилятора; 6 – направляючий апарат 2 ст.; 7 – спрямляючий апарат вентилятора; 8 – розділювальний корпус; 9 – компресор високого тиску; 10 – зовнішній корпус; 11 – камера згоряння; 12 – сопловий апарат ТВТ; 13 – корпус внутрішній ТВТ; 14 – робоче колесо; 15 – сопловий апарат ТНТ; 16 – робоче колесо; 17 – опора турбіни; 18 – насадок реактивного сопла; 19 – стікач; 20 – турбіна низького тиску; 21 – турбіна високого тиску; 22 – вал турбіни; 23 – повітряний турбостартер; 24 – коробка приводів.

Рисунок 1.2 – Розріз двигуна AI-222

Розглянуте кільце корпусу внутрішнього ТВТ являє собою кільцеву деталь (рис. 1.3). Деталь працює в умовах високих температур і виготовляється з жароміцного нікелевого сплаву ЕП648-ВІ (ХН50ВМТЮБ). Цей сплав застосовується для виготовлення деталей авіаційної техніки, що працюють за температур до +950 °С. Хімічний склад і механічні властивості сплаву представлені в табл. 1.1 і табл. 1.2 відповідно.



а – креслення кільця



б – 3D модель кільця

Рисунок 1.3 – Кільце корпусу внутрішнього ТВТ

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сплаву ЕП648-ВІ (ХН50ВМТЮБ) згідно ТУ 14-1-3046-80 [7]

C	Mn	Cr	W	Ti	Si	Nb	Mo	Fe	Al	Ni
≤0,10	≤0,50	32,0 – 35,0	4,3 – 5,3	0,5 – 1,1	≤0,4	0,5 – 1,1	2,3 – 3,3	≤4,0	0,5 – 1,1	Осн.

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сплаву ЕП648-ВІ [7]

Температура, °C	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ, Дж/см ²
20	780	345	25	-	35
800	340	-	13	18	-

1.2 Вибір способу виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ

На підприємстві дане кільце традиційним способом виготовляють шляхом точіння і фрезерування поковки (рис. 1.4), яку отримують штампуванням прутка сплаву ЕП648-ВІ круглого перерізу діаметром 150 мм.

Так як дане кільце є тонкостінною деталлю то при традиційному способі виготовлення маємо дуже низький коефіцієнт використання матеріалу так як велика частина заготовки переходить у відходи у вигляді стружки. Також традиційний спосіб виготовлення займає великий проміжок часу і вимагає підготовки великої кількості кваліфікованого персоналу.

Тому було прийнято рішення розробки технології виготовлення даної деталі методами адитивних технологій.

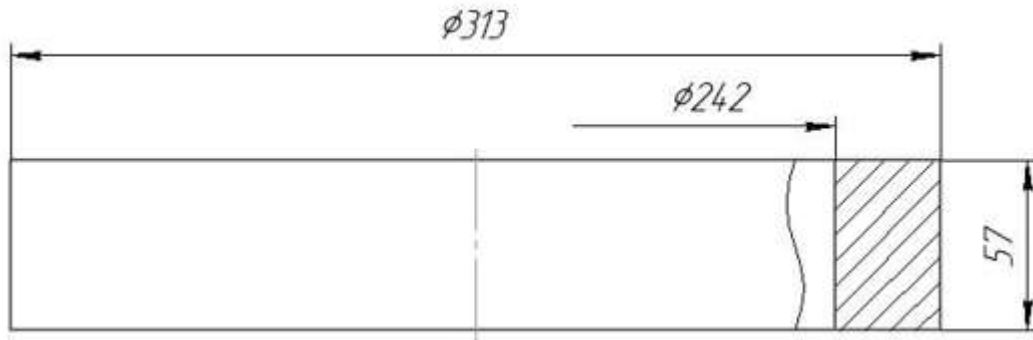


Рисунок 1.4 – Ескіз поковки для виготовлення кільця

Переваги адитивних технологій:

- скорочення робочого процесу і значне зменшення виробничих відходів.

Створення деталей традиційним способом досить трудомісткий процес. Спочатку робиться заготовка, потім виточується на різних інструментах. Це довго і в результаті утворюється багато відходів. При виготовленні деталей литтям, необхідно на початку виготовити форми. Використання адитивних технологій дозволяє обходитися без попередніх заготовок, а матеріалу потрібно значно менше так як заготовка, отримана адитивними методами, максимально повторює контури готової деталі з мінімальними припусками на механічну обробку;

- скорочення матеріалів на виготовлення та зниження собівартості виробів.

З впровадженням адитивних технологій значно скорочується кількість матеріалів для виготовлення деталей, а значить, собівартість готового продукту буде нижче. У деяких галузях при традиційних способах виробництва виробничі відходи можуть становити до 80%;

- варіативність і індивідуалізація виробів. Для виготовлення різних варіантів виробу досить внести невеликі зміни в 3D-модель або програму. Це дуже зручно, коли в стислі терміни потрібно вдосконалити виріб або представити кілька варіантів. Також це добре для виготовлення одиничних деталей;

- швидкість і легкість навчання персоналу. Навчитися створювати тривимірні моделі або написання програм для вирощування набагато простіше, ніж навчання створенню таких виробів ручним способом. Тим більше, що часу на це піде набагато менше.

1.3 Аналіз літературних даних з адитивного виробництва металевих виробів

Терміном «адитивне виробництво» (АВ) прийнято називати групу технологічних способів швидкого прототипування, які дозволяють створювати цілісні, об'ємні вироби з різних матеріалів за тривимірною комп'ютерною моделлю [8]. Стандарт ASTM F2792-12A дає визначення терміну АВ як «спосіб з'єднання матеріалів, при якому відбувається пошарове створення об'єкта за заданою цифровою тривимірною моделлю». Перші методи АВ, що з'явилися на початку 1980-х років, були спеціалізовані на виробництві виробів з полімерних пластиків і гум. В даний час ці способи знайшли успішне та комерційне застосування в таких галузях, як аерокосмічне виробництво, машинобудування, медицина, архітектура та дизайн, побутова електроніка, ювелірне виробництво, військова промисловість [9]. Поряд з розвитком способів АВ, що використовують в якості сировини полімерні матеріали, розвивалися і способи, що використовують металеві сплави.

Можливість виготовлення металевого виробу кінцевої форми або близької до кінцевої в одну технологічну операцію є перспективною в галузі безпосереднього виробництва. Умовна сфера застосування способу виробництва, за інших рівних умов, може бути представлена у вигляді залежності складності форми від кількості виробів. На рис. 1.5 представлена сфера застосування АВ у сфері металургійного виробництва [9]. Способи АВ

можуть бути конкурентоспроможними при необхідності виготовлення невеликої кількості виробів або деталей складної форми або виробів із заданою структурою.

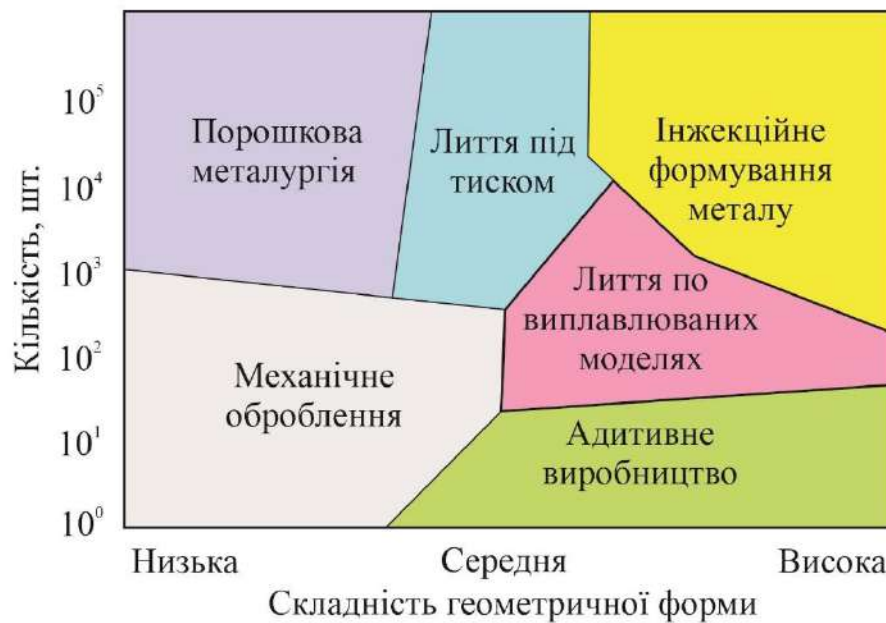


Рисунок 1.5 – Якісна позиція галузі застосування АВ щодо поширених способів виробництва

Порівняно з класичними способами виробництва (включаючи механічну обробку на фрезерних верстатах з ЧПУ), способи АВ мають певні переваги:

- можливість повної автоматизації процесу створення виробу (включаючи етап створення цифрової тривимірної моделі), що знижує кількість людино-годин, необхідних на виготовлення виробу, та загалом знижує загальний час виготовлення;

- конкурентоспроможність застосування способів АВ виготовлення виробів з дорогих титанових і нікелевих сплавів, зважаючи на низький коефіцієнт витрати матеріалу. Ця перевага особливо важлива в галузі аерокосмічної промисловості, виготовлення деталей якої найчастіше характеризується високим коефіцієнтом витрати матеріалу.

Способи АВ для виготовлення металевих виробів класифікують за такими критеріями:

1. За типом застосовуваних матеріалів поділяють на порошкові та дротяні. Вид і тип використовуваного матеріалу визначається виходячи з властивостей, галузі застосування, технології адитивного виробництва та ін.

Способи, що використовують порошок в якості присадного матеріалу, на даний момент ширше впроваджені в порівнянні зі способами, що використовують дріт, у зв'язку з можливістю виготовляти вироби зі значною геометричною точністю. Крім того, способи, що використовують металевий порошок, дають можливість виготовляти вироби з металевих порошкових композицій, що мають властивості, які притаманні виробам порошкової металургії, проте продуктивність порошкових способів АВ дуже низька, що обчислюється десятками грамів на хвилину, що обмежує можливість їх застосування для виготовлення великорозмірних виробів. До того ж необхідність захисної камери та особливості транспортування та зберігання металевих порошкових матеріалів накладають певні складності застосування порошкових способів АВ.

В основному для адитивного виробництва металевих виробів застосовують порошки з дисперсністю від 10 мкм до 40 мкм. Також можуть застосовуватись порошки середньої дисперсності від 40 мкм до 250 мкм та високодисперсні від 0,1 мкм до 10 мкм [3, 10]. Мінімальний розмір частинок порошків дозволяє отримувати тонкостінні вироби складної форми. Однак порошкові матеріали мають такі недоліки:

- виконання трудомістких підготовчих технологічних операцій: сушіння, просіювання, очищення і т.п;
- фракційна неоднорідність (несферичність, різнодисперсність);
- необхідність спеціального обладнання для підготовки, транспортування, очищення порошкових матеріалів;
- висока вартість.

Присадні 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 присадний дріт має значно меншу питому площу поверхні, ніж порошкові матеріали яка менш схильна до окислення і поглинання вологи або забруднюючих речовин. Система подачі присадного дроту в зону наплавлення значно простіше і компактніше порошкового живильника.

Способи АВ, що використовують в якості присадного матеріалу дріт, порівняно з порошковими способами АВ мають практично 100%-ву ефективністю використання матеріалу, а також значно більшу масову продуктивністю, що виправдовує застосування способів для створення великогабаритних виробів. Незважаючи на низьку точність і грубу поверхню, способи, які використовують дріт, дають можливість виготовляти заготовки деталей при значній економії матеріалу на наступних стадіях обробки.

При дослідженні металу виробів, виконаних за технологіями АВ з використанням дроту та порошку [11], відзначено схожість мікроструктури зразків, виконаних різними способами. Тим не менш, відзначається наявність деякої пористості металу виробу, виконаного за технологією АВ з використанням порошку.

2. 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 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристики джерел нагріву, що застосовуються в процесах адитивного виробництва [11]

	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	0,1 – 3,0	1 – 4
Мінімальна ширина створюваного елемента, мм	0,02 – 0,10	0,02 – 0,10	1,5 – 2,0
Захист зони побудови	вакуум (камера)	захисний газ (місцева)	захисний газ (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 – 0,5	1 – 3

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.

Зазначається [9], що лазерні способи АВ відрізняються підвищеною точністю, порівняно з іншими способами, які використовують дріт. Проте, лазерні методи об'ємного наплавлення мають низьку енергетичну ефективність від 2% до 5%. Способи електронно-променевого адитивного наплавлення мають

значно більшу енергетичну ефективність від 15% до 20%, проте спочатку спосіб електронно-променевого наплавлення довільних металевих форм був розроблений у NASA для перспективного застосування в космічному просторі [12] і вимагає застосування обладнання для створення вакуумного середовища. Відповідно розмір деталей, виготовлених електронно-променевим наплавленням обмежений розміром вакуумної камери (з урахуванням розміщеного в ній обладнання). Крім того, необхідність роботи з вакуумним обладнанням накладає певні складнощі на застосування способу.

Порівняно з лазерним та електронно-променевим наплавленням, електродугове наплавлення довільних форм, із залученням способів електродугового зварювання плавким або неплавким електродом у захисному газі має значну енергоефективність. Деякі способи TIG або MIG зварювання можуть досягати енергоефективності до 90%. Проте всі способи АВ дротом мають ряд загальних особливостей, таких як залишкові напруження та деформації виробу, викликані інтенсивним нагріванням, відносно низька точність виготовлення та характерна «ступінчаста» поверхня. Однак способи дротяного АВ залишаються перспективною областю металургійного виробництва, що розвивається і, особливо, способи електродугового адитивного виробництва. На даний момент відносно небагато публікацій присвячено проблемі адитивного виробництва на основі електродугової зварювальної технології. І хоча перші статті, присвячені електродуговому адитивному наплавленню, з'явилися в 1990-і роки [13], проблеми формування структури металу шва, проблеми, пов'язані з формоутворенням шва в нестационарних умовах тепловідведення, залишаються невирішеними та актуальними.

1.3.1 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 показано на рис. 1.6 [14].

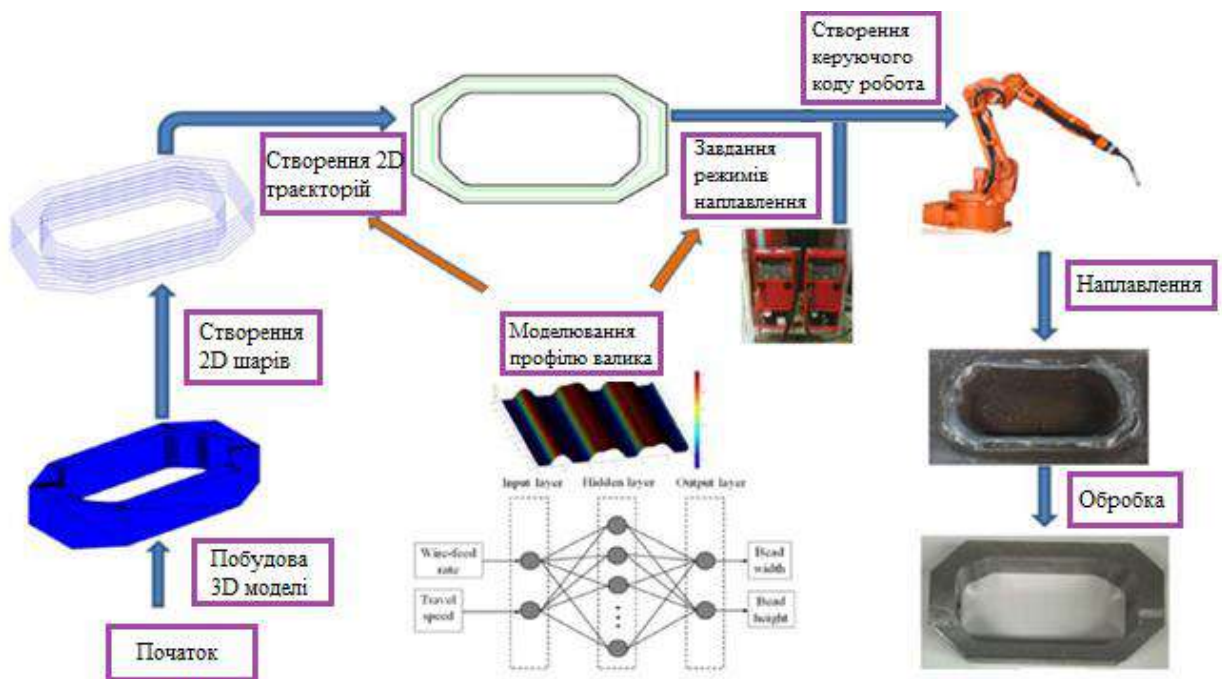


Рисунок 1.6 – Структурна схема процесу гібридного формування виробу із застосуванням WAAM

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 рис. 1.6, моделювання форми одиночного

валика є основою програмування виробничого процесу, а саме визначення кількості проходів та положення кожного валика.

Геометрія наплавленого компонента формується за заданою ієрархією. Схема створення виробу показано на рис. 1.7. 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.

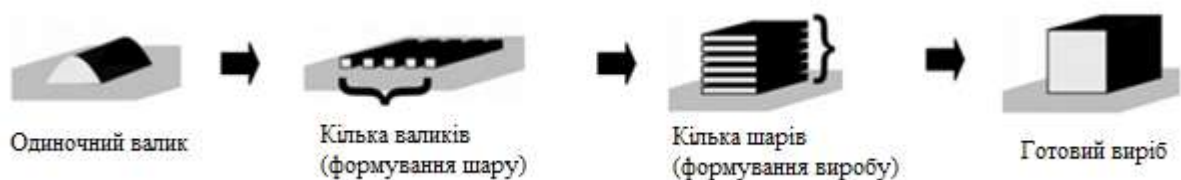


Рисунок 1.7 – Алгоритм побудови виробу способом WAAM [15]

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 тепловкладення було достатнім для сплавлення присадного та основного металу. Надлишок тепла, що підводиться, сприяє надмірному проплаву попереднього шару і розтіканню зварювальної ванни. Недолік – відсутність сплавлення [16 – 18].

Визначення взаємозв'язків між формою валика та параметрами режиму наплавлення, включаючи моделювання всіх фізичних процесів, спричиняє труднощі. 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 з геометрією валика, а також дозволяла робити вибір параметрів режиму наплавлення з урахуванням еволюції мікроструктури і механічних властивостей кінцевих виробів.

Існує велика кількість робіт, присвячених дослідженню геометрії одиночного валика, у тому числі – моделювання та передбачення основних параметрів валика [16, 19, 20]. Однак, для WAAM отримані моделі виявилися частково або повністю непридатними. Це зв'язано з тим що:

- попередні дослідження базувалися на вимірі лише висоти та ширини валика, замість побудови повного профілю поперечного перерізу [21];
- відсутній метод аналізу помилок та перевірка точності надійним способом [20, 22];
- розглядається вплив лише основних чинників щодо геометрії валика, а ефекти взаємодії цих чинників не враховуються [23];
- складні моделі, що враховують велику кількість різних фізичних взаємодій, потребують тривалого часу розрахунку [24].

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 [15, 18 – 20, 25 – 27].

Крім параметрів процесу слід враховувати низку таких факторів, як:

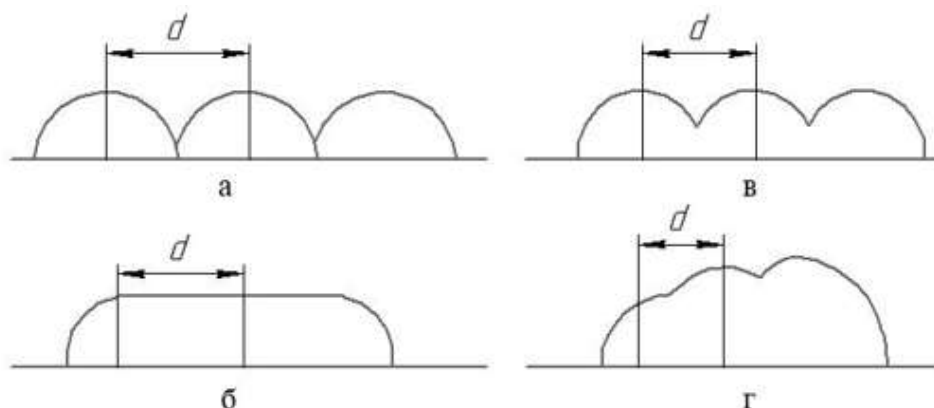
- зміщення дроту від центру дуги, яке може призвести до спотворення геометрії валика [28];
- температуру підкладки та попереднього шару [25, 26];
- зміну довжини дуги [25, 26];
- тепловміст краплі та характер перенесення присадного металу [29];
- швидкість охолодження [29].

Діапазони вхідних параметрів визначаються за допомогою попередніх експериментів. Режим наплавлення, при якому процес стабільний і без розбризування, вважається оптимальним. Зміна швидкості наплавлення у межах від 0,2 м/с до 1,2 м/с є ефективним способом керування формою валика.

Встановлено, що при фіксованому значенні сили струму існує критична швидкість наплавлення, вище за яку відбувається утворення дефекту Humping («пилкоподібний шов») [15, 24 – 26].

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 [15].

Процес формування шару є наплавлення одиночних валиків по траєкторії (рис. 1.8). 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 [11].



а – надмірна відстань між валиками призводить до утворення вогнутості між валиками; б – оптимальна відстань між валиками, площа перекриття дорівнює площі вогнутості; в – площа перекриття менше площі вогнутості; г – надмірне перекриття, площа перекриття більше площі вогнутості

Рисунок 1.8 – Вплив міжцентрової відстані на хвилястість наплавленої поверхні

Усунути хвилястість шару можна такими способами:

- пошарова механічна обробка шляхом фрезерування наплавленого шару до площини [21];
- управління процесом наплавлення виходячи зі створеної математичної моделі.

Основними моделями, що застосовуються в WAAM, є традиційна та тангенційна [18, 22, 30].

