

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДК 621.791

ВОЙТЕНКО ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

**МІКРОПЛАЗМОВЕ АДИТИВНЕ НАПЛАВЛЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ВИРОБІВ
З МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність – 132 Матеріалознавство

Галузь знань – 13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О.М. Войтенко

Науковий керівник:

чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. В.М. Коржик

Київ – 2022

АНОТАЦІЯ

Войтенко О.М. Мікроплазмове адитивне наплавлення просторових виробів з металевих матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ – 2022.

Дисертаційна робота присвячена вивченню особливостей технологічних процесів адитивного мікроплазмового наплавлення з використанням порошкових і дровових присаджувальних матеріалів та їх впливу на структуроутворення і залишковий напружено-деформований стан виготовлених тривимірних металевих об'єктів.

Сучасному виробництву притаманні потреби швидкої зміни типорозмірів деталей та використання безвідходних технологій. Актуальним підходом до вирішення таких проблем є використання адитивних технологій створення 3D-об'єктів. При цьому бажано досягти технічного сполучення точності виготовлення деталей, можливості повного усунення механічної обробки, а також високої продуктивності виробництва. У випадку потреби у великих серіях таких деталей актуальним підходом є застосування традиційних технологій наплавлення для пошарового нарощення металу із долученням, у певних випадках, супутньої або фінішної механічної обробки. Одним з перспективних процесів, що певною мірою задовольняє вказаним вимогам, є мікроплазмове наплавлення, яке, з одного боку, може використовувати більш широкий спектр витратних (присаджувальних) металевих матеріалів у вигляді порошків та дровів, а з іншого боку – оптимально поєднувати показники продуктивності, точності формоутворення, заданого рівня фізико-механічних властивостей та залишкових напружень.

Об'єктом дослідження є створені пошаровим мікроплазмовим наплавленням металеві тривимірні об'єкти з низьковуглецевої і нержавіючої сталей.

Предметом дослідження є адитивне мікроплазмове наплавлення з використанням дротових і порошкових присаджувальних матеріалів.

Мета роботи – дослідження закономірностей впливу технологічних параметрів адитивного мікроплазмового наплавлення просторових об'єктів із використанням сталевих дротових і порошкових присаджувальних матеріалів на формування мікроструктури і напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу об'ємних виробів і створення на основі цього інтелектуальних апаратно-програмних засобів для автоматичного 3D друку просторових металевих виробів із заданою структурою і прогнозованим напруженим станом.

До наукової новизни дослідження відносяться наступні положення:

1. Встановлено, що в процесі неперервного пошарового мікроплазмового наплавлення об'ємних виробів із металевих матеріалів типу «паралелепіпед», «циліндр», «трикутна призма», «квадратна призма», «розширений конус», «звужений конус» з максимальними габаритами до 65 мм і товщиною стінки від 2,5 мм в інтервалі струмів 20-30 А залишкові напруження кожному наступному наплавленому валику зменшуються у на 7–20%, а максимальні значення радіальних деформацій (переміщень) не перевищують діапазон 0,22–0,28 мм.

2. Виявлено, що при неперервному пошаровому мікроплазмовому наплавленні дроту низьковуглецевої сталі, в напрямі від першого шару спостерігається тенденція збільшення розміру зерен наплавленого металу (від 15-20 мкм до 150-200 мкм) по висоті наплавленої стінки, близької до 10 розмірів її ширини, а при подальшому наплавленні шарів розмір зерен практично не зростає.

3. Запропоновано оптимальні діапазони значень погонної енергії в якості критерію оптимізації режимів мікроплазмового адитивного наплавлення (80-90 Дж/мм та 160-200 Дж/мм, відповідно, при використанні в якості присаджувального матеріалу порошку розміром частинок до 150 мкм і дроту $\varnothing 0,8-1,2$ мм), в межах яких досягається зменшення розміру зони сплавлення шарів (до 0,1-0,3 мм), розміру зерен (на 15-30%), розміру стінки (до 2,5 мм),

збільшення твердості шарів (до 500-600 МПа) та досягнення більшої однорідності мікроструктури.

4. Підтверджено, що адитивне мікроплазмове наплавлення присаджувальним дротом із низьковуглецевої сталі в порівнянні із процесом WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing – дугою з плавким електродом) забезпечує зменшення розміру зерен по висоті стінки в об'ємі наплавленого металу, в середньому в 2-3 рази, покращення рівновісності структури (наближення коефіцієнту форми зерна до 1), уникнення дефектів у вигляді трансшарової пористості, досягнення пониження залишкових напружень по висоті просторового виробу в середньому на 50-150 МПа.

5. Запропоновано новий підхід до розробки апаратно-програмного забезпечення технології адитивного мікроплазмowego наплавлення металевих матеріалів, який включає поєднання самонавчальних нейронних мереж, системи збору і формування бази даних, системи автоматичного керування джерелом живлення, що забезпечує можливість генерувати керуючі програми для коригування режимів наплавлення металевого виробу із заданими геометричними параметрами, розмірами зерен та прогнозованим рівнем залишкових напружень.

Практичне значення отриманих результатів. У роботі було визначено вплив технологічних параметрів на особливості формування та структуроутворення наплавлених шарів при адитивному мікроплазмowego наплавленні порошкових і дрових сталевих присаджувальних матеріалів. Це дало можливість прогнозування НДС виробів, що отримують, а також визначення параметрів режимів процесу.

Встановлені в роботі оптимальні діапазони значень погонної енергії (80-90 Дж/мм та 160-200 Дж/мм, з точки зору забезпечення заданої структури та якості наплавленого металу, можуть використовувати в якості критеріїв оптимізації режимів мікроплазмowego адитивного наплавлення металевих об'ємних виробів.

Для апаратної реалізації адитивного вирощування об'ємних виробів із металевих матеріалів було розроблено та виготовлено плазмотрони покращеної

конструкції для мікроплазмового наплавлення (що використовують в якості присаджувальних матеріалів, як металеві порошки, так і дроти), а також 3D принтери з робочими полями від $300 \times 200 \times 200$ до $1000 \times 900 \times 900$ мм,

З метою автоматизації виготовлення виробів адитивним мікроплазмовим наплавленням вперше було створено інтелектуальне обладнання, що включає систему автоматичного моніторингу із вдосконаленою системою автоматичного регулювання плазмової дуги та відповідним програмним забезпеченням із використання самонавчальних нейронних мереж для генерування керуючих програм. Вказані програми в автоматичному режимі забезпечують вибір оптимальних параметрів мікроплазмового наплавлення і, відповідно, задану структуру та рівень внутрішніх напружень в просторовому металевому виробі. Реалізовано підхід та розроблено апаратне забезпечення для інтеграції вказаної системи автоматичного моніторингу із 3D принтерами та зварювальними роботами, яке впроваджено на ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР»» (Україна). З допомогою такого підходу виготовлено 4 комплекти обладнання для реалізації інтелектуального процесу мікроплазмового наплавлення просторових виробів із металевих матеріалів, два з яких поставлено на експорт в КНР.

У першому розділі представлено результати аналітичного огляду літературних джерел з питань дисертаційної роботи. Аналіз сучасного стану 3D-технологій виготовлення об'ємних металевих виробів показав, що для виготовлення точних деталей малих розмірів є доцільним застосування лазерних технологій (наприклад, SLM), для великогабаритних деталей – застосування технологій зварювання (наприклад, WAAM, PTA). Серед адитивних зварювальних технологій найперспективнішими є плазмово-дугові.

До основних переваг адитивних зварювальних технологій отримання тривимірних металевих конструкцій складної форми порівняно із SLM-технологіями відносяться: підвищення продуктивності процесу на 1–2 порядку за тієї ж споживаної потужності; зниження вартості обладнання у 3–10 разів; можливість збільшення в 10–100 і більше разів габаритних розмірів деталей; розширення номенклатури витратних матеріалів (порошки, дроту, композиційні

матеріали); підвищення коефіцієнта використання витратного матеріалу на 20–50%; зниження приблизно до 10-20 разів вартості обладнання.

До основних недоліків адитивних зварювальних технологій отримання тривимірних металевих конструкцій відносяться термічні деформації та перегрів шарів, що нарощуються. В процесі адитивного наплавлення можуть виникати небажані температурні градієнти, накопичуватися залишкові напруження, утворюватися деформації та тріщини і, як наслідок, – може відбуватися зниження експлуатаційних характеристик. Одним із методів усунення зазначених недоліків є підвищення термічної локальності джерела енергії. Наприклад, використання лазерного випромінювання або мікроплазми.

Для виготовлення готових металевих виробів 3D-друком з позицій якості/вартість доцільно використовувати адитивне мікроплазмове (робочий струм до 50 А) наплавлення з використанням порошкових і дровових присаджувальних матеріалів. Для цього необхідно застосовувати розширену систему моніторингу і керування параметрами технологічного процесу, яка буде враховувати комплекс чинників від створення цифрового прототипу до управління процесом і контролю якості. Перспективним підходом до створення такої системи керування є застосування штучних нейронних мереж.

У другому розділі розглянуто хімічний склад і основні структурні складові присаджувальних матеріалів, що застосовуються в дослідженнях. Для вирішення завдання одержання тривимірних металевих виробів методом адитивного наплавлення із застосуванням мікроплазмового і дугового з дугою плавкого електроду джерел запропоновано методику досліджень, вибрано відповідне технологічне обладнання і на його основі створено лабораторний стенд. Для реалізації запропонованої методики з урахування наявного технологічного обладнання обрано необхідні присаджувальні (наплавочні) дровові та порошкові матеріали, підібрано необхідні допоміжні прилади та обладнання, у тому числі обладнання для металографічних досліджень. Вибране дослідне обладнання дозволяє з достатньою точністю вивчити результати технологічних досліджень, що проводяться. У тому числі, встановити характерні

дефекти і структурні особливості одержуваних наплавлених шарів, для чого заплановано виконання низки відповідних металографічних досліджень.

У третьому розділі проведені розрахункові дослідження процесів газодинаміки в контурах стандартного плазмотрону показали його недоліки, що виявляються при подачі присаджувальних порошкових матеріалів. Для усунення цих недоліків проведено моделювання оптимальної динаміки газових потоків за критеріями ламінарності, повноти введення матеріалів у плазму, фокусування газових потоків в робочій зоні та стабілізації режиму нагріву/охолодження сопел. На підставі такого моделювання спроектовано покращену конструкцію плазмотрона, в якому додано другий канал введення транспортуючого газу, обидва канали введення розташовані під кутом до осі виходу газу з метою рівномірного розподілу матеріалу в камері вирівнювання, а також зменшено її поперечний переріз для покращення заповнення газом. З використанням мікроплазмотрону покращеної конструкції проведено порівняльні експерименти з адитивного наплавлення металевих просторових примітивів трьома адитивними методами: електродугове MAG наплавлення електродним струмопровідним дротом, мікроплазмове наплавлення присаджувальним дротом і порошком. Визначено базові особливості процесів, їх взаємні недоліки та переваги. Обрано оптимальні параметри режимів адитивного наплавлення за критеріями якісного з'єднання і утворення рівновісної структури наплавлених шарів.

Встановлено, що в результаті адитивного мікроплазмowego наплавлення порошку нержавіючої сталі (розмір частинок 40-60 мкм) формується шарувата структура металу з висотою наплавленого шару порядку 650 мкм і товщиною стінки близько 3 мм. Розподіл металу за висотою зразка рівномірний. Внаслідок адитивного формування зразка шляхом наплавлення порошку утворюються колонії великих і дрібних дендритів. Аналіз структури металу в різних ділянках виробу показав, що колонії дендритів мають різні розміри й орієнтацію залежно від висоти ділянки, на якій проводилося дослідження. Розмір субзерен становить 15...25 мкм, а їхній склад близький до складу вихідного порошку. Наплавлений

метал забезпечує високу міцність, що становить понад 600 МПа. При адитивному мікроплазмовому наплавленні з використанням присаджувального дроту низьковуглецевої сталі діаметром 1,2 мм на обраному режимі формуються просторові зразки з товщиною стінки порядку 2,7-3,0 мм з гладкою поверхнею близькою до литої. Металографічний аналіз перетину сформованої стінки показав утворення достатньо щільної дендритної мікроструктури металу без пор і несплавлень. При мікроплазмовому наплавленні дротом низьковуглецевої сталі діаметром 0,8-1,2 мм виявлено відсутність міжшарової або трансшарової пористості у зразках. Наплавлені шари мають якісне з'єднання та характеризуються рівновісною структурою. Розмір зерен поблизу підкладки становить 15...20 мкм, ближче до вільної поверхні зростає до 150...200 мкм. Встановлено, що тенденція незначного підвищення твердості в напрямку від нижніх наплавлених шарів (HV 1626...1705 МПа) до вільної поверхні (HV 1893...1936 МПа) пов'язана зі структурними перетвореннями через більший питомий об'єм перлітної складової в міру підвищення висоти тонкої стінки. При адитивному наплавленні просторових зразків електродуговим MAG способом дротом низьковуглецевої сталі діаметром 1,2 мм спостерігається дендритна мікроструктура металу (розмір дендритів до 200 мкм), наявність неметалевих включень і певна пористості у верхніх шарах вирощеної стінки. При цьому товщина стінки одержуваних зразків становить не менше 4 мм.

У четвертому розділі розроблено п'ять скінчено-елементних моделей складної просторової форми («циліндр», «трикутна призма», «квадратна призма», «розширений конус», «звужений конус») для визначення залишкових напружень і деформацій (переміщень), які враховують технологічну послідовність виконання наплавлених валиків на підкладці з урахуванням хімічного складу і механічних властивостей матеріалів підкладки і присаджувального дроту. Методом скінченних елементів отримано розв'язок термомеханічної задачі для п'яти просторових прототипів складної геометричної форми («циліндр», «трикутна призма», «квадратна призма», «розширений конус», «звужений конус») під час безперервного наплавлення формуючих

об'єктів. Встановлено, що для всіх змодельованих зразків високий рівень (до ~500 МПа) залишкових еквівалентних напружень у 1-му валику зумовлений жорсткістю між підкладкою і валиком і при цьому напруження не перевищують границі міцності матеріалу наплавленого металу із підкладкою. Встановлено, що залишкові еквівалентні напруження зменшуються у кожному наступному наплавленому порошком HYF-103 валику (шарі) на 7–20% для всіх змодельованих просторових прототипів, що виготовляються адитивним наплавленням. При цьому відбувається певне накопичення і збільшення цих напружень у середніх за висотою стінки шарах, що приводить до появи залишкових деформацій у верхніх шарах. При мікроплазмовому наплавленні порошком HYF-103 найбільші (565 МПа) за величиною еквівалентні напруження утворюються у середніх шарах (тобто 5-10 мм по висоті) модельного зразка типу «розширений конус», а найменші (552 МПа) – у тій же зоні зразка типу «звужений конус». Для всіх моделей максимальні значення переміщень відповідають діапазону 0,22–0,28 мм. Експериментальні дослідження показали, що наплавлені зразки мали залишкові деформації з відхиленнями не більше 20% від змодельованих, що свідчить про достатню ефективність моделювання для подальшого застосування розробленої методики для розрахункового врахування НДС у системі автоматичного моніторингу із керуючими програмами.

У п'ятому розділі розроблено базові технологічні прийоми адитивного порошкового мікроплазмового наплавлення, до яких відносяться: старт процесу на підвищеному струмі (~35 А) із швидким (~1 с) переходом до сталого режиму (~25 А); зменшення витрат присаджувального порошку (з 7 до 6 г/хв); зниження витрат плазмоутворюючого газу з 0,3 до 0,2 л/хв; стабілізація погонної енергії процесу на рівні 85-90 Дж/мм; зменшення довжини дуги до 5-7 мм. Для стабілізації погонної енергії і довжини дуги застосовано систему АРНД (автоматичного регулювання напруги дуги).

Створено технологічний комплекс обладнання, який дозволяє виконувати адитивне мікроплазмове наплавлення об'єктів довільної форми у просторі $X:Y:Z=500\times400\times400$ мм із продуктивністю до 0,8 кг/год. Комплекс оснащений

автоматичною системою моніторингу і керування власної розробки, які базуються на одержанні за допомогою системи датчиків необхідної інформації про процес наплавлення, обробки отриманих даних і співставленні їх із накопиченими у базі та розрахунковими даними за допомогою нейронних мереж, автоматичній генерації відповідних керуючих команд і їх відпрацювання завдяки наявним зворотним зв'язкам. Для автоматизації контролю якості об'єкта, що наплавляється, розроблено відповідну систему автоматичного моніторингу, яка поєднує контроль в реальному часі за допомогою нейронних мереж і розрахункове прогнозування температури та НДС. Випробування даної системи довело можливість та ефективність її застосування для прогнозування та оцінки якості об'ємних виробів, що наплавляють. На підставі інтеграції розробленої системи автоматичного моніторингу із 3D принтерами та зварювальними роботами створено дві лінійки обладнання, впроваджені на ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР»» (Україна).

Ключові слова: мікроплазмове наплавлення, тривимірні об'єкти, структури, фазовий склад, мікротвердість, просторові примітиви, скінчено-елементе моделювання, залишкові деформації, еквівалентні напруження, автоматичний моніторинг.

ABSTRACT

Voytenko O.M. Microplasma additive surfacing of spatial products from metal materials - Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 132 Materials Science - E.O. Paton Institute of Electric Welding of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv - 2022.

The dissertation work is devoted to studying the features of technological processes of additive microplasma surfacing with powder and wire filler materials and their influence on the structure formation and residual stress-strain state of the manufactured three-dimensional metal objects.

Modern production is characterized by the need to quickly change the size of parts and the use of waste-free technologies. An actual approach to solving such problems is using additive technologies to create 3D objects. At the same time, it is desirable to achieve a technical combination of the accuracy of manufacturing parts, the possibility of complete elimination of machining, as well as high production efficiency. In the case of the need for large series of such parts, the actual approach is the use of traditional surfacing technologies for layer-by-layer metal build-up with the addition, in certain cases, of accompanying or finishing machining. One of the promising processes, which to some extent satisfies these requirements, is microplasma surfacing, which, on the one hand, can use a wider range of consumable (filler) metal materials in the form of powders and wires, and on the other hand, optimally combine the performance, forming accuracy, a given level of physical and mechanical properties and residual stresses.

The object of research is created by layer microplasma surfacing metal three-dimensional objects of low-carbon and stainless steel.

The subject of research is additive microplasma surfacing using wire and powder filler materials.

The aim of the work is to study the regularities of the influence of technological parameters of additive microplasma surfacing of spatial objects using steel wire and powder filler materials on the formation of microstructure and stress-strain state (SSS) of the material of volumetric products and the creation of intelligent hardware and software for automatic 3D printing of spatial metal products with a given structure and predicted stress state.

The scientific novelty of the research includes the following provisions:

1. It has been established that in the process of continuous layer-by-layer microplasma surfacing of bulk products from metal materials such as "parallelepiped", "cylinder", "triangular prism", "square prism", "expanded cone", "narrowed cone" with maximum dimensions up to 65 mm and wall thickness from 2.5 mm in the range of currents of 20-30 A residual stresses of each subsequently welded roller is reduced by

7-20%, and the maximum values of radial deformations (displacements) do not exceed the range of 0.22-0.28 mm.

2. It is revealed that at continuous layer-by-layer microplasma surfacing of low-carbon steel wire, in the direction from the first layer, there is a tendency to increase the grain size of the deposited metal (from 15-20 microns to 150-200 microns) along the height of the deposited wall, close to 10 sizes of its width, and with the further surfacing of layers, the grain size practically does not increase.

3. It is proposed optimal ranges of values of running energy as a criterion for optimizing the modes of microplasma additive surfacing (80-90 J/mm and 160-200 J/mm, respectively, when using as a filler material powder granulation up to 150 microns and wire Ø0,8-1.2 mm), within which a decrease in the size of the fusion zone of layers (up to 0.1-0.3 mm), grain size (by 15-30%), wall size (up to 2.5 mm), an increase in the hardness of layers (up to 500-600 MPa) and the achievement of greater uniformity of the microstructure is achieved.

4. It is confirmed that additive microplasma surfacing with filler wire from low carbon steel in comparison with the process of WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing - arc with a fusible electrode) provides a reduction in the grain size along the wall height in the volume of the deposited metal, on average by 2-3 times, improving the equilibrium of the structure (approximation of the grain shape coefficient to 1), avoiding defects in the form of trans layer porosity, achieving a decrease in residual stresses along the height of the spatial product by an average of 50-150 MPa.

5. A new approach to the development of hardware and software for the technology of additive microplasma surfacing of metal materials, which includes a combination of self-learning neural networks, a system for collecting and forming a database, a system for automatic control of the power supply, which provides the ability to generate control programs to adjust the modes of the surfacing of a metal product with specified geometric parameters, grain sizes and the predicted level of residual stresses.

The practical significance of the obtained results. The influence of technological parameters on the features of formation and structure formation of

deposited layers during additive microplasma surfacing of powder and wire steel filler materials was determined. This made it possible to predict the SSS of the resulting products, as well as to determine the parameters of the process modes.

The optimum ranges of values of running energy (80-90 J/mm and 160-200 J/mm, from the point of view of ensuring the specified structure and quality of the deposited metal, can be used as criteria for optimizing the modes of microplasma additive surfacing of metal bulk products.

For the hardware implementation of additive growth of volumetric products from metal materials, plasma torch of improved design for microplasma surfacing (using both metal powders and wires as filler materials), as well as 3D printers with working fields from $300 \times 200 \times 200$ to $1000 \times 900 \times 900$ mm were developed and manufactured,

In order to automate the manufacture of products by additive microplasma surfacing, for the first time, intelligent equipment was created, including an automatic monitoring system with an improved system of automatic control of the plasma arc and the corresponding software using self-learning neural networks to generate control programs. These programs automatically provide the selection of optimal parameters of microplasma surfacing and, accordingly, the specified structure and level of internal stresses in the spatial metal product. The approach was implemented and the hardware for integration of the specified automatic monitoring system with 3D printers and welding robots was developed, which was implemented at the Research and Production Center "PLASER" LLC (Ukraine). Using this approach, 4 sets of equipment for the implementation of an intelligent process of microplasma surfacing of spatial products from metal materials were manufactured, two of which were exported to China.

The first section presents the results of an analytical review of the literature on the subject of the thesis. The analysis of the current state of 3D technologies for the manufacture of bulk metal products has shown that for the manufacture of precision parts of small sizes, it is advisable to use laser technologies (for example, SLM), for large parts - the use of welding technologies (for example, WAAM, PTA). Among the additive welding technologies, the most promising is plasma-arc.

The main advantages of additive welding technologies for obtaining three-dimensional metal structures of complex shapes in comparison with SLM-technologies include the increase of process productivity by 1-2 orders of magnitude at the same power consumption; reduction of equipment cost by 3-10 times; the possibility of increasing the overall dimensions of parts by 10-100 times or more; expansion of the range of consumables (powders, wires, composite materials); increase of consumable utilization rate by 20-50%; reduction of equipment cost by about 10-20 times.

The main disadvantages of additive welding technologies for the production of three-dimensional metal structures include thermal deformation and overheating of the layers being built up. In the process of additive surfacing, undesirable temperature gradients can occur, residual stresses can accumulate, deformations and cracks can form and, as a result, performance characteristics can be reduced. One of the methods to eliminate these shortcomings is to increase the thermal locality of the energy source. For example, the use of laser radiation or microplasma.

For the manufacture of finished metal products by 3D printing from the standpoint of quality/cost, it is advisable to use additive microplasma (operating current up to 50 A) surfacing using powder and wire filler materials. To do this, it is necessary to apply an advanced system of monitoring and control of process parameters, which will take into account a set of factors from the creation of a digital prototype to process control and quality control. A promising approach to the creation of such a control system is the use of artificial neural networks.