У традиційній моделі спочатку вводяться такі параметри: висота (g) та ширина (e) одиночного валика, а також міжцентрова відстань (d) (рис. 1.9). Як апроксимуюча функція профілю валика найчастіше застосовується парабола. Коли $d > e$, відсутнє перекриття у межах двох сусідніх валиків (див. рис. 1.8, а). При зменшенні d до певного значення площа перекриття стає рівною площі вогнутості, і поверхня шару стає плоскою (див. рис. 1.8, б). При подальшому зменшенні d надмірна площа перекриття призводить до збільшення товщини нанесеного шару і хвилястості поверхні (див. рис. 1.8, г). Експериментально доведено, що неможливо досягти ідеальної плоскої поверхні, що призводить до накопичення помилок у вертикальному напрямку та порушення стабільності наплавлення [18, 31, 32].



Рисунок 1.9 – Схема наплавленого шару [18]

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% (тангенційна) [31].

Іншим важливим завданням є формування траєкторії руху пальника. При цьому необхідно враховувати особливості дугового процесу [19]:

- низька геометрична точність;
- спотворення геометрії валика на початковій та кінцевій ділянках пред'являють вимогу до 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, короблення і великої анізотропії матеріалу. Метод контурного шляху знижує деформацію та анізотропію, проте має схильність до утворення несплошностей. Траєкторія «середньоосьової трансформації» дозволяє уникнути виникнення проміжків між наплавленими валиками і не призводить до утворення несплошностей.

Управління нарізанням моделі на плоскі шари (адаптивна стратегія нарізання) дозволяє зменшити невідповідність форми заготовки та моделі: ефект неузгодженості та «сходів» (рис. 1.10) [11].



а – ефект неузгодженості; б – ефект «сходів»

Рисунок 1.10 – Причини зниження точності заготовки [11]

Основними проблемами побудови заготовок є:

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

Управління параметрами наплавлення дозволяє уникнути більшості негативних процесів при формоутворенні виробу, а також одержувати елементи різної конфігурації [25].

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.

1.3.2 Способи дугового наплавлення, що застосовуються для адитивного виробництва

Для створення металевих виробів за технологією WAAM застосовуються різні способи дугового наплавлення (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Способи дугового наплавлення, що застосовуються для WAAM

Коротко розглянемо найбільш використовувані з них:

1. Механізоване наплавлення плавким електродом в середовищі захисного газу (МІГ/МАГ) найбільш часто застосовується для WAAM [1, 3, 9, 21].

Перевагами способу МІГ/МАГ 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 тепловкладення, високе розбризування присадного металу, використання активних газів вимагає наявність розкислювачів у присадних матеріалах. В результаті дії розкислювачів на поверхні наплавленого металу утворюється шлак, який необхідно видаляти перед нанесенням наступного шару. Відсутність розкислювачів, у свою чергу, веде до розбризування металу та утворення дефектів (пори, тріщини тощо). Процес МІГ/МАГ в основному ведуть на постійному струмі зворотної полярності, що унеможливорює виробництво виробів з титанових сплавів.

Застосування МІГ/МАГ з імпульсним режимом зварювального струму сприяє зниженню розбризування та підвищує керованість тепловкладення [27].

2. Cold Metal Transfer (CMT) – модифікований варіант МІГ/МАГ процесу, що ґрунтується на механізмі керованого тепловкладення та масопереносу електродного металу. Процес CMT має низьке тепловкладення у виріб, стабільну поведінку процесу та мінімальне розбризування присадного металу. Недоліками CMT є висока залишкова пористість наплавленого металу та низька швидкість наплавлення від 0,5 м/хв до 0,6 м/хв. Реалізація процесу потребує спеціального обладнання фірми Fronius [4, 11, 20, 26, 30].

3. Дугове наплавлення неплавким електродом в середовищі захисного газу (ТІГ).

Перевагами ТІГ наплавлення є: відсутність розбризування, використовується інертна захисна атмосфера (чистий аргон), можливість

застосування двох і більше дротів присадки, в тому числі різнорідних, простота, доступність і низька вартість обладнання. Використання імпульсного режиму сприяє підвищенню гнучкості процесу наплавлення та зниженню тепловкладення. Застосування змінного струму дозволяє ефективно наплавляти алюмінієві сплави за рахунок ефекту катодного очищення робочої поверхні, але при цьому знижується ресурс роботи неплавкого електрода і підвищується ризик утворення вольфрамових включень.

Основними недоліками ТІГ є: низька продуктивність, високий ризик руйнування неплавкого електрода (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 певними кутами щодо стовпа дуги та поверхні, що наплавляється. В іншому випадку знижується точність наплавлення [33, 34].

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

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 плавкого електрода і складність налаштування обладнання [22].

5. Особливість процесу Тандем МІГ/МАГ полягає в одночасному поданні двох присадних дротів у загальну зварювальну ванну, що підвищує продуктивність. Підвищене тепловкладення, розбрикування електродного металу, висока вартість спеціалізованого обладнання та складність його налаштування ускладнюють застосування даного процесу для WAAM [15].

6. Плазмове наплавлення неплавким електродом застосовується для адитивного формування виробів з титанових сплавів і високолегованих сталей. Плазмове наплавлення схоже на ТІГ наплавлення і має такі ж переваги та

недоліки. За рахунок стиснутої дуги плазмове наплавлення 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, значний тепловий вплив [35, 36].

Плазмове наплавлення характеризується високою теплопередачею при пошаровому формуванні виробу. Однак мікроплазмове наплавлення дозволяє отримувати валики, що наплавляються, за розмірами і величиною теплопередачі, на рівні з променевими способами АВ [16, 18, 32].

Порівняння способів дугового наплавлення, що застосовуються для WAAM, представлено в таблиці 1.4. Такі різновиди як мікроТІГ і мікроплазмове наплавлення мають низьку продуктивність від 0,03 кг/год до 0,04 кг/год, і розглядати їх спільно з іншими дуговими способами недоцільно.

Порівнюючи способи, зазначені у таблиці 1.4, можна зробити такі висновки:

- способи дугового наплавлення плавким електродом забезпечують велику продуктивність процесу, в порівнянні зі способами наплавлення неплавким електродом;

- способи наплавлення неплавким електродом дозволяють отримати наплавлений метал високої якості. При напавленні плавким електродом існує ймовірність наявності внутрішньої пористості металу, а також розбрикування присадного металу;

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

- аксіальна подача присадного дроту є кращою, так як 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 напавленому 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 зауважити на те, що комбіновані процеси ускладнюють технологію наплавлення, а спеціалізоване обладнання має високу вартість.

Таблиця 1.4 – Способи дугового наплавлення, що застосовуються для WAAM

Критерій	МП/МАГ	СМТ	ТІГ	Плазмове наплавлення	DE-GMAW	Тандем МП/МАГ
Кількість дуг	1	1	1	1	2	2
Тип дуги	Вільно палаюча	Вільно палаюча	Вільно палаюча	Стиснена	Вільно палаюча	Вільно палаюча
Полярність струму дуги	Зворотна	Зворотна	Пряма	Пряма, зворотна	Зворотна	Зворотна
Рід струму дуги	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний
Можливість застосування імпульсного режиму	Так	Тільки керований	Так	Так	Так	Тільки керований
Тип електрода	Плавкий	Плавкий	Неплавкий	Неплавкий	Плавкий	Плавкий
Спосіб подачі присадного дроту	Аксіальний	Аксіальний	Бічний	Бічний	Неспіввісний	Неспіввісний
Кількість бризок металу	Багато	Дуже мало	Немає	Немає	-	-
Продуктивність наплавлення,	2 – 8	1 – 3	1 – 5	2 – 12	-	6 – 8
Імовірність наявності залишкової пористості	Середня	Висока	Дуже низька	Дуже низька	-	Низька
Устаткування для наплавлення	Серійне	Спеціальне	Серійне	Спеціальне	Спеціальне	Спеціальне

1.3.3. Плазмове наплавлення неплавким електродом

Процес Plasma Arc Welding (PAW) використовує для нарощування виробів плазмову дугу з подачею дроту і класифікується як WAAM. Основою при цьому способі є плазмотрон, що генерує плазмову дугу, яка переносить введений до неї дріт на заздалегідь виготовлену підкладку виробу. При розплавленні металу на виробі створюється один прохід, при заданій кількості проходів створюється готовий до обробки виріб.

На рис. 1.12 показана схема PAW процесу із введенням дроту в плазмову дугу та утворення проходів на виробі.

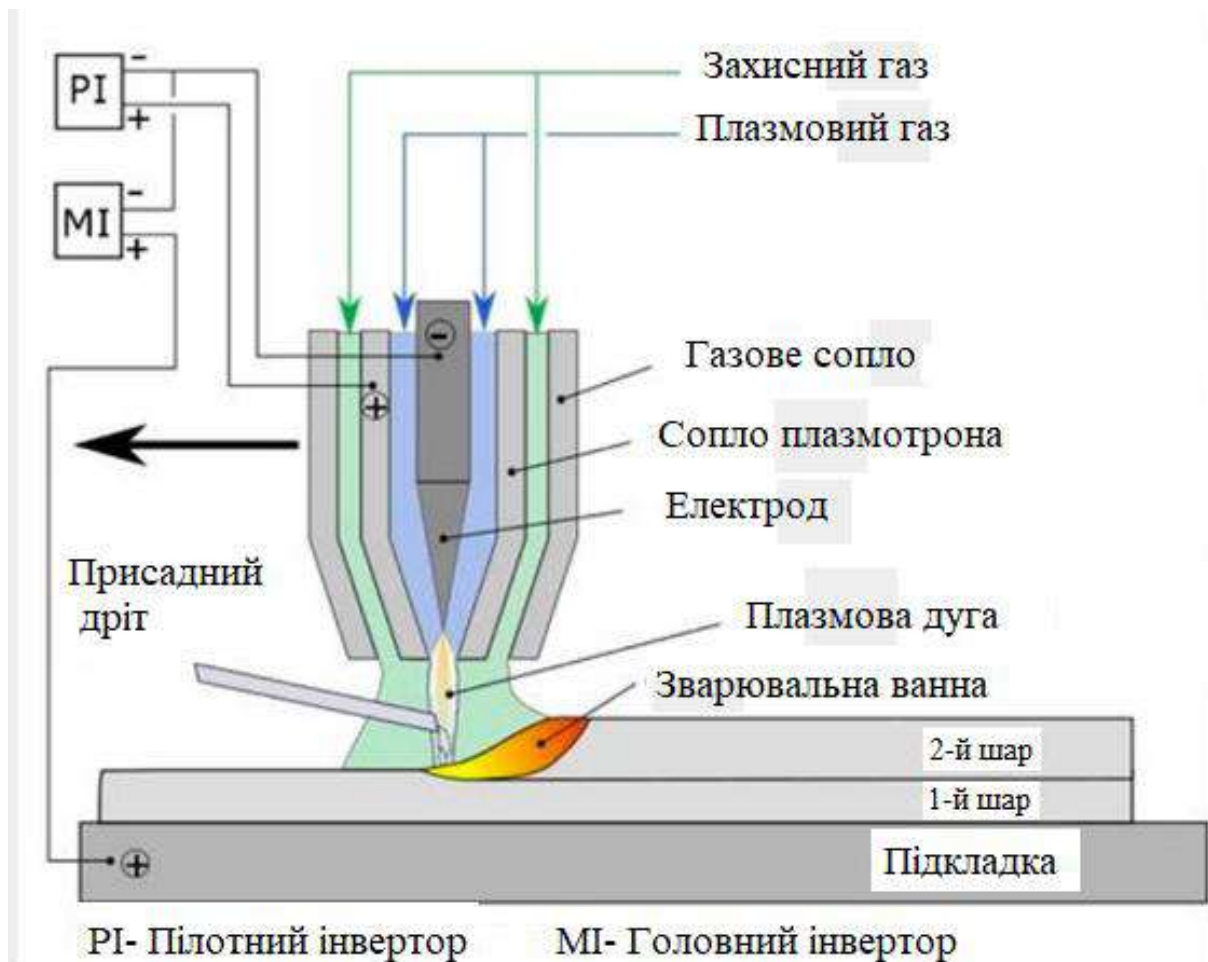


Рисунок 1.12 – Схема процесу PAW

Плазмова дуга в залежності від джерела струму, що використовується, працює в двох режимах:

- Direct Current Electrode Negative (DCEN). У цьому випадку від джерела струму постійної напруги на вольфрамовий електрод плазмотрона подається (-) а на виріб (+);

- AC режим. Коли між електродом плазмотрону та виробом змінюється полярність +/- із заданою частотою.

Режим прямої полярності DCEN використовується для нарощування різних металів: сталь, титан, сплавів на основі нікелю. Режим AC – для нарощування алюмінію.

Можливість зміни режиму роботи дозволяє вибрати відповідний режим виробництва. Крім того, режими постійного струму можуть бути імпульсними для кращого регулювання теплового вкладення. Частоту імпульсів можна встановити в діапазоні від 1 Гц до 2000 Гц.

Перевагою процесу PAW є можливість запуску плазмової дуги без додавання дроту. Це дозволяє створювати параметри процесу, такі як попередній підігрів основи перед наплавленням і самої заготовки.

На відміну від інших джерел енергії для WAAM плазмовий пальник генерує плазму високого тиску, яка притискає зварювальну ванну в напрямку протилежному напрямку руху пальника. Така властивість дозволяє акуратно завершувати наплавлення шару при виготовленні некруглої частини виробу.

На рис. 1.13 показано схему наплавлення шарів. Оскільки плазма натискає на зварювальну ванну в протилежному напрямку (1), кінцева кромка не є прямою (2). При зварюванні у протилежному напрямку зварювальна ванна притискається до торцевої кромки (3) і утворюється згладжений край.

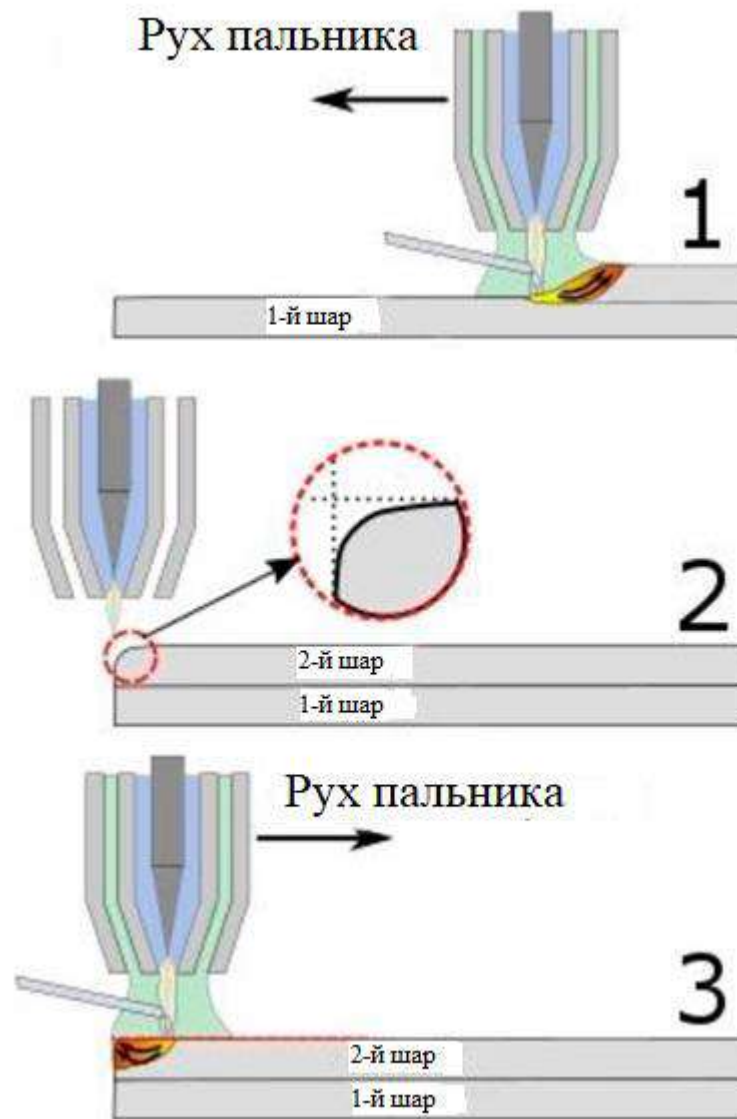


Рисунок 1.13 – Схема наплавлення шарів

Для більш високої швидкості наплавлення можливе зварювання за допомогою гарячого дроту (рис. 1.14). Підігрів зварювального дроту досягається шляхом створення ланцюга між заготовкою та дротом. Коли дріт торкається заготовки, вона нагрівається опором і знижує споживання енергії плазмою для плавлення дроту. Таким чином, можливі вищі швидкості подачі дроту і досягнення високої швидкості наплавлення.

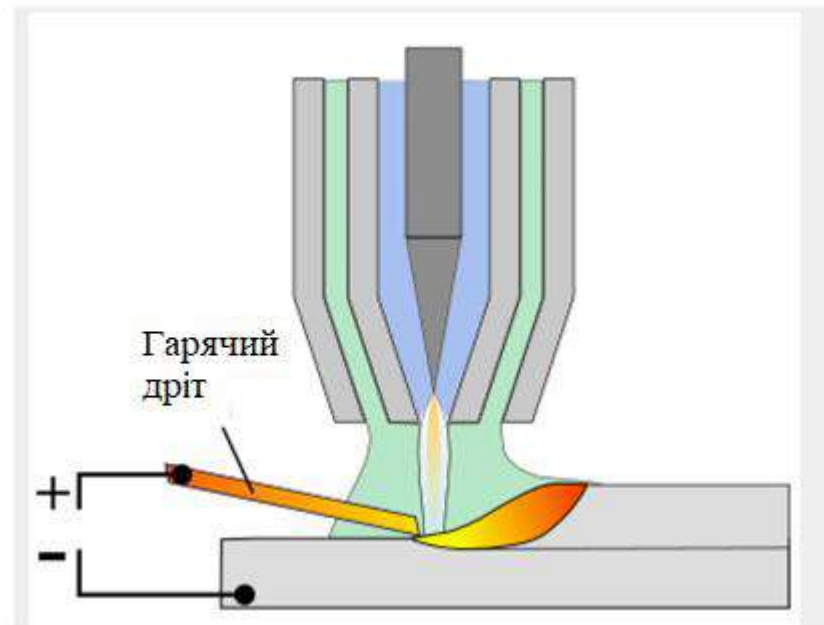


Рисунок 1.14 – Схема наплавлення з гарячим дротом

Також можливо використовувати багатодротяний механізм подачі (MWF), який подає кілька дротів в плазмову дугу. MWF забезпечує нижчі швидкості подачі дроту, що робить процес вирощування ще стабільнішим.

1.4 Формулювання цілей і завдання на проведення дослідження

У результаті аналізу технології виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ на підприємстві АТ «Мотор Січ» було виявлено, що за традиційного способу виготовлення (штампування і точіння вихідної поковки круглого перерізу) маємо дуже низький коефіцієнт використання матеріалу, бо більша частина заготовки переходить у відходи у вигляді стружки.

Також традиційний спосіб виготовлення має такі недоліки:

- процес виготовлення займає великий проміжок часу і потребує підготовки великої кількості кваліфікованого персоналу;

- прутки для виготовлення поковок із жароміцних нікелевих сплавів на сьогоднішній день є дефіцитними, тому що їх не виготовляють у нашій країні, а закупають за кордоном, що, в свою чергу, накладає певні труднощі із закупівлею і доставкою.

Для вирішення цих проблем можливо замінити традиційний спосіб виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ на метод адитивного вирощування.

Після аналізу наявних нині методів АВ було зроблено висновок, що для виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ найбільше підходить метод плазмового наплавлення з використанням присадного дроту, що класифікується як WAAM та має такі переваги в порівнянні з іншими методами:

- при використанні присадного матеріалу у вигляді дроту, порівняно з порошковими способами маємо практично 100%-ву ефективність використання матеріалу, а також значно більшу масову продуктивність, що виправдовує застосування способів для створення великогабаритних виробів. Незважаючи на низьку точність і грубу поверхню, способи, що використовують дріт, дають змогу виготовляти заготовки деталей за значної економії матеріалу на наступних стадіях обробки;

- порівняно з лазерним та електронно-променевим наплавленням, електродугове наплавлення довільних форм плавким або неплавким електродом у захисному газі має значну енергоефективність, яка може досягати до 90%;

- за рахунок стиснутої дуги плазмове наплавлення має високий ККД (до 95%) і високу гнучкість процесу.

Однак до теперішнього часу залишаються відкритими низка питань, пов'язаних з особливостями технології виготовлення виробів даним способом:

- недостатньо вивчено технологічний процес адитивного вирощування плазмовим наплавленням з використанням дротів із жароміцних нікелевих сплавів;

- не в повному обсязі досліджено структуру і властивості жароміцних нікелевих сплавів, отриманих адитивним вирощуванням плазмовими методами;

- недостатність знань про дефекти, особливо гарячі тріщини, які можуть утворюватися в нікелевих жароміцних сплавах, у процесі адитивного вирощування плазмовими методами та способів їх усунення.

Виходячи з вищевикладеного, метою даної дипломної роботи є дослідження технології адитивного вирощування методом плазмового наплавлення з використанням присадного дроту виробів з жароміцних нікелевих сплавів у рамках підприємства АТ «Мотор Січ» на прикладі кільця корпусу внутрішнього ТВТ зі сплаву ЕП648-ВІ.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Підібрати оптимальні режими адитивного вирощування виробів із жароміцного нікелевого сплаву ЕП648-ВІ.

2. Визначити механічні властивості матеріалу, отриманого даним методом, і дослідити мікроструктуру.

3. Вивчити механізм утворення гарячих тріщин у процесі адитивного вирощування, а також їхній вплив на механічні властивості матеріалу. Дослідити можливість використання гарячого ізостатичного пресування для загоєння даних тріщин.

4. Розробити технологію адитивного вирощування методом плазмового наплавлення з використанням присадного дроту кільця корпусу внутрішнього ТВТ зі сплаву ЕП648-ВІ.

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ І ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1 Визначення оптимальних параметрів режиму вирощування та виготовлення зразків

Перед виготовленням деталі виконується підбір оптимальних параметрів режиму адитивного вирощування для формування шару з мінімальною ввігнутістю між сусідніми валиками, коли площа перекриття стає приблизно рівною площі ввігнутості, і поверхня шару стає плоскою (див. рис. 1.9).

Після визначення оптимальних параметрів режиму вирощуються зразки для визначення механічних властивостей матеріалу, отриманих на даних режимах. Зразок розміром 140 мм × 125 мм × 14 мм, отриманий із жароміцного нікелевого сплаву ЕП648-ВІ прямим вирощуванням (PAW), представлений на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд вирощених зразків

2.2 Гаряче ізостатичне пресування і термообробка зразків

Для визначення впливу ГП на структуру, механічні властивості матеріалу, а також на можливість «загоєння» гарячих тріщин, зразок після вирощування був розділений на дві частини розмірами 62 мм × 125 мм × 14 мм (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд вирощених зразків після ГП та термообробки

Одній частині зразка було виконано обробку методом ГП на пресі QIN 09×1,5-2070-1400MURC. Режими обробки методом ГП представлені в табл. 2.2, після чого виконано термообробку (ТО) за стандартним режимом для сплаву ЕП648-ВІ: гартування з $T=(1140\pm 10)$ °С, витримка 1 година, старіння при $T=(900\pm 20)$ °С, витримка 16 годин, охолодження на повітрі.

Другій частині зразка було виконано термообробку за стандартними режимами, представленими вище.

Таблиця 2.2 – Режими гарячого ізостатичного пресування

$T_{\text{прес}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t, \text{ год.}$	$P, \text{ атм}$
1180	2	160

2.3 Металографічний аналіз

Металографічне дослідження вирощених зразків проводилося макро- та мікроструктурним аналізом шліфів, виготовлених у поздовжньому та поперечному напрямках відносно шарів вирощування.

Для проведення металографічних досліджень методом оптичної мікроскопії поверхню зразків готували за стандартною методикою, що включала операції запресовування зразків, шліфування, полірування та травлення.

Запресовування зразків у полімерну смолу здійснювали з використанням преса Buehler Simplimet 2000 (рис. 2.3, а). Шліфування зразків на автоматичному шліфувально-полірувальному верстаті Buehler Ecomet 3 (рис. 2.3, б) здійснювали з використанням абразивних кругів зернистістю P180, P400, P600, P1000, P1500. Фінішне полірування поверхні виконували з використанням алмазної суспензії із середнім розміром абразивних частинок 6 мкм.

Для виявлення структури зразків після шліфування та полірування за стандартною методикою для жароміцних нікелевих сплавів застосовували електролітичне травлення поверхні в реактиві (H_3PO_4 – 800 мл + CrO_3 – 100 мл). Час травлення підбирали дослідним шляхом.

Дослідження мікроструктури зразків проводили на оптичному мікроскопі ZEISS Axio Observer. Dlm (рис. 2.3, в) у діапазоні збільшень від x50 до x1000.



а – прес Buehler Simplimet 2000



б – шліфувально-полірувальний верстат Buehler Ecomet 3



в – оптичний мікроскоп ZEISS Axio Observer. Dlm

Рисунок 2.3 – Обладнання для металографічного аналізу

2.4 Механічні випробування

Випробування матеріалу зразків зі сплаву ЕП648-ВІ, отриманих методом адитивного вирощування плазмовим наплавленням (PAW), в умовах одновісного розтягування проводили на розривній машині ZDMY 30.

У роботі використовувалися стандартні циліндричні зразки (рис. 2.4) за ДСТУ ISO 6892-1:2019 «Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури» [37]. Зразки вирізали в поздовжньому (ПЗ) і поперечному (ПО) напрямку (рис. 2.5) відносно шарів вирощування після термічної обробки та після ГП+ТО за вищевказаними режимами.

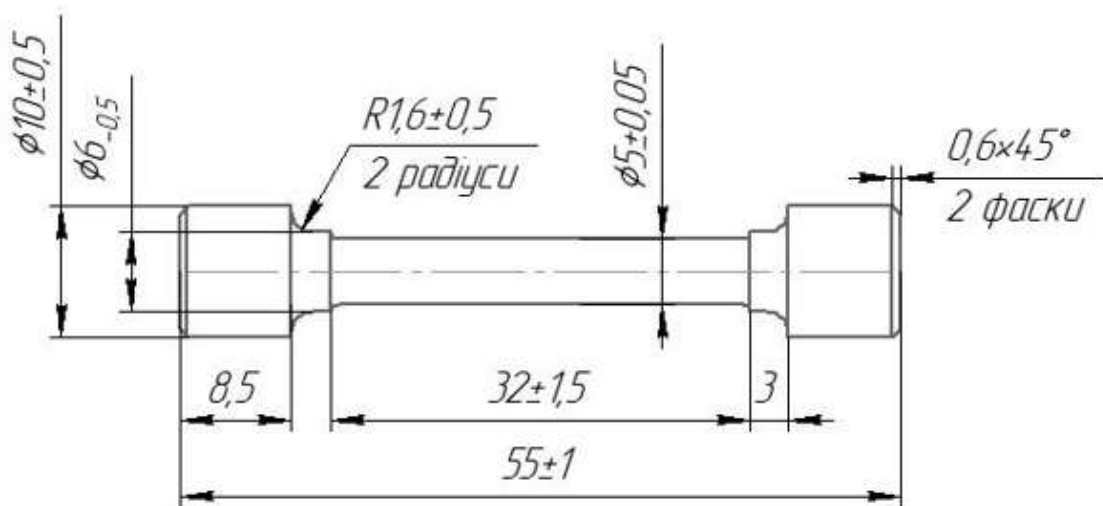


Рисунок 2.4 – Циліндричний зразок для механічних випробувань

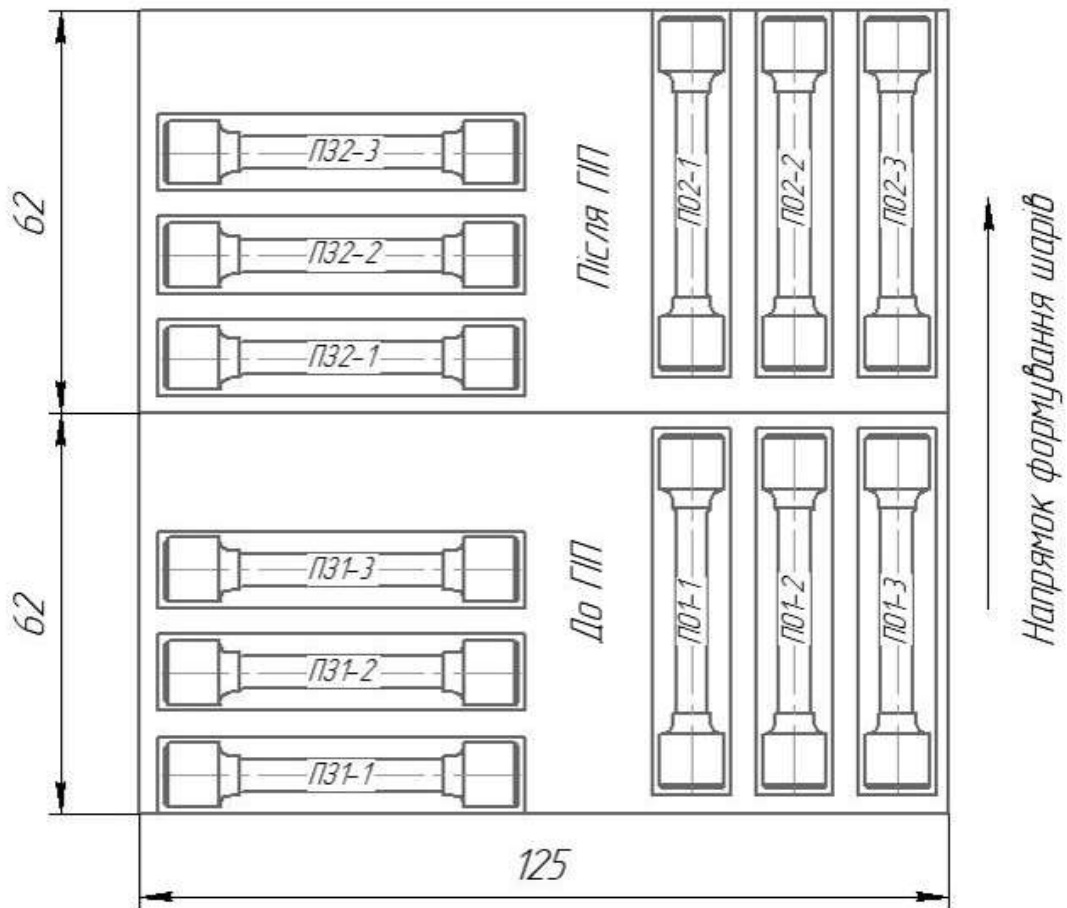


Рисунок 2.5 – Схема вирізання зразків для випробувань

Під час статичних випробувань на розтягнення визначали такі характеристики матеріалу: межа короточасної міцності (σ_B), межа плинності ($\sigma_{0,2}$), відносне подовження (δ), відносне звуження (ψ) за кімнатної температури. При оцінці кожної характеристики було випробувано не менше трьох зразків.

2.5 Фрактографічний аналіз

Фрактографічні дослідження зламів розривних зразків після механічних випробувань проводили на растровому електронному мікроскопі JEOL JSM 6360LA.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Механізми зміцнення та морфологія фаз високолегованих нікелевих сплавів

Жароміцні сплави на основі нікелю являють собою особливий клас металевих матеріалів з винятковою комбінацією високотемпературної міцності, ударної в'язкості та стійкості до руйнування в агресивних або окислювальних середовищах. Ці матеріали широко використовуються в авіаційних і енергетичних турбінах, ракетних двигунах та інших складних умовах, зокрема в атомній і хімічній промисловості [38].

Висока міцність нікелевих сплавів зумовлені присутністю широкої низки легувальних елементів, що визначають їхній фазовий склад і механізми зміцнення.

Безліч нікелевих жароміцних сплавів містять у своєму складі до 40 ваг.% комбінацій від 5 до 10 інших елементів. При збільшенні вмісту в сплаві Al, що додається до γ -нікелю, утворюється друга фаза. Ця фаза має номінальний склад Ni_3Al , позначається як γ' -фаза і має впорядковану інтерметалічну кристалічну структуру L12 [38]. Формування γ' -фази відбувається у твердому стані, оскільки пересичений твердий розчин γ -нікелю охолоджується нижче за її рівноважну температуру сольвуса, отже, кінетика виділення і зростання γ' -фази дуже чутливі до швидкості, з якою сплав охолоджується. Унімодальний розподіл тонких частинок γ' -фази (від 300 нм до 500 нм) зазвичай асоціюється зі швидкостями охолодження, що перевищують 40 К/хв, тоді як повільніші швидкості охолодження зазвичай сприяють утворенню часток γ' , які складаються з комбінації більших (>500 нм) та менших (<50 нм) частинок. Частинки γ' є основною зміцнювальною фазою. Ці дві фази залишаються основними складовими мікроструктури жароміцних сплавів, навіть у разі додавання шести – десяти додаткових легуючих елементів. У загальному випадку для твердорозчинного зміцнення γ -фази додають тугоплавкі легуючі елементи, з

великими відмінностями в електронній структурі та атомних радіусах порівняно з Ni, такі як Mo, W, Nb і Re. Додатки Ti, Ta і Nb сприяють утворенню і зміцненню $Ni_3(Al, Ti, Ta, Nb)$ γ' -фази [38]. Додавання заліза становить основу важливої групи жароміцних сплавів Ni-Fe, причому найпоширенішим сплавом є Inconel 718. Додатки Cr, Y і La зазвичай покращують корозійні властивості сплаву [38].

Вуглець проявляє високу спорідненість до таких елементів, як Hf, Zr, Ta, Ti, Nb, W, Mo, V, і Cr і має тенденцію утворювати первинні карбіди MC безпосередньо з розплаву під час кристалізації сплавів на основі нікелю. Залежно від складу первинних карбідів MC і легуючих елементів, присутніх у сплаві, подальше твердофазне перетворення може розкласти карбід MC на множину $M_{23}C_6$, M_6C , і карбіди M_7C_3 під час термообробки або при температурі експлуатації. Наприклад, Cr з матриці може потенційно реагувати з менш стабільними карбідами TiC і NbC з утворенням низки карбідів $M_{23}C_6$, M_6C і M_7C_3 . За повідомленням авторів [39], за вмісту в сплаві W і Mo карбіди типу $M_{23}C_6$ приблизно відповідають формулі $Cr_{21}(Mo, W)_2$, однак, Ni може займати значне місце в цих карбідах. Перетворення первинних карбідів MC з витягуванням Cr з матриці, що оточує карбіди, призводить до утворення шару γ' -фази на поверхні карбідів. Оскільки ці карбіди займають значно більший об'єм уздовж границь зерен і часто взаємопов'язані, можливе зниження механічних властивостей, коли карбіди MC розпадаються за таким фазовим перетворенням [38]. Хоча карбіди можуть слугувати місцями ініціювання тріщини за втомних навантажень (за відсутності інших більших дефектів), наявність дискретних карбідів на границях зерен стримує скупчення та накопичення ушкоджень при високотемпературній повзучості.

Також, згідно з роботами [38 – 40], небажаним є утворення в мікроструктурі жароміцних нікелевих сплавів таких топологічно щільноупакованих фаз, багатих на тугоплавкі елементи, як: орторомбічна P-фаза, тетрагональна σ -фаза, ромбоєдрическа R- і μ -фази; оскільки утворення даних фаз також призводить до окрихчування і зниження механічних властивостей.

У таблиці 3.1 наведено характеристики типових фаз, що зустрічаються в мікроструктурі жароміцних нікелевих сплавів.

Таблиця 3.1 – Фази, присутні в жароміцних нікелевих сплавах [41]

Фаза	Формула	Коментарі
γ		Твердий розчин на основі Ni
γ'	Ni_3Al $Ni_3(Al,Ti)$	Основна фаза зміцнення в багатьох жароміцних сплавах на основі Ni і Ni-Fe; кристалічна решітка незначно змінюється (від 0% до 0,5%) від кристалічної решітки γ -фази; форма варіюється від сферичної до кубічної; розмір варіюється залежно від часу та температури старіння. Експерименти показали, що зміни вмісту Mo і відношення Al/Ti можуть змінювати морфологію γ' -фази. Зі збільшенням невідповідності решіток γ/γ' форма змінюється в такому порядку: сферична, глобулярна, блокова, кубічна. Коли неузгодженість решіток γ/γ' велика, тривалі витримки вище 700°C викликають появу небажаних фаз η (Ni_3Ti) або δ (Ni_3Nb).
γ''	Ni_3Nb	Основна фаза зміцнення в сплаві Inconel 718. γ'' являють собою когерентні дискретні частинки (середній діаметр приблизно 60 нм, товщина, приблизно від 5 нм до 9 нм. Під час перестарівання γ'' перетворюється на δ .
MC	TiC NbC HfC	MC має деяку розчинність для Ni, Zr і Mo; виділяється як кулясті частинки неправильної форми; "M" може бути Ti, Ta, Nb, Hf, Th або Zr.

Продовження таблиці 3.1

Фаза	Формула	Коментарі
$M_{23}C_6$	$Cr_{23}C_6$ $(Cr,Fe,W,Mo)_{23}C_6$	Форма виділень важлива для механічних властивостей; частинки можуть виділятися у вигляді глобул, пластин або ламелей; зазвичай утворюється на границях зерен; Елемент "М" зазвичай являє собою Cr, але Ni, Co, Fe, Mo і W можуть його замінювати.
M_6C	Fe_3Mo_3C Fe_3W_3C, Fe_4W_2C Fe_3Nb_3C Nb_3Co_3C Ta_3Co_3C	Випадково розподілені карбіди; "М" зазвичай являє собою Mo або W; існує деяка розчинність для Cr, Ni, Nb, Ta і Co.
M_7C_3	Cr_7C_3	Зазвичай виділяється по границям зерен у вигляді блоків.
M_3B_2	Ta_3B_2 V_3B_2 Nb_3B_2 Mo_2FeB_2	Спостерігається в сплавах на нікелевій основі за вмісту B, приблизно 0,03% або вище; бориди схожі на карбіди; елементами "М" можуть бути Mo, Ta, Nb, Ni, Fe або V.
MN	TiN (Ti,Nb,Zr)N (Ti,Nb,Zr)(C,N) ZrN NbN	Нітриди спостерігаються в сплавах, що містять Ti, Nb або Zr; вони є нерозчинними за температур, нижчих за точку плавлення; легко розпізнаються після полірування, мають прямокутну форму і колір від жовтого до помаранчевого. Вони часто слугують місцями зародження для карбідів.

Основний вплив на формування структури об'єктів, одержаних методами адитивного вирощування, чинить велика швидкість плавлення і кристалізації. Надшвидке охолодження може призводити до утворення метастабільних

структур, властивості яких істотно відрізняються від тих, що спостерігаються в рівноважному стані. Крім того, під час плавлення локальної ділянки повторному нагріванню піддаються сусідні вже перекристалізовані ділянки, тобто відбувається термоцеклювання матеріалу, що може призвести до стабілізації дефектів кристалічної будови в структурі [42]. Вивчення структури, що формується в процесі адитивного вирощування методами плазмового наплавлення, і підбір режимів подальших обробок (термічної або ГП) з метою досягнення максимального комплексу механічних властивостей наразі є актуальним завданням, оскільки в літературних джерелах даному питанню, стосовно жароміцних нікелевих сплавів, присвячено невелику кількість робіт.

3.2 Визначення оптимальних параметрів режиму прямого вирощування методом плазмового наплавлення

Сутність процесу плазмового наплавлення полягає в нанесенні розплавленого присадного дроту на металеву поверхню з використанням в якості джерела нагріву стиснутої дуги, яка горить між електродом плазмотрона і виробом.

Технологічні характеристики процесу плазмового наплавлення із застосуванням присадного дроту в літературі [43] зазвичай оцінюються таким чином:

- продуктивність – від 2 кг/год до 30 кг/год;
- мінімальна товщина шару, що наплавляється – 0,5 мм;
- ширина наплавленого валика без коливань – до 14 мм;
- діаметр присадного дроту – від 0,8 мм до 3,6 мм.

Слід зазначити, що наведені в літературі порівняно високі значення продуктивності плазмового наплавлення на практиці практично не використовуються. Вироби відповідального призначення, що мають невеликі

габарити (автомобільні та суднові клапани, деталі запірної арматури та ін.), які наплавляються сплавами на нікелевій і кобальтовій основах, як правило, на обмежені поверхні, не потребують великих витрат матеріалу, і зазвичай достатня продуктивність наплавлення в цих випадках складає менше 2 кг/год [44, 45].

Процес плазмового наплавлення може виконуватися з поперечними коливаннями або без них на струмі прямої або зворотної полярності. Плазмоутворюючим, захисним і транспортувальним газом для порошкових матеріалів, як правило, слугує аргон із витратою відповідно: 1...3 л/хв, 8...15 л/хв, 5...15 л/хв [43].

Універсальність процесів плазмового наплавлення забезпечується великою кількістю регульованих параметрів.

Основні параметри режиму: полярність дуги, величина струму, діаметр плазмоутворюючого сопла, швидкість переміщення (зокрема швидкість і вид поперечних коливань), витрата плазмоутворюючого газу, відстань від зрізу сопла до виробу.

Додаткові параметри: витрата захисного газу, витрата газу для транспортування (для порошкових матеріалів), швидкість подачі або витрата присадного матеріалу, геометричні розміри та розташування робочих елементів плазмотрона (електрода, плазмоутворюючого та захисного сопла та ін.), стан виробу, який обробляють (температура, стан поверхні, положення в просторі, точність і жорсткість закріплення), взаємне розташування плазмотрона, виробу та пристрою подачі матеріалу, точність збереження всіх встановлених параметрів, включно з точністю позиціонування плазмотрона в просторі.

Під час плазмового наплавлення більшості матеріалів, зокрема й нікелевих сплавів, доволі широко застосовується стиснута дуга прямої полярності («мінус» на вольфрамовому електроді, див. рис. 1.12), але може використовуватися також стиснута дуга зворотної полярності і дуга змінного струму. Плазмотрони для наплавлення на зворотній полярності зазвичай мають мідний водоохолоджуваний електрод-анод (іноді з вольфрамовою вставкою); для роботи на змінному струмі можуть використовуватися плазмотрони з вольфрамовим

стрижневим електродом, але при цьому стійкість вольфрамових електродів на змінному струмі нижча, ніж на постійному струмі прямої полярності.

Використання імпульсного режиму дає можливість розширити сферу регулювання режимів плазмового наплавлення.

Режим імпульсного плазмового наплавлення задається з урахуванням розмірів зварювальної ванни, температурного поля і швидкості наплавлення. При цьому необхідно розраховувати і призначати окремо: струм імпульсу $I_{\text{імп}}$; струм паузи $I_{\text{паузи}}$; тривалість імпульсу $t_{\text{імп}}$; тривалість паузи $t_{\text{паузи}}$. Частота імпульсів, як правило, невисока і може становити від часток герца до кількох герц.

У літературі звертається увага на те, що багатопрохідне наплавлення жароміцних нікелевих сплавів, що має місце при адитивному вирощуванні, необхідно виконувати з мінімальними тепловкладеннями для уникнення утворення тріщин [46]. Щоб уникнути утворення тріщин, у низці випадків також може бути застосований значний попередній підігрів [47], але тепловкладення безпосередньо в процесі наплавлення має бути мінімальним.

На першому етапі підбору оптимальних режимів адитивного вирощування було визначено оптимальний режим наплавлення (табл. 3.2, умов. №1) з мінімальним тепловкладенням, при якому процес залишається стабільним із рівномірним формуванням одиночного валика без розбризкування та подрізів (рис. 3.1).