The second section. The chemical composition and main structural components of filler materials used in the research are considered in the second section. To solve the problem of obtaining three-dimensional metal products by the method of additive surfacing using microplasma and arc with arc fusible electrode sources, a research methodology was proposed, appropriate technological equipment was selected and a laboratory bench was created on its basis. To implement the proposed methodology, taking into account the available technological equipment, the necessary filler (surfacing) wire and powder materials were selected, and the necessary auxiliary

devices and equipment were selected, including equipment for metallographic research. The selected research equipment allows to study of the results of technological research carried out with sufficient accuracy. In particular, to establish the character defects and structural features of the resulting cladding layers, for which a number of relevant metallographic studies are planned.

In the third section, computational studies of gas dynamics processes in the circuits of a standard plasma torch have shown its shortcomings, which are manifested when feeding filler powder materials. To eliminate these shortcomings, the modeling of the optimal dynamics of gas flows was carried out according to the criteria of laminarity, completeness of the introduction of materials into the plasma, focusing of gas flows in the working area, and stabilization of the heating/cooling mode of the nozzles. On the basis of such modeling, an improved design of the plasma torch was designed, in which a second inlet channel of the transporting gas was added, both inlet channels are located at an angle to the gas outlet axis in order to evenly distribute the material in the alignment chamber, and its cross-section was reduced to improve gas filling. Using a microplasma torch of improved design, comparative experiments on the additive surfacing of metal spatial primitives by three additive methods were carried out: electric arc MAG surfacing with electrode conductive wire, microplasma surfacing with filler wire, and powder. The basic features of the processes, their mutual disadvantages, and their advantages are determined. Optimal parameters of additive surfacing modes are selected according to the criteria of quality connection and formation of equilibrium structure of deposited layers.

It is established that as a result of additive microplasma surfacing of stainless steel powder (granulation 40-60 microns) a layered metal structure is formed with a height of the deposited layer of about 650 microns and a wall thickness of about 3 mm. The distribution of metal along the height of the sample is uniform. Due to the additive formation of the sample by surfacing the powder, colonies of large and small dendrites are formed. Analysis of the metal structure in different parts of the product showed that the colonies of dendrites have different sizes and orientations depending on the height of the area where the study was conducted. The size of subgrains is 15...25 microns,

and their composition is close to the composition of the original powder. The welded metal provides high strength, which is more than 600 MPa. At additive microplasma surfacing with the use of filler wire of low-carbon steel with a diameter of 1.2 mm in the selected mode, spatial samples with a wall thickness of about 2.7-3.0 mm with a smooth surface close to the cast one are formed. Metallographic analysis of the cross-section of the former wall showed the formation of a sufficiently dense dendritic microstructure of the metal without pores and non-fusions. Microplasma surfacing with low-carbon steel wire with a diameter of 0.8-1.2 mm revealed the absence of interlayer or trans-layer porosity in the samples. The welded layers have a high-quality connection and are characterized by an equilibrium structure. The grain size near the substrate is 15...20 microns, closer to the free surface increases to 150...200 microns. It is established that the tendency of a slight increase in hardness in the direction from the lower welded layers (HV 1626...1705 MPa) to the free surface (HV 1893...1936 MPa) is associated with structural transformations due to the larger specific volume of the pearlite component as the height of the thin wall increases. During the additive surfacing of spatial samples by electric arc MAG method with a low-carbon steel wire with a diameter of 1.2 mm, a dendritic microstructure of the metal (dendrite size up to 200 microns), the presence of non-metallic inclusions and a certain porosity in the upper layers of the grown wall are observed. The wall thickness of the obtained samples is not less than 4 mm.

In the fourth section, five finite element models of complex spatial shape ("cylinder", "triangular prism", "square prism", "expanded cone", "narrowed cone") are developed to determine the residual stresses and deformations (displacements), which take into account the technological sequence of the welded rolls on the substrate, taking into account the chemical composition and mechanical properties of the substrate materials and filler wire. The finite element method was used to solve the thermomechanical problem for five spatial prototypes of complex geometric shapes ("cylinder", "triangular prism", "square prism", "expanded cone", and "narrowed cone") during continuous surfacing of rollers forming the object. It is established that for all simulated samples a high level (up to ~500 MPa) of residual equivalent stresses in the

1st roller is due to the stiffness between the substrate and the roller, and the stresses do not exceed the tensile strength of the material of the welded metal with the substrate. It is established that the residual equivalent stresses decrease in each subsequent roller (layer) welded with HYF-103 powder by 7-20% for all simulated spatial prototypes manufactured by additive surfacing. At the same time, there is a certain accumulation and increase of these stresses in the average wall height layers, which leads to the appearance of residual deformations in the upper layers. At microplasma surfacing with HYF-103 powder, the largest (565 MPa) equivalent stresses are formed in the middle layers (i.e. 5-10 mm in height) of the model sample of the "expanded cone" type, and the smallest (552 MPa) - in the same zone of the "narrowed cone" type sample. For all models, the maximum displacement values correspond to the range of 0.22-0.28 mm. Experimental studies have shown that the welded samples had residual deformations with deviations of no more than 20% from the simulated ones, which indicates the sufficient efficiency of modeling for further application of the developed methodology for the calculated accounting of SSS in the automatic monitoring system with control programs.

In the fifth section, the basic technological methods of additive powder microplasma surfacing are developed, which include: start of the process at high current (~35 A) with fast (~1 s) transition to steady state (~25 A); reduction of filler powder consumption (from 7 to 6 g/min); reduction of plasma gas consumption from 0.3 to 0.2 l/min; stabilization of the process energy at the level of 85-90 J/mm; reduction of arc length to 5-7 mm. The AVC system (automatic arc voltage control) was used to stabilize the power output and arc length.

A technological complex of equipment has been created, which allows performing additive microplasma surfacing of objects of arbitrary shape in the space $X:Y:Z = 500 \times 400 \times 400$ mm with a capacity of up to 0.8 kg/h. The complex is equipped with an automatic monitoring and control system of its own design, which is based on obtaining the necessary information about the surfacing process using a system of sensors, processing the received data, and comparing them with the accumulated in the database and calculated data using neural networks, automatically generating

appropriate control commands and their development due to the available feedback. To automate the quality control of the object to be welded, an appropriate automatic monitoring system has been developed, which combines real-time control using neural networks and calculated forecasting of temperature and SSS. Testing of this system has proved the possibility and effectiveness of its application for predicting and assessing the quality of bulk welded products. Based on the integration of the developed automatic monitoring system with 3D printers and welding robots, two lines of equipment were created and implemented at the Research and Production Center "PLASER" LLC (Ukraine).

Keywords: microplasma surfacing, three-dimensional objects, structures, phase composition, microhardness, spatial primitives, finite element modeling, residual deformations, equivalent stresses, automatic monitoring.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у науково періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази даних Scopus:

1. Welding Technology in Additive Manufacturing Processes of 3D Objects / V. Korzhyk, V. Khaskin, O. Voitenko, V. Sydorets, O. Dolianovskaia // Materials Science Forum, Vol. 906, 2017 – P. 121-130. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.906.121>
2. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review) / Peleshenko S., Korzhyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. // Eastern European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 3/1(87), 2017. – P. 42-52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99666>
3. Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials / Kvasnytskyi V., Volodymyr Korzhyk., Ivan Lahodzinkyi., Yevhenii Illiashenko., Sviatoslav Peleshenko., Oleksandr Voitenko // IEEE International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP-2020) Sumy, Ukraine, 9-13 Nov. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>

Статті у наукових фахових виданнях України:

4. Особливості лазерно-плазмового зварювання корозійностійкої сталі AISI 304 з використанням лазера / В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, А.А. Гринюк, Є.В. Ілляшенко, А.В. Бернацький, С.І. Пелешенко // Автоматичне зварювання, № 12, 2021, с. 18-26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.04.04>
5. Розробка автоматизованого обладнання для виготовлення тривимірних металевих виробів на основі адитивних технологій / В.М. Коржик, О.М. Войтенко, С.І. Пелешенко, В.І. Ткачук, В.Ю. Хаскін, А.А. Гринюк // Автоматичне зварювання, №5-6, 2017, с. 91-98. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.15>

Статті у науково періодичних виданнях інших держав:

6. Моделирование лазерно-плазменной сварки нержавеющей и углеродистых тонколистовых сталей методом конечных элементов / В.Ю. Хаскин, В.Н. Коржик, А.А. Бабич, А.В. Бернацкий, А.Н. Войтенко // Colloquium-journal, №13(24), 2018. – С. 55-61.
7. Analysis of features of technological schemes of processes of laser-plasma cutting and welding / V. Khaskin, V. Korzhyk, A. Bernatsky, I. Gos, S. Kostash, O. Voitenko // Austria-science, №20, 2018. – P. 34-43.
8. Особенности лазерной сварки титановых сплавов стыковыми и прорезными швами / В.Ю.Хаскин, В.М.Коржик, В.П.Лихошва, В.И.Ткачук, С.И.Пелешенко, А.А.Бабич, А.Н.Войтенко // Sciences of Europe, №4, 2016. – С. 13-20.
9. The process of laser and laser-plasma cladding / V.Yu. Khaskin, V.N. Korzik, V.Tkachuk, S. Peleshenko, O. Voitenko, T. Oleinychenko // American Scientific Journal, №2 (2), 2016. – P. 74-78.
10. Резка листовых углеродистых сталей лазерным излучением / В.Ю.Хаскин, В.М.Коржик, В.Е.Шевченко, В.И.Ткачук, С.И.Пелешенко, А.А.Бабич, А.Н.Войтенко, Т.В.Олейниченко // Scientia. Техника, №1, 2016. – С. 13-18.

Патенти

11. Спосіб лазерно-дугового зварювання металевих деталей підвищених товщин / В.Ю. Хаскін, В.М. Коржик, В.Ю. Шевченко, О.М. Войтенко, С.І. Пелешенко,

І.Д. Гос, С.М. Косташ, О.А. Бабич // Патент України на винахід UA 122817 від 06.01.2021.

12. Спосіб гібридного лазерно-плазмового різання і зварювання / Хаскін В.Ю., Коржик В.М., Бабич О.А., Пелешенко С.І, Войтенко О.М., Ткачук В. І. // Патент України на винахід UA 121907 від 10.08.2020.

Матеріали, що засвідчують апробацію дисертації:

13. Formation of spatial products by additive layer-by-layer arc and plasma surfacing / Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Voitenko O., Shcheretskiy V., Illiashenko Ye., Sitko O. // The 7th International scientific and practical conference —Topical issues of modern science, society and education (January 29-31, 2022) SPC — Sci-conf.com.ua, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1899 p. – P. 382-388.

14. Estimation of influence of duration of current flow at direct and inverse polarity on quality of formation and geometrical parameters of seams / Korzhyk V., Grynyuk A., Khaskin V., Peleshenko S., Shcheretskiy V., Hos I., Illiashenko Ye., Voitenko O., Konoreva O. // The 6th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (January 13-15, 2022) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. – 2022. – 705 p. – P. 185-190.

15. Improvement design of the electrodes of hybrid plasmatron for plasma-GMAW / Korzhyk V., Khaskin V., Babych O., Grynyuk A., Ganushchak O., Shevchenko V., Peleshenko S., Voitenko O. // The 11th International scientific and practical conference “European scientific discussions” (September 12-14, 2021) Potere della ragione Editore, Rome, Italy. 2021. 337 p. – P. 57-60.

16. Nano-scale non-metallic microstructure modifier in materials for aluminum welding and 3D printing / Korzhyk V. M., Shcheretskiy V. O., Demianov O. I., Grynyuk A. A., Voitenko O. M., Strohonov D. V // The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2021). Abstract Book of participants of International research and practice conference, 25 – 27 August 2021, Lviv. Edited by Dr. Olena Fesenko. – Kyiv: LLC «Computer-publishing, information center», 2021. – 854 p. – P.159.

17. Plasmatron development for plasma-arc spraying of a fusible wire-anode / Voitenko O., Korzhyk V., Demianov O., Shcheretskyi V., Illiashenko Ye., Ganushchak O., Strohonov D., Gos I // The 3rd International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects” (August 29-31, 2021) MDPC Publishing, Berlin, Germany. – 2021. – 403p. – P. 77-79.

ЗМІСТ

	Стор.
Перелік умовних позначень	25
Вступ	26
Розділ 1. Аналіз технологічних особливостей і програмно-апаратних рішень адитивного дугового і плазмового наплавлення з використанням дротових і порошкових присаджувальних матеріалів	32
1.1. Класифікація технологій адитивного виробництва тривимірних виробів	32
1.2. Технологічні особливості адитивного наплавлення з використанням дугових джерел енергії	37
1.3. Сучасні підходи до індустріалізації адитивного виробництва із застосуванням процесів адитивного наплавлення	45
1.4. Потенціал застосування мікроплазмових зварювальних технологій в адитивному виробництві	52
Висновки по розділу 1	61
Розділ 2. Експериментальний стенд і методика дослідження процесів пошарового плазмового і мікроплазмового наплавлення просторових металевих конструкцій	63
2.1. Методика дослідження процесів пошарового плазмового і мікроплазмового наплавлення просторових металевих конструкцій	63
2.2. Використані матеріали та їх характеристики	64
2.3. Створення лабораторного комплексу обладнання для дослідження адитивних технологій наплавлення	69
2.4. Характеристики вузлів лабораторного комплексу	71
2.5. Методи та обладнання металографічних досліджень	84
Висновки по розділу 2	86
Розділ 3. Моделювання оптимізованої конструкції плазмотрону і дослідження закономірностей впливу технологічних прийомів	

адитивного наплавлення на формування структури тривимірних об'єктів	87
3.1. Вибір методу чисельного моделювання процесів газодинаміки в контурах плазмотрону та параметрів сітки розрахунків	87
3.2. Комп'ютерне моделювання процесів газодинаміки в плазмотронах доопрацьованих для здійснення плазмовеого адитивного наплавлення	91
3.2.1. Моделювання газодинаміки плазмотрона для адитивного виробництва з використанням дроту як присаджувального матеріалу	91
3.2.2. Моделювання газодинаміки плазмотрона для адитивного виробництва з використанням порошку як присаджувального матеріалу	94
3.3. Комп'ютерне моделювання газодинаміки нового плазмотрону для плазмовеї адитивної технології, закономірностей розподілу та траєкторій руху частинок присаджувального порошку	109
3.4. Технологічні дослідження формування просторових примітивів за допомогою процесів адитивного наплавлення	116
3.5. Металографічні дослідження результатів виготовлення металевих просторових примітивів методом адитивного наплавлення	124
3.6. Аналіз впливу основних параметрів мікроплазмовеї дуги та двофазного потоку «мікроплазма-присаджувальний порошок» на розміри шару, що наплавляється	136
3.7. Аналіз умов багаточарової адитивної мікроплазмове-порошкової технології за критеріями маси наплавленого металу та погонної енергії	141
Висновки по розділу 3	144
Розділ 4. Прогнозування напружено-деформованого стану одержуваних металевих тривимірних об'єктів	146

4.1. Методика скінчено-елементного моделювання напружено-деформованого стану прототипів виробів, одержаних адитивним наплавленням	146
4.2. Розробка скінчено-елементних 3D моделей	150
4.3. Аналіз параметрів залишкового НДС тривимірних виробів	153
4.3.1. Граничне значення напруженого стану в точці тіла	153
4.3.2. Поля еквівалентних напружень у модельних прототипах	155
4.3.3. Переміщення в моделях прототипів	158
4.4. Дослідна перевірка методики моделювання НДС виробів, одержаних адитивним наплавленням	161
Висновки по розділу 4	167
Розділ 5. Створення технологічних прийомів, обладнання та системи автоматичного моніторингу і керування процесами адитивного мікроплазмового наплавлення	169
5.1. Розробка базових технологічних прийомів адитивного мікроплазмового наплавлення	169
5.2. Автоматичний моніторинг якості процесу адитивного мікроплазмового наплавлення	172
5.3. Створення технологічного комплексу адитивного мікроплазмового наплавлення та апробація системи автоматичного моніторингу	175
5.4. Впровадження апаратно-програмних комплексів адитивного мікроплазмового наплавлення 3D виробів	184
5.5. Перспектива розробки гібридного процесу "лазер-мікроплазма" для адитивного наплавлення і обладнання для його реалізації	191
Висновки по розділу 5	193
Загальні висновки	195
Список літератури	198
Додаток А. Впровадження результатів роботи в ТОВ «ЗЕП КУІЗ»	213
Додаток Б. Впровадження результатів роботи в ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР»	216

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$I_{од}$ – струм основної дуги, А

$I_{чд}$ – струм чергової дуги, А

U – напруга на дузі, В

$Q_{пл}$ – витрати плазмоутворюючого газу основної дуги, л/хв

$Q_{чд}$ – витрати плазмоутворюючого газу чергової дуги, л/хв

Q_3 – витрати захисного газу, л/хв

$Q_{тр}$ – витрати транспортуючого присаджувального порошку газу, л/хв

$Q_{пр}$ – витрати присаджувального порошку, л/хв

E – погонна енергія, Дж/мм

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні нормальні напруження, МПа

T_m – температура плавлення, К

R_z – шорсткість поверхні, мкм

HV – мікротвердість за Вікерсом, МПа

ВСТУП

Актуальність роботи. Однією з основних особливостей сучасного виробництва є збільшення номенклатури форм та розмірів виробів із близьким або ідентичним функціоналом. При цьому виробництво може бути середньосерійним або навіть дрібносерійним. З одного боку це пов'язано із певним насиченням ринку виробами крупносерійного виробництва, а з іншого – бажанням споживачів мати унікальні вироби. При дрібносерійному виготовленні розмаїтих виробів часто-густо стає не вигідним застосування традиційних підходів механічної обробки через значне зростання їх собівартості. Іншою особливістю сучасного виробництва є навпаки – потреба у крупносерійному виробництві із максимальним зменшенням собівартості виробів. Це викликано близькістю або ідентичністю функціонала виробів із зовні різним дизайном.

В першому випадку, при виготовленні розмаїтих виробів, виникає потреба заміни методів традиційної механічної обробки такими, які дозволяють швидко перелаштовуватися з одного типорозміру деталей на інший. У другому, при виготовленні однотипних виробів, виникає потреба у використанні безвідходних технологій. В обох випадках актуальним підходом до вирішення зазначених завдань є використання адитивних технологій створення 3D-об'єктів. Така технологія, з одного боку, може використовувати більш широкий спектр витратних (присаджувальних) металевих матеріалів у вигляді порошків та дротів, а з іншого боку – оптимально поєднувати показники продуктивності, точності формоутворення, заданого рівня фізико-механічних властивостей та залишкових напружень.

Таким чином, адитивні технології створення тривимірних об'єктів є актуальними для сучасного виробництва, зокрема, для створення готових металевих деталей. При цьому у випадку потреби у великих серіях таких деталей актуальним підходом є застосування традиційних технологій зварювання і наплавлення для пошарового нарощення металу із долученням, у певних випадках, супутньої або фінішної механічної обробки.

Мета роботи – дослідження закономірностей впливу технологічних параметрів адитивного мікроплазмового наплавлення просторових об'єктів із використанням сталевих дротових і порошкових присаджувальних матеріалів на формування мікроструктури і напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу об'ємних виробів і створення на основі цього інтелектуальних апаратно-програмних засобів для автоматичного 3D друку просторових металевих виробів із заданою структурою і прогнозованим напруженим станом.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні **задачі**:

1. Аналіз технологічних особливостей і програмно-апаратних рішень адитивного дугового і плазмового наплавлення з використанням дротових і порошкових присаджувальних матеріалів.
2. Створення експериментального стенду і вибір методики дослідження процесів пошарового дугового (MAG) і мікроплазмового наплавлення просторових металевих конструкцій.
3. Експериментально-розрахункові дослідження закономірностей впливу технологічних прийомів пошарового наплавлення на особливості формування структури та властивості металевих тривимірних об'єктів.
4. Моделювання конструкцій плазмотронів і процесів адитивного наплавлення дротових і порошкових присаджувальних матеріалів, прогнозування напружено-деформованого стану одержуваних металевих тривимірних об'єктів.
5. Створення технологічного обладнання, інтелектуальної системи автоматичного моніторингу та програмних прийомів керування процесами адитивного мікроплазмового наплавлення для підвищення якості та продуктивності створення металевих тривимірних об'єктів.

Об'єктом дослідження є створені пошаровим наплавленням металеві тривимірні об'єкти.

Предметом дослідження є адитивне мікроплазмове наплавлення з використанням дротових і порошкових присаджувальних матеріалів.

Використовувалися наступні **методи дослідження**: фізичне і математичне моделювання процесів адитивного мікроплазмового наплавлення металевих

матеріалів; чисельне прогнозування напружено-деформованого стану (НДС) одержуваних металевих тривимірних об'єктів; моделювання газових потоків для покращення конструкцій плазмотронів; технологічні дослідження особливостей пошарового формування металевих об'єктів та їх впливу на структуроутворення стінки; візуальні та хронографічні методи контролю; оптичне і механічне вимірювання геометричних параметрів наплавлених зразків; металографічні дослідження одержаних структур із застосуванням оптичної та електронної мікроскопії; мікродюрOMETричний аналіз твердості; випробування на статичне розтягування.

Наукова новизна отриманих результатів.

До новизни дослідження відносяться наступні положення:

1. Встановлено, що в процесі неперервного пошарового мікроплазмового наплавлення об'ємних виробів із металевих матеріалів типу «паралелепіпед», «циліндр», «трикутна призма», «квадратна призма», «розширений конус», «звужений конус» з максимальними габаритами до 65 мм і товщиною стінки від 2,5 мм в інтервалі струмів 20-30 А залишкові напруження кожному наступному наплавленому валику зменшуються у на 7–20%, а максимальні значення радіальних деформацій (переміщень) не перевищують діапазон 0,22–0,28 мм.
2. Виявлено, що при неперервному пошаровому мікроплазмовому наплавленні дроту низьковуглецевої сталі, в напрямі від першого шару спостерігається тенденція збільшення розміру зерен наплавленого металу (від 15-20 мкм до 150-200 мкм) по висоті наплавленої стінки, близької до 10 розмірів її ширини, а при подальшому наплавленні шарів розмір зерен практично не зростає.
3. Запропоновано оптимальні діапазони значень погонної енергії в якості критерію оптимізації режимів мікроплазмового адитивного наплавлення (80-90 Дж/мм та 160-200 Дж/мм, відповідно, при використанні в якості присаджувального матеріалу порошку розміром частинок до 150 мкм і дроту Ø0,8-1,2 мм), в межах яких досягається зменшення розміру зони сплавлення шарів (до 0,1-0,3 мм), розміру зерен (на 15-30%), розміру стінки (до 2,5 - 3 мм),

збільшення твердості шарів (до 500-600 МПа) та досягнення більшої однорідності мікроструктури.

4. Підтверджено, що адитивне мікроплазмове наплавлення присаджувальним дротом із низьковуглецевої сталі в порівнянні із процесом WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing – дугою з плавким електродом) забезпечує зменшення розміру зерен по висоті стінки в об'ємі наплавленого металу, в середньому в 2-3 рази, покращення рівновісності структури (наближення коефіцієнту форми зерна до 1), уникнення дефектів у вигляді трансшарової пористості, досягнення пониження залишкових напружень по висоті просторового виробу в середньому на 50-150 МПа.

5. Запропоновано новий підхід до розробки апаратно-програмного забезпечення технології адитивного мікроплазмowego наплавлення металевих матеріалів, який включає поєднання самонавчальних нейронних мереж, системи збору і формування бази даних, системи автоматичного керування джерелом живлення, що забезпечує можливість генерувати керуючі програми для коригування режимів наплавлення металевих виробів із заданими геометричними параметрами, розмірами зерен та прогнозованим рівнем залишкових напружень.

Практичне значення отриманих результатів. У роботі було визначено вплив технологічних параметрів на особливості формування та структуроутворення наплавлених шарів при адитивному мікроплазмовому наплавленні порошкових і дрових сталевих присаджувальних матеріалів. Це дало можливість прогнозування НДС виробів, що отримують, а також визначення параметрів режимів процесу.

Встановлені в роботі оптимальні діапазони значень погонної енергії (80-90 Дж/мм та 160-200 Дж/мм, з точки зору забезпечення заданої структури та якості наплавленого металу, можуть використовувати в якості критеріїв оптимізації режимів мікроплазмowego адитивного наплавлення металевих об'ємних виробів.