Таблиця 3.2 – Режими адитивного вирощування

Параметри режиму	Умовний номер режиму			
	№1	№2	№3	№4
Діаметр присадного дроту $d_{п.д.}$, мм	1	1	1	1
Діаметр вольфрамового електрода d_w , мм	3,2	3,2	3,2	3,2
Сила струму $I_{зв}$, А	95	95	95	95
Швидкість зварювання $V_{зв}$, мм/с	1,5	1,5	1,5	1,5
Швидкість подачі дроту $V_{п.д.}$, м/хв	0,85	0,85	0,85	0,85
Діаметр плазм. сопла, мм	2,6	2,6	2,6	2,6
Витрата плазм. газу Q_{Ar} , л/хв	1,1	1,1	1,1	1,1
Витрата захисного газу Q_{Ar} , л/хв	12	12	12	12
Крок наплавлення, мм	-	2,0	3,0	2,5
Параметри імпульсу				
-Частота, Hz	0,8	0,8	0,8	0,8
-Струм паузи $I_{п}$, А	$30\%I_{зв}$	$30\%I_{зв}$	$30\%I_{зв}$	$30\%I_{зв}$

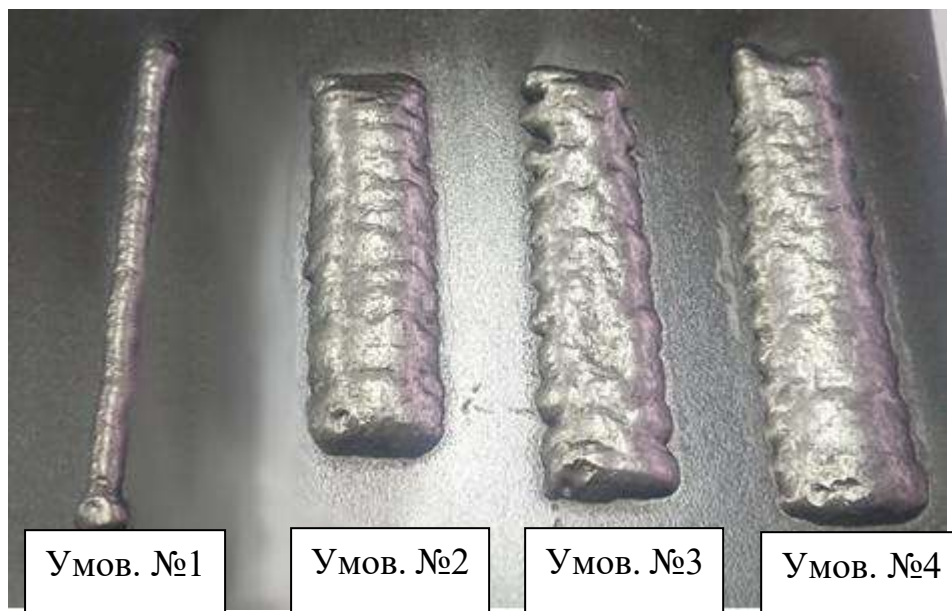


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд наплавлених шарів

Так як, базовим елементом для формування виробів під час адитивного вирощування є геометричні параметри одиночного валика, після встановлення

оптимального режиму для одиночного валика було визначено його геометричні розміри на поперечних макрошліфах, які складають: ширина валика 4,9 мм, висота валика 2,42 мм (рис. 3.2).

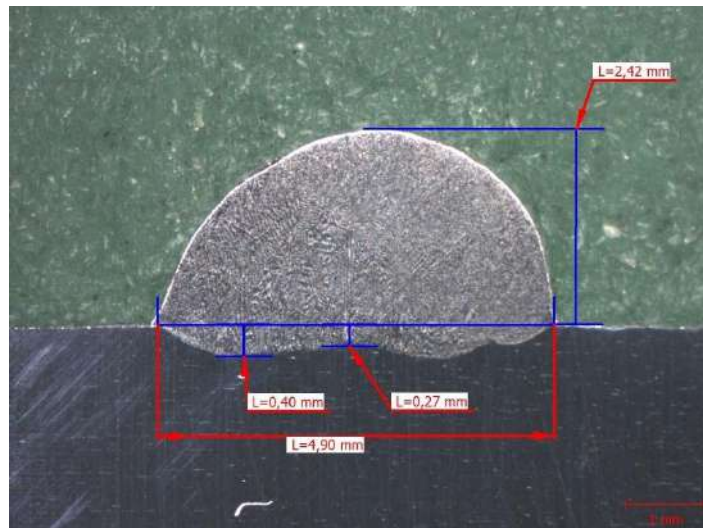


Рисунок 3.2 – Геометричні розміри одиночного валика

Для формування шару необхідної ширини під час прямого адитивного вирощування найпоширенішими стратегіями наплавлення є наплавлення з поперечними коливаннями і наплавлення з нанесенням паралельних валиків під час руху «по змійці» (рис. 3.3). Під час розроблення технології адитивного вирощування кільця корпусу внутрішнього ТВТ нами було обрано наплавлення з рухом «по змійці».

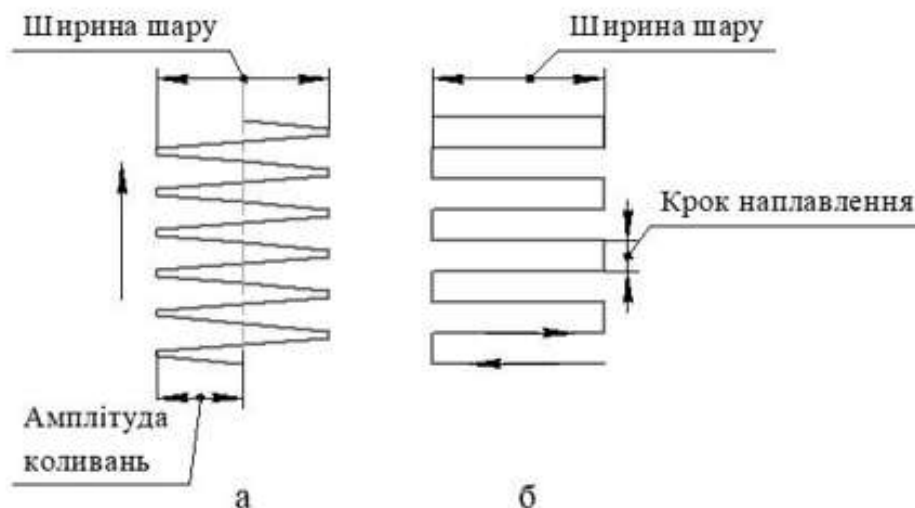


Рисунок 3.3 – Стратегії наплавлення шарів

Якість наплавленого шару визначається міжцентровою відстанню між сусідніми валиками, що забезпечує оптимальну площу перекриття для забезпечення плоскої поверхні шару без значної вогнутості, що має місце за недостатньої площі перекриття, і збільшеної хвилястості поверхні, яка з'являється за надмірної площі перекриття.

Для визначення оптимальної площі перекриття, виходячи з геометричних розмірів одиночного валика, було наплавлено три шари з різним кроком наплавлення 2 мм, 2,5 мм і 3 мм відповідно. Ширина шарів у всіх випадках становила 15 мм, що відповідає максимальній ширині шару необхідного під час вирощування кільця корпусу внутрішнього ТВТ. Після чого визначалися геометричні розміри і площа перекриття на поперечних і поздовжніх макрошліфах, які показали, що:

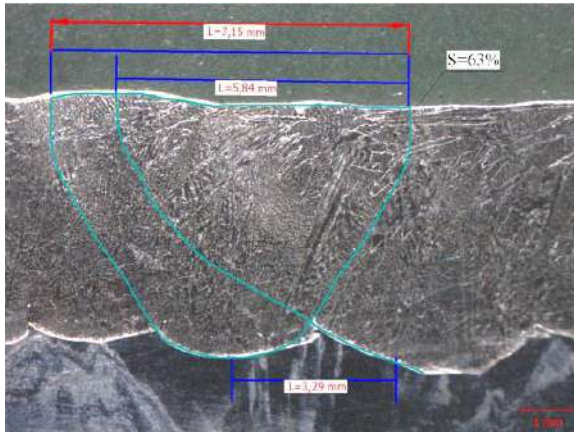
- за кроку наплавлення 2 мм (табл. 3.2, умов. №2) площа перекриття становить 63%, при ширині валика 7,15 мм, висота шару становить 4,65 мм (рис. 3.4, а, б). При цьому в наплавленому шарі в місцях перекриття валиків присутня збільшена хвилястість поверхні, яка свідчить про надмірну площу перекриття. Як видно з результатів виміру за маленького кроку наплавлення, збільшується ширина валика на 40% відносно вихідного одиночного, це пов'язано зі збільшенням тепловкладення і значного розплавлення сусіднього валика під час наплавлення;

- за кроку наплавлення 3 мм (табл. 3.2, умов. №3) площа перекриття становить 31%, при ширині валика 5,47 мм, висота шару становить 3,26 мм. При цьому в наплавленому шарі присутня вогнутість між сусідніми валиками, що свідчить про недостатню площу перекриття (рис. 3.4, в, г);

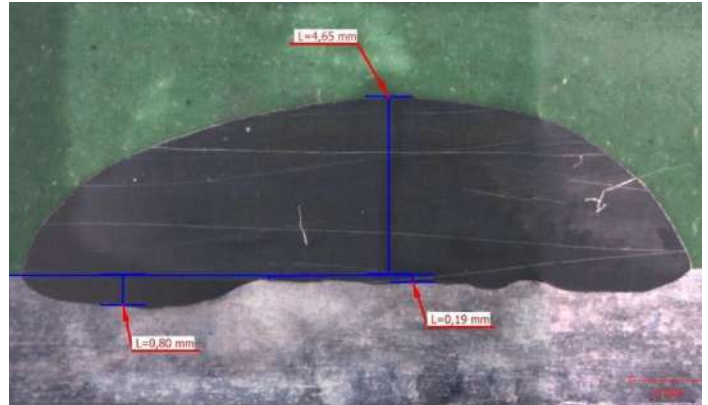
- за кроку наплавлення 2,5 мм (табл. 3.2, умов. №4) площа перекриття становить 48%, при ширині валика 5 мм, висота шару становить 3,93 мм. При цьому наплавлений шар має практично плоску поверхню, що свідчить про достатню площу перекриття (рис. 3.4, д, е).

З вищевикладеного випливає, що оптимальним режимом вирощування, що забезпечує плоску поверхню шару без значної вогнутості та надмірної

хвилястості й оптимальною площею перекриття (48%), є режим умов. №4. Для визначення якості матеріалу, отриманого на цьому режимі, було вирошено зразок розміром 140 мм × 125 мм × 14 мм (див. рис. 2.1).



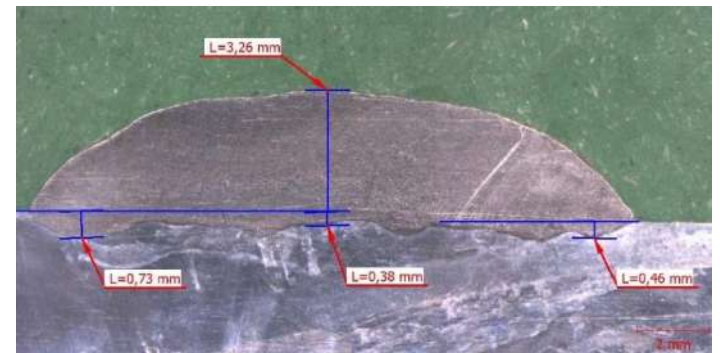
а – умов. №2 поздовжній шліф



б – умов. №2 поперечний шліф



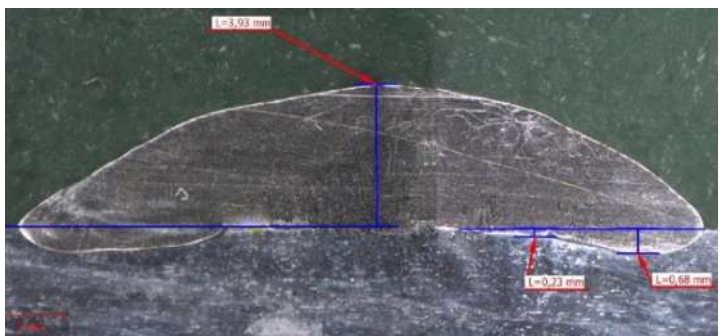
в – умов. №3 поздовжній шліф



г – умов. №3 поперечний шліф



д – умов. №4 поздовжній шліф



е – умов. №4 поперечний шліф

Рисунок 3.4 – Геометричні розміри наплавлених шарів на різних режимах

3.3 Дослідження мікроструктури матеріалу, отриманого прямим вирощуванням методом плазмового наплавлення до і після ГП

На відміно від ливарних технологій під час формування структури сплавів адитивними методами напрямок теплового потоку протилежний до напрямку зростання зерен на границі розділу ванни розплаву з попереднім шаром [48]. Дослідження [49, 50] показують, що під час пошарового формування матеріалу залежно від обраних технологічних режимів структура окремого шару може містити три зони, що послідовно формуються. Схематичне зображення типової для адитивних процесів структури представлено на рисунку 3.5.

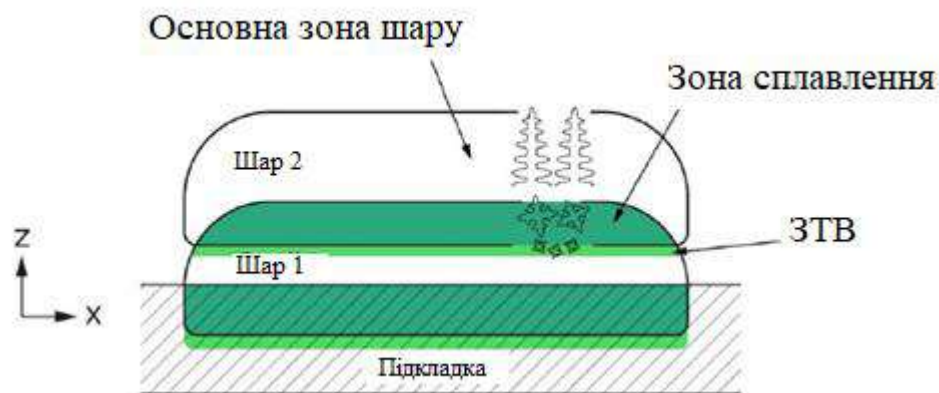


Рисунок 3.5 – Схематичне зображення типової для адитивних процесів структури (у поздовжньому перерізі зразка)

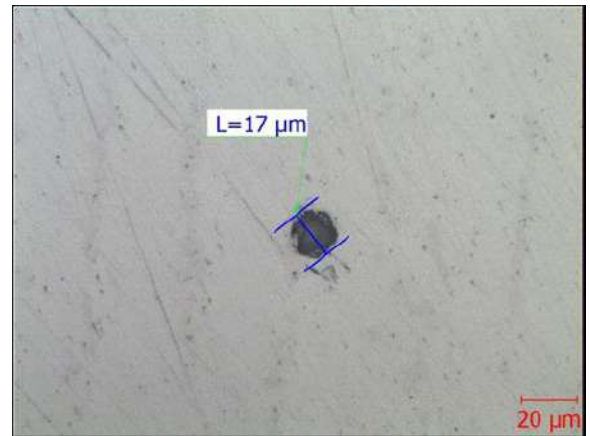
Мікроструктурний аналіз зразків, отриманих прямим вирощуванням методом плазмового наплавлення, проводили на шліфах, виготовлених у повздовжньому (площина XY) і поперечному напрямі (вздовж осі Z) відносно шарів вирощування.

Металографічне дослідження нетравлених шліфів показало, що в матеріалі зразка після вирощування та термообробки (без ГП) присутні пори розміром до ~17 мкм (рис. 3.6 а, б) і раковини розміром до ~35 мкм (рис. 3.6 в, г).

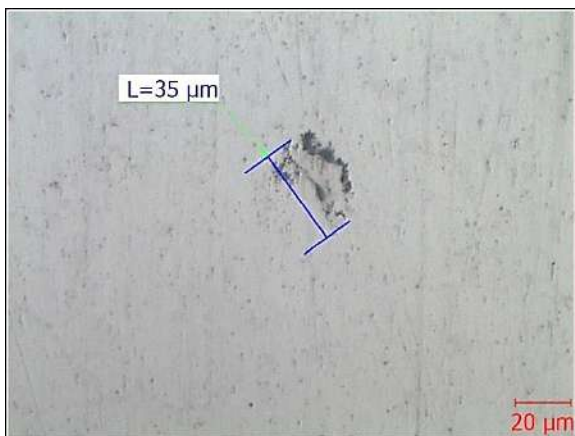
На поздовжніх шліфах також виявлено наявність внутрішніх мікротріщин, що не виходять на поверхню, довжиною до ~ 196 мкм (рис. 3.6). Ці тріщини розвиваються поперек шарів вирощування на відстані від 1,9 мм до 3,0 мм від поверхні зразка.



а – пори, х50



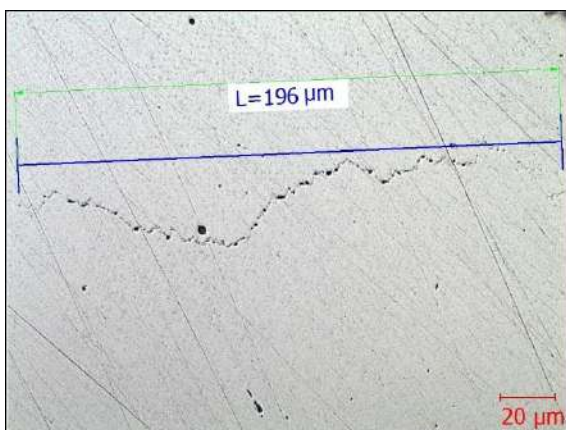
б – пора, х500



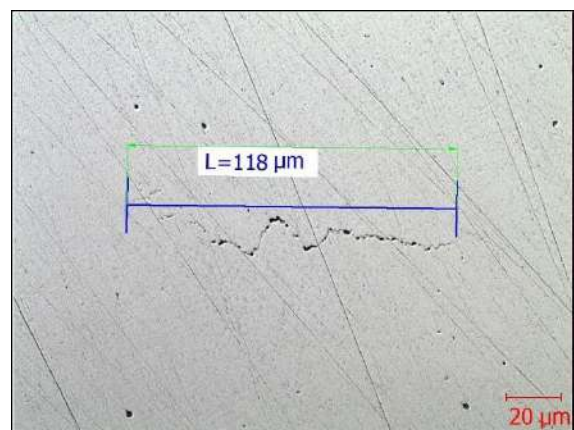
в – раковина, х500



г – раковина, х500



д – мікротріщина, х500



е – мікротріщина, х500

Рисунок 3.6 – Дефекти в мікроструктурі зразків після вирощування і термообробки (без ГП)

Після травлення шліфів у реактиві для електролітичного травлення жароміцних сплавів встановлено, що мікроструктура зразків без ГП дендритної будови. Спостерігається різнозернистість і наявність витягнутих зерен і дендритів (стовпчаста структура) у напрямку максимального градієнту температури (поперек шарів) (рис. 3.7).



а – поперечний, х200



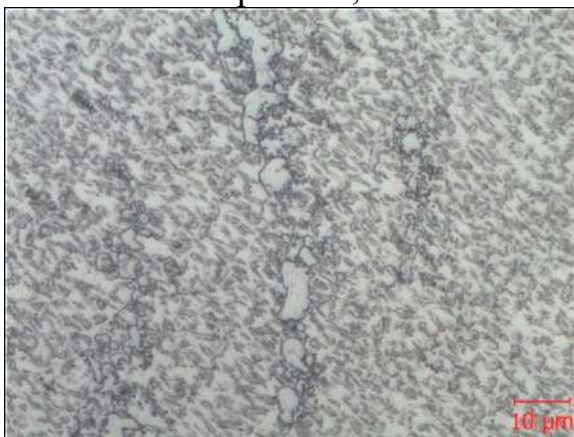
б – поздовжній, х200



в – поперечний, х500



г – поздовжній, х500



д – поперечний, х1000



е – поздовжній, х1000

Рисунок 3.7 – Мікроструктура зразків після вирощування і термообробки (без ГП)

Мікроструктура являє собою γ -твердий розчин з наявністю інтерметалідів, карбідів, нітридів та частинок голчастої морфології надлишкової фази на основі хрому (α -Cr), що виділилась під час старіння. У мікроструктурі лінії сплавлення не проглядаються, структура є однорідною із взаємним проростанням зерен і дендритів між шарами. Мікроструктура відповідає нормально термообробленому стану сплаву ЕП648-ВІ (ХН50ВМТЮБ).

У матеріалі зразка присутні скупчення карбідів по границям зерен (рис. 3.7 д, е), що характерно для нікелевих сплавів. Згідно з автором роботи [51] в нікелевих сплавах карбіди $Me_{23}C_6$ виділяються переважно по границям зерен. Таке їх розташування чинить значний вплив на збільшення межі тривалої міцності, мабуть, внаслідок утруднення прослизання по границям зерен.

Після травлення шліфів встановлено, що мікротріщини, виявлені в матеріалі зразків, розвиваються по границям зерен (рис. 3.8).



а – поздовжній, x200



б – поздовжній, x500

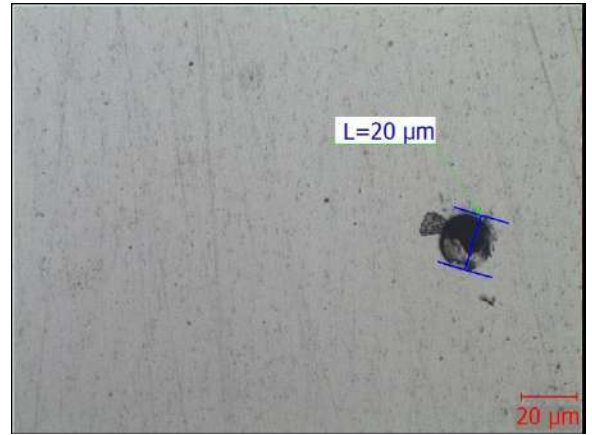
Рисунок 3.8 – Мікротріщини в структурі зразків після вирощування і термообробки (без ГП)

Металографічне дослідження нетравлених шліфів показало, що в матеріалі зразка після вирощування та обробки ГП+ТО присутні одиничні пори розміром до ~ 21 мкм (рис. 3.9 а-в), дрібна пористість відсутня, також присутні раковини розміром до ~ 35 мкм (рис. 3.9 г). Мікротріщин, які присутні на зразку без ГП,

не виявлено. На поздовжніх шліфах виявлено сліди «загоєння» тріщин, які не мають виходу на поверхню (рис. 3.9 д, е).



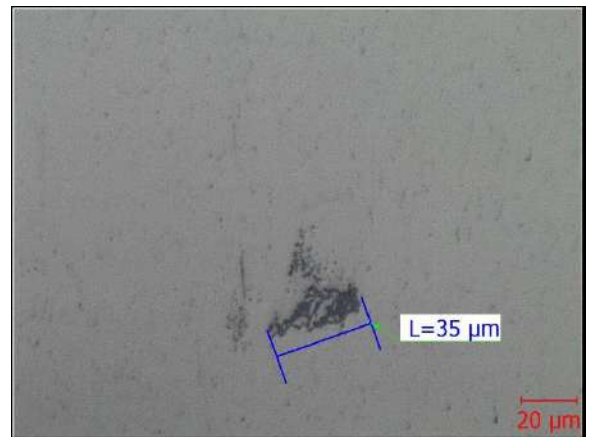
а – пори, х50



б – пора, х500



в – пора, х500



г – раковина, х500



д – «загоєння» мікротріщини, х200



е – «загоєння» мікротріщини, х500

Рисунок 3.9 – Дефекти в мікроструктурі зразків після вирощування та обробки

ГШ+ТО

Таким чином, у процесі гарячого ізостатичного пресування відбулося «загоєння» дрібної пористості (до ~ 20 мкм) і внутрішніх мікротріщин. Це узгоджується з механізмом баротермічного впливу, за якого усунення, а також зменшення мікропористості може бути досягнуто стосовно тільки внутрішніх об'ємів металу.