Для апаратної реалізації адитивного вирощування об'ємних виробів із металевих матеріалів було розроблено та виготовлено плазмотрони покращеної конструкції для мікроплазмowego наплавлення (що використовують в якості

присаджувальних матеріалів, як металеві порошки, так і дроти), а також 3D принтери з робочими полями від $300 \times 200 \times 200$ до $1000 \times 900 \times 900$ мм,

З метою автоматизації виготовлення виробів адитивним мікроплазмовим наплавленням вперше було створено інтелектуальне обладнання, що включає систему автоматичного моніторингу із вдосконаленою системою автоматичного регулювання плазмової дуги та відповідним програмним забезпеченням із використання самонавчальних нейронних мереж для генерування керуючих програм. Вказані програми в автоматичному режимі забезпечують вибір оптимальних параметрів мікроплазмового наплавлення і, відповідно, задану структуру та рівень внутрішніх напружень в просторовому металевому виробі. Реалізовано підхід та розроблено апаратне забезпечення для інтеграції вказаної системи автоматичного моніторингу із 3D принтерами та зварювальними роботами, яке впроваджено на ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР»» (Україна). З допомогою такого підходу виготовлено 4 комплекти обладнання для реалізації інтелектуального процесу мікроплазмового наплавлення просторових виробів із металевих матеріалів, два з яких поставлено на експорт в КНР.

Особистий внесок здобувача. При особистій участі автора були отримані результати та розроблені положення, відображені в дисертаційній роботі. Постановку задач, визначення методів дослідження здійснено спільно з науковим керівником дисертації. Процеси наплавлення і присаджувальні матеріали для дослідження було обрано відповідно до рекомендацій наукового керівника та технологів. Автором були самостійно отримані експериментальні дані, на основі яких проведено скінченно-елементні розрахунки. Здобувачем самостійно проводилась підготовка зразків до наплавленні і до металографічних досліджень, виконувались технологічні експерименти і металографічні дослідження. Результати експериментальних досліджень оформлені здобувачем у співавторстві та опубліковані у статтях і тезах доповідей, а також апробовані на міжнародних конференціях. Теоретичні опрацювання результатів дисертаційної роботи проведені спільно з науковим керівником.

Апробація роботи. Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня, таких як:

- відеоконференція International Academic Conference on Intelligent Manufacturing and Laser Processing, Гуанчжоу, КНР (26.11.2022);
- відеоконференція з Пекінським Технологічним Університетом, Пекін, КНР (19.10.2022);
- online conference International Institute of Welding, Tokyo, Japan (20.07.2022);
- XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022». Київ, Україна, 28-29 квітня 2022 р.;
- The 7th International scientific and practical conference «Topical issues of modern science, society and education», Kharkiv, Ukraine, January 29-31, 2022;
- The 11th International scientific and practical conference “European scientific discussions”, Rome, Italy, September 12-14, 2021;
- The 3rd International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects”, MDPC Publishing, Berlin, Germany, August 29-31, 2021;
- The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2021). Abstract Book of participants of International research and practice conference, 2021, Lviv, Ukraine, August 25 – 27, 2021.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображений у 17 наукових працях, із яких 10 – статті у наукових фахових виданнях України і періодичних виданнях іноземних держав, 3 з яких включених до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, 2 патенти України на винахід, та 5 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становлять 197 сторінок, 97 рисунків, 29 таблиць та список використаних джерел з 135 найменувань, додатки з 2 довідками про впровадження обладнання.

Розділ 1. Аналіз технологічних особливостей і програмно-апаратних рішень адитивного дугового і плазмового наплавлення з використанням дротових і порошкових присаджувальних матеріалів.

В останні роки спостерігається підвищений інтерес до процесів адитивного виробництва (технологій 3D-друку), від застосування яких очікують зміни структури промислового виробництва та економіки, реалізації автоматичного проєктування деталей, гнучкості та швидкості виготовлення різних виробів, перерозподілу виробництва від великих підприємств до малих або виготовлення деталей безпосередньо у споживача [1]. Технології 3D-друку дозволяють вирощувати вироби будь-якої складності з мінімальними витратами. При цьому практично відсутні відходи виробництва та скорочується кількість персоналу. Крім переваг по швидкості та вартості виготовлення виробів, ці технології мають суттєве значення з точки зору охорони навколишнього середовища, а саме, знижують виділення парникових газів та «теплове» забруднення. Адитивні технології мають величезний потенціал у справі зниження енергетичних та матеріальних витрат на створення найрізноманітніших видів продукції. І нарешті, ступінь використання 3D-технологій у промисловому виробництві є індикатором реальної індустріальної могутності держави, індикатором його інноваційного розвитку.

1.1. Класифікація технологій адитивного виробництва тривимірних виробів.

Різні процеси тривимірного друку поєднує те, що прототип виготовляється шляхом пошарового (адитивного) накладання матеріалу. Основна перевага швидкого прототипування полягає в тому, що прототип створюється за один технологічний цикл згідно заздалегідь створеній геометричній моделі без застосування додаткових технологічних заходів. Отже, при цьому відпадає необхідність у плануванні послідовності етапів технологічних процесів,

спеціальному устаткуванні для обробки матеріалів на кожному етапі виготовлення, транспортування від верстата до верстата тощо.

У таблиці 1.1 представлена класифікація адитивних технологій вирощування тривимірних об'єктів [2–4].

Таблиця 1.1. Основні методи адитивного виробництва.

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

Серед найпоширеніших процесів тривимірного друку можна виділити такі, як стереолітографія [5], струменеве нарощування термопластичного полімерного матеріалу (Fused Deposition Modeling – FDM) [6], вибіркове лазерне спікання (Selective Laser Sintering - SLS) [2]. Недоліком таких процесів є застосування пластику як основного конструкційного або сполучного матеріалу. Це значно обмежує номенклатуру виробів, що виготовляються за температурою експлуатації, навантаженням, механічною міцністю та іншими показниками.

Для розширення можливостей тривимірного друку потрібна наявність технологій отримання об'ємних високоміцних виробів з металів, сплавів, у тому числі з високою твердістю. В деяких науково-дослідних центрах США (наприклад, NASA's Langley Research Center, Houston й Johnson Space Centre, Hampton) проводиться розробка електронно-променевого процесу виготовлення металевих виробів довільної форми (Electron beam freeform fabrication – EBF₃) [7]. При цьому електронний пучок використовується як джерело енергії для плавлення дроту, що подається, у вакуумі. Ця методика була продемонстрована на алюмінієвих і титанових сплавах [8]. На нашу думку, її також можна поширити на сплави на основі нікелю та заліза. Проте застосування цього процесу обмежено необхідністю у використанні високовартісної і складної вакуумної техніки, що також призводить до збільшення собівартості виготовлення металевих деталей.

Однією з перспективних технологій отримання високоміцних об'ємних металевих виробів є вибіркове лазерне спікання, яке забезпечує їх формування шляхом сплавлення порошків різних металів і сплавів лазерним променем [3]. Така технологія дає можливість отримувати складні об'ємні металеві вироби з високим ступенем деталізації їх елементів і високою густиною (до 99 %), а також з високою розмірною точністю (± 50 мкм).

Разом з тим, при всій його ефективності, процес SLS також має ряд недоліків, що звужує його застосування (табл. 1.1):

- необхідність використання високовартісного і енергетично витратного обладнання, що зумовлює високу собівартість процесу тривимірного друку і призводить до високої вартості виготовлених виробів;
- відносно низька продуктивність тривимірного друку (зазвичай для найпоширеніших машин не більше 10 см³/год нарощування металу);
- обмеження по матеріалу – для SLM використовуються високовартісні порошки з жорсткими вимогами по гранулометричному і хімічному складу, плинності й інших характеристик;
- недостатньо висока міцність виготовлених виробів.
















Враховуючи вище сказане, актуальним є розгляд технологій зварювання для тривимірного друку металевих виробів складної форми, оскільки зварювання, при більшій продуктивності, також дозволяє реалізувати принцип адитивного виробництва, а саме пошарового формування об'ємних конструкцій. Крім того, технології зварювання розроблялися задовго до появи тривимірного друку і є менш затратними. Тому процеси зварювання актуально використовувати при розробленні економічного способу виробництва об'ємних металевих деталей та інструментів [9].

Слід зазначити, що до класифікації представлених у табл. 1.1 технологій не внесено адитивні зварювальні дугові технології. Такі технології розроблюються ще з 1926 року, але суттєве поширення отримали лише наприкінці XX – початку XXI сторіччя [10]. Наприклад, у 1993 р. у США запатентовано комбіновану технологію нарощування матеріалу за допомогою зварювання з фрезеруванням на верстатах з ЧПУ (Shape Deposition Manufacturing – SDM), а у 1994-99 рр. у Великобританії розроблено технологію Shaped Metal Deposition (SMD) виготовлення оболонок двигунів для корпорації Rolls Royce.

Також є дані про спроби створення об'ємних металевих конструкцій за допомогою дугового зварювання із заформуванням (Shape Welding) (Німеччина, 1960-х роки). На основі цього процесу такі компанії, як Krupp (Німеччина) та Thyssen (Німеччина), організували виготовлення великогабаритних деталей простої геометрії, наприклад, посудин високого тиску вагою до 500 т [11]. Компанія The Babcock & Wilcox Company (США) застосувала процес «плавлення із заформовуванням» (Shape Melting) для виготовлення великих металевих конструкцій та виробів з аустенітних сталей [12]. Корпорацією Rolls-Royce (Великобританія) проводяться роботи із застосування дугового зварювання для підвищення продуктивності формування та зниження рівня відходів при виготовленні виробів із дорогих сплавів [13]. Ця технологія успішно впроваджена для виробництва різних частин літаків зі сплавів на основі нікелю та титану.

Крім вищенаведених прикладів, науково-дослідна робота з тривимірного дугового зварювання ведеться в University of Nottingham (Великобританія), Університеті Wollongong (Австралія) та Southern Methodist University (США) [14]. Групи дослідників з Індійського Інституту Технологій (Бомбей, Індія) та Інституту Технології Виробництва та Автоматизації Фраунгофера (Німеччина) представили свої концептуальні ідеї поєднання зварювання з фрезеруванням. Розроблялися шляхи усунення характерних дефектів формування об'ємних виробів методами зварювання [15]. Показано необхідність контролю температури шарів, що нарощуються. Особливу увагу зосереджено на створення виробів з титанових [16] і нікелевих [17] сплавів для завдань аерокосмічної галузі. Тому головні зварювальні та споріднені технології для адитивного виробництва можна представити у вигляді табл. 1.2 [18].

Таблиця 1.2. Головні технології адитивного виробництва з використанням процесу локального плавлення

	Напильня				Порошок/випливиця		
	Плазма (дріт)	Електронний промінь (дріт)	Лазер (дріт)	Лазер (порошок)	Лазер (порошок)	Електронний промінь (порошок)	Сполучне (порошок)
Схема процесу							
Ілюстрація							
Описання	Випилення дроту з використанням дугової плазми	Напильня дроту, розплавленого за допомогою лазерного або електронного променя в камері	Осередження порошку, розплавленого за допомогою лазеру в камері	Лазерне або електронно-дугове селективне плавлення у випливиці, що знаходиться в камері	Лазерне або електронно-дугове селективне плавлення у випливиці, що знаходиться в камері	Лазерне або електронно-дугове селективне плавлення у випливиці, що знаходиться в камері	Система порошкового сполучення, яка потребує розплавлення в ній матеріалу
Застосування	 Високошвидкісне розплавлення матеріалу та технологія його нанесення дозволяють виробувати складні форми	 Високошвидкісне розплавлення матеріалу та технологія його нанесення дозволяють виробувати складні форми	 Високошвидкісне розплавлення матеріалу та технологія його нанесення дозволяють виробувати складні форми	 Точні та надійні методи напильня частини	 Примітивні компоненти нового покоління з високою геометричною складністю	 Примітивні компоненти нового покоління з високою геометричною складністю	 Деталі складної форми з внутрішніми порожнинами для автомобілів

Таким чином, на сьогодні спостерігається підвищення частки зварювальних технологій в адитивному виробництві металевих об'ємних виробів. Це пов'язано як із високою продуктивністю зварювання, так і з її

невисокою вартістю. Тому інтерес представляє детальне вивчення особливостей та перспектив застосування зварювальних технологій для тривимірного друку металевих виробів.

1.2. Технологічні особливості адитивного наплавлення з використанням дугових джерел енергії.

В Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (ІЕЗ) було підтверджено принципову можливість формування великогабаритних об'ємних конструкцій за допомогою дугового наплавлення. Одним із яскравих прикладів може бути створення об'ємних зварних скульптур і картин з титанового сплаву за унікальним методом, розробленим у середині 1970-х років [19]. Вирішувалися також окремі виробничі завдання, пов'язані з виготовленням унікальних виробів оборонної промисловості.

Перелік матеріалів та технологій, апробованих для отримання об'ємних металевих виробів пошаровим адитивним нарощуванням із застосуванням дугового наплавлення, наведено у табл. 1.3 [20].

Таблиця 1.3. Матеріали та процеси, випробувані для отримання об'ємних металевих виробів пошаровим адитивним нарощуванням із застосуванням дугового наплавлення.

Матеріали	Процеси
<ul style="list-style-type: none"> – Низьколегована конструкційна сталь; – Високоміцна сталь; – Нержавіюча сталь; – Нікелеві жароміцні сплави; – алюмінієві сплави; – Титан, титанові метали; – Мідь, мідні метали 	<ul style="list-style-type: none"> – TIG (DC та імпульсний) – висока якість; – TIG високочастотна (DC та імпульсний) – висока точність, висока якість; – Імпульсний MIG – простота, економічна ефективність; – Cold Metal Transfer (CMT) – низьке тепло-вкладання, висока стабільність процесу; – Tandem Pulsed MIG – висока швидкість нарощування; – Плазма РТА – висока якість, швидкість, можливість регулювати ширину шару, що нарощується.

Апаратно-структурна схема побудови таких технологічних процесів наведено на рис. 1.1, а її реалізація для технології електродугового наплавлення з електродом (дротом), що плавиться – WAAM (Wire-Arc Additive Manufacturing) – наведена на рис. 1.2 [20].

За допомогою технології дротяно-дугового адитивного виробництва WAAM виготовляють об'ємні вироби з різних матеріалів, наприклад, конструкційної низьковуглецевої сталі, титанових [21] та алюмінієвих [22] сплавів та ін. (рис. 1.3). Для реалізації цієї технології було створено спеціалізоване обладнання для наплавлення [23].

Адитивні зварювальні технології є одними з небагатьох процесів, що дозволяє виготовляти об'ємні біметалеві деталі складної форми із внутрішніми ребрами жорсткості. Наприклад, отримані таким чином деталі «конструкційна сталь – бронза Cu-3%Si» досить важко виробляти за допомогою технологій лиття, порошкової металургії тощо. Отриманий таким чином виріб характеризується досить високими механічними властивостями:

- межа плинності – 140 МПа;
- межа міцності – 300 МПа;
- відносне подовження – 12%.

При механічних випробуваннях руйнування проходить по бронзі, а не по перехідній зоні «сталь-бронза» [20].

Також одне з особливо перспективних застосувань адитивних технологій дугового наплавлення – отримання об'ємних конструкцій з титанових сплавів. Підтверджено можливість ефективного застосування таких технологій для виготовлення панелей складної форми з ребрами жорсткості зі сплаву Ti-6Al-4V [24, 25].

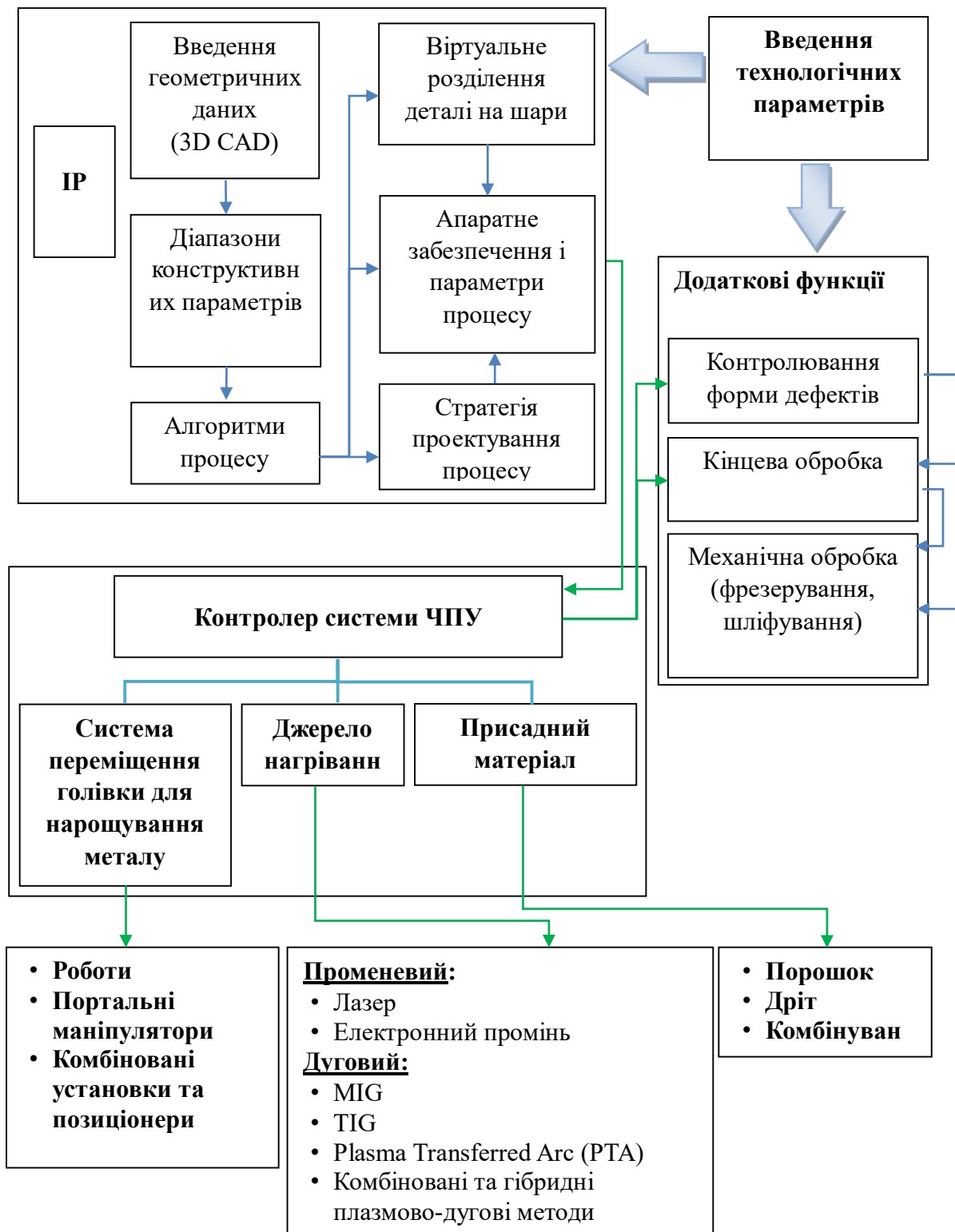


Рис. 1.1. Принципова апаратно-структурна схема процесів отримання об'ємних металевих виробів пошаровим адитивним нарощуванням на основі зварювальних технологій.

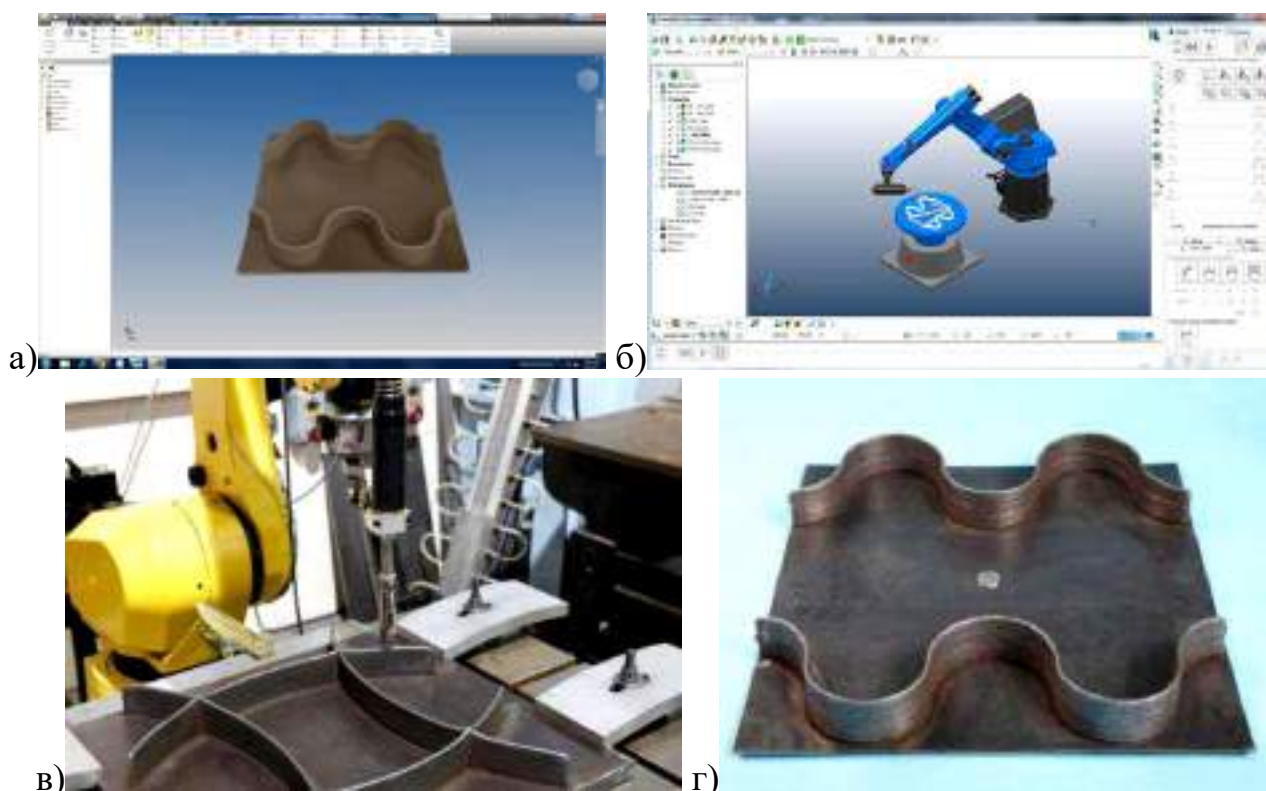


Рис. 1.2. Технологічний процес 3D друку об'ємних металевих виробів методом Wire-Arc Additive Manufacturing [20]: а) – комп'ютерне проектування деталі; б) – програмне забезпечення для 3D позиціонера або робота з інтегрованим зварювальним обладнанням; в) – роботизований комплекс зі зварювальною установкою; г) – готова деталь.

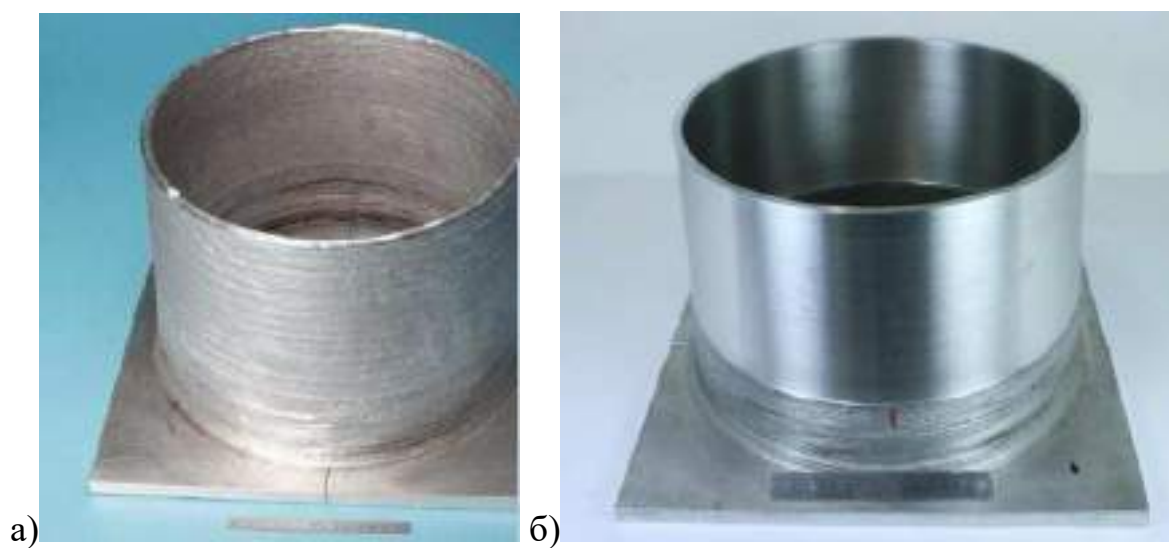


Рис. 1.3. Виготовлення циліндричної деталі супутника з алюмінієвих сплавів із змінною товщиною стінки (час виготовлення – 6 годин) [20]: а) – після пошарового нарощування; б) – після механічної обробки.

Зокрема застосування адитивної технології WAAM дозволяє підвищувати економію дорогого титанового сплаву при виготовленні об'ємних конструкцій. Так, співвідношення ваги витраченого матеріалу до ваги готової деталі для технології WAAM становить лише 1,1. При виготовленні аналогічної деталі з листових заготовок цей показник становить 4,9 (табл. 1.4) [26]. У цьому механічні властивості одержуваних деталей близькі (табл. 1.5) [27]. За деякими показниками деталі, виконані за технологією WAAM, перевершують отримані традиційним способом аналоги.

Таблиця 1.4. Показники економії матеріалу при 3D-друку об'ємних деталей з титанового сплаву Ti-6Al-4V із застосуванням технологій наплавлення.

Метод виготовлення деталі	Показники		
	Вага використаного сплаву (кг)	Кінцева вага готової деталі (кг)	Співвідношення ваги витраченого матеріалу до ваги готової деталі
Традиційне механічне оброблення заготовки (різання листових заготовок + подальше зварювання + фінішне механічне оброблення)	27,5	5,6	4,9
WAAM + фінішне механічне оброблення	5,0 (заготовка)+1,2 (дріт)=6,2	5,6	1,1

Таблиця 1.5. Порівняльні механічні характеристики об'ємних деталей із титанового сплаву Ti-6Al-4V, отриманих за допомогою адитивної технології наплавлення та традиційних технологій.

Метод виготовлення деталі	Показники			
	Межа плинності (МПа)	Межа міцності (МПа)	Видовження (%)	Тріщиностійкість (МПа*м ^{1/2})
Отримання виливки + гаряче ізостатичне пресування (Cast and	824	896	6,0	75,0

НІР) – стандарт AMS 4985				
Кування	950	1034	11,7	–
Пошарове нарощування із застосуванням дугового наплавлення – WAAM	805–865	918–965	8,2–14,1	73,9

Також одним із перспективних напрямків використання технології WAAM є виготовлення великогабаритних довгомірних конструкцій складної форми із високоміцних алюмінієвих сплавів, наприклад, крила літака [22].

Зазначимо, що в основі технології WAAM лежать процеси зварювання дугою з електродом, що плавиться (MIG). При цьому можуть використовуватися як режим імпульсної модуляції струму (для випадків наплавлення алюмінієвих сплавів), так і безперервний режим.

У Південному Університеті в Далласі (штат Техас, США) отримано результати, що підтвердили ефективність поєднання дугової технологій виготовлення тривимірних об'єктів з одночасною або фінішною механічною обробкою (ЧПУ-фрезеруванням) [13]. Запропоновано низку технічних рішень, що дозволяють виготовляти як відносно прості, так і досить складні вироби, зокрема лопатки турбін з нікелевих сплавів [28]. У Cranfield University (Велика Британія) розроблено ряд промислових комплексів для реалізації адитивних зварювальних технологій - як з механічною обробкою в процесі нарощування шарів, так і без такої (рис. 1.4) [10].

Зварювальний 3D-принтер Value Arc MA5000-S1 (Японія) було виготовлено компанією Mutoh Industries Ltd. (Японія) у співпраці з Інститутом передових механічних систем Токійського університету [29]. У ньому, на відміну від більшості інших металевих 3D-принтерів, для друку об'ємних виробів з металу застосовується технологія електродугового зварювання струмопровідним дротом у середовищі захисного газу (GMAW). Застосування такої технології забезпечує невисоку вартість установки Value Arc MA5000-S1 (Японія) та її високу продуктивність (понад 500 см³/год). Така установка має

досить великий розмір робочого простору ($500 \times 500 \times 500$ мм) та здатна створювати об'ємні вироби з різних металів, таких як сталь, титан, алюміній, сплави нікелю тощо.

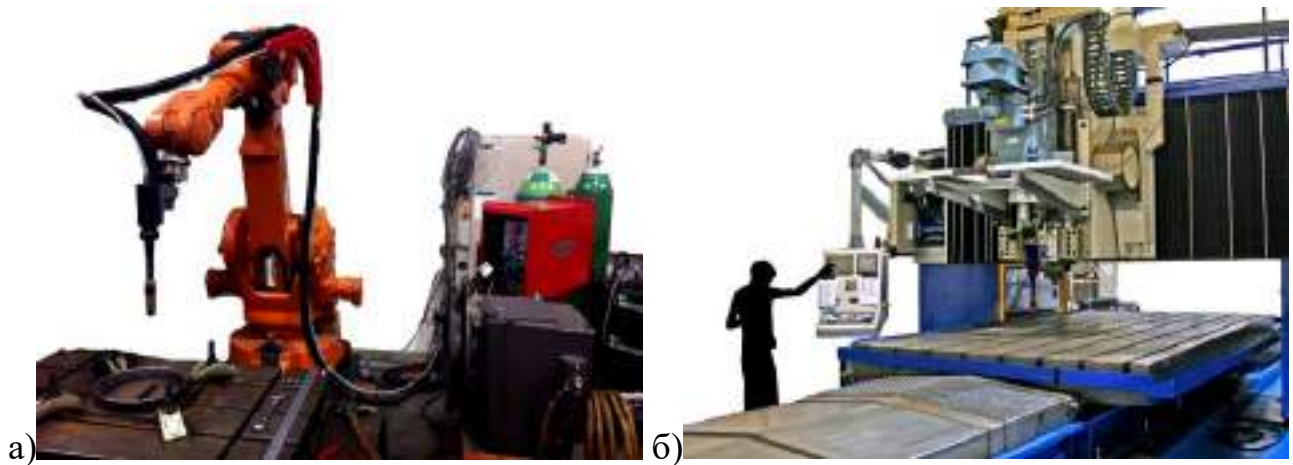


Рис. 1.4. Комплекси реалізації зварювальних адитивних технологій [11]: а) – з урахуванням антропоморфного робота без механічної обробки; б) – 3-осьовий комплекс із системою фрезерування.

Крім розглянутих електродугових технологій для тривимірного друкування металевих виробів в даний час вивчається можливість застосування плазмових зварювальних технологій. Як приклад можна навести результати досліджень, виконаних у Southern Methodist University (Техас, США) з вивчення процесу вирощування об'ємних виробів методом мікроплазмового порошкового пошарового наплавлення [13]. При дослідженнях даного методу наплавлення отримували і вивчали градієнтні композитні структури.

Крім виробів машин та механізмів, зварювальні технології тривимірного друку дозволяють створювати і великогабаритні будівельні металеві конструкції. Прикладом може бути створення нової адитивної технології, заснованої на процесі електродугового зварювання із застосуванням дроту, який отримав назву MX3D (Голландія) [30]. Проект MX3D створений у лабораторії JORIS LAARMAN LAB (Амстердам, Голландія) у співпраці з ACOTECH та HAL (Голландія). Така нова технологія має величезні перспективи, оскільки дозволяє

швидко створювати складні металеві споруди без зведення будь-яких супутніх конструкцій, що підтримують, наприклад, лісів або тимчасових проміжних опор (рис. 1.5). У процесі тривимірного зварювання MX3D людина або зварювальний робот сам будує собі опору і рухається вперед по конструкції, що зводиться. Це прискорює та спрощує будівництво, до того ж MX3D може бути повністю роботизований та працювати цілодобово [31].

У проаналізованих роботах переважно вивчалися можливості застосування дугових зварювальних процесів для тривимірного друку [32]. Розглядалося дугове зварювання електродом, що плавився, в середовищі захисного газу (GMAW) [33] і дугове зварювання вольфрамовим електродом у захисному газі (GTAW) [34]. Основними перевагами цих процесів є: порівняно невисока вартість, доступність, забезпечення хорошого металургійного зчеплення, а також захист зварювальної ванни та шарів, що нарощуються від утворення оксидів.



Рис. 1.5. Процес виготовлення мосту за допомогою зварювального 3D-принтера [30].

До недоліків розглянутих процесів відносять значний розмір зони термічного впливу (ЗТВ) і досить великі розміри шару нарощування [35]. Це призводить до виникнення небажаних температурних градієнтів та накопичення залишкових напружень. Крім цього, як видатковий (присаджувальний) матеріал

для формування об'ємних виробів використовується переважно звичайний зварювальний дріт, що обмежує хімічний склад і властивості цих виробів.

Більш широкі технологічні можливості мають плазмово-дугові зварювальні технології (Plasma Transferred Arc Welding – PTA) [14, 36]. Застосування цих технологій для виготовлення тривимірних металевих об'єктів замість розглянутих електродугових зварювальних процесів може зменшити або усунути деякі із зазначених недоліків.

1.3. Сучасні підходи до індустріалізації адитивного виробництва із застосуванням процесів адитивного наплавлення.

Інноваційні технології дозволяють організаціям залишатися конкурентоспроможними на сучасному ринку та підвищувати свою прибутковість. Ці рушійні фактори призвели до впровадження адитивних технологій безпосереднього виготовлення готових металевих виробів. Для цього використовуються цифрові технології, спрямовані на автоматизацію та обмін даними у виробничих технологіях і процесах. Вони входять в якості складових до єдиного інтегрованого програмно-апаратного комплексу, який називають Індустрія 4.0 і який сформувався в результаті так званої четвертої промислової революції. У контексті Індустрії 4.0 адитивне виробництво (Additive Manufacturing – AM) є ключовим елементом [37]. Технології AM широко досліджені та впроваджені для виробництва однорідних і неоднорідних продуктів зі складною геометрією шляхом додавання шарів один на одного. Важливою ланкою AM є формування концепції цифрового потоку, який інтегрує технології AM і конструкторсько-дизайнерські рішення, які реалізуються за допомогою таких технологій. Взаємозв'язок можливостей технології AM і потреб замовників можна забезпечити, зокрема, шляхом застосування інноваційних розробок програм керування і самонавчання [38, 39]. Розробка такого цифрового потоку для AM забезпечить значні переваги, дозволить

компаніям ефективніше реагувати на вимоги клієнтів і прискорить перехід до інтелектуального виробництва (рис.1.6).

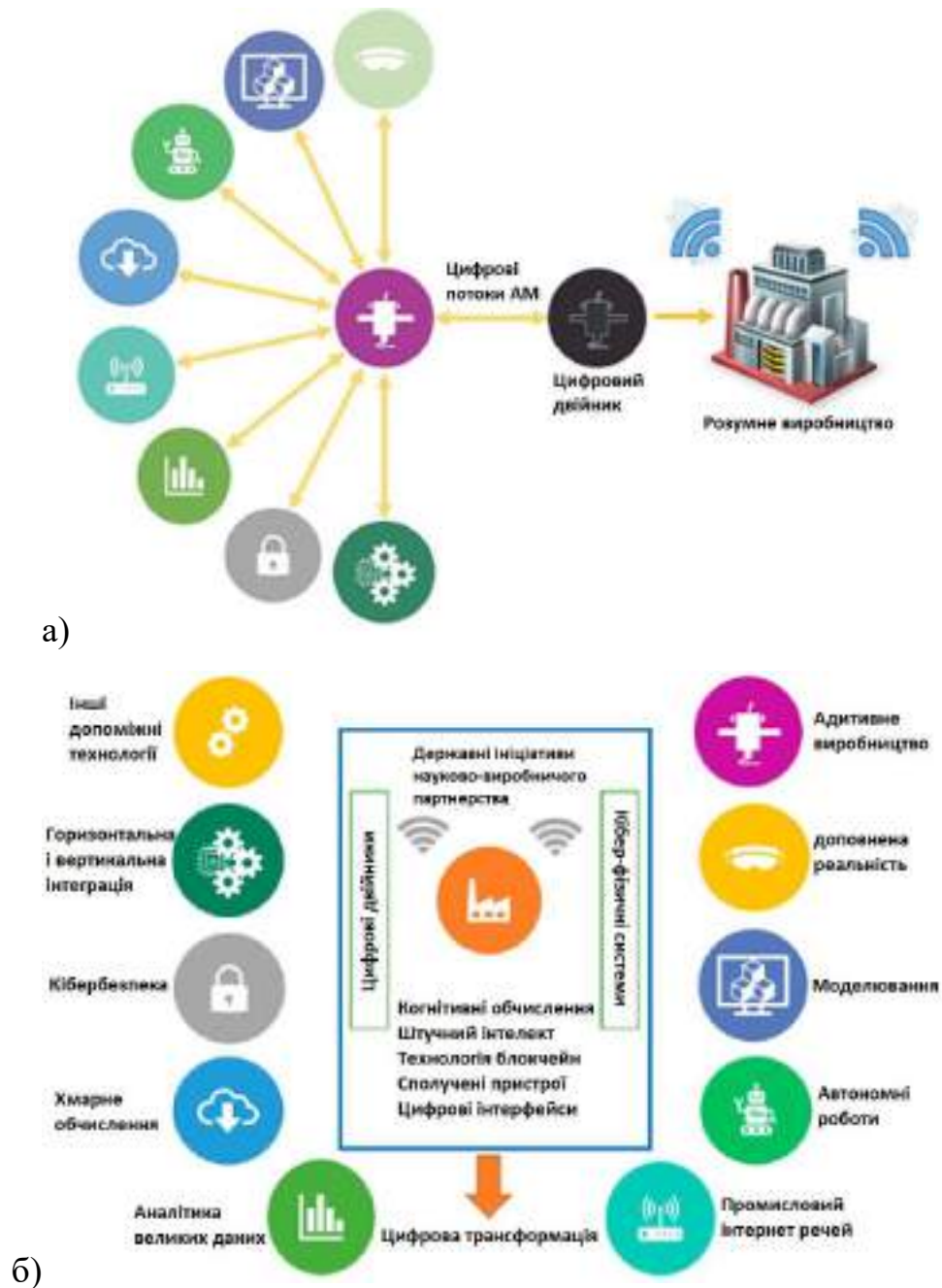


Рис. 1.6. Цифрові інформаційні потоки (а) і чинники цифрової трансформації (б), які задіяні в процесі АМ [37].

При виготовленні виробу методом АМ спочатку необхідно створити його цифровий прототип, потім зберегти на певному носії (частіш за все – у хмарному сервісі) з використанням кіберзахисту, надалі передавати до місця реалізації АМ-

процесу тощо (рис.1.7). Під час реалізації АМ-процесу необхідно не лише обрати матеріали й технологічні режими, але й задіяти певну керуючу програму функціонування роботизованої ділянки, а також забезпечити проведення відповідного контролю на усіх відповідних етапах робіт. Для спрощення такого процесу АМ виготовлення виробу доцільно поєднати вирішення кількох програмних завдань в одній керуючій програмі.

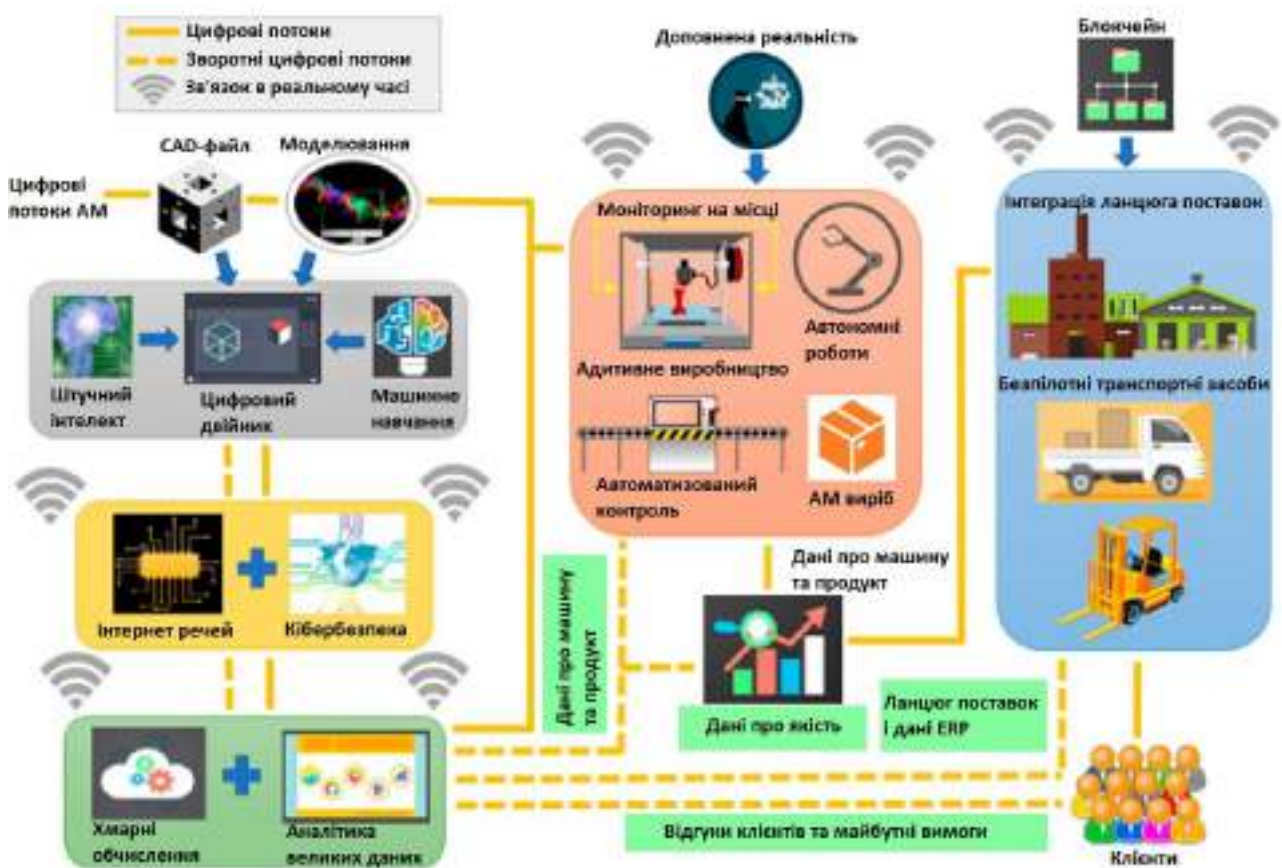


Рис. 1.7. Повний цикл виготовлення виробів за допомогою АМ [37].

Одним із основних обмежень існуючих ланцюжків гібридних процесів є відсутність узгоджених, структурованих та автоматизованих робочих процесів для підтримки стратегії адаптивного виробництва [40]. Розв'язання цієї задачі дозволить спростити й покращити процес АМ. Іншим шляхом покращення АМ процесів є створення спеціалізованих керуючих програм для машин адитивного виробництва із значною кількістю ступенів свободи [41]. Ще одним напрямком є такий, що буде враховувати особливості теплового джерела, яке здійснює

процес наплавлення металевого матеріалу. Такий підхід було задіяно авторами роботи [42] для лазерного джерела енергії. В якості фактору, що поєднує, важливу роль у одержанні повномасштабних рішень інтеграції чинників АМ відіграють візуальні обчислення. Зокрема, візуальні обчислення відіграють вирішальну роль в Індустрії 4.0, що наразі є одним з перспективних шляхів майбутніх досліджень [43].

Для того, щоб технології АМ стали достатньо вагомими у виробництві, необхідно усувати проблеми, що виникають на кожному етапі життєвого циклу виготовлення виробу. Встановлено, що переваги АМ пов'язані з можливостями редизайну продукту, матеріалу та процесу протягом усього життєвого циклу продукту, удосконаленням обробки вхідних матеріалів, виготовленням компонентів і продуктів на замовлення, а також замиканням циклу [44]. Зокрема, доцільно створювати програмне забезпечення автоматизованої генерації траєкторії руху інструменту для підвищення швидкості та якості геометрії у адитивному виробництві [45, 46]. При цьому важливою проблемою є проблема вирішення обходження гострих кутів, на яких зменшується швидкість переміщення інструменту й підвищується тепловкладання, у тому числі за рахунок погіршення тепловідведення [47]. Одним зі шляхів вирішення такої проблеми може бути модульне планування й програмування траєкторії руху головки, що наплавляє метал [48, 49].

У процесі АМ виготовлення полегшених конструкцій з тонкостінними елементами може використовуватися контурна паралельна траєкторія, де набори паралельних контурів зсуваються від геометричних меж структури через заздалегідь визначені інтервали для нанесення матеріалу шар за шаром. Наразі ці інтервали встановлюють як постійні, що обмежує здатність виробляти деталі майже чистової форми. У нещодавніх дослідженнях було вивчено можливість виготовлення деталей із використанням контурних паралельних траєкторій із змінною шириною валика, що збільшує швидкість виробництва, підвищує точність геометрії та зменшує ризик виникнення пустот у стінках деталі, що виготовляють [50]. Однак існуючі методи планування процесів неефективні з

обчислювальної точки зору та складні для реалізації [51]. Для вирішення наявних проблем можна запропонувати комплексну структуру планування процесу для адаптивної контурної паралельної траєкторії інструменту зі змінною шириною валика [52]. Така структура включає в себе алгоритм планування траєкторії інструменту з використанням методу набору рівнів і алгоритм планування процесу для генерації бажаної геометрії валика з використанням регресійної моделі процесу Гауса [53].

Важливим аспектом створення керуючих програм для АМ процесів є врахування типу і хімічного складу присаджувального матеріалу, з якого виготовляють тривимірний виріб. Наприклад, при адитивному лазерному наплавленні вже враховують використання присаджувальних дротів [54] і порошкових матеріалів [55]. При дрово-дуговому адитивному виробництві (wire and arc additive manufacture – WAAM) враховують не лише матеріал дроту, а й точність формоутворення трубчастих з'єднань [56]. Розмірні похибки формування труб при цьому становили приблизно ± 1 мм, а кутові похибки пересічних труб були менше $\pm 0,5^\circ$.

Використання технологій АМ дає конкурентну перевагу за відносно короткий час через зменшення кількості відходів, кількості задіяних в процесі людей та через виробництво продукції будь-якої форми, яка у більшості випадків не потребує подальшої обробки чи складання [57]. Технології АМ дозволяють виробляти деталі зі складною геометрією, які інакше було б неможливо виготовити за допомогою традиційних технологій [58]. Проте, в певних випадках неможливість змінити матеріал, який використовується для виробництва, може звести нанівець доцільність застосування технології АМ [59]. Тому необхідний глибокий аналіз вибору матеріалів тривимірних виробів на основі вимог виробництва та параметрів обраної технології АМ [60].

Такий аналіз може виконуватися через розширену систему керування даними для адитивного виробництва [61]. Він допоможе усунути такі обмежувальні фактори, як точність повторюваності процесу, проблеми з доступністю матеріалів тощо [62]. Подолання перешкод адитивного

виробництва вимагає розуміння взаємозв'язків геометрії, процесу, структури та властивостей деталей, виготовлених за допомогою АМ [63]. Емпіричні підходи, спрямовані на використання даних, довели свою ефективність у визначенні взаємозв'язків процесу, структури та властивості матеріалу [64, 65]. Вони дозволили створити спільну систему керування даними АМ, розроблену в Національному інституті стандартів і технологій США (NIST) (рис. 1.8) [61]. Ця система керування даними створена за технологією баз даних NoSQL (Not Only Structured Query Language) і забезпечує інтерфейс Representational State Transfer (REST) для інтеграції програм. Крім того, до неї додається веб-інтерфейс для керування, вивчення та завантаження даних.