Дослідження шліфів після травлення в реактиві для електролітичного травлення жароміцних сплавів показало, що в мікроструктурі зразків після ГП не відбулося якихось помітних змін порівняно зі структурою без ГП. Мікроструктура має дендритну будову, спостерігається різнозернистість і наявність витягнутих зерен і дендритів (стовпчаста структура) у напрямку максимального градієнту температури (поперек шарів) (рис. 3.10). Мікроструктура являє собою γ -твердий розчин з наявністю інтерметалідів, карбідів, нітридів і частинок голчастої морфології надлишкової фази на основі хрому (α -Cr), яка виділилася під час старіння.

У мікроструктурі лінії сплавлення не проглядаються, структура є однорідною із взаємним проростанням зерен і дендритів між шарами. Мікроструктура відповідає нормально термообробленому стану сплаву ЕП648-ВІ (ХН50ВМТЮБ).

Так само, як і до ГП, на зразках присутні скупчення карбідів по границям зерен (див. рис. 3.10 д, е), що характерно для нікелевих сплавів.



а – поперечний, х200



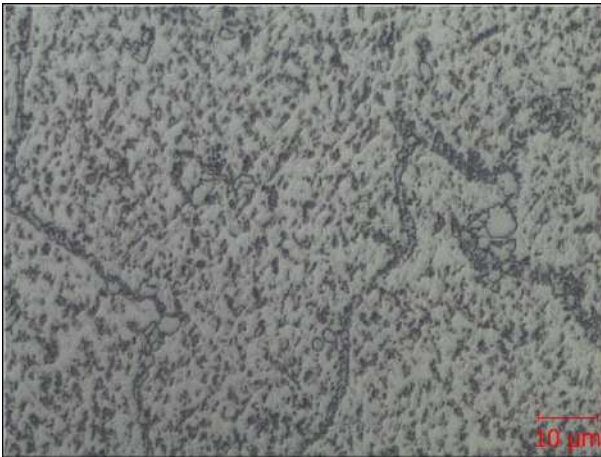
б – поздовжній, х200



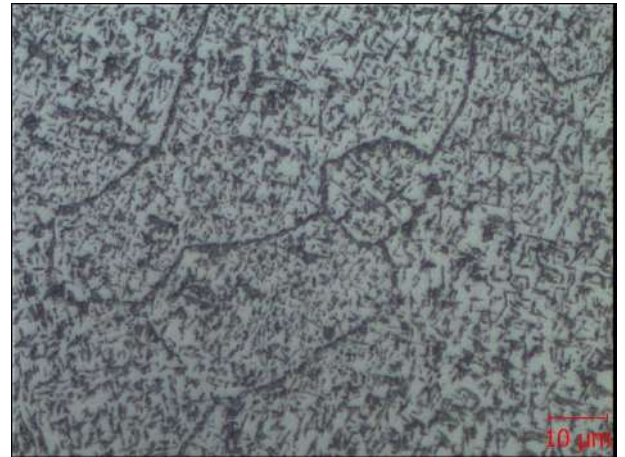
в – поперечний, х500



г – поздовжній, х500



д – поперечний, х1000



е – поздовжній, х1000

Рисунок 3.10 – Мікроструктура зразків після вирощування та обробки ГП+ТО

3.4 Механічні властивості матеріалу, отриманого прямим вирощуванням методом плазмового наплавлення до і після ГП

При адитивному формуванні виробів отриманий метал має відповідати необхідним характеристикам міцності. Як правило, вони мають бути не нижчими за властивості матеріалу, отриманого традиційними способами (лиття, кування тощо).

Зразки для проведення механічних випробувань матеріалу вирізали за схемою, представленою на рис. 2.5.

Результати механічних випробувань за кімнатної температури зразків зі сплаву ЕП648-ВІ, отриманих прямим вирощуванням методом плазмового наплавлення (РАW), опрацьовано та представлено в таблиці 3.3 та на діаграмі рис. 3.11. Для порівняння в таблиці 3.3 і на діаграмі рис. 3.11 наведено норми ТУ 14-1-3046-80 [7] для прутків зі сплаву ЕП648-ВІ (ХН50ВМТЮБ) і норми ОСТ 1 90126-85 [52] для лиття зі сплаву ВХ4Л (ХН50ВМТЮБ) (ливарний варіант ЕП648-ВІ).

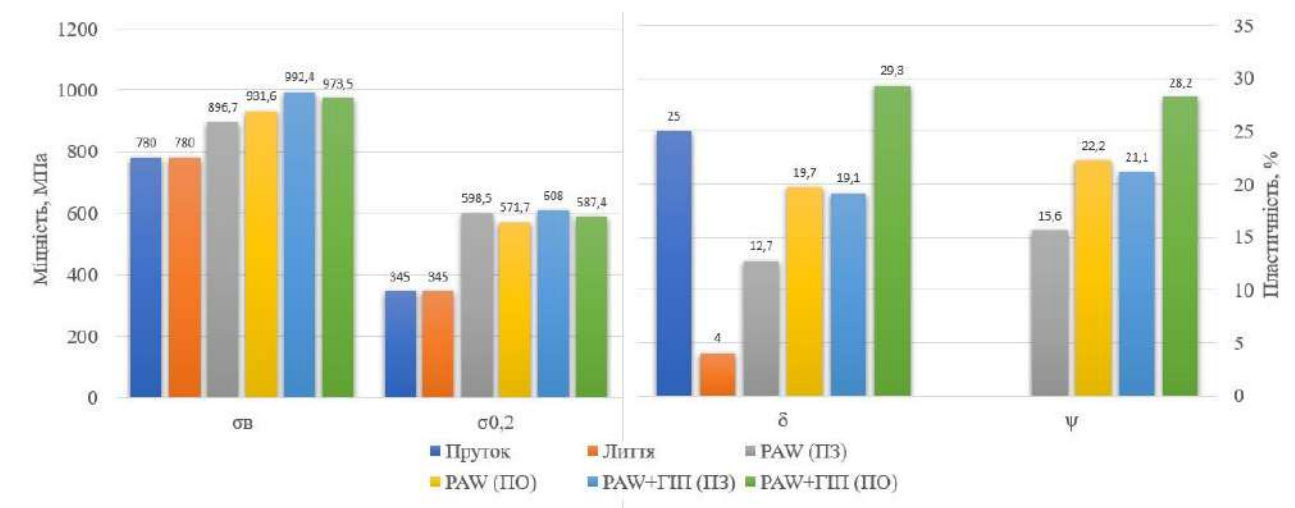


Рисунок 3.11 – Механічні властивості зразків, отриманих методом прямого вирощування до і після ГП, в порівнянні з прутками і литтям

Таблиця 3.3 – Механічні властивості вирощених зразків при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Вид напівфабрикату	Режими ТО	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Вирощений зразок плазовим наплавленням (PAW) до ГП	Гартування з $T=(1140\pm 10)^{\circ}\text{C}$, витримка 1 година, старіння при $(900\pm 20)^{\circ}\text{C}$, витримка 16 годин, охолодження на повітрі	Поздовжній напрямок			
		926,7	616,8	12,8	19,0
		858,1	583,5	8,4	13,1
		905,2	595,3	9,6	15,0
		896,7	598,5	12,7	15,6
		Поперечний напрямок			
		871,8	551,1	15,2	18,6
		952,2	566,8	23,6	29,5
		970,9	597,2	20,4	18,6
		931,6	571,7	19,7	22,2
Вирощений зразок плазовим наплавленням (PAW) після ГП	Гартування з $T=(1140\pm 10)^{\circ}\text{C}$, витримка 1 година, старіння при $(900\pm 20)^{\circ}\text{C}$, витримка 16 годин, охолодження на повітрі	Поздовжній напрямок			
		1029,7	631,5	19,2	22,2
		997,3	606,1	20,0	18,6
		950,3	586,4	18,0	22,6
		992,4	608,0	19,1	21,1
		Поперечний напрямок			
		967,9	593,3	28,0	27,5
		962,0	583,5	30,4	27,7
		990,5	585,5	29,6	29,5
		973,5	587,4	29,3	28,2
Норми ТУ 14-1-3046-80 (Пруток)	Гартування з $T=(1140\pm 10)^{\circ}\text{C}$, витримка 1 година, старіння при $(900\pm 20)^{\circ}\text{C}$, витримка 16 годин, охолодження на повітрі	≥ 780	≥ 345	≥ 25	-
Норми ОСТ 1 90126-85 (Лиття)	Гартування з $T=(1180\pm 15)^{\circ}\text{C}$, витримка 1 година, старіння при $(900\pm 10)^{\circ}\text{C}$, витримка 16 годин, охолодження на повітрі	≥ 780	≥ 345	≥ 4	-

Примітка. Жирним шрифтом наведено середні значення механічних властивостей.

З даних, представлених у таблиці 3.3 слідує, що:

- міцнісні властивості (σ_B , $\sigma_{0,2}$) при кімнатній температурі зразків до ГП відповідають вимогам ТУ 14-1-3046-97 (Прутки) та ОСТ 1 90126-85 (Лиття ВХ4Л);

- пластичні властивості (δ) при кімнатній температурі зразків до ГП відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85 (Лиття ВХ4Л), але є нижчими за вимог ТУ 14-1-3046-97 (Прутки) на 49% у поздовжньому напрямку та на 21% у поперечному напрямку;

- міцнісні властивості (σ_B , $\sigma_{0,2}$) зразків до ГП у поздовжньому і поперечному напрямку перебувають приблизно на одному рівні, присутня невелика відмінність (~4...5%). При цьому спостерігається більш значна до (~36%) анізотропія пластичних властивостей (δ) у поздовжньому і поперечному напрямку;

- міцнісні властивості (σ_B , $\sigma_{0,2}$) зразків при кімнатній температурі після ГП збільшилися на 11% у поздовжньому напрямку і на 5% у поперечному напрямку;

- пластичні властивості (δ) зразків при кімнатній температурі після ГП збільшилися більш значно, на 50% у поздовжньому напрямку і на 49% у поперечному напрямку. Пластичні властивості (δ) зразків після ГП у поперечному напрямку збільшилися до рівня прутків і відповідають вимогам ТУ 14-1-3046-97 (Прутки);

- міцнісні властивості (σ_B , $\sigma_{0,2}$) зразків після ГП у поздовжньому і поперечному напрямку перебувають приблизно на одному рівні, присутня невелика відмінність (~2...4%). При цьому спостерігається більш значна до (~53%) анізотропія пластичних властивостей (δ) у поздовжньому та поперечному напрямку.

За результатами механічних випробувань можна зробити висновки, що мікротріщини, які присутні в матеріалі зразків після вирощування, не мають значного впливу на міцнісні властивості зразків під час статичного навантаження, при цьому мають більш значний вплив на пластичні властивості,

після проведення обробки методом ГП пластичність зразків збільшується до 50%. Ця обставина підтверджує факт, що в процесі ГП відбувається «загоєння» внутрішніх мікротріщин, яке призводить до підвищення механічних властивостей. Що узгоджується з авторами інших робіт, які підтверджують, що, гаряче ізостатичне пресування може ефективно усувати мікротріщини, пори та інші дефекти, що значно покращує властивості [53, 54].

Такі тріщини мало впливають на механічні властивості при статичному навантаженні, проте вони мають великий вплив на міцність під час повзучості та стійкість до втоми, оскільки часто стають концентраторами руйнування, призводячи до серйозного зниження характеристик виробів [55].

Значна відмінність пластичних властивостей у поздовжньому і поперечному напрямку як до, так і після ГП пояснюється наявністю стовпчастої структури в матеріалі, отриманому методом прямого вирощування. Така структура характерна для жароміцних сплавів з направленою кристалізацією, в яких спостерігається анізотропія пластичних властивостей залежно від напрямку прикладання навантаження (уздовж або поперек зерен). За умови прикладення навантаження паралельно до напрямку росту зерен пластичні властивості вищі, ніж за умови прикладення навантаження поперек зерен. Така структурна особливість призводить до збільшення межі повзучості при підвищених температур. Оскільки в умовах повзучості порожнечі утворюються тільки навколо карбідів типу $Me_{23}C_6$ на границях зерен, які перпендикулярні осям напружень, відсутність таких границь сприяє збільшенню опору повзучості [51].

Візуальний огляд розривних зразків після випробування показав, що поверхня поздовжніх зразків, які не пройшли ГП, блискуча, має мінімальну хвилястість. Руйнування відбулося практично без утворення шийки, що свідчить про крихко-в'язкий характер руйнування (рис. 3.12 а).

Поверхня поздовжніх зразків, після ГП, змінилася, стала хвилястою з різним ступенем стоншення. Зразки подовжилися, руйнування відбулося з утворенням шийки, що свідчить про пластичний характер руйнування (рис. 3.12 б).



а – без ГШ



б – після ГШ

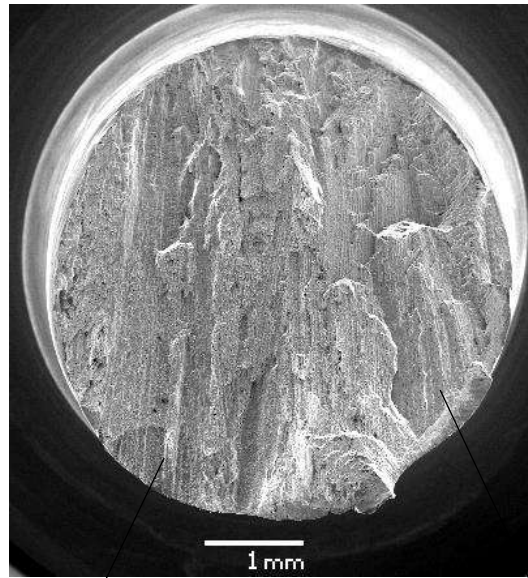
Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд поздовжніх зразків після випробувань

Поверхня поперечних зразків як до, так і після ГШ ідентична, хвиляста з різним ступенем стоншення. Зразки подовжилися, руйнування відбулося з утворенням шийки, що свідчить про пластичний характер руйнування.

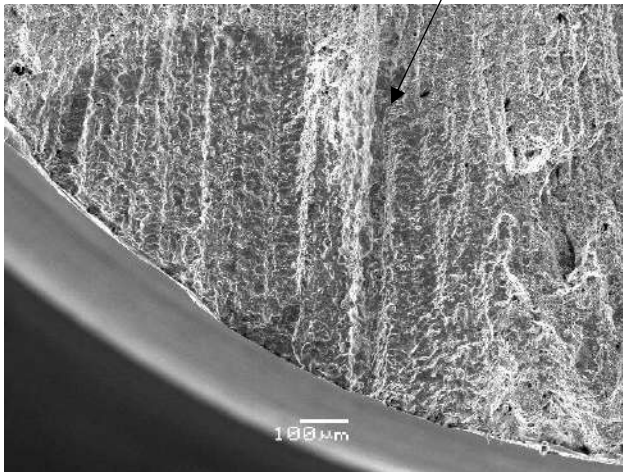
Після випробувань на розтяг провели дослідження зламів розривних зразків на електронному мікроскопі.

Злами поздовжніх зразків до і після ГШ дендритної будови, спостерігається спрямованість дендритів (стовпчастість) така сама, як і в мікроструктурі (рис. 3.13 а, 3.14 а).

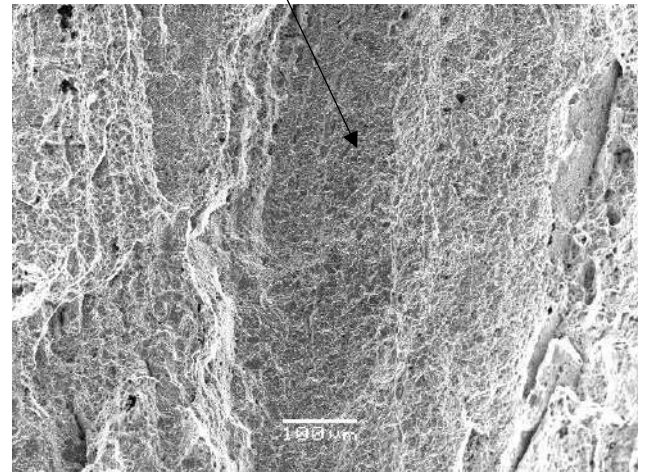
На фрактограмах зламу поздовжніх зразків до ГШ видно, що загалом поверхня зламу характеризується ямковою структурою поверхні (рис. 3.13 в, д), характерною для пластичних матеріалів, присутні невеликі зони, які мають згладжену «оплавлену» поверхню (рис. 3.13 б, г) характерну для зламів гарячих тріщин [56].



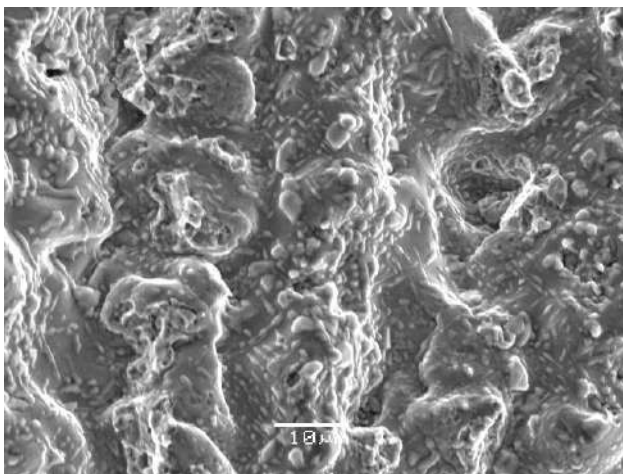
а, x15



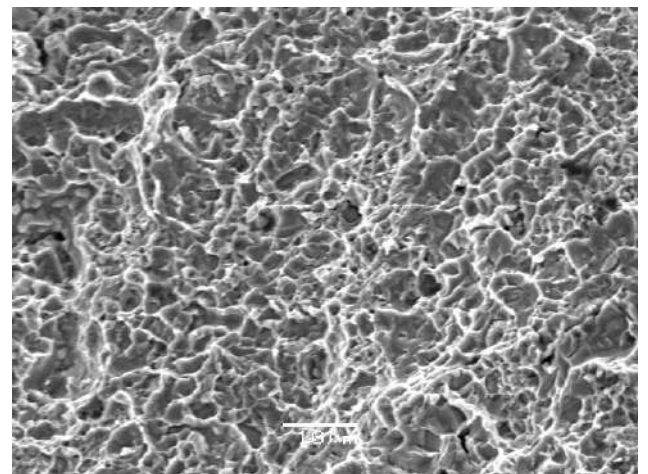
б – ділянка з оплавленням, x100



в – ямковий злам, x150



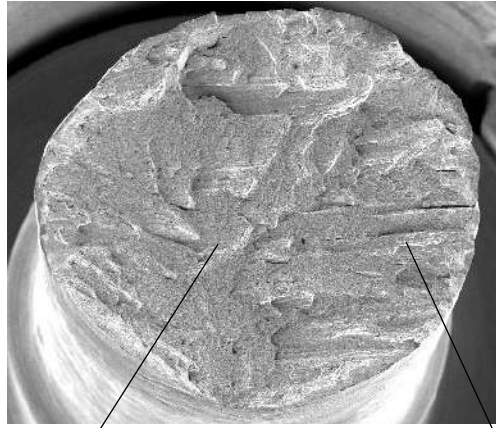
г – ділянка з оплавленням, x1500



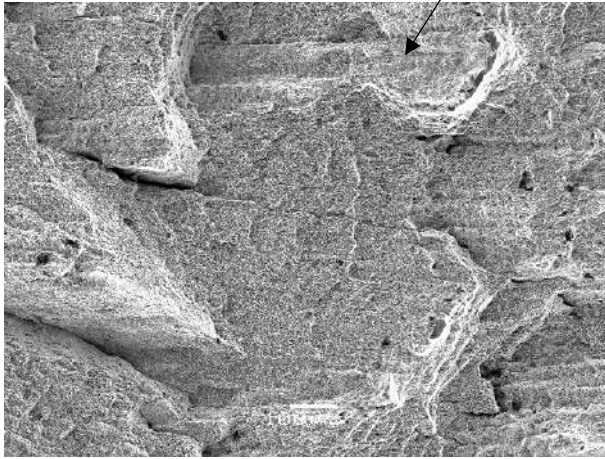
д – ямковий злам, x1500

Рисунок 3.13 – Фрактограма зламу поздовжнього зразка до ГП

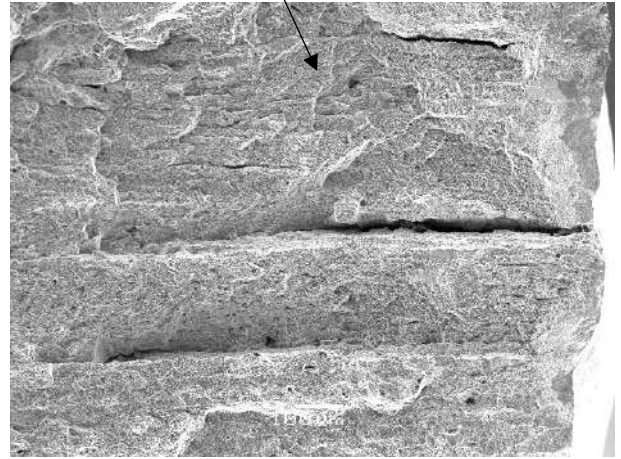
На фрактограмах зламу поздовжніх зразків після ГП видно, що вся поверхня зламу характеризується ямковою структурою (рис. 3.14), характерною для пластичних матеріалів. Згладжені «оплавлені» ділянки які присутні на зразку до ГП, не виявлено.



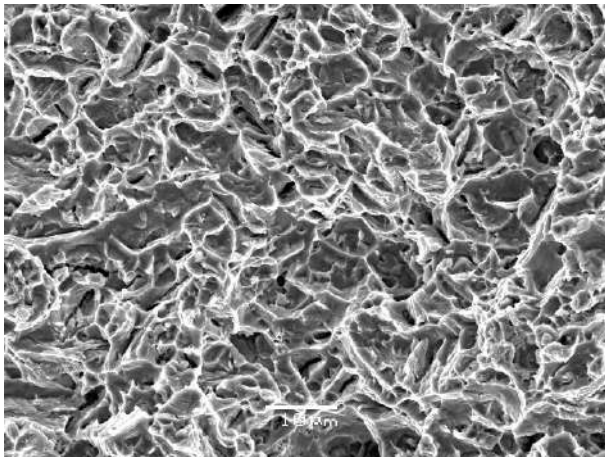
а, x15



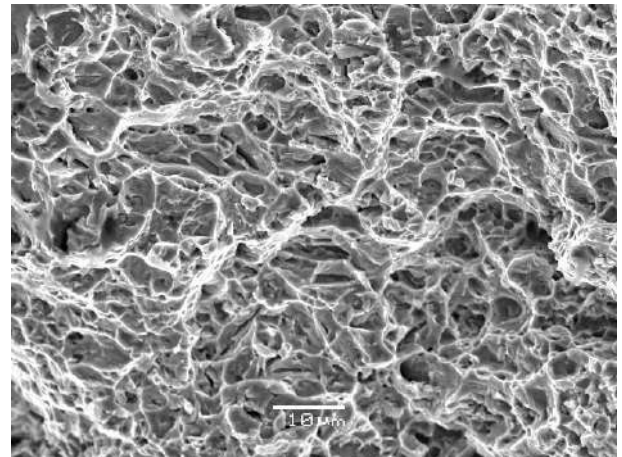
б – ямковий злам, x100



в – ямковий злам, x100



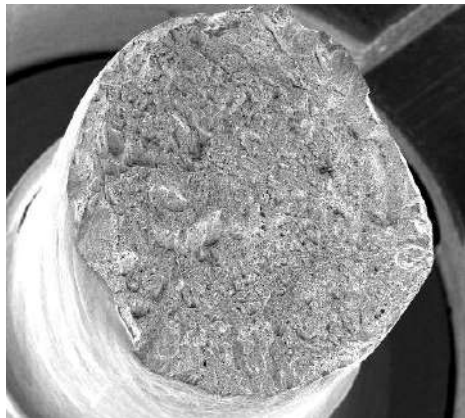
г – ямковий злам, x1500



д – ямковий злам, x1500

Рисунок 3.14 – Фрактограма зламу поздовжнього зразка після ГП

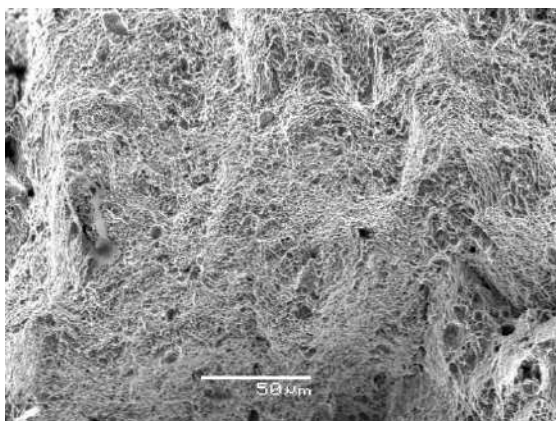
Злами поперечних зразків до і після ГП дендритної будови, спрямованість дендритів як на поздовжніх зразках не спостерігається (рис. 3.15 а, б). На фрактограмах зламів видно ямкову структуру по всій поверхні зразків (рис. 3.15), характерну для пластичних матеріалів. Згладжені «оплавлені» ділянки, не виявлені.



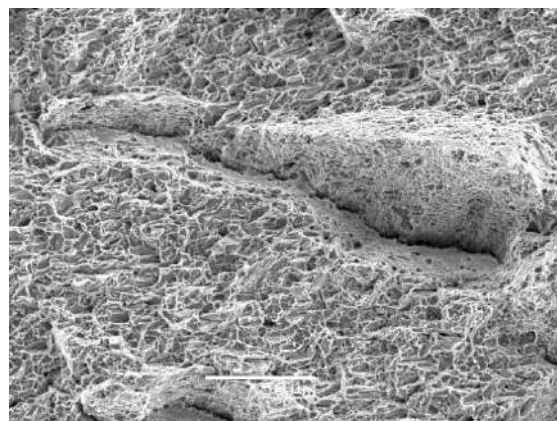
а – поперечних до ГП, x15



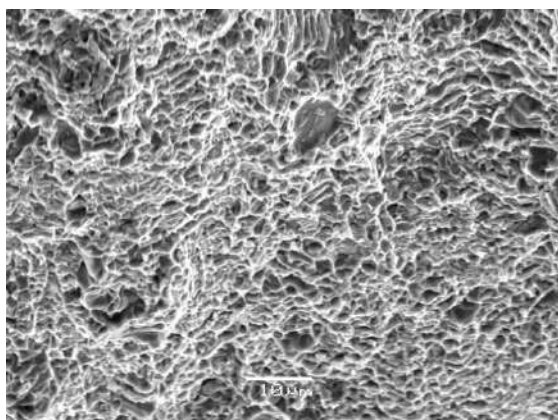
б – поперечний після ГП, x20



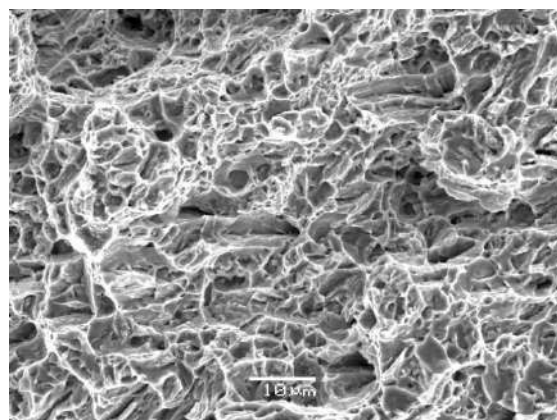
в – поперечних до ГП, x500



г – поперечний після ГП, x500



д – поперечних до ГП, x1500



е – поперечний після ГП, x1500

Рисунок 3.15 – Фрактограма зламу поперечних зразків до і після ГП

Згладжені «оплавлені» ділянки на поверхні зламів поздовжніх зразках до ГП вказують на наявність міжкристалітних рідких плівок, що є характерними для гарячих тріщин [56]. Це свідчить про те, що мікротріщини, виявлені в матеріалі зразків, є гарячими тріщинами, які утворилися по рідким плівкам, розташованих по границям зерен на останній стадії кристалізації.

Автори робіт [57 – 59] механізм утворення гарячих тріщин при адитивному вирощуванні жароміцних сплавів на нікелевій основі описують таким чином.

Утворення гарячих тріщин відбувається за двома механізмами – затвердіння і ліквідаційного розтріскування. Обидва механізми пов'язані з наявністю міжкристалітних рідких плівок. Перший зазвичай є результатом обмеження свободи, яке може бути присутнім при адитивному вирощуванні методами WAAM. Другий, є результатом дифузії таких елементів, як Cr, Mo і W під час багаторазового нагрівання, до границь зерен, і за досягнення в локальній зоні критичного вмісту Cr, Mo і W призводить до утворення евтектик із низькою температурою плавлення у вигляді рідких плівок.

Наявність міжкристалітної рідкої плівки сама по собі недостатня для утворення тріщин. Поєднання рідких плівок і термічних напружень, що виникають під час кристалізації та охолодження, призводить до розвитку гарячих тріщин.

Відсутність «оплавлених» ділянок на поверхні зламів після ГП підтверджує «загоєння» внутрішніх мікротріщин, які не виходять на поверхню в процесі гарячого ізостатичного пресування.

3.5 Технологія виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ методом прямого вирощування плазмовим наплавленням

Заготовка для кільця корпусу внутрішнього ТВТ вирощується на роботизованій установці (рис. 3.16), до складу якої входить: робот

FANUC M-710iC (Японія), маніпулятор з планшайбою FANUC 2-axes (Японія) та плазмове джерело живлення SBI PMI-350 AC/DC TL (Австрія).



Рисунок 3.16 – Установка для прямого вирощування методом плазмового наплавлення

Заготовка для вирощування максимально повторює контури готової деталі з мінімальними припусками на механічну обробку ~ 5 мм на сторону. Ескіз вирощуваної заготовки кільця представлений на рис. 3.17.

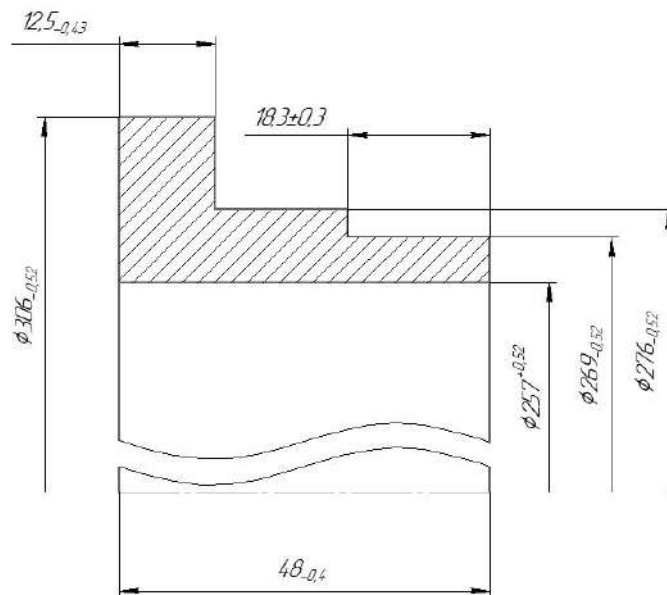


Рисунок 3.17 – Ескіз вирощуваної заготовки кільця корпусу внутрішнього ТВТ

Вирощування заготовки виконується на підкладку, яка виготовляється з низьковуглецевої сталі Ст3, Ст5 і т.п. підкладка не повинна бути занадто тонкою мінімальна товщина підкладки 10 мм, так як при вирощуванні під дією зварювальних напружень можлива її деформація. Підкладка для вирощування заготовки кільця корпусу внутрішнього ТВТ виготовляється у вигляді кільця (рис. 3.18), яке закріплюється на планшайбі маніпулятора.

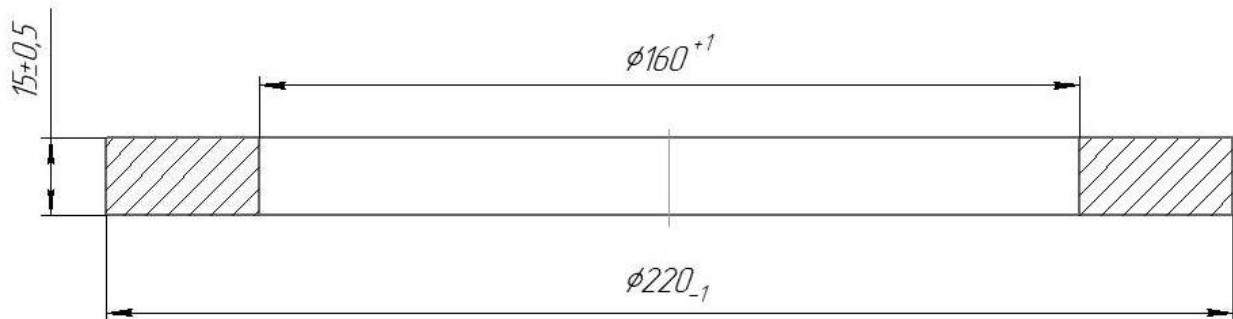
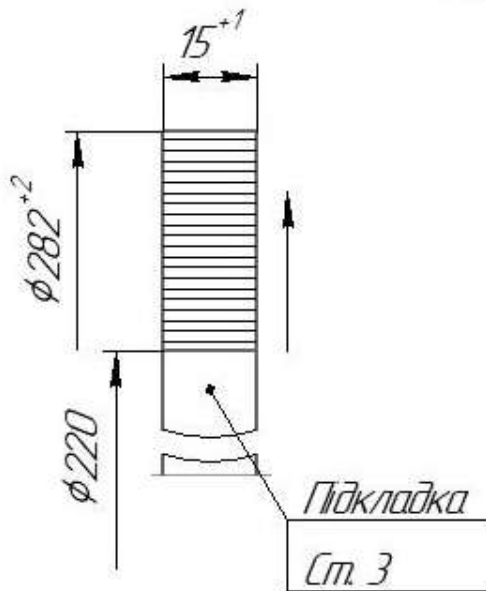


Рисунок 3.18 – Ескіз підкладки для вирощування

Технологія виготовлення заготовки кільця корпусу внутрішнього ТВТ методом прямого вирощування плазмовим наплавленням має наступний вигляд:

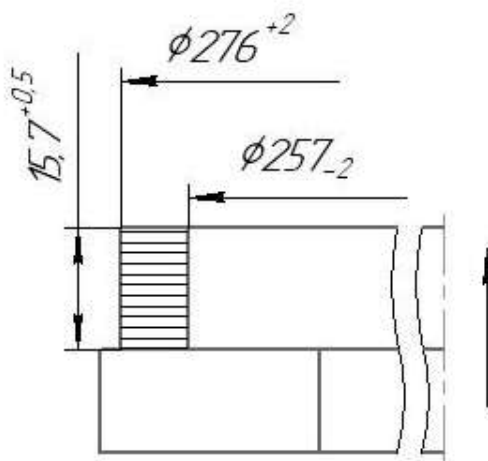
1. Встановити підкладку для вирощування на маніпулятор, та протерти поверхню підкладки від мастила та забруднень серветкою змоченою в ацетоні або уайт-спіриті;
2. Розбити заготовку на чотири окремі частини для зручності вирощування, та скласти програму для кожної частини через контролер робота;
3. Виконати поетапне вирощування кожної частини згідно схеми та режимів вирощування представлених на рис. 3.19 – 3.20. Стрілками показано напрямок вирощування на кожній частині, штрихуванням показано вирощуваний фрагмент;
4. Після вирощування кожної частини поверхню на яку буде виконуватися вирощування наступної частини зачистити металевією щіткою до блиску від окалини яка утворюється на бокових поверхнях під час вирощування;

Частина 1



Параметри режиму вирощування	
Діаметр присадного дроту $d_{п.д.}$, мм	1
Діаметр вольфрамового електрода $d_{в.}$, мм	3,2
Сила струму $I_{н.}$, А	95
Швидкість зварювання $V_{з.}$, мм/с	1,5
Швидкість подачі дроту $V_{п.д.}$, м/хв	0,85
Діаметр плазм. сопла, мм	2,6
Витрата плазм. газу $Q_{п.г.}$, л/хв	1,1
Витрата захисного газу $Q_{з.г.}$, л/хв	12
Крок наплавлення, мм	2,5
Параметри імпульсу	
-Частота, Hz	0,8
-Струм паузи $I_{п.}$, А	30% $I_{н.}$
Кількість проходів, шт.	8

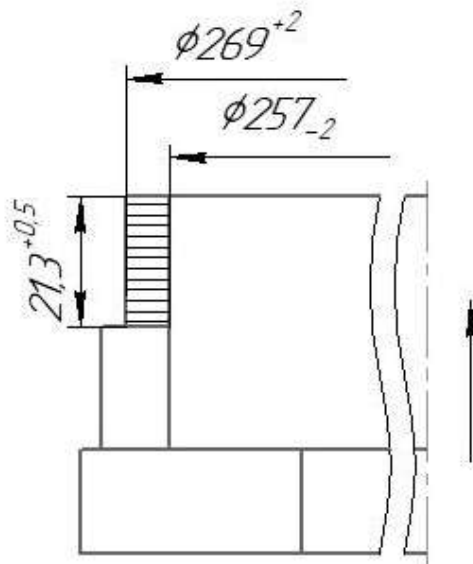
Частина 2



Параметри режиму вирощування	
Діаметр присадного дроту $d_{п.д.}$, мм	1
Діаметр вольфрамового електрода $d_{в.}$, мм	3,2
Сила струму $I_{н.}$, А	95
Швидкість зварювання $V_{з.}$, мм/с	1,5
Швидкість подачі дроту $V_{п.д.}$, м/хв	0,85
Діаметр плазм. сопла, мм	2,6
Витрата плазм. газу $Q_{п.г.}$, л/хв	1,1
Витрата захисного газу $Q_{з.г.}$, л/хв	12
Крок наплавлення, мм	2,5
Параметри імпульсу	
-Частота, Hz	0,8
-Струм паузи $I_{п.}$, А	30% $I_{н.}$
Кількість проходів, шт.	4

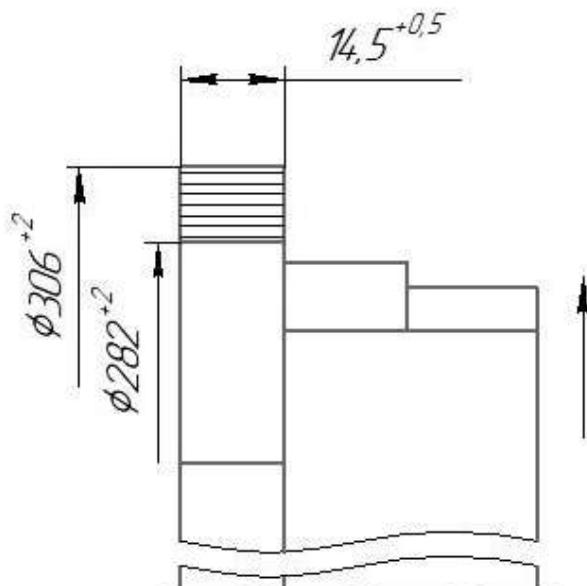
Рисунок 3.19 – Схема і режими вирощування заготовки

Частина 3



Параметри режиму вирощування	
Діаметр присадного дроту $d_{п.д.}$, мм	1
Діаметр вольфрамового електрода $d_{в.}$, мм	3,2
Сила струму $I_{н.}$, А	95
Ш видкість зварювання $V_{з.}$, мм/с	1,5
Ш видкість подачі дроту $V_{п.д.}$, м/хв	0,85
Діаметр плазм. сопла, мм	2,6
Витрата плазм. газу $Q_{п.г.}$, л/хв	1,1
Витрата захисного газу $Q_{з.г.}$, л/хв	12
Крок наплавлення, мм	2,5
Параметри імпульсу	
-Частота, Hz	0,8
-Струм паузи $I_{п.}$, А	30% $I_{н.}$
Кількість проходів, шт.	6

Частина 4



Параметри режиму вирощування	
Діаметр присадного дроту $d_{п.д.}$, мм	1
Діаметр вольфрамового електрода $d_{в.}$, мм	3,2
Сила струму $I_{н.}$, А	95
Ш видкість зварювання $V_{з.}$, мм/с	1,5
Ш видкість подачі дроту $V_{п.д.}$, м/хв	0,85
Діаметр плазм. сопла, мм	2,6
Витрата плазм. газу $Q_{п.г.}$, л/хв	1,1
Витрата захисного газу $Q_{з.г.}$, л/хв	12
Крок наплавлення, мм	2,5
Параметри імпульсу	
-Частота, Hz	0,8
-Струм паузи $I_{п.}$, А	30% $I_{н.}$
Кількість проходів, шт.	4

Рисунок 3.20 – Схема і режими вирощування заготовки

5. Контроль якості після вирощування заготовки виконується візуальним оглядом із застосування лупи з 10-ти кратним збільшенням на наявність поверхневих дефектів та перевіряються геометричні розміри заготовки згідно ескізу. При виявленні поверхневих дефектів (несплавлень, підрізів, раковин та ін.) допускається їх усунення аргонодуговим зварюванням з використанням присадного дроту ЕП648-ВІ. Дефекти перед зварюванням механічно обробити до повного видалення;

6. Зрізати заготовку з підкладки на токарному верстаті. Зовнішній вигляд заготовки кільця після вирощування представлений на рис. 3.21.



Рисунок 3.21 – Зовнішній вигляд заготовки кільця після вирощування

7. Виконати обробку методом ГП по режимам: температура $T=1180^{\circ}\text{C}$, тиск 160 атм, витримка 2 год.;

8. Виконати термообробку по режимам для сплаву ЕП648-ВІ: гартування з $T=(1140\pm 10)^{\circ}\text{C}$, витримка 1 годину, старіння при $T=(900\pm 20)^{\circ}\text{C}$, витримка 16 годин, охолодження на повітрі;

9. Виконати механічну обробку на токарному і фрезерувальному верстаті згідно з кресленням деталі. Зовнішній вигляд деталі після механічної обробки представлений на рис. 3.22;

10. Виконати контроль якості остаточно обробленої деталі візуальним оглядом та кольоровою дефектоскопією. Перевірити геометричні розміри кільця згідно креслення.



а



б

Рисунок 3.22 – Зовнішній вигляд кільця корпусу внутрішнього ТВТ після механічної обробки

3.6 Контроль якості виробів отриманих прямим вирощуванням методом плазмового наплавлення

Для технологічного процесу прямого вирощування методом плазмового наплавлення типовими є такі дефекти:

- раковина – порушення суцільності, утворена затриманим газом, що виділяється під час кристалізації;
- пора – газова порожнина сферичної або неправильної форми;
- несплавлення – відсутність з'єднання між окремими валиками;
- тріщина – порушення суцільності, спричинене локальним розривом унаслідок дії внутрішніх напружень;
- включення – чужорідна речовина в основному металі виробу.

Причинами утворення дефектів можуть слугувати як порушення режимів технологічного процесу вирощування, так і інші чинники.

Контроль механічних властивостей матеріалу, отриманого вирощуванням методом плазмового наплавлення, виконують на етапі розроблення технології нової деталі на зразках, а також не рідше ніж один раз на рік під час подальшого виробництва.

Контроль якості вирощених заготовок виконується візуальним оглядом із застосуванням лупи з 10-им збільшенням на наявність поверхневих дефектів. Норми допустимих дефектів наведено в таблиці 3.4, тріщини не допускаються.

Таблиця 3.4 – Норми допустимих дефектів

	Одиничні (раковини, порі, несплавлення)	Групові
Діаметр, мм	2,5	-
Відстань між дефектами (ділянками), мм	10	10
Кількість допустимих дефектів (ділянок), шт.	10	4
Допустима площа, мм ²	-	50

Дефекти, що перевищують норми (табл. 3.4), дозволяється виправляти пологою зачисткою в межах припуску на механічну обробку. Також допускається виправлення дефектів аргонодуговим зварюванням з попереднім зачищенням до повного видалення дефекту.