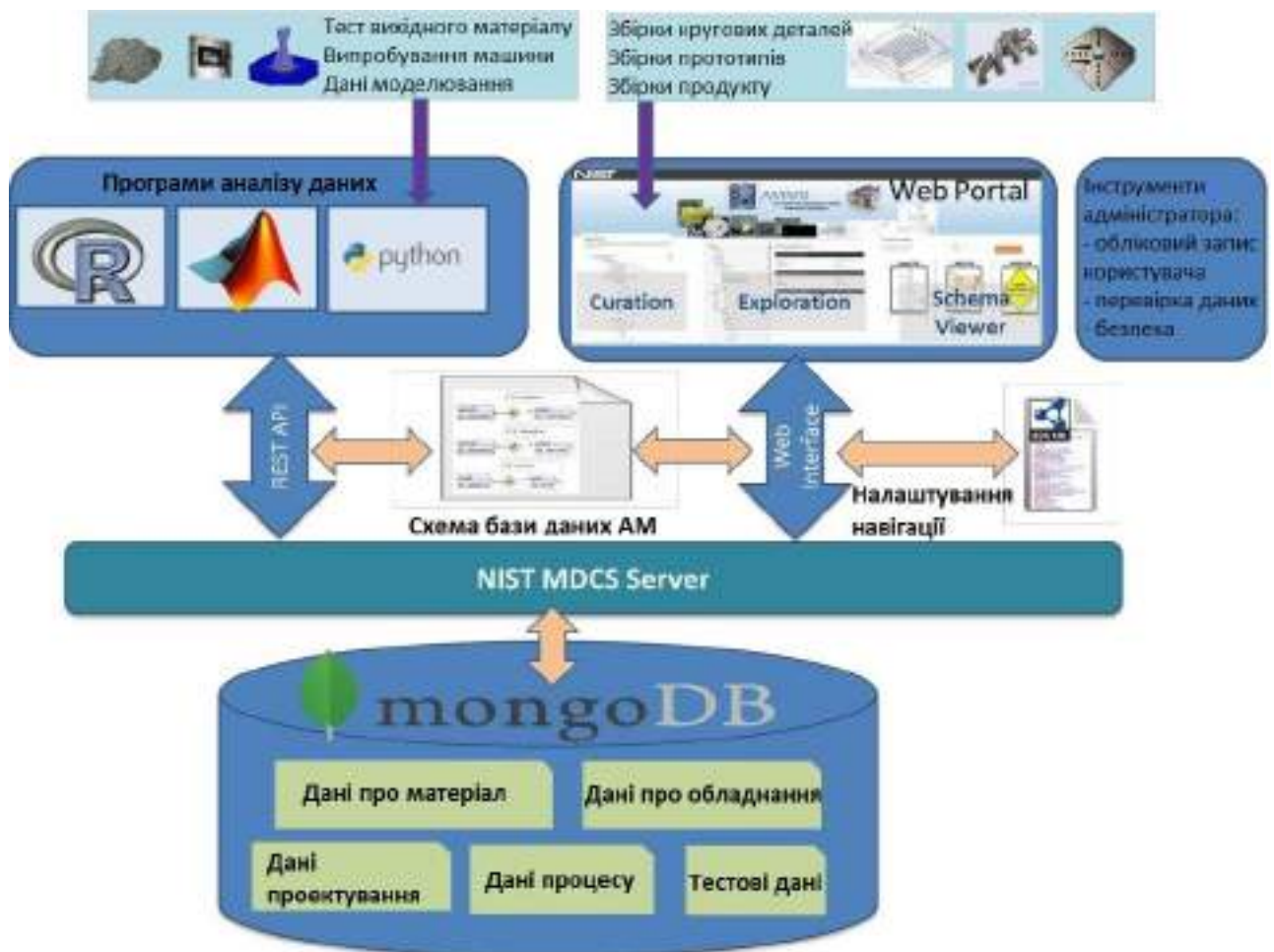


Рис. 1.8. Архітектура системи спільного керування даними [61].

Для дослідження даних (рис. 1.9) система керування даними надає механізм для налаштованих веб-графічних інтерфейсів користувача, які можна налаштувати за допомогою онтології візуалізації. Будучи платформою для співпраці, система керування даними розвивається шляхом обміну як схемою АМ, так і даними розробки АМ між зацікавленими сторонами спільноти АМ [66]. Оскільки набори даних продовжують накопичуватися, стає можливим встановити нові кореляції між процесами, матеріалами та частинами.

Для підвищення ефективності АМ в керуючих програмах доцільно застосовувати технології машинного навчання, зокрема, для виконання розпізнавання складних образів і перетворення фізичних моделей у цифрові [67]. Серед алгоритмів машинного навчання нейронна мережа (NN) є найбільш широко використовуваною моделлю завдяки доступності великого набору даних, обчислювальній потужності та складній архітектурі алгоритму [68]. В роботі [69] розглянуто застосування алгоритму NN до кількох аспектів усього ланцюга АМ, включаючи проектування моделі, моніторингу на місці та оцінки якості.



Рис. 1.9. Концептуальна модель бази даних [61].

Параметри процесу 3D-друку складно оптимізувати, оскільки вони впливають на властивості та час використання надрукованих деталей [70]. Тому розробити кореляцію між параметрами процесу та властивостями друкованих деталей за допомогою традиційних методів оптимізації є складним завданням [71]. В роботі [72] для ідентифікації складних шаблонів і розробки детермінованих зв'язків, усунення потреби в розробці та розв'язанні фізичних моделей, запропоновано застосування машинного навчання за допомогою використання штучних нейронних мереж.

1.4. Потенціал застосування мікроплазмових зварювальних технологій в адитивному виробництві

Основні відмінності плазми від звичайної електричної дуги полягають у значно вищій температурі, ступеню концентрації даного джерела нагріву і меншому нагріванні виробу в процесі його вирощування за рахунок більшої швидкості та можливості зменшення ширини шару, що наплавляється (рис. 1.10) [73]. Також для забезпечення мінімального термічного впливу на деталь доцільно здійснювати нарощування шарів за допомогою плазмових пальників (плазмотронів) прямої дії, на відміну від відкритої (не стисненої) дуги у дугових технологіях (рис. 1.10,в) [74]. Отже, для адитивного виробництва об'ємних металевих деталей застосування плазмових зварювальних (наплавочних) технологій дозволяє зменшити зазначені недоліки дугового зварювання [75].

Для додаткового покращення плазмових АМ технологій можуть застосовуватися особливі плазмові джерела, наприклад, радіочастотна дугова плазма [76] або мікроплазма [77]. Мікроплазма становить стиснену малоамперну електричну дугу, яка горить в струмені аргону, що має ламінарне витікання з плазмоутворюючого сопла. Завдяки своїм властивостям вона дозволяє наплавляти валики металу досить невеликої ширини (1 мм і менше) при використанні присаджувальних порошків і забезпечує достатньо низьке тепловкладення в метал підкладки [78, 79].

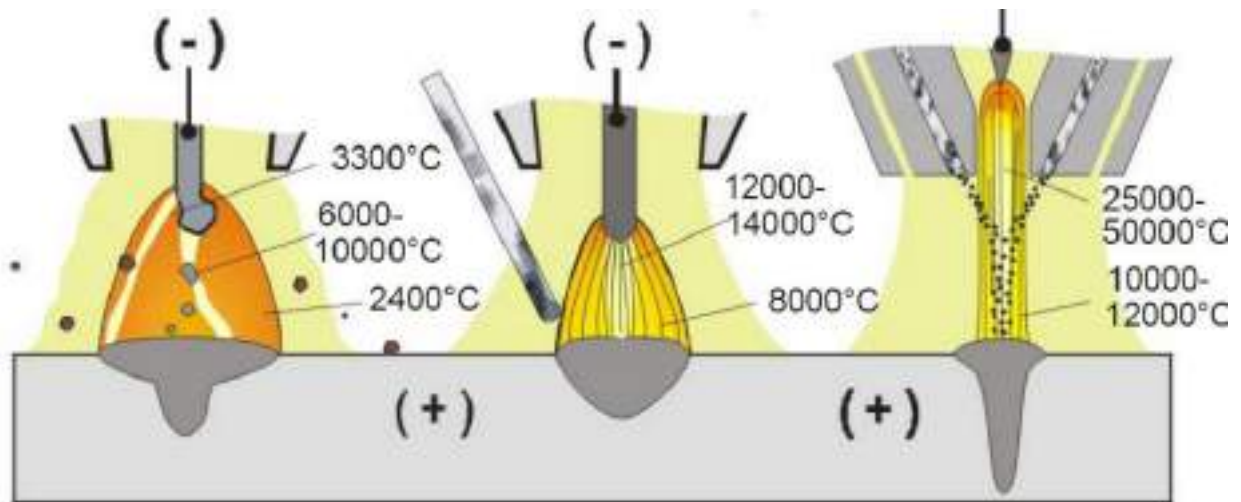


Рис. 1.10. Основні відмінності плазми від звичайної електричної дуги з погляду застосування в адитивному виробництві металевих деталей (3D-друку) [73].

На основі багаторічного досвіду застосування плазмового зварювання (наплавлення) для отримання зварних з'єднань і наплавлених шарів металу [80, 81], можна виділити наступні переваги зварювальних (наплавочних) плазмово-дугових технологій, здатні забезпечити новий рівень показників тривимірного друку та властивостей отриманих виробів порівняно з методами дугового наплавлення плавким електродом, неплавким вольфрамовим електродом з подачею нейтрального присаджувального дроту та ін. (GMAW, GTAW, WAAM):

- температура у факелі плазмової дуги може досягати до 30000°C, що у 5–6 разів більше ніж у звичайній електричній дузі, тому плазма може розплавити практично будь-який тугоплавкий матеріал для пошарового нарощування об'ємних виробів;
- мінімальне нагрівання попередньо нанесених шарів при формуванні виробів, проникнення тепла в основний метал менше 5%;
- відсутність розбризкування металу при нарощуванні шарів, надзвичайно низьке їх перемішування;
- можливість регулювання в широких межах товщини (від 0,5 мм до 5,0 мм) та ширини (від 1,5 мм до 50,0 мм) шару металу, що наноситься, при адитивному нарощуванні об'ємних виробів;

- можливість регулювання складу газового середовища (відновного, інертного, окисного) у процесі адитивного нарощування шарів при формуванні виробу;
- вища економічність та продуктивність процесу (більша ніж у 2–3 рази порівняно із дуговими процесами);
- можливість використання широкої номенклатури витратних матеріалів (порошки металів, сплавів, композиційних матеріалів, порошкові суміші, суцільні та порошкові дроти), у тому числі зі сплавів на основі Fe, Ni, Co, Cu, Ti, Al, а також з композитних матеріалів, які містять тугоплавкі компоненти – карбіди, борида та ін. (наприклад, WC, Cr₃C₂, TiC, TiB₂) тугоплавкі матеріали, композиційні матеріали з тугоплавкими компонентами;
- можливість зміни складу металу у процесі формування виробів, отримання виробів із матеріалів із градієнтною структурою.

В Інституті електрозварювання ім. Е.О. Патона накопичений дуже великий багаторічний досвід розробки та застосування адитивних технологій плазмового наплавлення із застосуванням в якості як присаджувального матеріалу дроту та порошку [82–87]. Незважаючи на те, що ці технології застосовувалися в основному для нанесення шарів металів різної товщини на деталі для забезпечення заданих фізико-механічних властивостей або для відновлення розмірів зношених деталей, їх застосування для отримання металевих виробів різної форми визначається наявністю необхідних маніпуляторів (позиціонерів або роботів), а також відповідного програмного забезпечення та систем числового програмного управління [88, 89].

Досвід використання плазмово-дугової адитивної технології для вирощування об'ємних деталей має компанія HoneywellAerospace – процес IFF (Ion fusion formation) [90].

Для 3D-друку металевих деталей перспективне застосування таких плазмових технологій наплавлення, в яких використовується струмінь ламінарної плазми [91, 92, 83, 86]. Був розроблений прототип 3D-принтера із можливістю застосування змінних плазмових зварювально-наплавних головок

(рис. 1.11). В якості витратних присаджувальних матеріалів в таких головках використовуються як порошки, так і дроти.

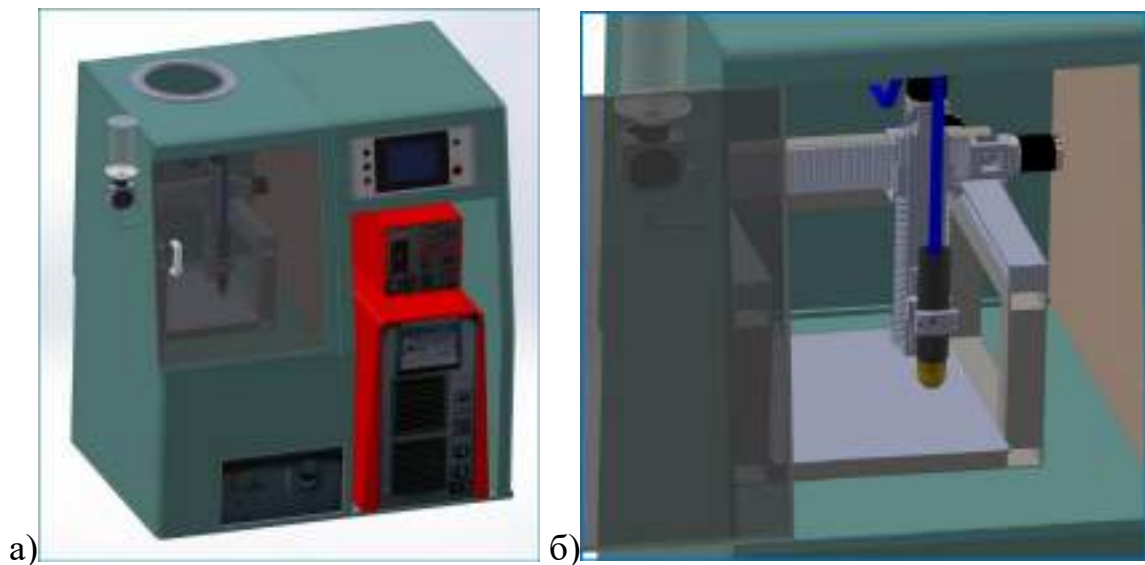


Рис. 1.11. Модель 3D-принтера PLAZER 3D PW для розробки нових плазмових технологій виготовлення об'ємних виробів: а) – загальний вигляд; б) – трикоординатний позиціонер плазмотрону [86].

Із застосуванням такого 3D принтера було проведено низку експериментів, що дозволили розробити базові технологічні прийоми адитивного плазмово-дугового виготовлення об'ємних металевих виробів. Розроблене обладнання та технологія мають наступні переваги в порівнянні з широко застосовуваними процесами виборчого лазерного плавлення SLM (табл. 1.6):

- продуктивність по металу, що нарощується, для однакової споживаної потужності вище на 1–2 порядки, при цьому питома вартість обладнання (1 кВт) нижче в 3–10 разів.

- ширші технологічні можливості (практично без обмежень максимальні розміри деталей, що вирощуються, які визначаються тільки розмірами 3D позиціонера, можливість реалізації процесу при великих ступенях свободи, можливість зміни та застосування різних головок для вирощування тривимірних виробів;

– ширша номенклатура застосовуваних витратних матеріалів для 3D друку (порошки, дроти, композиційні матеріали), вищий коефіцієнт використання присаджувального матеріалу (вище 20–50%).

Таблиця 1.6. Порівняння основних техніко-економічних показників SLM-технологій тривимірного друку металевих виробів з розробленою адитивною плазмово-дуговою технологією.

Показники	Технології тривимірного друку металевих виробів			
	SLM (фірма LENS)	SLM (фірма POM)	SLM (фірма AeroMet)	Адитивна плазмово-дугова технологія (3D-принтер PLAZER 3D PW)
Характеристики обладнання	Лазер Nd:YAG, потужність 1 кВт	Лазер CO ₂ , потужність 2 кВт	Лазер CO ₂ , потужність 14 кВт	На основі зварювання, потужність 2–20 кВт
Продуктивність по нарощуванню металу (см ³ /год)	8	8	160	>500–5000
Можливість обробки по осях	3 осі	3 осі	3 осі	3 осі
Максимальні розміри вирощених деталей	100мм	200 мм	350 мм	900 мм і більше
Тип використовуваного матеріалу для 3D-друку	Металевий порошок	Металевий порошок	Металевий порошок	Порошки металів, сплавів, композиційних матеріалів, суміші порошків. Дріт – суцільний і порошковий
Коефіцієнт використання матеріалу, %	Близько 40 %	Близько 40 %	Близько 70 %	Більш 80 %
Області застосування	Виготовлення та ремонт дрібних високовартісних деталей складної форми	Виготовлення та ремонт дрібних високовартісних деталей складної форми	Виготовлення та ремонт дрібних високовартісних деталей складної форми	Виготовлення і ремонт середніх та великогабаритних об'ємних виробів різного призначення

Орієнтовна вартість основних одиниць обладнання	Вартість лазера: \$80,000...\$120,000 за 1 кВт потужності	Вартість зварювального обладнання: \$1000...\$5000 за 1 кВт потужності
---	---	--

Також необхідно відзначити, що механічна міцність виробів, отриманих за допомогою адитивних плазмово-дугових технологій наплавлення, становить переважно 90–95% від міцності литого металу, що не завжди досягається SLM-процесом.

Незважаючи на кращу якість об'ємних виробів плазмові технології, порівняно з адитивними електродуговими процесами наплавлення, вони поступаються вибіркового лазерного плавлення за показниками точності геометричних розмірів металевих об'ємних виробів складної форми, а також шорсткості їхньої поверхні. Однак, ця проблема вирішується шляхом поєднання технології пошарового плазмового наплавлення з ЧПУ-фрезеруванням (CNC-Milling), що забезпечує формування точної геометричної форми виробу та фінішну обробку в рамках єдиного програмного забезпечення та системи управління.

Як було описано вище, цей підхід успішно реалізований у процесах 3D-друку із застосуванням технологій електродугового наплавлення. Необхідно відзначити, що в переважній більшості випадків тривимірні деталі, отримані вибірково лазерним плавленням, також піддаються доведенню за розмірами та фінішною обробкою [93]. Тому різниця у витратах на остаточну механічну обробку тривимірних деталей після АРТА та SLM-процесів після 3D друку не є суттєвою для показника собівартості.

В даний час розглядається можливість використання гібридних процесів, що поєднують технології плазмового зварювання з дуговим зварюванням струмопровідного дроту [92, 94]. Перспективність такого підходу заснована на перевагах плазмових технологій при зварюванні та наплавленні алюмінієвих та інших сплавів, що важко зварюються [95, 96]. Застосування гібридного обладнання із елементами адитивним наплавленням може цікавити виробників

великогабаритних тривимірних деталей, для виготовлення яких вимагається підвищення продуктивності при збереженні високих механічних характеристик [97, 98].

Основна відмінність процесу мікроплазмового наплавлення від плазмового полягає в тому, що для нього використовується ламінарний струмінь аргонової плазми. Число Рейнольдса для мікроплазмового процесу менше критичної величини, при якій плазмовий потік стає турбулентним (як при звичайних плазмових процесах) [91, 92, 99]. Крім цього, звичайні плазмотрони, в основному, працюють на струмах 50–400 А, а плазмотрони для мікроплазмового способу наплавлення розраховані на струми 1–30(50) А. Високий ступінь стиснення струменя мікроплазми (діаметр плазмоутворюючого сопла зазвичай близько значень 0,8 мм) не дозволяє підвищити струм більше 50–60 А через явища подвійного дугоутворення (явище Штеенбека), що призводить до аварійного руйнування плазмоутворюючого сопла [100].

У процесах мікроплазмового зварювання (наплавлення) можуть використовуватися плазмотрони як прямої, так і непрямої дії. Перші забезпечують питомий тепловий потік 10^4 – 10^5 Вт/см², другі – 10^3 – 10^4 Вт/см². З вигляду зварювального струму процеси зварювання (наплавлення) можуть виконуватися як у безперервному режимі, так і в імпульсному [101]. У другому випадку можуть застосовуватись як різнополярні, так і уніполярні імпульси.





У зв'язку з високою інтенсивністю питомого теплового потоку мікроплазмові процеси дозволяють досягати високої термічної локальності, тобто незначно нагрівають вироби або наступні шари, що наплавляються. Тому такі процеси доцільно використовувати для наплавлення металів та сплавів малих (0,5–1,5 мм) товщин, а також наплавлення валиків порівняно невеликого перерізу (висотою 0,3–1,0 мм при ширині 1,5–5,0 мм) [30, 102].

Перспективність застосування адитивної мікроплазмової технології наплавлення також підтверджена практичними результатами, отриманими у Southern Methodist University (Техас, США). Доведена перспективність вирощування об'ємних виробів циліндричної та іншої форми методом

мікроплазмового порошкового пошарового наплавлення. У ході цих робіт за допомогою цього процесу було вирощено об'ємні циліндричні та інші просторові вироби [13].

Згідно запропонованому в роботі [103] порівнянню стає наочним, що у разі необхідності досягнення найбільшої точності форми тривимірного виробу і мінімізації шорсткості його поверхні доцільно використовувати SLM технологію (табл. 1.7). У разі потреби у максимальній продуктивності підходить WAAM технологія та плазмове наплавлення при струмах, більших 50-150А.. Мікроплазмове порошкове адитивне наплавлення становить певний компроміс між якістю та продуктивністю.

Таблиця 1.7. Порівняння базових характеристик основних адитивних процесів [103].

Процес виробництва	SLM	WAAM	3DPDM	Листовий метал
Матеріал	316L (1.4403)			
Початковий стан	Порошок (30-63 мкм)	Дріт d1.2 мм	Порошок (50-125 мкм)	Лист (холоднокатаний)
Джерело наплавлення	Лазер	Електрична дуга	Електрична дуга	-
Висота шару / товщина листа	0,06 мм	1,7 мм	0,97 мм	6 мм
Час процесу	231,3 хв	13,5 хв	25,5 хв	-
Еталонний компонент				

В результаті досліджень, проведених у Інституті електрозварювання ім. Е.О. Патона, показана перспективність застосування мікроплазмового порошкового наплавлення у ремонтних виробництвах, зокрема для відновлення та вирощування форми зруйнованих елементів лопаток турбогвинтових та газотурбінних авіаційних двигунів із жаростійких нікелевих сплавів [104]. У ході більш детальних досліджень показано, що оптимізація ширини валика, який наплавляється на вузьку підкладку, дозволить на 10-40% знизити кількість

зайвого наплавленого металу і, відповідно, зменшити кількість нераціонально введеного в анод-виріб тепла [105].

Таким чином, **метою** даної роботи була обрана наступна: дослідження закономірностей впливу технологічних параметрів адитивного мікроплазмового наплавлення просторових об'єктів із використанням сталевих дровових і порошкових присаджувальних матеріалів на формування мікроструктури і напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу об'ємних виробів і створення на основі цього інтелектуальних апаратно-програмних засобів для автоматичного 3D друку просторових металевих виробів із заданою структурою і прогнозованим напруженим станом.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні **задачі**:

1. Аналіз технологічних особливостей і програмно-апаратних рішень адитивного дугового і плазмового наплавлення з використанням дровових і порошкових присаджувальних матеріалів.
2. Створення експериментального стенду і вибір методики дослідження процесів пошарового плазмового і мікроплазмового наплавлення просторових металевих конструкцій.
3. Моделювання конструкцій плазмотронів і процесів адитивного наплавлення дровових і порошкових присаджувальних матеріалів, прогнозування напружено-деформованого стану одержуваних металевих тривимірних об'єктів.
4. Експериментальні дослідження закономірностей впливу технологічних прийомів пошарового наплавлення на особливості формування структури та властивості металевих тривимірних об'єктів.
5. Створення технологічного обладнання та програмних прийомів керування процесами адитивного плазмового і мікроплазмового наплавлення для підвищення якості та продуктивності створення металевих тривимірних об'єктів.