Деталі після остаточної механічної обробки піддаються візуальному контролю і контролю методами кольорової дефектоскопії. Дефекти не повинні перевищувати норми, наведені в табл. 3.4, тріщині не допускаються.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В даному розділі розглянуті основні заходи з охорони праці при розробленні технології виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ методом прямого вирощування плазмовим наплавленням, та дослідженні зразків при роботі в дослідницькій лабораторії.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) незадовільна організація робочого місця може бути пов'язана з недостатнім врахуванням вимог ергономіки, зокрема з нераціональним розташуванням технологічного та науково-дослідного обладнання та захаращеністю робочої зони, що може призвести до механічних або електричних травм та зниженню або втраті працездатності;

б) можливість ураження електричним струмом. Головними причинами ураження можуть бути невиконання правил електробезпеки, невикористання індивідуальних засобів захисту, відсутність захисного заземлення, частково оголені проводи, відкриті скрутки, пробій ізоляції, що може призвести до електричних травм або летальних наслідків;

в) можливість отримання механічних травм при підготовці зразків що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом (НПАОП 28.0-1.30-12) [60] зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм;

г) можливість отримання механічних травм внаслідок порушень правил з охорони праці при підготовці зразків для випробування твердості, механічних та технологічних властивостей та при безпосередніх випробуваннях. Основними

небезпеками можуть бути: використання застарілого та небезпечного обладнання, порушення умов проведення випробувань;

д) можливість отримання хімічного отруєння внаслідок порушення правил зберігання та використання хімічних речовин в лабораторії при травленні металів, або відсутності чи не використання індивідуальних засобів захисту;

е) небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом оптичної металографії з використанням оптичних мікроскопів зокрема: ушкодження органів зору при хибній комбінації світлофільтрів, об'єктивів та окулярів.

є) негативний вплив електромагнітних полів та випромінювань при роботі за комп'ютером, який полягає в зниженні імунітету людини, а відповідно, сприяє загальній захворюваності;

ж) невідповідність вимогам ДБН В.2.5-28-2018 [61] «Природне і штучне освітлення» освітлення робочих зон дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору;

з) можливість загорянь причинами яких є порушення правил пожежної безпеки, виток горючих робочих газів, коротке замикання, що може призвести до пожеж;

и) неправильні дії персоналу в умовах надзвичайних ситуацій різного характеру, причинами яких є невідповідність персоналу до дій в умовах НС, низька ефективність управління в цих умовах, що може призвести до тяжких травм або летального наслідку.

4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

4.2.1 Захист працівників у робочій зоні

а) Правильна організація робочого місця передбачає виконання ергономічних вимог, які визначаються існуючими стандартами ДСТУ ГОСТ 12.2.061-2009 «ССБП. Устаткування виробниче. Загальні вимоги безпеки до робочих місць», ДСТУ 8604-2015 «Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги» визначає загальні ергономічні вимоги до робочого місця при виконанні робіт сидячи, а ДСТУ 7950-2015 «Дизайн і ергономіка. Робоче місце під час виконання робіт стоячи. Загальні ергономічні вимоги» при виконанні робіт стоячи [62 – 64].

Головною ідеєю стандартів є положення про те, що «Конструктивні та ергономічні особливості робочого місця повинні забезпечувати безперешкодне та зручне виконання всіх робочих операцій».

Шляхи пересування в робочій зоні, включаючи сходи, стаціонарні переходи, аварійні виходи повинні бути позначені відповідними знаками, мати дороговкази, бути так розташовані і мати такі розміри, щоб прохід або проїзд був легким і безпечним. Наприклад: підлоги приміщень не повинні мати нерівностей, отворів або небезпечних ухилів, двері аварійних виходів повинні відкриватись назовні і замикатись, так, щоб у випадку необхідності будь-яка особа могла легко і швидко їх відкрити без застосування додаткових засобів, захищеність робочих зон, шляхів пересування, аварійних виходів категорично забороняється.

Конструкція робочого столу в лабораторії повинна забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного устаткування з урахуванням його кількості і конструктивних особливостей, а також характеру виконуваної роботи. Допускається використання робочих столів різних конструкцій, що відповідають сучасним вимогам ергономіки. Поверхня робочого стола повинна мати коефіцієнт відбиття 0,5 – 0,7. Висота поверхні

столу повинна регулюватися в межах від 680 мм до 800 мм, при відсутності такої можливості висота робочої поверхні столу повинна складати 725 мм.

Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм і на рівні витягнутих ніг – не менше 650 мм.

Конструкція робочого крісла повинна забезпечувати підтримку раціональної робочої пози під час роботи, дозволяти змінювати позу з метою зниження статичного напруження м'язів шийно-плечової області і спини для попередження розвитку втоми. Робоче крісло повинно мати наступні основні елементи: сидіння, спинку і стаціонарні або знімні підлокітники, регулюватися по висоті, куту нахилу сидіння і спинки, висоті підлокітників. Регулювання кожного параметра незалежні.

4.2.2 Заходи з електробезпеки

б) Для попередження ураження електричним струмом необхідно здійснювати наступні заходи захисту:

До виконання робіт допускаються особи віком не молодше 18 років, що пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки згідно НПАОП 40.1-1.21-98 [65] «Правила безпечної експлуатації електроустановок – споживачів» та отримали допуск з електробезпеки відповідної групи.

Для кожного електроспоживного обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи.

Згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 [66] «Правила безпечної експлуатації електроустановок» для безпечного проведення робіт необхідно виконати наступні організаційні заходи (п. 6.1.1):

- призначити працівників, відповідальних за безпечне проведення робіт; - видати наряд або розпорядження;

- видати дозвіл на підготовку робочих місць і на допуск;
- підготувати робочі місця та забезпечити допуск до роботи;
- забезпечити нагляд при виконанні робіт;
- при необхідності, організувати переведення на інше робоче місце;
- забезпечити оформлення перерв у роботі та порядок її закінчення.

До основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Використання захисного заземлення:

- Захисне заземлення – це заземлення, яке виконане з метою електробезпечності, тобто з'єднання відкритих провідних частин (ВПЧ) із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та від наведеного напруги.

На практиці, у більшості випадків, це той же самий заземлювач до якого приєднують і ВПЧ, і нейтралі трансформаторів, і блискавкоприймачи. Тільки

при яких-небудь обґрунтуваннях (технологічних, з погляду безпеки і т.п.) застосовують три різні заземлювача, що обходиться значно дорожче.

Заземлення використовують також для захисту від статичної електрики, що накопичується при терті діелектриків для захисту від електромагнітних випромінювань, підключаючи екрани до заземлювача і т.п.

Захисне заземлення може бути ефективним тільки в тому випадку, якщо струм замикання на землю не збільшується зі зменшенням опору заземлення. Це можливо в мережах з ізольованою нейтраллю, де при глухому замиканні на землю або на заземлений корпус струм не залежить від провідності (або опору) заземлення, а також у мережах, напругою вище 1000 В з заземленою нейтраллю. В останньому випадку замикання на землю є коротким замиканням, при цьому спрацьовує максимальний струмовий захист.

У мережі із заземленою нейтраллю напругою до 1000 В заземлення неефективне, тому що навіть при глухому замиканні на землю струм залежить від опору заземлення та зі зменшенням останнього струм зростає.

Відповідно до «Правил технічної експлуатації електроустановок» ПУЕ-2017 [67] і ПТБ для персоналу, який обслуговує електроустановки, встановлено кваліфікаційні групи з електробезпеки:

- I кваліфікаційна група присвоюється не електротехнічному персоналу, який використовує у своїй роботі електроінструмент (ПК, принтер, сканер, пилосос і т.п.). Спеціальне навчання – не потрібно. Групу присвоює співробітник, призначений на посаду відповідального за електрогосподарство підприємства.

- II кваліфікаційна група присвоюється кваліфікаційною комісією електротехнічному персоналу, який обслуговує установки та обладнання з електроприводом.

Наприклад, електрозварювачі (без права підключення), термісти установок СВЧ, машиністи вантажопідійомних машин, пересувні машини та механізми з електроприводом, що працюють із ручними електричними машинами та іншими переносними електроприймачами тощо. Також 2 група допуску (до 1000 В)

присвоюється молодим електрикам, електромонтажникам, і співробітникам, які прострочили продовження групи допуску більш ніж на 6 місяців.

- III кваліфікаційна група присвоюється тільки електротехнічному персоналу. Ця група дає право одноособового обслуговування, огляду, підключення та відключення електроустановок від мережі напругою до 1000 В.

- IV кваліфікаційна група присвоюється тільки особам електротехнічного персоналу. Особи із кваліфікаційною групою не нижче IV мають право на обслуговування електроустановок напругою вище 1000 В.

4-я група допуску з електробезпеки (до 1000 В) необхідна особам (ІТП) для призначення відповідальною особою за електрогосподарство в організації. Також присвоюється оперативному персоналу для навчання молоді на робочому місці.

- V кваліфікаційна група присвоюється особам, відповідальним за електрогосподарство та іншому інженерно-технічному персоналу в установках напругою вище 1000 В.

4.2.3 Заходи безпеки при виконанні процесів дослідження

в) Випробування абразивних кругів повинно виконуватися згідно з вимогами ГОСТ 12.3.028-82 [68] «Процесс обработки абразивными и эльборовым инструментом». Абразивні круги повинні мати штамп або наклейку про випробування – порядковий номер круга і підпис особи, відповідальної за випробування.

Біля кожного верстата необхідно вивісити табличку із зазначенням допустимої роботи кутової швидкості використовуваних кругів і частоти обертання шпинделя верстата в хвилину.

При шліфуванні і поліруванні дрібних і важко утримуваних зразків слід застосовувати спеціальні пристосування або оправлення, забороняється працювати в рукавицях або рукавичках. Огляд рухомого полірувального диска виконувати тільки після повної його зупинки. При автоматичній подачі матеріалу наближати руки до зони валиків забороняється.

Під час роботи верстата забороняється відкривати і знімати огорожі і запобіжні пристрої. Правку кола виконувати спеціальними правлячими інструментами: алмазним олівцем, металокерамічними дисками і т. п.

Не проводити перевірку точності обробки деталей до повної зупинки верстата.

Підручники повинні мати достатній за величиною майданчик для стійкого положення оброблюваного виробу. Зазор між краєм підручника і робочою поверхнею шліфувального круга повинен бути не більше 3 мм. Заборонено працювати без підручника, захисного екрана або окулярів, якщо верстат не заземлений і не обладнаний установкою для відсмоктування абразивного пилю.

г) Для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають.

При визначенні механічних характеристик зразків металів за допомогою розривних машин, маятнікового копра і твердоміра Брінелля забороняється:

- поправляти зразки на працюючій машині;
- працювати на несправному і необгородженому обладнанні;
- стояти навпроти випробуваного зразка;
- залишати маятник копра в піднятому положенні;
- допускати сторонніх осіб до працюючих машин, приладів і обладнання.

Оглядати рухомі частини обладнання слід після повної його зупинки.

д) Роботи з отруйними і токсичними хімічними речовинами необхідно проводити обов'язково з використанням засобів індивідуального захисту згідно НПАОП 0.00-7.17-18 [69] «Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці», лабораторія повинна бути обладнана ефективною місцевою витяжною вентиляцією по ДСТУ Б А.3.2-12-2009 [70] «ССБП. Системи вентиляційні. Загальні вимоги».

Роботи по знежиренню деталей ацетоном і бензином повинні проводитися при діючій загальнообмінній і місцевій витяжній вентиляції. Системи місцевих відсмоктувачів повинні включатися до початку робіт і вимикатися після їх закінчення. Робота вентиляційних установок повинна контролюватися за допомогою світлової і звукової сигналізації яка автоматично вмикається при зупинці вентиляції.

е) При визначенні типу структури використовується горизонтальний металографічний мікроскоп ZEISS Axio Observer. Dlm призначений для дослідження мікроструктури металів та інших не прозорих об'єктів в світловому полі при прямому і відбитому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі. Для візуального спостереження об'єктів мікроскоп забезпечений монокулярною і біноклярною насадками. Власне збільшення біноклярної насадки – х2,5.

Освітлення здійснюється від електролампи розжарювання потужністю 170 Вт, 17 В, живиться від освітлювальної мережі 220 В через понижуючий трансформатор, забезпечений секційним перемикачем для регулювання яскравості напруження лампи.

Правильне використання мікроскопа виходить тільки за умови раціональної комбінації об'єктів, окулярів. При вживанні їх треба враховувати, тому що збільшення повинно знаходитися в межах від 500 до 1000 апертур. Крім правильної комбінації об'єктів і окулярів, не менш важливе значення має і правильне застосування світлофільтрів. Як правило, при роботі з об'єктивними-

ахроматами слід застосовувати світлофільтри, а з апохроматами можна працювати і без них.

Об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з нечіткими контурами, пофарбованими головним чином по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, в яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра, жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

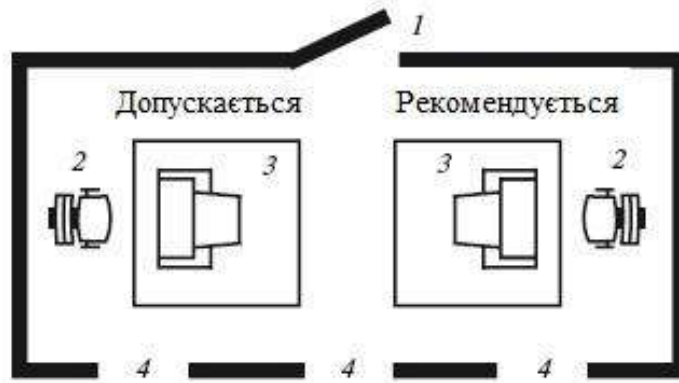
4.2.4 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці

є) для захисту працюючих від впливу електромагнітного випромінювання на комп'ютері повинен бути встановлений захисний екран, який включає прозорий провідний шар з питомим опором менше $0,01 - 0,001 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, що дозволяє знизити рівень напруженості до 5 В/м відповідно до ГОСТ 12.1.045-84 [71].

ж) для забезпечення достатнього освітлення передбачено проектування та застосування бокового та верхнього природного, штучного рівномірного освітлення згідно ДБН В.2.5-28-2018 [61] «Природне і штучне освітлення».

Приміщення лабораторії повинне мати природне і штучне освітлення. Штучне освітлення може бути як загальне, так і комбіноване. Освітленість на поверхні столу в зоні розміщення документів має бути від 300 лк до 500 лк.

Для підсвічування документів допускається застосування світильників місцевого освітлення. Робочі місця слід розміщувати таким чином, щоб монітор комп'ютера був орієнтований бічною стороною до світлових прорізів, а природне світло падало переважно ліворуч (рис. 4.1).



1 – двері; 2 – крісло робочого; 3 – стіл; 4 – вікна

Рисунок 4.1 – Розташування робочого місця з ПК по відношенню до світлових отворів

Блесткость усувається раціональним розміщенням робочих місць і вибором відповідного світильника. Світильники місцевого освітлення повинні мати непрозорий відбивач із захисним кутом не менше 40°.

Необхідно регулювати положення світильника так, щоб на екрані монітора не виникало відблисків. Періодично слід регулювати яскравість екрану, при необхідності перевіряючи її спеціальним приладом (люксометром). Рівень штучного освітлення слід регулярно перевіряти з допомогою люксометра.

4.2.5 Заходи по забезпеченню пожежної безпеки

з) Для виключення можливості загорянь, внаслідок порушення правил пожежної безпеки, необхідно проводити інструктаж і перевірку знань правил пожежної безпеки, відповідно до НПАОП 28.52-1.15-60 [72] «Правила по техніці безпеки і виробничої санітарії при електрозварювальних роботах», НАПБ А.01.001-2014 [73] «Правила пожежної безпеки України» та

НПАОП 0.00-4.12-05 [74] «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

Організаційні заходи: проводити інструктаж персоналу по техніці безпеки, розробити заходи щодо дій адміністрації на випадок виникнення пожежі, схему евакуації при пожежі розмістити на видному місці, ширина дверного прорізу на випадок евакуації 1,5 м, висота 2 м.

По пожежної небезпеки приміщення лабораторії, згідно ДСТУ Б В.1.1-36-2016 [75], відноситься до категорії В – пожежонебезпечне, тому що в приміщенні знаходяться тверді горючі і важко горючі речовини і матеріали, які при взаємодії з киснем повітря здатні тільки горіти. Площа лабораторії складає 60 м².

За ступенем вогнестійкості дане приміщення відноситься до 1-го ступеня вогнестійкості за ДБН В.1.1-7-2016 [76] (виконано з цегли, яка відноситься до негорючих матеріалів).

У приміщенні лабораторії знаходяться ПК, в яких дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. Сам ПК являє собою пожежну небезпеку, так як при підвищенні температури окремих вузлів можливо оплавлення ізоляції сполучних проводів, яке веде до короткого замикання, що супроводжується, у свою чергу, іскрінням.

Пожежна безпека в лабораторії забезпечується відповідно до ГОСТ 12.1.004-91 [77] «Системой предотвращения пожара, противопожарной защиты и организационно-техническими мероприятиями».

Система протипожежного захисту згідно з ГОСТ 12.4.009-83 [78]: необхідна установка автоматичної пожежної сигналізації на димових сповіщувачах ДИП-1, з розрахунку 2 шт. на кожні 20 м² площі приміщення, враховуючи високу вартість обладнання, наявність прихованих комунікацій і специфіку загоряння ПК, на площу 60 м² необхідно 6 димових сповіщувачів, виходячи з площі лабораторії вибираємо 2 вуглекислотних вогнегасника ВВК-2 (ручні) ємністю 7 л кожен.

При виникненні пожежі: припинити роботу, відключити електрообладнання, повідомити про пожежу в пожежну охорону, прийняти заходи по можливості евакуації працівників, гасіння пожежі та збереження матеріальних цінностей.

4.3 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

Цивільний захист на підприємстві, в установі, організації (далі – об'єкті) організується з метою своєчасної підготовки об'єкта до захисту від наслідків НС та оперативного проведення рятувальних і інших невідкладних робіт.

Згідно зі ст. 8 закону України "Про цивільну оборону України" "Керівництво підприємств, установ і організацій незалежно від форм власності і підпорядкування забезпечує своїх працівників засобами індивідуального та колективного захисту, організовує здійснення заходів по евакуації, створює сили для ліквідації наслідків НС та забезпечує їх готовність до практичних дій, виконує інші заходи з цивільної оборони і несе пов'язані з цим матеріальні та фінансові витрати в порядку та обсягах, передбачених законодавством".

На об'єктах підвищеної небезпеки (радіаційно-, хімічно-, вибухонебезпечних) створюються локальні системи виявлення загрози виникнення НС і оповіщення працівників цих об'єктів та місцевого населення, що проживає в зоні можливого ураження (згідно з законом України "Про цивільну оборону України" власники таких об'єктів відповідають за захист населення, що проживає в зонах можливого ураження від наслідків аварій на цих об'єктах). Відповідно до затвердженої Державної цільової соціальної програми розвитку цивільного захисту, вищеназвані локальні системи мають бути створені до 2013 року на всіх об'єктах підвищеної небезпеки.

Відповідальність за цивільний захист об'єкта несе керівник цього об'єкта, він є начальником ЦЗ об'єкта і підпорядковується своєму старшому начальнику

(міністерства чи відомства), а в оперативному відношенні начальнику цивільного захисту міста чи району.

Начальник цивільного захисту об'єкта несе відповідальність за:

- створення, організацію, підготовку і дієдатність системи цивільного захисту на підпорядкованому об'єкті;
- забезпечення захисту персоналу (а на об'єктах підвищеної небезпеки і за захист населення, що проживає в зонах можливого ураження від наслідків аварій на цих об'єктах) під час загрози або виникнення надзвичайних ситуацій техногенного, природного та воєнного характеру;
- організацію і здійснення заходів щодо попередження НС, а у разі їх виникнення – за мінімізацію збитків від них;
- створення і організацію роботи системи оповіщення на об'єкті;
- створення і організацію роботи комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій, а також евакуаційної комісії об'єкта;
- постійну готовність органів управління і невоєнізованих формувань об'єкта до функціонування в мирний і воєнний час;
- фінансове та матеріально-технічне забезпечення заходів у сфері цивільного захисту;
- підготовку і навчання персоналу до дій у НС.

Наказом начальника ЦЗ об'єкта призначаються заступники (як варіант – з евакуації, інженерно-технічної частини, з матеріально-технічного постачання, з оперативних питань).

Органом управління з питань надзвичайних ситуацій та цивільного захисту об'єкта є штаб цивільної оборони та надзвичайних ситуацій (штаб ЦО та НС) (далі – штаб ЦО). Штаб ЦО очолює начальник штабу, який є першим заступником начальника ЦЗ об'єкта. До складу штабу входять заступники начальника штабу і необхідні спеціалісти. Штаб комплектується як штатними працівниками ЦЗ об'єкта так і посадовими особами підприємства, не звільненими від виконання своїх основних обов'язків.

Начальник штабу ЦО відповідає за безпосередню організацію та функціонування сил і засобів цивільного захисту під час загрози або виникнення надзвичайних ситуацій техногенного, природного та воєнного характеру. Він має право віддавати розпорядження з питань цивільної оборони, захисту від НС техногенного, природного та воєнного характеру від імені начальника цивільного захисту об'єкту.

Начальник штабу ЦО несе відповідальність за:

- організацію своєчасного оповіщення і збору персоналу об'єкта;
- організацію роботи і узгодженість дій створених на об'єкті органів управління і структурних підрозділів цивільного захисту;
- розробку планової документації з питань цивільного захисту, її своєчасне уточнення і коригування;
- стан готовності особового складу невоєнізованих формувань цивільного захисту до дій за призначенням;
- своєчасне доведення до виконавців рішень начальника цивільного захисту та організацію контролю за їх виконанням;
- організацію збору і аналізу інформації щодо вірогідного виникнення надзвичайних ситуацій, відпрацювання пропозицій щодо захисту персоналу (а на об'єкті підвищеної небезпеки і населення, що проживає в зоні можливого ураження від наслідків аварії на цьому об'єкті) від їх наслідків;
- виконання заходів, спрямованих на підвищення стійкості роботи об'єкта в воєнний час та при виникненні надзвичайної ситуації техногенного або природного характеру;
- організацію взаємодії з місцевими органами державної влади, підрозділами МНС України, аварійно-рятувальними службами тощо;
- організацію спеціальної підготовки і підвищення кваліфікації персоналу у сфері цивільної оборони, захисту від надзвичайних ситуацій.