Висновки по розділу 1.

1. Аналіз сучасного стану 3D-технологій виготовлення об'ємних металевих виробів показав, що для виготовлення точних деталей малих розмірів є доцільним застосування лазерних технологій (наприклад, SLM), для великогабаритних деталей – застосування зварювальних технологій (наприклад, WAAM, РТА). Серед адитивних зварювальних технологій найперспективнішими є плазмово-дугові. У таких технологіях порівняно висока (5–10 кг/год і більше) продуктивність поєднується з можливістю отримання досить тонких (2,5–5,0 мм) стінок при порівняно невеликому перегріві. Застосування адитивного плазмово-дугового друку дозволяє підвищувати точність виготовлення та якість поверхні об'ємних металевих виробів у порівнянні з іншими електродуговими зварювальними способами.
2. До основних переваг адитивних зварювальних технологій отримання тривимірних металевих конструкцій складної форми порівняно із SLM-технологіями відносяться: підвищення продуктивності процесу на 1–2 порядку за тієї ж споживаної потужності; зниження вартості обладнання у 3–10 разів; можливість збільшення в 10–100 і більше разів габаритних розмірів деталей; розширення номенклатури витратних матеріалів (порошки, дроту, композиційні матеріали); підвищення коефіцієнта використання витратного матеріалу на 20–50%; зниження приблизно до 10-20 разів вартості обладнання.
3. До основних недоліків адитивних зварювальних технологій отримання тривимірних металевих конструкцій відносяться досить великі розміри зони термічного впливу і шару, що нарощується. Це призводить до виникнення небажаних температурних градієнтів, накопичення залишкових напружень та утворення деформацій і, як наслідок, – зниження експлуатаційних характеристик. Одним із методів усунення зазначених недоліків є підвищення термічної локальності джерела енергії. Наприклад, використання лазерного, електронно-променевого або мікроплазмового наплавлення.
4. На сьогоднішній день при виготовленні промислового обладнання для 3D-друку металевих виробів застосовують два основних підходи: без супутньої

механічної обробки та з такою. У першому випадку для реалізації зварювальних технологій широко використовуються антропоморфні роботи. У разі застосування плазмово-дугових зварювальних технологій доцільним є застосування 3D-позиціонерів портального типу, що дають можливість використання супутньої механічної обробки.

5. Для виготовлення готових металевих виробів 3D-друком з позицій якість/вартість доцільно використовувати адитивне мікроплазмове (робочий струм до 50 А) і плазмове (струм до 120 А) наплавлення з використанням порошкових і дровових присаджувальних матеріалів. Для цього необхідно застосовувати розширену систему керування даними, що буде враховувати комплекс чинників від створення цифрового прототипу до управління процесом і контролю якості. Перспективним підходом до створення такої системи керування є застосування штучних нейронних мереж.

Розділ 2. Експериментальний стенд і методика дослідження процесів пошарового плазмового і мікроплазмового наплавлення просторових металевих конструкцій.

2.1. Методика дослідження процесів пошарового плазмового і мікроплазмового наплавлення просторових металевих конструкцій.

Для досягнення мети роботи та вирішення поставлених завдань було прийнято наступну методику проведення досліджень:

- визначення технологічних схем взаємного розташування джерела енергії та присаджувального матеріалу в процесі адитивного наплавлення;
- вибір дротових і порошкових присаджувальних матеріалів для адитивного мікроплазмового наплавлення, підготовка матеріалів до використання;
- вибір параметрів технологічного режиму мікроплазмового наплавлення;
- моделювання конструкції плазмотрону і швидкостей/витрат потоків плазмоутворюючого і захисного газів з метою досягнення сталого ламінарного режиму генерації стисненої плазми;
- скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану п'яти друко-зварних просторових геометричних прототипів основних базових форм виробу, що виготовляють шляхом безперервного адитивного наплавлення;
- корегування вибраних параметрів технологічного режиму мікроплазмового наплавлення з урахуванням можливості мінімізації залишкового напружено-деформованого стану тривимірного виробу, що одержується адитивним наплавленням;
- створення лабораторного стенду для проведення технологічних досліджень;
- проведення експериментів з наплавлення просторових геометричних примітивів мікроплазмовим способом із застосуванням дротових і порошкових присаджувальних матеріалів;
- дослідження можливостей адитивного мікроплазмового наплавлення просторових примітивів зі змінним хімічним складом стінок, що формуються;

- проведення металографічних досліджень наплавлених зразків, визначення наявності характерних дефектів та шляхів їх усунення, внесення необхідних коректив у розробку технологій мікроплазмового наплавлення;
- проведення експериментів з наплавлення просторових геометричних примітивів дугою з плавким дротовим електродом;
- порівняння результатів мікроплазмового наплавлення дротом і дугою з плавким дротовим електродом, визначення технологічних перспектив;
- створення бази даних для керуючої програми, яка дозволить автоматизувати процеси вибору режимів мікроплазмового наплавлення і роботизованого виготовлення тривимірного виробу;
- створення керуючої програми з можливістю самонавчання на базі штучних нейронних мереж для автоматичного вибору режимів мікроплазмового наплавлення і роботизованого виготовлення тривимірного виробу;
- проектування мікроплазмотрону для адитивного порошкового наплавлення металевих тривимірних виробів;
- проектування дослідно-промислового комплексу адитивного порошкового мікроплазмового наплавлення.

Згідно цієї методики проводитиметься низка досліджень, в яких буде задіяно як лабораторне технологічне обладнання, так і різне діагностичне та дослідне обладнання. Детальний опис такого обладнання наведено нижче.

2.2. Використані матеріали та їх характеристики.

При виготовленні тривимірних металевих об'єктів виконувалось пошарове наплавлення на металеві підкладки розмірами порядку $100 \times 100 \times 10$ мм. Склад матеріалів підкладки і присаджувальних (наплавочних) матеріалів наведені у табл.2.1. Для наплавлення застосовували плазмові, мікроплазмові і дугові з плавким електродом пальники. Для подачі присаджувального дроту застосовували механізми подачі захищеного типу, що виключають попадання на

дріт пилю та вологи. Для подачі порошків використовували дозатори-живильники оригінальної розробки.

Таблиця 2.1. Хімічний склад матеріалів, що були застосовані для наплавлення.

Матеріал	Склад елементів, мас. %										
	Fe	B	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	P	S	Інші
Метал підкладки											
Сталь Q235	основа	–	0.14-0.22	0.05-0.15	0.4-0.65	<0.3	<0.3	<0.3	<0.04	<0,05	
Присаджувальні (наплавочні) матеріали											
Дріт ER70S-6 (Св-08Г2С) (Ø0,8 і 1.0 мм)	основа	–	0.05-0.11	0.7-0.95	1.8-2.1	<0.25	<0.2	<0.25	<0.015	<0,01	Мо<0.15
Порошок залізу ПЖ-1 (d _ч <50 мкм)	основа	–	0.03	0.1	0.1	–	–	–	0.02	0.01	–
Порошок НУФ-103 (d _ч 40-60 мкм)	основа	1.15	–	0.75	0.6	7.85	15.55	–	<0.02	<0.01	–
Порошок EuTroLoу 16316 (d _ч 53-150 мкм)	основа	–	–	3-5	1	13	18	–	–	–	Мо<3.0
Порошок нержавіючої сталі 316L (d _ч 40-60 мкм)	основа	–	0.03	<0.6	<0.8	14-16	15-17	–	<0.02	<0.015	Мо 2.5-3.0

Для виконання наплавлення здійснювали попередню підготовку присаджувальних матеріалів. Так, виконували контроль поверхні дроту для встановлення відсутності на ній слідів корозії. У разі наявності на дроті мідного покриття – переконувалися у відсутності його пошкодження. У разі застосування порошків їх калібрували шляхом просіювання крізь набір спеціальних калібрувальних сит. До калібрування за допомогою муфельної пічки здійснювали прогрів порошків при температурі 150...200°C для усунення наявності вологі, яка може лишатися за рахунок їх гігроскопічності.

Присаджувальний дріт ER70S-6 (Св-08Г2С), який застосовували для отримання тривимірних об'єктів, мав регулярну рівновісну структуру (рис.2.1,а), а його хімічний склад відповідав паспортним даним (табл. 2.1). Відповідність

хімічного складу перевірялася за допомогою електронної растрової мікроскопії (ри.2.1,б).

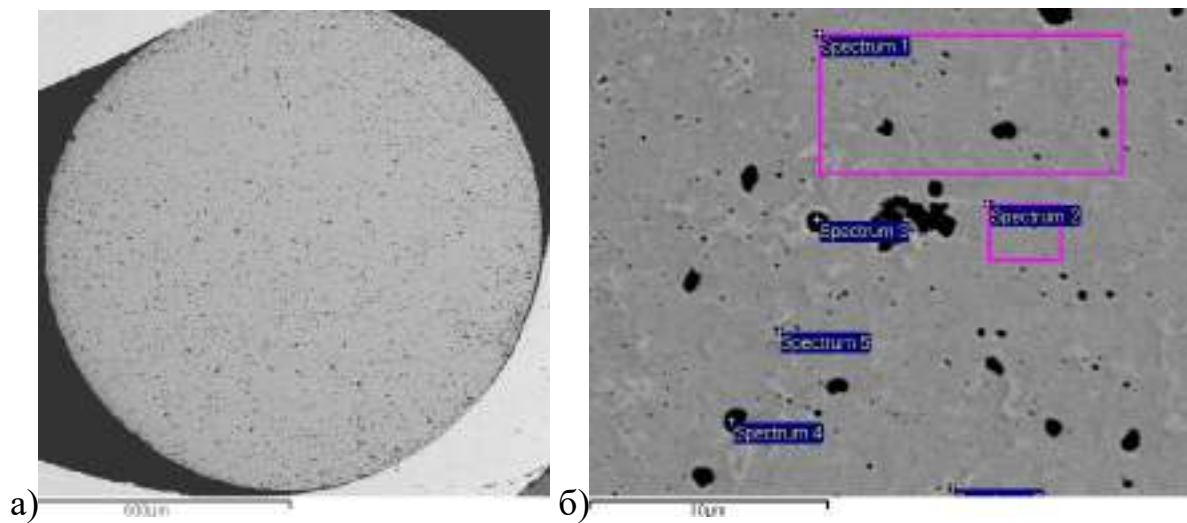


Рис. 2.1. Макро- і мікроструктура поперечного перетину сталевго дроту марки ER70S-6 (Св-08Г2С).

Порошок ПЖ-1 на залізній основі (рис.2.2). Даний порошок має підвищене окислення повітрям: $1,23 \div 2,69$ мас.% кисню згідно даним аналізу (табл.2.2), замість 0,2 мас.%, згідно паспортним даним. Порошок містить частинки неправильної округлої форми з розвиненою поверхнею, не є повністю однорідним і складається з великих і дрібних частинок. Розмір частинок порошку коливається від 20 мкм до 150 мкм. Переважний розмір частинок порошку ~ 87 мкм. Максимальний розмір часток – до 180 мкм.

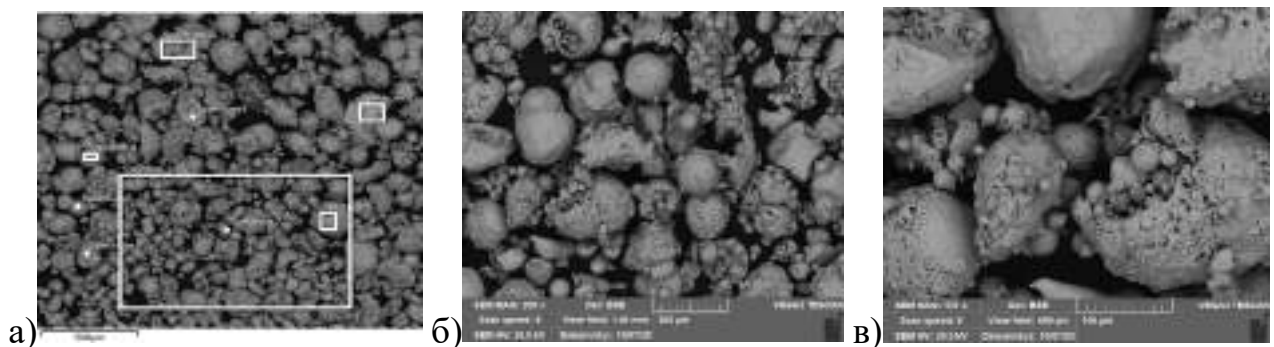


Рис. 2.2. Морфологія вихідного порошку ПЖ-1 при різних збільшеннях.

Таблиця 2.2. Хімічний склад частинок порошку ПЖ-1 за даними растрової електронної мікроскопії.

Spectrum	O	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni
Spectrum 1	2,24	0,23		0,06	1,47	0,34	95	0,65
Spectrum 2	2,16	0,06	0,08			0,21	97,49	
Spectrum 3	1,23	0,07	0,01	0,07		0,14	98,47	
Spectrum 4	2,69	0,05		0,05			97,21	
Spectrum 5		0,1				0,2	99,7	
Spectrum 6			0,05			0,11	99,84	
Spectrum 7	0,53	0,07			0,62	0,09	98,69	
Spectrum 8		0,03			0,21	0,44	99,32	
Spectrum 9		0,06	0,06			0,07	99,82	

Проведені за допомогою оптичного мікроскопу дослідження порошку НУФ-103 показали неоднорідність його гранулометричного складу. Даний порошок складається як з великих, так і дрібних частинок переважно сферичної форми (рис. 2.3). Їх розмір змінюється від 15,39 мкм до 67,85 мкм. Середній розмір – 39,88 мкм. Поодинокі частинки мають розмір 109,45 мкм. Хімічний склад порошку визначали за допомогою растрової електронної мікроскопії. Дослідження показали стабільність його складу (табл. 2.3). Порошок окиснений на повітрі.

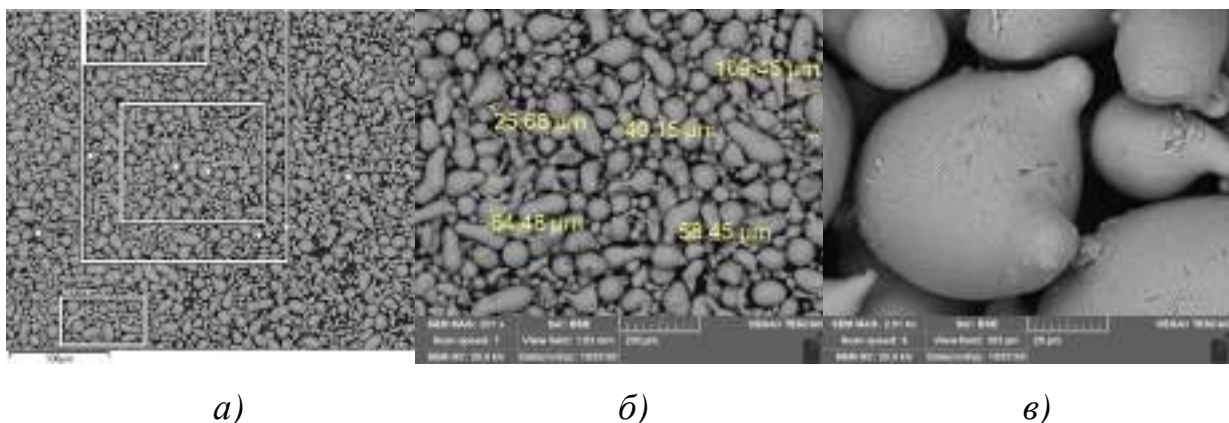


Рис. 2.3. Морфологія вихідного порошку НУФ-103: а) – зовнішній вигляд та хімічний склад; б) – розмір частинок; в) – мікроструктура.

Таблиця 2.3. Хімічний склад частинок порошку НУФ-103 за даними растрової електронної мікроскопії.

Спектр	Вміст елементів, мас. %						
	B	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	5,57	2,79	1,51	17,33	0,28	65,21	7
2	6,19	2,68	1,41	17,34	0,37	64,8	7,08
3	6	2,98	1,47	17,48	0,23	65,06	6,61
4	6,69	2,65	1,42	17,81	0,45	64,88	6,11
5	3,6	1,83	1,46	17	0,38	67,2	8,53
6	4,43	2,94	1,17	15,6	0,2	66,79	8,86
7	2,65	3,97	2,04	15,68	0,3	67,07	8,29
8	5,97	—	1,16	17,05	0,15	66,75	8,92
9	3,33	1,43	1,25	17,41	0,24	71,81	4,29
10	2	1,98	1,55	17,09	0,33	68,07	8,85

Порошок EuTroLoy 16316 системи Fe-Cr-Ni-Mo твердістю HV30-170 (рис.2.4). Має окислення на повітрі (табл.2.4). Форма частинок порошку несферична і є неправильними округлими формами. Порошок не є повністю однорідним і складається з великих та дрібних частинок. Розмір частинок порошку коливається від 48,98 мкм до 207,69 мкм. Середній розмір частинок порошку 116 мкм. Максимальний розмір часток 212,92 мкм. Наявний результат зіткнення гарячих крапель з холодними частинками.

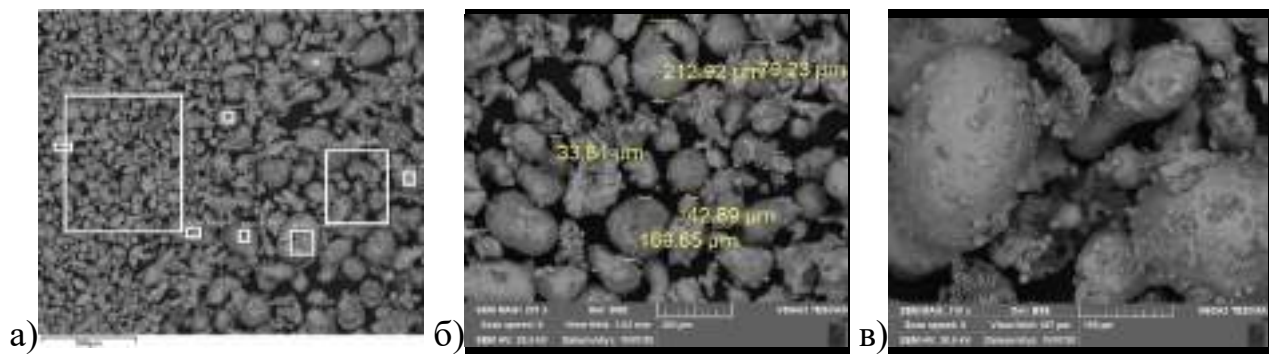


Рис. 2.4. Морфологія вихідного порошку EuTroLoy 16316 при різних збільшеннях.

Таблиця 2.4. Хімічний склад частинок порошку EuTroLoy 16316 за даними растрової електронної мікроскопії.

Spectrum	O	Si	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Total
----------	---	----	----	---	----	----	----	----	-------

spectrum 1	8,2	3			20,54	2,78	59,14	6,34	100
spectrum 2	14,33	4,94			19,52	4,27	51,76	5,18	100
spectrum 3	12,7	4,39			19,46	3,99	54,32	5,14	100
spectrum 4	11,76	3,91	0,11		18,99	2,45	56,4	6,38	100
spectrum 5	18,56	8,25		0,17	21,14	6,78	41,05	4,05	100
spectrum 6	8,54	4			18,97	1,92	59,59	6,97	100
spectrum 7	9,54	3,84			18,8	2,05	58,85	6,92	100
spectrum 8	13,99	3,23			18,24	1,49	56,64	6,4	100
spectrum 9	4,55	2,7			19,37	1,09	64,46	7,82	100

2.3. Створення лабораторного комплексу обладнання для дослідження адитивних технологій наплавлення.

Для визначення оптимальних технологічних параметрів мікроплазмової технології вирощування металевих виробів розроблено універсальний лабораторний стенд, створений на базі зварювального обладнання в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона. Цей стенд включає зварювальне обладнання, що дозволяє на першому етапі досліджень реалізувати процеси пошарового вирощування наплавленням пластинчастих зразків (типу «пряма висока стінка») різної висоти із застосуванням дроту та порошку як присаджувального матеріалу. На такому стенді проводили дослідження наступних адитивних технологій наплавлення:

- мікроплазмове порошкове наплавлення;
- мікроплазмове наплавлення з присаджувальним дротом;
- електродугове наплавлення плавким струмопровідним дротом.

Блок-схема універсального лабораторного комплексу для дослідження адитивних технологій наплавлення наведено на рис. 2.5. До його складу входять такі вузли:

- модифіковане зварювальне джерело живлення для плазмового (мікроплазмового) наплавлення неплавким електродом на базі силових модулів і вузлів Tetrix 421 AC/DC;

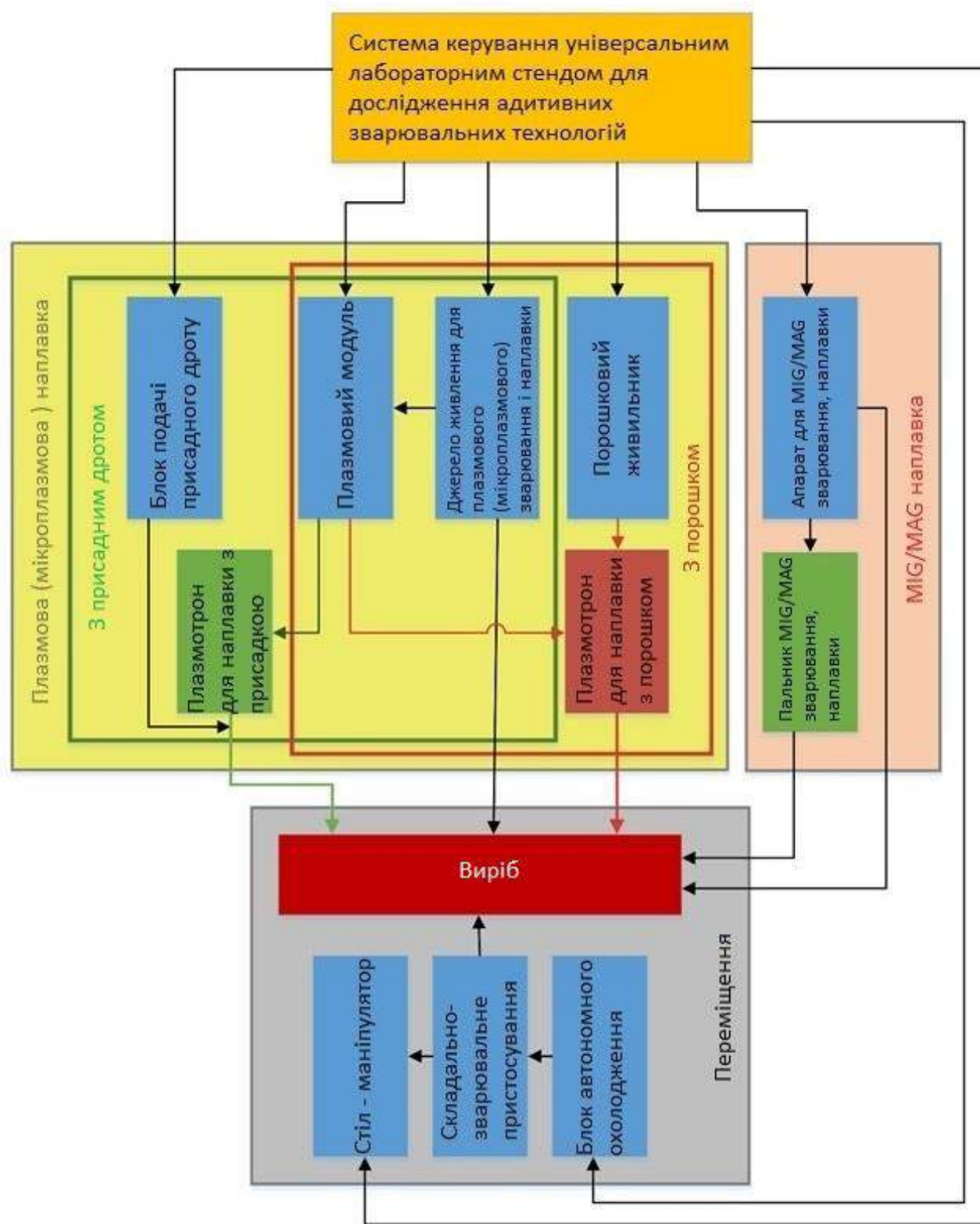


Рис. 2.5. Блок-схема універсального лабораторного комплексу для дослідження адитивних технологій наплавлення.

- спеціалізований плазмовий модуль, модифікований апарат для наплавлення плавким електродом на базі силових модулів та вузлів TPS 450, блок автономного охолодження;
- універсальний плазмотрон для наплавлення дротом у режимах мікроплазмового та плазмового наплавлення;
- плазмотрон для мікроплазмового порошкового наплавлення;
- функціональний стіл-маніпулятор, механізм подачі присаджувального дроту;
- порошковий дозатор, а також загальну систему управління універсальним лабораторним стендом, включаючи управління усіма одиницями наплавлюваного обладнання та столом-маніпулятором.

Для реалізації процесу вирощування пластинчастих виробів різної висоти на столі-маніпуляторі встановлено універсальне складально-наплавлюване пристосування.

2.4. Характеристики вузлів лабораторного комплексу.

Розглянемо детальніше вимоги до кожного з вищезгаданих вузлів лабораторного комплексу для дослідження адитивних технологій наплавлення.

Апарат для реалізації адитивної електродугової технології наплавлення плавким електродом.

Для виконання порівняльних досліджень плазмових та електродугових адитивних технологій наплавлення використовували апарат для зварювання електродом Fronius TPS 450 (табл. 2.5), що складається з однойменного джерела живлення та блоку подачі дроту Fronius VR 155 (рис. 2.6).

Для зручності роботи в джерелі живлення передбачений синергетичний зворотний зв'язок, який коригує параметри дуги відповідно до заздалегідь вибраного типу матеріалу, діаметру електрода та виду захисного газу. Передбачено також можливість ручного завдання параметрів режиму наплавлення на розсуд оператора. Для покращення умов відриву крапель та

підвищення стабільності перенесення металу в джерелі живлення передбачено варіант модуляції струму.

Таблиця 2.5. Технічні характеристики апарату для наплавлення плавким електродом.

Назва параметру	Величина
Напруга трифазного змінного струму частотою 50 Гц, В	380
Потужність, що споживається кВА, не більше	24
Сила струму, що споживається з мережі А, не більше	32
Діапазони регулювання струму в режимі Plasma DC, А	5–450
Номінальна сила струму при ПВ 60%, А	450
Номінальна сила струму при ПВ 100%, А	360
Напруга холостого ходу джерела живлення, В	80
Робоча напруга джерела живлення, В	0–50
Швидкість подачі дроту, м/хв.	2–22
Діаметр дроту, мм	0,8; 1,0; 1,2; 1,6

Для проведення експериментів з вирощуванням об'ємних виробів за адитивною електродуговою технологією наплавлення плавким електродом, розроблено спеціальний пальник (рис. 2.7). Для його виготовлення застосовували базові вузли серійного водоохолоджувального пальника марки Fronius AW500 Multilock. У процесі розробки були оптимізовані деякі конструктивні параметри пальника, зокрема спроектований та виготовлений струмопровідний наконечник для дроту Ø 0,8 мм, а також захисне сопло з вихідним отвором Ø 12 мм. Ці доробки дозволяють використовувати пальник, розрахований на значне теплове навантаження з дротами малого діаметра, що дає можливість безперервного ведення процесу протягом тривалого часу, необхідного для вирощування об'ємних виробів.



Рис. 2.6. Загальний вигляд апарату для наплавлення плавким електродом
Fronius TPS 450 з механізмом подачі дроту.



а)



б)

Рис. 2.7. 3D модель (а) і загальний вигляд (б) пальника для реалізації адитивної
електродугової технології наплавлення плавким електродом.

Джерело живлення для плазмового (мікроплазмового) зварювання (наплавлення).

Джерело живлення плазмового (мікроплазмового) наплавлення Tetrix 421 AC/DC забезпечує наплавлення неплавким електродом на струмі прямої полярності та різнополярному (рис. 2.8). Відмінною особливістю даного джерела є те, що він забезпечує реалізацію процесу в режимі як плазмового, так і мікроплазмового зварювання (наплавлення). Його технічні характеристики наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Технічні характеристики джерела живлення для плазмового (мікроплазмового) зварювання (наплавлення).

Назва параметру	Величина
Діапазон регулювання струму, А	5–420
Діапазон регулювання напруги, В	10–34
Тривалість ввімкнення при 20 °С	
80 % ПВ	420
100 % ПВ	380
Напруга холостого ходу, В	92
Мережева напруга (допуски)	3×400 В (від -25 % до +20 %) 3×415 В (від -25 % до +15 %)

Система стабілізації струму наплавлення джерела працює з точністю ± 1 А. Для підвищення стійкості вольфрамового електрода при запалюванні дуги у джерелі живлення передбачена функція плавного наростання струму від його початкового значення, на якому відбувається підпалювання дуги, до його робочого значення (струм виконання наплавлення). Час, протягом якого відбувається наростання струму, регулюється в межах від 0 до 7,0 с з точністю 0,1 с.



Рис. 2.8. Загальний вигляд джерела живлення для плазмового (мікроплазмового) зварювання (наплавлення) у складі універсального лабораторного комплексу для дослідження адитивних технологій наплавлення.

Також передбачена функція плавного гасіння дуги та заварювання кратера ванни. Час спаду регулюється в межах від 0 до 7,0 с із точністю 0,1 с. Струм запалювання дуги та заварювання кратера регулюються окремо. У джерелі живлення передбачена можливість наплавлення на імпульсних режимах, у тому числі на різнополярному струмі. Частота імпульсів регулюється в діапазоні від 01 до 2500 Гц (для різнополярного струму від 1 до 50 Гц), баланс імпульсу – в межах 1–99 %. При частотах до 200 Гц можна регулювати крутизну переднього і заднього фронтів імпульсів. При роботі зазначеного джерела живлення у складі універсального лабораторного комплексу для дослідження наплавлюваних адитивних технологій управління ним здійснюється з пульта системи управління.

Плазмовий модуль.

Плазмовий модуль забезпечує запалювання та горіння чергової дуги постійного струму прямої полярності, а також забезпечує подачу плазмоутворюючого газу. Діапазон регулювання струму становить 5–50 А. Величина струму чергової дуги вибирається відповідно до вимог плазмотронів. Робочий діапазон витрати плазмоутворюючого газу від 0,1 до 10 л/хв. Точність регулювання становить 0,1 л/хв. Така точність досягається за рахунок застосування в конструкції модуля дозатора-витратоміра газу з електронним керуванням. Управління підпалом чергової дуги та витратами газу може здійснюватися як з передньої панелі плазмового модуля, так і з дистанційного пульта системи управління процесом наплавлення.

Плазмотрон для адитивної плазмової технології наплавлення з використанням дроту, як присаджувального матеріалу.

Для проведення досліджень адитивної плазмової технології наплавлення у цій роботі розроблено спеціальний універсальний плазмотрон. Це пов'язано з тим, що існуючі плазмотрони в основному розраховані для наплавлення на середніх і високих струмах, тому навіть з найменшим комплектним плазмоутворювальним соплом ($\varnothing 2,5$ мм), вони генерують надмірно широкий стовп плазми та забезпечують формування одиничних наплавних валиків підвищених розмірів. Також в основному наявні плазмотрони не можуть одночасно стабільно та ефективно працювати при мікроплазмових режимах (при струмах менше 50 А), так як це призводить до недостатньої щільності струму і, як наслідок, низької швидкості ведення процесу, а також перегріву навколишнього металу.

При створенні універсального плазмотрона для лабораторного стенду за основу взято плазмотрон марки PD-174М, створений в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона. Одним з нових рішень при створенні універсального плазмотрона була оптимізація конструктивних параметрів плазмоутворюючого сопла з діаметром каналу 1,5 мм, також була змінена конструкція вольфрамового електрода (рис. 2.9).

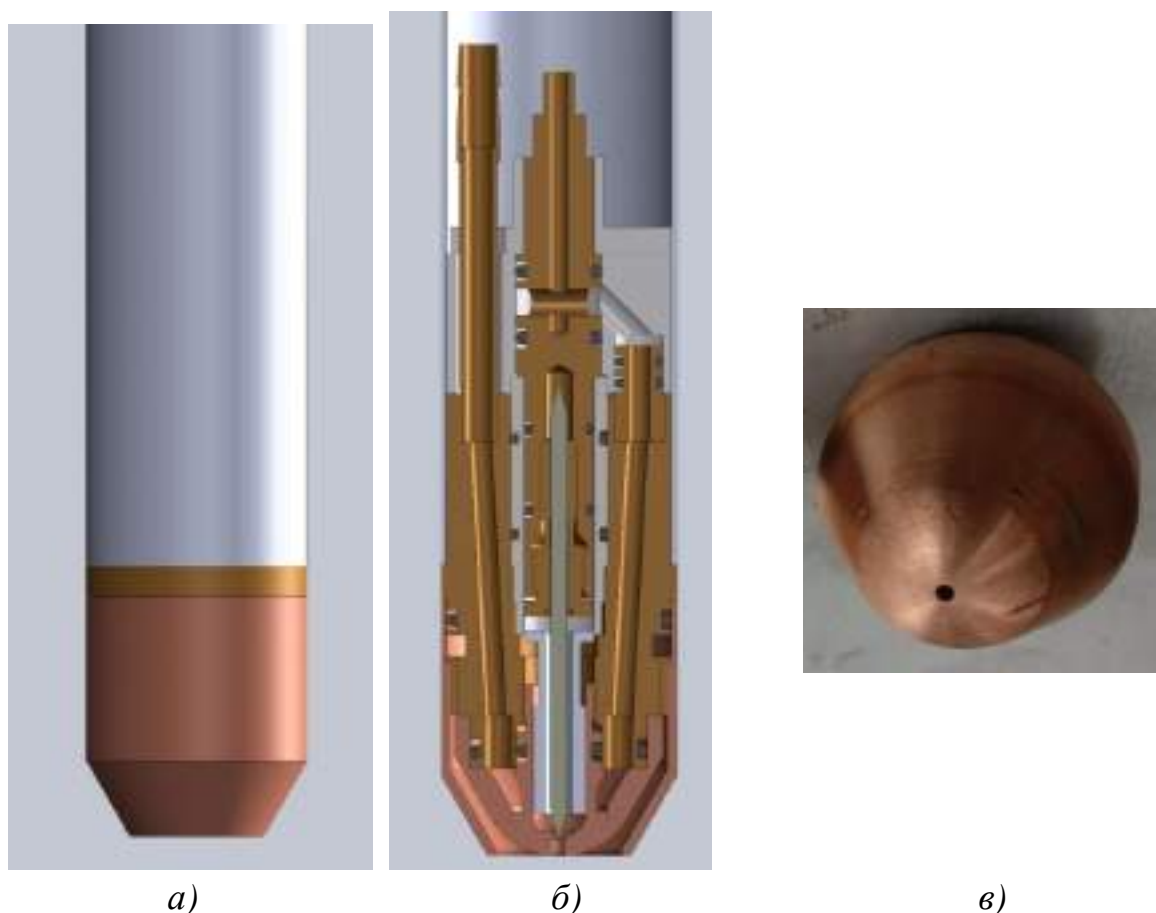


Рис. 2.9. Загальний вигляд (а) з розрізом (б) та плазмоутворююче сопло (в) універсального плазмотрона для реалізації адитивної плазмової (мікроплазмової) технології із застосуванням дроту як присаджувальний матеріал.

Конструкція спроектованого плазмотрона передбачає в залежності від струму використання вольфрамових електродів діаметрами від 2,4 мм до 4,8 мм та плазмоутворюючих сопел калібром від 1,5 мм до 4,5 мм.

Проведені доробки дозволили досягти звуження стовпа плазми, точності його позиціонування та підвищення щільності струму.

Блок подачі дроту для адитивних плазмових технологій.

Стандартні механізми подачі присаджувальних дротів, що випускаються виробниками зварювального обладнання, розраховані на швидкість подачі присаджувального дроту не менше 2 м/хв. Проте, для більшості випадків в адитивних технологіях це занадто велика швидкість подачі для вирощування високих тонких стінок, ребер жорсткості та інших подібних елементів в об'ємних

металевих виробках. Для забезпечення можливості 3D-друку високих стінок був спроектований та виготовлений новий блок (рис. 2.10), що забезпечує подачу дроту діаметрів 06-16 мм зі швидкістю від 05 м/хв до 5 м/хв Основними новими технічними рішеннями в ньому є: використання двигуна і редуктора з такими оборотами і передавальним числом, які забезпечують подачу дроту в необхідному діапазоні швидкостей (рис. 2.11).



Рис. 2.10. Загальний вигляд блоку подачі дроту для реалізації адитивних плазових (мікроплазових) технологій наплавлення.



Рис. 2.11. Загальний вигляд плазмотрона з позиціонером дроту.

Діапазон швидкостей від 0,5 м/хв до 5 м/хв дозволяє точно регулювати кількість металу, що наплавляється за один прохід і, відповідно, керувати розмірами наплавлюваного валика.

Плазмотрон для застосування порошку як присаджувальний матеріал.

Для проведення досліджень адитивної плазмової технології наплавлення у цій роботі також модернізовано зварювальний плазмотрон установки мікроплазмового зварювання МПУ-4, Україна (рис. 2.12, а-г).

Типова схема плазмотрону представлена на рис. 2.12(а). Основою конструкції є катодний *K* та анодний *A* вузли, розділені між собою ізолюючою шайбою *Ш*. У катодний вузол входять: електрод *2*, цанга *б*, вкладиш *3* регулювання вильоту електрода, верхній корпус *4* з комунікаціями підведення струму та плазмоутворюючого газу-аргону.

Анодний вузол включає: *9* плазмоутворююче і захисне *8* сопла; нижній корпус *7* з камерою охолодження та комунікаціями підведення струму, захисного газу та охолоджувальної води. Для ізоляції цанги *б* кріплення електрода та нижнього корпусу *7*, що знаходяться під різними потенціалами, між ними встановлена ізолююча втулка *5*. Зверху катодний вузол закритий кришкою *1*.

Вимоги до конструкції такого плазмотрона досить високі. Він повинен забезпечувати: стабільне горіння чергової та основної дуги у робочому діапазоні струмів; діелектричну міцність при високочастотному запалюванні чергової дуги; надійний захист металу зварювальної ванни від впливу атмосфери; безвідмовну роботу найбільш теплонавантажених елементів – електрода та плазмоутворюючого сопла, а в разі потреби простоту їх заміни; можливість точного центрування електрода щодо каналу плазмоутворюючого сопла та регулювання його поздовжнього переміщення; зручність та маневреність при наплавленні.

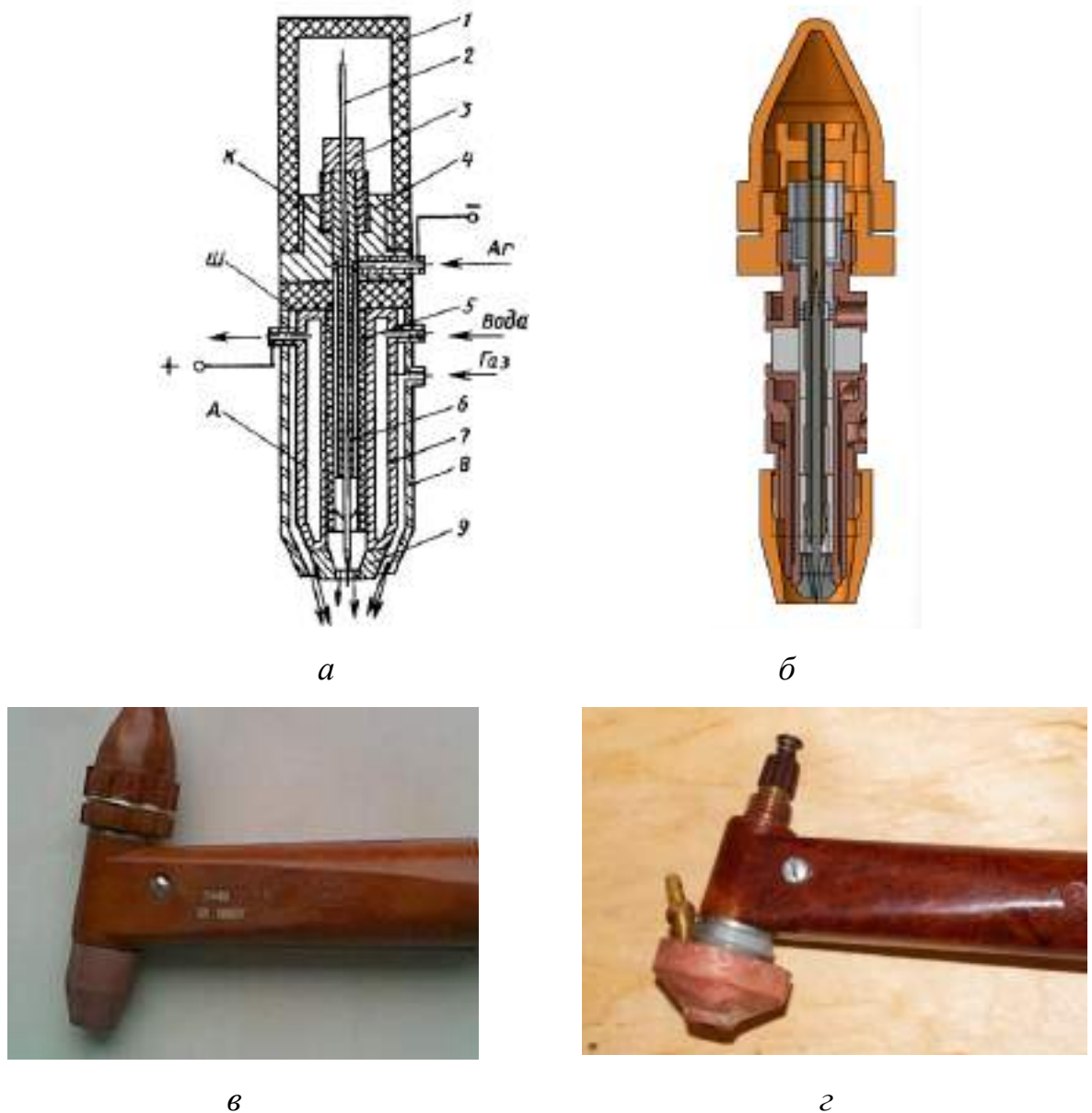


Рис. 2.12. Схема (а), переріз (б) та загальний вигляд (в) плазмотрона МПУ-4 для мікроплазмового зварювання та загальний вигляд цього плазмотрона з сопловим вузлом для введення порошку в струмінь (з), модернізованого для комплектації універсального лабораторного комплексу для дослідження адитивних технологій наплавлення.

Лабораторний порошковий живильник для реалізації адитивної плазмової технології наплавлення.

Лабораторний порошковий живильник спроектований на основі порошкового дозатора плазмової установки PLAZER 80, розробки Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона та ТОВ «Науково-технічний центр

«ПЛАЗЕР» [106] та включає такі основні компоненти: бункер (з можливістю перекидання) з дисковим дозатором; індукційний двигун з частотним регульованим приводом та понижувальною передачею, система подачі транспортуючого газу (що забезпечує подачу порошку в стовп плазми), привод поворотного механізму із замковим пристроєм (рис. 2.13).

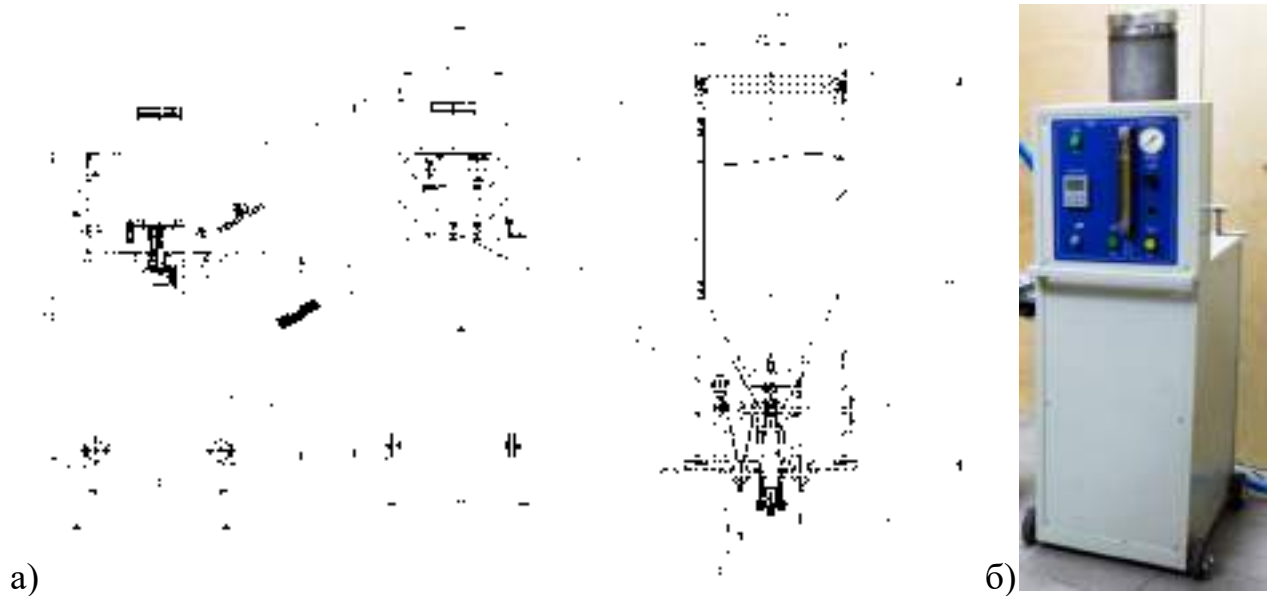


Рис. 2.13. Схематичне зображення (а) та зовнішній вигляд (б) лабораторного порошкового живильника для реалізації адитивної плазмової технології наплавлення: 1 – корпус; 2 – ротаметр; 3 – бункер; 4 – рукоятка механізму фіксації бункера; 5 – бункер внутрішній; 6 – кришка; 7 – гайка; 8 – конус; 9 – платформа; 10 – вісь; 11 – муфта; 12 – вирва; 13 – розпушувач; 14 – скребок; 15 – електродвигун з редуктором; 16 – манометр тиску транспортуючого газу; 17 – ротаметр витрати транспортуючого газу; 18 – показчик швидкості обертання платформи; 19 – потенціометр регулювання швидкості обертання платформи; 20 – кнопка "ПУСК"; 21 – кнопка «ПОДАЧА» транспортуючого газу.

Бункер живильника циліндричної форми 3 ємністю 5 л щільно закривається кришкою 6, виготовленої з прозорого оргскла з метою зручності перевірки наявності порошку в бачку. Кришка 6 закріплюється на бачку за допомогою спеціальної гайки 7 з внутрішнім різьбленням. Живильник має

запобіжний клапан, який відкривається при перевищенні тиску в бачку більше 0,3 МПа. Через штуцер у нижній частині корпусу бункера здійснюється подача транспортуючого газу. У днищі бункера є отвір 12 для входу та виходу через ніпель газопорошкової суміші.

Механізм для дозування порошку складається з нерухомих та рухомих деталей. До нерухомих деталей відносяться знімне днище з вхідним отвором 12, внутрішній бункер 5, що формує прямий конус 8 і скребок 14. До рухомих деталей відносяться платформа 9 з розвантажувальним конусом і розпушувачами 13.