На великому об'єкті для організації і проведення заходів захисту від НС на базі відповідних структурних підрозділів (відділів, цехів тощо) об'єкта, в

залежності від характеру його виробничої діяльності створюються служби цивільного захисту:

- оповіщення і зв'язку;
- протипожежна;
- аварійно-технічна;
- сховищ і укриттів;
- медична;
- охорони громадського порядку;
- протирадіаційного та протихімічного захисту;
- матеріально-технічного постачання та інші.

На невеликому об'єкті служби ЦЗ не створюються, а їх функції при необхідності виконують структурні органи управління цього об'єкта. Керівники цих служб (керівники підрозділів на базі яких створені ці служби) відповідають за постійну готовність сил і засобів, за забезпечення підлеглих формувань спеціальними засобами (засобами індивідуального захисту, спецобладнанням, апаратурою, приладами, технікою тощо), за навчання діям у надзвичайних ситуаціях.

Для виконання завдань цивільного захисту на об'єкті створюються невоєнізовані формування. Вони поділяються на формування загального призначення (наприклад, рятувальні загони, команди, групи) і формування служб (команди, групи, дружини, ланки, пости).

Невоєнізовані формування – це завчасно підготовлені до дій у НС групи робітників та службовців об'єкта, які об'єднані в окремі загони, команди, дружини, ланки, групи, пости зі спеціальною технікою, приладами та майном, без звільнення їх від основної роботи.

Таким чином найбільш важливими заходами з охорони праці є:

Для виключення можливості отримання хімічного отруєння роботи з отруйними і токсичними хімічними речовинами необхідно проводити обов'язково з використанням засобів індивідуального захисту згідно НПАОП 0.00-7.17-18 «Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при

використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці», лабораторія повинна бути обладнана ефективною місцевою витяжною вентиляцією по ДСТУ Б А.3.2-12-2009 «ССБП. Системи вентиляційні. Загальні вимоги».

Роботи по знежиренню деталей ацетоном і бензином повинні проводитися при діючій загальнообмінній і місцевій витяжній вентиляції. Системи місцевих відсмоктувачів повинні включатися до початку робіт і вимикатися після їх закінчення. Робота вентиляційних установок повинна контролюватися за допомогою світлової і звукової сигналізації яка автоматично вмикається при зупинці вентиляції.

Для виключення можливості враження електричним струмом до виконання робіт допускаються особи віком не молодше 18 років, що пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки згідно НПАОП 40.1-1.21-98 [65] «Правила безпечної експлуатації електроустановок – споживачів» та отримали допуск з електробезпеки відповідної групи.

Для кожного електроспоживного обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи.

Для виключення можливості загорянь, внаслідок порушення правил пожежної безпеки, необхідно проводити інструктаж і перевірку знань правил пожежної безпеки, відповідно до НПАОП 28.52-1.15-60 «Правила по техніці безпеки і виробничої санітарії при електрозварювальних роботах», НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки України» та НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

Організаційні заходи: проводити інструктаж персоналу по техніці безпеки, розробити заходи щодо дій адміністрації на випадок виникнення пожежі, схему евакуації при пожежі розмістити на видному місці, ширина дверного прорізу на випадок евакуації 1,5 м, висота 2 м.

ВИСНОВКИ

В дипломному проєкті досліджено технологічний процес прямого адитивного вирощування методом плазмового наплавлення з застосуванням присадного дроту. Обґрунтовано актуальність його застосування для виготовлення кільця корпусу внутрішнього ТВТ з жароміцного нікелевого сплаву ЕП648-ВІ двигуна АІ-222, що дозволяє знизити трудомісткість та вартість його виготовлення замість традиційної технології (штамбування і точіння вихідної поковки круглого перерізу).

В результаті проведеної роботи за розробленою методикою досліджень:

1. Підібрано оптимальні режими адитивного вирощування виробів із жароміцного нікелевого сплаву ЕП648-ВІ методом плазмового наплавлення;

2. Обрана стратегія наплавлення шарів з нанесенням паралельних валиків під час руху «по змійці». Визначено геометричні розміри одиночного валика на підібраних режимах та виходячи з цього дослідним шляхом підібрано оптимальний шаг наплавлення між валиками який становить 2,5 мм. Це забезпечує плоску поверхню шару без значної вогнутості та надмірної хвилястості, площа перекриття становить 48%;

3. При металографічному дослідженні встановлено, що в зразках після вирощування присутні мікротріщини, що не виходять на поверхню, довжиною до ~ 196 мкм. Ці тріщини розвиваються поперек шарів вирощування на відстані від 1,9 мм до 3,0 мм від поверхні зразка. Вони мало впливають на механічні властивості при статичному навантаженні, проте вони мають великий вплив на міцність під час повзучості та стійкість до втоми, оскільки часто стають концентраторами руйнування;

4. Визначено механічні властивості матеріалу отриманого на даних режимах. При механічних випробуваннях встановлено, що міцнісні властивості (σ_B , $\sigma_{0,2}$) при кімнатній температурі відповідають вимогам ТУ 14-1-3046-97

(Прутки) та ОСТ 1 90126-85 (Лиття ВХ4Л) для даного сплаву. Пластичні властивості (δ) при кімнатній температурі відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85 (Лиття ВХ4Л), але є нижчими за вимог ТУ 14-1-3046-97 (Прутки) на 49% у поздовжньому напрямку та на 21% у поперечному напрямку. Міцнісні властивості (σ_B , $\sigma_{0,2}$) у поздовжньому і поперечному напрямку перебувають приблизно на одному рівні, присутня невелика відмінність (~4...5%). При цьому спостерігається більш значна до (~36%) анізотропія пластичних властивостей (δ) у поздовжньому і поперечному напрямку;

5. При фрактографічному дослідженні розривних зразків після випробувань встановлено, що виявлені мікротріщини являються гарячими тріщинами які утворилися при вирощуванні на останній стадії кристалізації;

6. Після проведення операції ГПІ на зразках після вирощування, при металографічному дослідженні мікротріщин не виявлено, в мікроструктурі присутні сліди «загоєння» цих тріщин. За результатами механічних випробувань зразків після ГПІ встановлено, що мікротріщини, які присутні в матеріалі зразків після вирощування, не мають значного впливу на міцності властивості зразків під час статичного навантаження, при цьому мають більш значний вплив на пластичні властивості, після проведення обробки методом ГПІ пластичність зразків збільшується до 50%. У поперечному напрямку збільшилися до рівня прутків і відповідають вимогам ТУ 14-1-3046-97 (Прутки). Ця обставина підтверджує факт, що в процесі ГПІ відбувається «загоєння» внутрішніх мікротріщин, яке призводить до підвищення механічних властивостей;

7. Розроблено технологію адитивного вирощування методом плазмового наплавлення з використанням присадного дроту кільця корпусу внутрішнього ТВТ з жароміцного нікелевого сплаву ЕП648-ВІ;

8. За розробленою технологією вирощена заготовка кільця корпусу внутрішнього на роботизованій установці до складу якої входить: робот FANUC M-710iC (Японія), маніпулятор з планшайбою FANUC 2-axes (Японія) та плазмове джерело живлення SBI PMI-350 AC/DC TL (Австрія).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А.А. Осколков, Е. В. Матвеев, И. И. Безукладников, Д. Н. Трушников, Е. Л. Кротова // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение, – 2018. – № 3. – Т. 20. – С. 90 – 105.
2. Елисеев Ю.С. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: учебное пособие для вузов / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. Хворостухин. – М.: Машиностроение, – 2003. – 512 с.
3. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – Изд-во Политехнического ун-та, – 2013. – 222 с.
4. Коротеев А.О., Долячко В.П., Куликов В.П. Аддитивная технология создания объемных металлических изделий на основе дуговой сварки с импульсной реверсивной подачей присадочного материала [Текст] / А.О. Коротеев, В.П. Долячко, В.П. Куликов // Вестник Белорусско-Российского университета, – 2019. – №4. – С. 15-25.
5. Ding D. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests [Текст] / D. Ding [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol, – 2015. – Vol. 81. - pp. 465 – 481.
6. Сиротин Н.Н. Конструкция и эксплуатация, повреждаемость и работоспособность газотурбинных двигателей. — М.: РИА "ИМ-Информ", 2002. – 442 с.
7. ТУ 14-1-3046-97 – Прутки из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП648-ВИ), ХН50ВМТЮБ-ИД (ЭП648-ИД). – Взамен: ТУ 14-1-3046-80; введен 1999 – 07 – 01. – 1997. – 17 с.
8. Wong K. V. A review of additive manufacturing / K.V. Wong, A. Hernandez // International Scholarly Research Network Mechanical Engineering. — 2012. —

Vol. 2012. — Article ID 208760. — 10 pages — режим доступа:
<http://downloads.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760.pdf>.

9. Жуков В.В., Григоренко Г.М., Шаповалов В.А. Аддитивное производство металлических изделий (обзор) [Текст] / В.В. Жуков, Г.М. Григоренко, В.А. Шаповалов // Автоматическая сварка. – 2016. – №5 – 6. – С. 148 – 153.

10. Безобразов Ю.А. Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM- методами быстрого прототипирования [Текст] / Ю. А. Безобразов [и др.] // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А.Ф. Головина», [г. Екатеринбург, 29 октября – 1 ноября 2012 г.]. — Екатеринбург.: Изд-во Урал. ун-та, — 2012. — С. 154 – 157.

11. Ding D. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 81(1-4). – P. 465–481.

12. Dave V. R. Electron beam solid freeform fabrication of metal parts / V.R. Dave, J.E. Matz, T.W. Eagar // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. – 1995. – P. 64–70.

13. Dickens P. M. Rapid prototyping using 3-D welding / P.M. Dickens, M.S. Pridham, R.C. Cobb, I. Gibson, G. Dixon // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. – 1992. – P. 280–290. – режим доступа:
<http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1992/1992-32-Dickens.pdf>.

14. 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.

15. Somashekara M.A. Investigations into effect of weld-deposition pattern on residual stress evolution for metallic additive manufacturing [Текст] /

M.A. Somashekara [et al.] // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2017. – Vol. 90. – № 5–8. – pp. 2009 – 2025.

16. Jhavar S. Enhancement of Deposition Quality in Micro-plasma Transferred Arc Deposition Process [Текст] / S. Jhavar, N.K. Jain, C.P. Paul // *Mater. Manuf. Process.* – 2014. – Vol. 29. – № 8. – pp. 1017 – 1023.

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

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

19. Gu J. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys [Текст] / J. Gu [et al.] // *J. Mater. Process. Technol.* – 2016. – Vol. 230. – pp. 26 – 34.

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

21. 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.

22. Yang D. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing [Текст] / D. Yang, C. He, G. Zhang // *J. Mater. Process. Technol.* – 2016. – Vol. 227. – pp. 153 – 160.

23. Szost B.A. A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components [Текст] / B.A. Szost [et al.] // *Mater. Des.* – 2016. – Vol. 89. – pp. 559 – 567.

24. Montevecchi F. Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process [Текст] / F. Montevecchi [et al.] // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 55. – pp. 109 – 114.
25. Zhang Y.M. Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study [Текст] / Y.M. Zhang [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2003. – Vol. 135. – pp. 347– 357.
26. Bai X. Modeling of the 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.
27. 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.
28. Nikam S.H. Thermal modeling of geometry of single-track deposition in micro-plasma transferred arc deposition process [Текст] / S.H. Nikam, N.K. Jain, S. Jhavar // J. Mater. Process. Technol. – 2016. – Vol. 230. – pp. 121– 130.
29. Kovacevic R. Process Control of 3D Welding as a Droplet-Based Rapid Prototyping Technique [Электронный ресурс] / R. Kovacevic, H. Beardsley. – Электрон. дан. (4.1 Мб). – Int. Solid Free. Fabr. Symp. – 1998. – pp. 57 – 64. Режим доступа - <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/581>.
30. Karunakaran K.P. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing [Текст] / K.P. Karunakaran [et al.] // Robot. Comput. Integr. Manuf. – 2010. – Vol. 26. – pp. 490 – 499.
31. Gu J. Wire+Arc Additive Manufacturing of Aluminum [Электронный ресурс] / J. Gua [et al.]. – Электрон. дан. (853 Кб). – SFF Symp. Austin Texas. – 2014. – pp. 451 – 458.
32. Jhavar S. Experimental investigation on geometrical aspects of micro-plasma deposited tool steel for repair applications [Текст] / S. Jhavar, C.P. Paul, N.K. Jain // Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. – 2014. – Vol. 32. – P. 1460347 (9 pages).

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

34. Geng H. Geometric Limitation and Tensile Properties of Wire and Arc Additive Manufacturing 5A06 Aluminum Alloy Parts [Текст] / Н. Geng [et al.] // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2017. – Vol. 26. – № 2. – pp. 621 – 629.

35. Щицын Ю.Д. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из алюминиевых сплавов / Ю. Д. Щицын [и др.] // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.* – 2019. – Т. 21. – № 2. – С. 63 – 72.

36. Щицын Ю.Д. Создание слоистых материалов на основе высоконикелевых сплавов с использованием плазменной дуги на токе обратной полярности / Ю.Д. Щицын [и др.] // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение.* – 2016. – Т. 18. – № 2. – С. 7 – 20.

37. ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT). – На заміну ДСТУ EN 10002-1:2006; введено 2020-07-01. – Технічний комітет стандартизації «Стандартизація методів контролю механічних, металографічних та корозійних властивостей металопродукції», – 2019. – 75 с.

38. Pollock T.M., Tin S.J., Nickel-based Superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties // *Journal of propulsion and power.* – 2006. – Vol. 22. – №2. – pp. 361 – 374.

39. Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Книга 1; пер. с англ. под ред. Р.Е. Шалина. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.

40. Rae C.M.F., Reed R.C., The Precipitation of Topologically Close-Packed Phases in Rhenium-Containing Superalloys // *Acta Materialia.* – 2001. – Vol. 49. – №.10. – pp. 4113 – 4125.

41. Geddes B., Leon H., Huang X. Superalloys: alloying and performance. / B. Geddes [et al.]. – ASM International, Materials Park (OH), – 2010. – 176 p.
42. Doubenskaia M., Domashenkov A., Smurov I., Petrovskiy P. Study of Selective Laser Melting of intermetallic TiAl powder using integral analysis / M. Doubenskaia [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2018.– Vol. 129. – pp. 1–14.
43. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб: Изд-во Политехи, ун-та, – 2013. – 406 с.
44. Цыкунова Т.В., Лупачев А.Г. Оптимизация массы наплавленного металла и объемов обработки при восстановлении деталей. / Т.В. Цыкунова, А.Г. Лупачев // Автоматическая сварка. – 1998. – №9. – С. 42 – 44.
45. Коротков В.А., Бердников А.А., Толстов И.А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями / В.А. Коротков, А.А. Бердников, И.А. Толстов. – Челябинск: Металл, – 1993. – 144 с.
46. Ye X., Hua X., Wang M., Lou S. Controlling hot cracking in Ni-based Inconel-718 superalloy cast sheets during tungsten inert gas welding / X. Ye [et al.] // Journal of materials processing technology. – 2015. – Vol. 222. – pp. 381 – 390.
47. Shuai Li, Qingsong Wei, Yusheng Shi, Jie Zhang, Li Wei Micro-crack formation and controlling of Inconel 625 parts fabricated by selective laser melting // Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International
48. Fortuna, S. V. Directional Solidification of a Nickel-Based Superalloy Product Structure Fabricated on Stainless Steel Substrate by Electron Beam Additive Manufacturing / S.V. Fortuna, D.A. Ggurianov, K.N. Kalashnikov, A.V. Chumaevskii [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2021. – Vol. 52. – №2. – pp. 857 – 870.
49. Parimi L. L. Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718 / L.L. Parimi, G.A. Ravi, D. Clark, M.M. Attallah // Materials Characterization. – 2014. – Vol. 89. – pp. 102 – 111.

50. Thijs L. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder / L. Thijs, K. Kempen, J.P. Kruth, J. Van Humbeeck // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61. – №5. – pp. 1809 – 1819.

51. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы. Пер. с англ. — М.: Металлургия, – 1976. – 568 с.

52. ОСТ 1 90126-85. Сплавы жаропрочные литейные вакуумной выплавки. [Текст]. – Взамен ОСТ 1 90126-744; Введён 1986 – 04 – 01. – М.: Изд-во стандартов. 1986. – 11 с. (Сортовой и фасонный прокат – Каталог ОСТ).

53. Wang F., Wu X. H., Clark D. On direct laser deposited Hastelloy X: dimension, surface finish, microstructure and mechanical properties / F. Wang [et al.] // *Materials science and technology*. – 2011. Vol. 27. – №1. – pp. 344 – 356. Режим доступа: <https://doi.org/10.1179/026708309x12578491814591>.

54. Carter L.N., Martin C., Withers P.J., Attallah M.M. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy / L.N. Carter [et al.] // *Journal of alloys and compounds*. – 2014. – Vol. 615. – pp. 338 – 347.

55. Ganesh P, Kaul R, Paul C, Tiwari P, Rai S, Prasad R. Fatigue and fracture toughness characteristics of laser rapid manufactured Inconel 625 structures / P. Ganesh [et al.] // *Materials science and engineering*. – 2010. – Vol. 527. – №.29-30. – pp. 7490 – 7497. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.034>

56. Шоршоров М.Х. Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов / М.Х. Шоршоров. – М.: Машиностроение, – 1973. – 224 с.

57. Kontis P., Chauvet E., Peng Z., He J., Raabe D., Tassin C. Atomic-Scale grain boundary engineering to overcome hot-cracking in additively-manufactured superalloys / P. Kontis [et al.] // *SSRN electronic journal*. – 2019. Режим доступа: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3391502>.

58. Chauvet E, Kontis P, Gault B., Raabe D. Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron Beam Melting /

E. Chauvet [et al.] // *Acta materialia*. – 2018. – Vol. 142. – pp. 82 – 94. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.09.047>

59. Seow C., Zhang J., Coules H., et al. Effect of crack-like defects on the fracture behaviour of Wire + Arc Additively Manufactured nickel-base Alloy 718 / C. Seow [et al.] // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 36. – pp. 101578.

60. Правила охорони праці під час роботи з абразивним інструментом [Електронний ресурс]: НПАОП 28.0-1.30-12. – На заміну НПАОП 28.52-1.22-64; чинний від 2012-11-26. – К.: МНС України, 2012. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1879-12>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці)

61. Природне і штучне освітлення. [Текст] : ДБН В.2.5-28-2018. – На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 133 с. – (Державні будівельні норми України)

62. ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009 Система стандартів безпеки труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам. – На заміну ГОСТ 12.2.061-81; введено 2009 – 02 – 01. – Держспоживстандарт України, – 2009. – 5 с.

63. ДСТУ 8604:2015. Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. – На заміну ГОСТ 12.2.032-78; чинний від 2017-07-01. Київ: Український науково-дослідний інститут дизайну та ергономіки НАУ, – 2017. – 30 с.

64. ДСТУ 7950:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце під час виконання робіт стоячи. Загальні ергономічні вимоги. – На заміну ГОСТ 12.2.033-78; чинний від 2016 – 09 – 01. Київ: Український науково-дослідний інститут дизайну та ергономіки НАУ – 2016. – 10 с.

65. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Текст]: НПАОП 40.1-1.21-98. – На заміну ДНАОП 0.00.1.21-84; чинний від 1998-01-09. – К. : Мінпраці України, 1998. – 89 с. – (Нормативно-правовий акт охорони праці)

66. Правила безпечної експлуатації електроустановок [Текст]: НПАОП 40.1-1.01-97. – На заміну НАОП 1.1.10-1.01-85; чинний від 1997-10-06. – К. : Держнаглядохоронпраці, – 1997. – 97 с.

67. Правила улаштування електроустановок [Текст]: ПУЕ-2017. – На заміну ПУЕ-86; чинний від 2017-08-21. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

68. ГОСТ 12.3.028-82 ССБТ. Процессы обработки абразивным и эльборовым инструментом. Требования безопасности. – На замену ГОСТ 12.2.001-74; введен 1983 – 01 – 01. – М.: Изд-во стандартов, – 1983. – 13 с.

69. Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці [Текст]: НПАОП 0.00-7.17-18. – На заміну НПАОП 0.00-4.01-08; чинний від 2019 – 15 – 01. – К. : Держнаглядохоронпраці, – 2019. – 28 с.

70. Система стандартів безпеки праці. Системи вентиляційні. Загальні вимоги [Текст]: ДСТУ Б А.3.2-12:2009. На заміну ГОСТ 12.4.021-75; чинний від 2010-08-01. – К.: Мінрегіон України, – 2010. – 13 с.

71. ГОСТ 12.1.045-84 Электростатические поля, допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – Введен 1985 – 07 – 01 – М.: Изд-во стандартов, – 1985. – 2 с.

72. Правила охорони праці під час зварювання металів [Текст]: НПАОП 28.52-1.31-13. – На заміну НПАОП 28.52-1.26-89; чинний від 2013 – 02 – 08 – К.: Міністерство надзвичайних ситуацій України, – 2013. – 28 с.

73. Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс]: НАПБ А.01.001-14. – На заміну НАПБ А.01.001-04; чинний від 2014-12-30. – К.: МВС України, – 2014. – 47 с. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15>.

74. Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці [Електронний ресурс]: НПАОП 0.00-4.12-05. – На заміну ДНАОП 0.00-4.12-99, ДНАОП 0.00-8.01-93; чинний від 2005 – 02 – 26. – К.: Держнаглядохоронпраці України, 2005. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05>.

75. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – На заміну НАПБ Б.03.002-2007; чинний від 2017 – 01 – 01. – К.: Мінрегіон України, – 2016. – 34 с.

76. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – На заміну ДБН В.1.1-7-2002; чинний від 2017 – 06 – 01. К.: Мінрегіон України, – 2017. – 47 с.

77. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. – На замену ГОСТ 12.1.004-85; введен 1992 – 07 – 01. – М.: Изд-во стандартов, – 1991. – 68 с.

78. ГОСТ 12.4.009-83 ССБТ. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание. – На замену ГОСТ 12.4.009-75; введен 1985 – 01 – 01. – М.: Изд-во стандартов, – 1985. – 8 с.