Порошок, сиплючись через проміжок між прямим конусом внутрішнього бункера і розвантажувальним конусом, утворює в дозувальному обсязі над платформою 9 задану порцію порошку, яка не залежить від ступеня наповнення бункера. Таким чином, виключається вплив рівня порошку в бункері на продуктивність живильника. Транспортуючий газ має однаковий тиск на поверхню порошку в бункері та над дозуючою платформою 9. Тим самим виключається вплив транспортуючого газу на продуктивність живильника.

Розпушувачі 13 встановлені на одній осі з тарілкою і перемішують порошок в дозувальному об'ємі. Це сприяє точному дозуванню погано сипких порошків.

Продуктивність живильника плавно регулюється швидкістю обертання платформою 9 від нуля до максимальної.

Крім того, діапазон регулювання (верхня межа) може налаштовуватися шляхом зсуву вгору-вниз прямого конуса 8, і, відповідно, зміни кільцевого зазору між платформою та ним.

На передній панелі управління живильника розміщені кнопка «Сеть» увімкнення живлення 220 В, панель управління двигуном з дисплеєм, на якому відображаються оберти ротора, кнопка з фіксацією «Пуск» для вмикання та вимкнення двигуна, потенціометр для регулювання частоти обертання ротора двигуна, кнопка «Подача » для включення електромагнітного клапана подачі

транспортуючого газу, манометр та ротаметр з голчастим вентилям для регулювання та контролю витрат транспортуючого газу.

Порівняно з базовим варіантом у конструкцію лабораторного живильника внесено низку модифікацій та доробок, зокрема змінено конструкцію диска та ножа системи дозування порошку. Ця доробка дозволяє значно підвищити точність дозування та знизити мінімально можливі витрати порошку до 2 г/хв, що дозволяє досягти мінімальної товщини нарощеного шару і, відповідно, високої точності виготовлення деталі.

Стіл-маніпулятор універсального лабораторного комплексу для отримання пластинчастих зразків «висока стінка».

На першому етапі досліджень доцільно проводити експерименти з пошарового вирощування наплавленням пластинчастих зразків (типу «пряма висока стінка») різної висоти із застосуванням як присаджувального матеріалу дроту та порошку. Для таких робіт використовували спеціалізований стіл-маніпулятор, розроблений в Інституті електрозварювання ім. Е.О. Патона, який забезпечує пошарове наплавлення зі швидкістю від 5 см/хв до 6000 см/хв (рис. 2.14). Спеціальний механізм підйому та розвороту дозволяють виконувати наплавлення (вирощування стінки) на вертикальній площині на спуск та на підйом, горизонтальній стінки, перпендикулярній вертикальній площині, вертикальні та горизонтальні стінки на похилій площині з кутами нахилу від 0 до 90 градусів.

Отже, застосування такого-стола маніпулятора для досліджень у цій роботі дозволяє моделювати практично будь-які рухи наплавлюваної головки з формуванням стінок і ребер жорсткості в будь-яких просторових положеннях.

Ще однією відмінною особливістю описаного столу-маніпулятора є те, що в процесі наплавлення рухається виріб, тоді як плазмотрон (наплавна головка) залишається нерухомим. Це значно спрощує встановлення додаткового дослідницького обладнання, навісного газового захисту металу виробу, що вирощується.

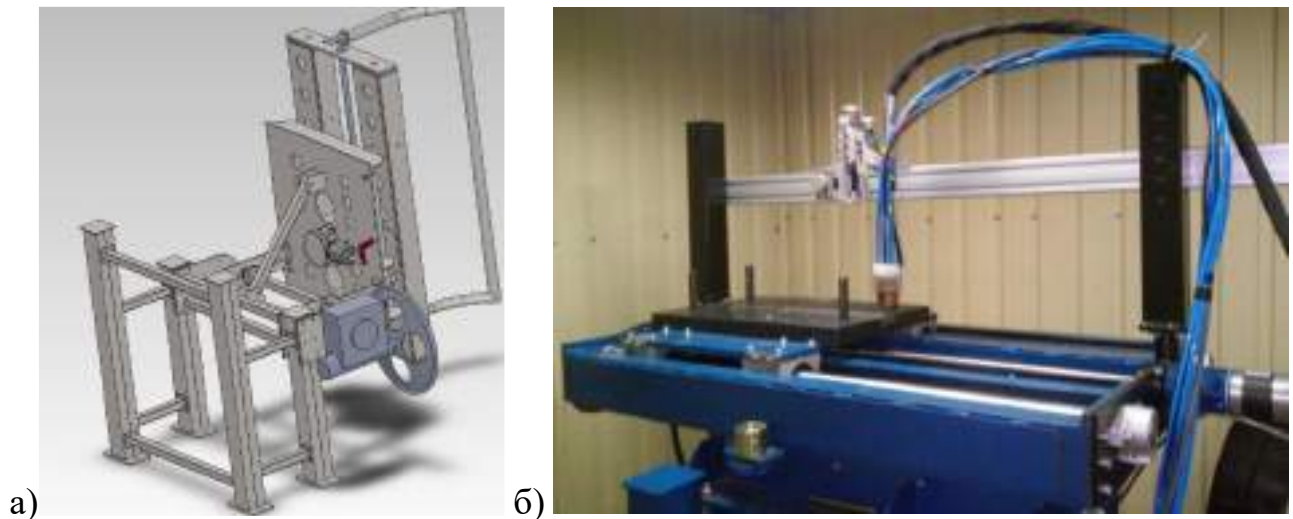


Рис. 2.14. Модель (а) і загальний вигляд (б) столу-маніпулятора універсального лабораторного комплексу для дослідження адитивних технологій наплавлення.

2.5. Методи та обладнання металографічних досліджень.

Для проведення металографічного аналізу з отриманих з'єднань вирізали поперечні темплети і виготовляли мікрошліфи. При цьому застосовували кілька видів травлення [107]:

- холодне хімічне розчином 48%-вої плавикової кислоти у воді (0,5 мл на 100 мл, відповідно), або травлення розчином лугу з подальшою нейтралізацією розчином кислоти для виявлення макроструктур;
- холодне хімічне розчином лугу з наступною нейтралізацією для виявлення мікроструктур;
- електролітичне із застосуванням хромової кислоти або сірчанокислоного амонію для виявлення мікроструктур;
- іонно-вакуумне травлення для виявлення мікроструктур.

Металографічні дослідження проводили на наступних ділянках зразків: переплавлений метал шва → лінія сплавлення → зона термічного впливу (ЗТВ) → основний метал. Структури виконаних з'єднань досліджували методами оптичної (мікроскопи Reichert Polyvar та Neophot-30, рис.2.15) та аналітичної растрової електронної (мікроскоп JSM-840 фірми PHILIPS, Голландія, рис.2.16)

мікроскопії. За допомогою аналітичної растрової електронної мікроскопії визначали хімічний склад фаз і зерен металу (загальний та локальний точковий аналіз). За допомогою оптичної мікроскопії вивчали структурні зміни. Мікротвердість вимірювали за допомогою мікротвердоміра LM-400 (серії LECO) (рис.2.17).



Рис.2.15. Зовнішній вигляд оптичних мікроскопів Reichert Polyvar (a) і Neophot-30 (б).



Рис.2.16. Зовнішній вигляд аналітичного растрового електронного мікроскопа JSM-840.



Рис.2.17. Зовнішній вигляд мікротвердоміра LM-400 (серія LECO).

Висновки за розділом 2.

1. Для вирішення завдання одержання тривимірних металевих виробів методом адитивного наплавлення із застосуванням мікроплазмового і дугового з дугою плавкого електроду джерел запропоновано методику досліджень, вибрано відповідне технологічне обладнання і на його основі створено лабораторний стенд.
2. Для реалізації запропонованої методики з урахуванням наявного технологічного обладнання обрано необхідні присаджувальні (наплавочні) дрітотві та порошкові матеріали, підібрано необхідні допоміжні прилади та обладнання, у тому числі обладнання для металографічних досліджень.
3. Вибране дослідне обладнання дозволяє з достатньою точністю вивчити результати технологічних досліджень, що проводяться. У тому числі, встановити характерні дефекти і структурні особливості одержуваних наплавлених шарів, для чого заплановано виконання низки відповідних металографічних досліджень.

Розділ 3. Моделювання оптимізованої конструкції плазмотрону і дослідження закономірностей впливу технологічних прийомів адитивного наплавлення на формування структури тривимірних об'єктів.

3.1. Вибір методу чисельного моделювання процесів газодинаміки в контурах плазмотрону та параметрів сітки розрахунків.

Враховуючи складність конструкцій плазмотронів та високу вартість виготовлення, необхідним етапом проектування та дослідження їх характеристик стає моделювання газодинаміки в контурах та аналіз працездатності прийнятих рішень.

Розвиток програмних пакетів обчислювальної гідродинаміки дозволяє відносно швидко та з мінімальними витратами змодельовати, візуалізувати траєкторії протікання газу, отримати розподіл швидкості та тиску газу у магістралях плазмотрона.

Газодинамічний розподіл газів у плазмотроні важливий для розуміння та перевірки наступних процесів:

- швидкість протікання газу в зазорі, де має відбуватися осциляторний пробій дуги;
- швидкість виходу потоку газу з плазмоутворюючого сопла, ламінарність потоку, що виходить, також важливо щоб швидкість руху потоку в каналі сопла була найбільшою, відносно всієї магістралі, гарантуючи стабілізацію та орієнтування дуги;
- швидкість, тиск та траєкторії руху газу на виході із захисного сопла є важливими параметрами для формування захисту зони плавлення.

Для моделювання газодинаміки використано розрахунковий пакет Solidworks Flow Simulation [123, 124]. Цей пакет використовує для моделювання один із підрозділів обчислювальної гідродинаміки – механіку суцільних середовищ, що включає сукупність фізичних, математичних та чисельних методів, призначених для обчислення характеристик потокових процесів. Враховуючи наявність тертя та стиснення середовища для побудови рівнянь,

використовується система Нав'є-Стокса (3.1), доповнена рівнянням для врахування турбулентності (3.2) [123-126]. На їх основі складається система диференціальних рівнянь другого порядку.

Рівняння нерозривності, руху та енергії [123-126]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} &= 0 \\
 \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \\
 \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) &= \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial P}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \\
 H &= h + \frac{1}{2} u_i u_i \quad \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \\
 \tau_{ij}^R &= \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Рівняння для турбулентної енергії та дисипації турбулентності [123-126]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i}((\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i}) + S_k \\
 \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i}((\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) + S_\varepsilon \\
 S_k &= \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B \quad S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \\
 P_B &= -\frac{g_i}{\sigma_B \rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad \sigma_B = 0.9 \\
 \mu_t &= f_\mu C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \\
 f_\mu &= (1 - \exp(-0.025 R_y))^2 (1 + \frac{20.5}{R_\tau}) \quad R_\tau = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu} \\
 f_1 &= 1 + (\frac{0.05}{f_\mu})^3 \quad f_2 = 1 - \exp(-R_\tau^2) \quad C_\mu = 0.09 \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad \sigma_k = 1
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Диференціальні рівняння мають безліч рішень. Для вибору єдиного рішення, відповідного аналізованій задачі, цю систему необхідно доповнити

умовами однозначності – математичним описом особливостей конкретного завдання.

Умови однозначності включають:

- геометричні умови для опису форми та розмірів системи;
- фізичні властивості середовища, зокрема теплоємність C і густина ρ ;
- граничні умови, у яких описують особливості перебігу процесів на межах системи;
- тимчасові умови, що визначають особливості перебігу процесів у часі.

Питання існування єдиного рішення повної системи рівнянь руху до нашого часу не вирішено. Однак отримані часткові рішення добре підтверджуються експериментальними дослідженнями, що дає змогу зробити висновок про правильність наведених вище рівнянь реальним гідродинамічним процесам.

Постановка задачі та ряд спрощень, прийнятих під час моделювання.

Для процесу адитивного мікроплазмового наплавлення одними з найважливіших факторів досягнення необхідної точності вирощування виробів, поряд з регулюванням енергії, що вкладається в дугу, є форма і розміри стовпа плазми. Ці параметри задаються потоками плазмоутворюючого та захисного газів, які у свою чергу, залежать від геометрії каналів, по яких протікають і витрат цих газів. У разі мікроплазмового наплавлення з використанням металевих порошків, як присаджувального матеріалу, до вищеперелічених факторів додаються спосіб і точка введення порошку в дугу.

Комп'ютерне моделювання газодинаміки в плазмотронах дозволяє оперативно перевірити конструктивні рішення без необхідності виготовлення дослідних зразків, що значно прискорює розробку плазмотронів, здатних виконувати поставлене завдання.

Для кожного з плазмотронів необхідно:

- змодельовати швидкість та вектори руху газу в плазмоутворюючій магістралі та на виході плазмоутворюючого сопла, з отриманого розподілу оцінити можливість та стабільність формування стовпа плазми;

- змодельовати розподіл тиску в плазмоутворюючій магістралі, як перевірочне моделювання для швидкості відповідно до закону Бернуллі;
- змодельовати швидкість та вектори руху газу в захисній магістралі та на виході з неї для аналізу надійності захисту зони плавлення металу;
- змодельовати розподіл тиску в захисній магістралі як перевірочне моделювання для швидкості згідно із законом Бернуллі.
- для наплавлення з використанням присаджувального порошку змодельовати швидкість та вектори руху газу в транспортуючій магістралі та на виході з неї, з отриманого розподілу оцінити вплив потоків транспортуючого газу на формування плазмового струменя та якість захисту зони ведення процесу;
- змодельовати розподіл тиску в транспортувальній магістралі як перевірочне моделювання для швидкості згідно із законом Бернуллі;
- для наплавлення з використанням присаджувального порошку змодельовати швидкість і вектори руху частинок порошку в транспортувальній магістралі і на виході з неї, з отриманого розподілу оцінити ймовірність попадання порошку в зону плавлення.

Спрощення та умови, що приймаються при моделюванні:

- як плазмоутворювальний і захисний газ був обраний чистий аргон;
- не враховується вплив дуги наплавлення на фізичні властивості аргону, моделювання газодинаміки відбувається у холодному стані;
- для моделювання поширення тепла у вузлах плазмотрона дуга прирівнюється до радіаційного джерела тепла еквівалентної потужності.

Робочим газом для всіх каналів приймався аргон.

3.2. Комп'ютерне моделювання процесів газодинаміки в плазмотронах доопрацьованих для здійснення плазмового адитивного наплавлення.

3.2.1. Моделювання газодинаміки плазмотрона для адитивного виробництва з використанням дроту як присаджувального матеріалу.

Для виконання плазмового адитивного наплавлення з дротом використовувався зварювальний допрацьований плазмотрон марки PD-174М описаний у розділі 2 (рис. 2.12), його поперечний переріз наведено на рис. 3.1. Технологічні параметри процесу наплавлення наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Технологічні параметри процесу наплавлення, використані при моделюванні газодинаміки допрацьованого плазмотрона марки PD-174М.

№	Назва параметра	Величина
1	Витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{пл}$), л/хв.	1
2	Витрати захисного газу (Q_3), л/хв.	10

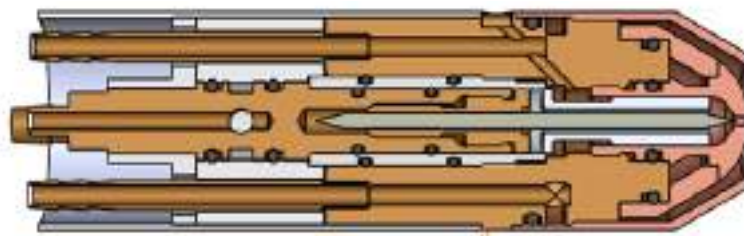


Рис. 3.1. Поперечний розріз моделі розробленого плазмотрона для плазмово-дротового наплавлення.

Результати моделювання показали (рис. 3.2, 3.3), що при витратах необхідних для плазмового наплавлення потік плазмоутворюючого газу в каналі сопла і виході з нього залишається ламінарним, швидкість потоку достатня для формування стабільного стовпа плазми.

Перевірочне моделювання тиску в контурі плазмоутворюючого газу узгоджується із законом Бернуллі та підтверджує результати моделювання за швидкістю потоку.

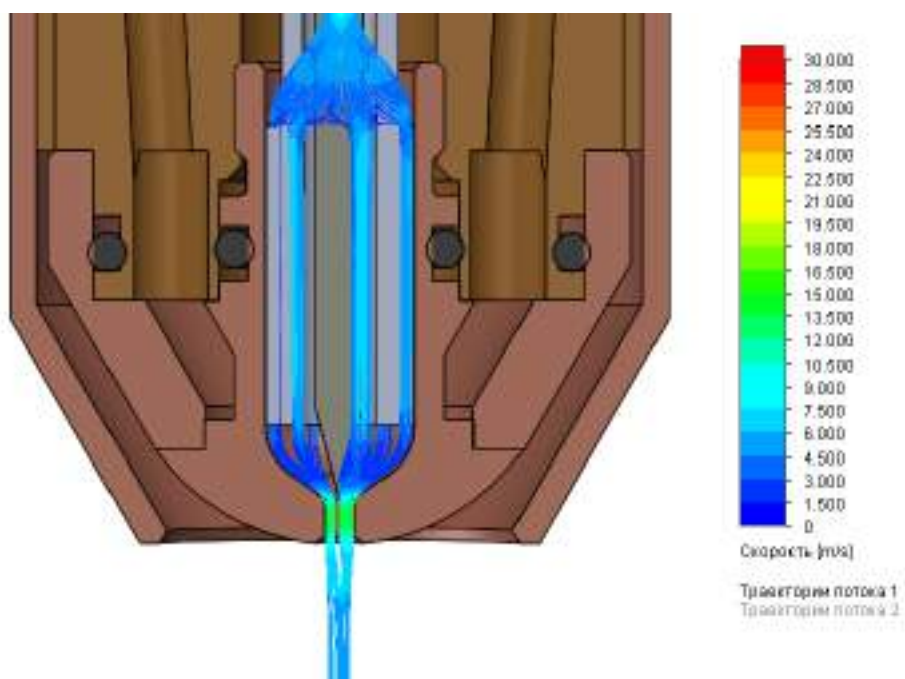


Рис. 3.2. Швидкість та траєкторії проходження газів у плазмоутворювальному контурі плазмотрона.

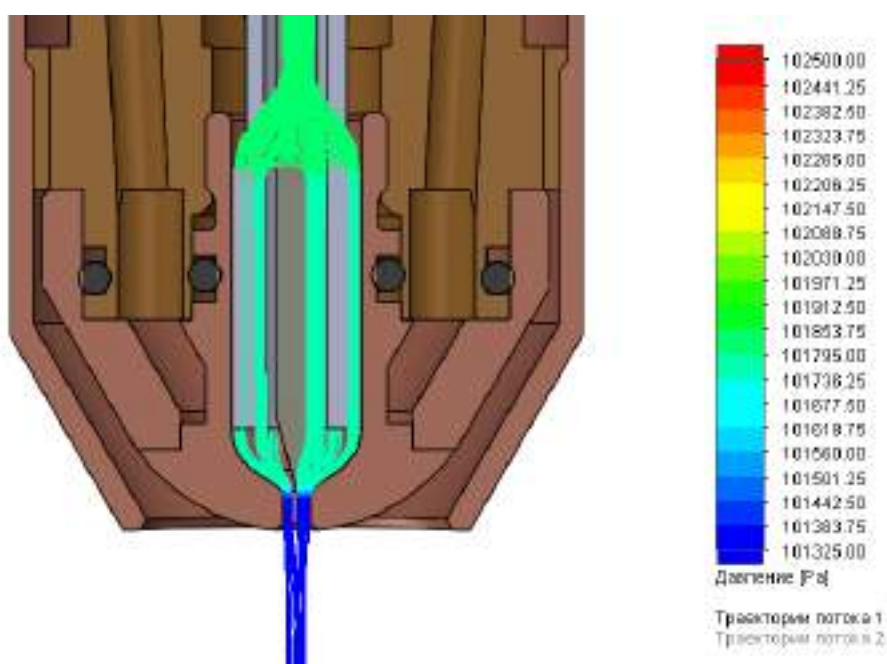


Рис. 3.3. Тиск і траєкторії проходження газів у контурі плазмоутворюючого газу плазмотрону.

Потік захисного газу (рис. 3.4, 3.5) на виході із сопла рухається з малою швидкістю, практично ламінарно, формуючи при цьому захисну область

достатнього розміру для надійного захисту рідкого та гарячого металу в зоні ведення процесу. Моделювання тиску свідчить про наявність у зоні наплавлення об'ємної зони з надлишковим тиском, що є необхідною умовою надійного захисту наплавленого металу.

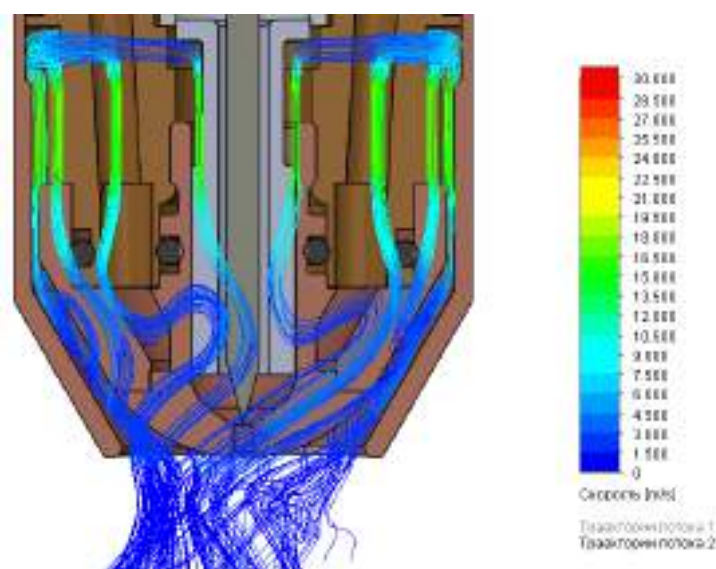


Рис. 3.4. Швидкість та траєкторії проходження газів у контурі захисного газу плазмотрону.

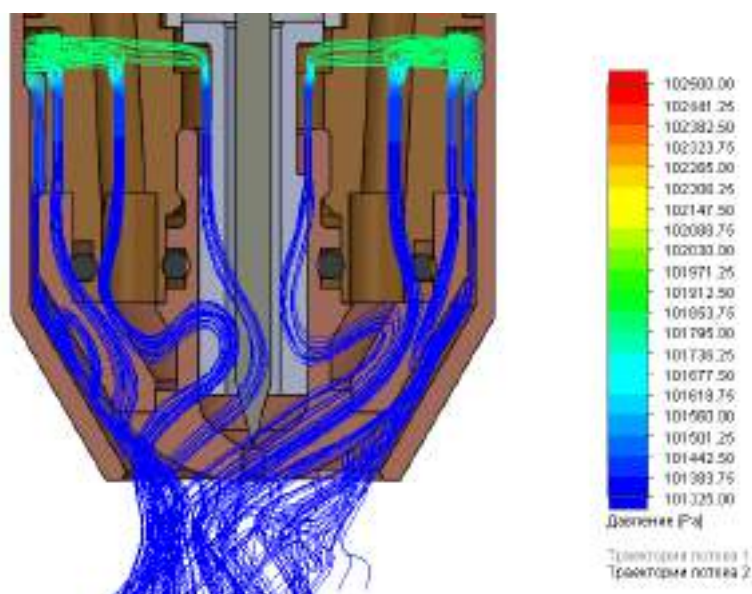


Рис. 3.5. Тиск і траєкторії проходження газів у контурі захисного газу плазмотрону.

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що допрацьований плазмотрон марки PD-174M придатний для відпрацювання технології плазмового адитивного наплавлення з присаджувальним дротом як початковий прототип.

3.2.2. Моделювання газодинаміки плазмотрона для адитивного виробництва з використанням порошку як присаджувального матеріалу.

На першому етапі проєктування за основу взято серійний плазмотрон зварювальної установки МПУ-4, описаний у п. 2.1 розділу 2, для якого був спроектований вузол введення порошку. Допрацьований плазмотрон показано на рис. 3.6.

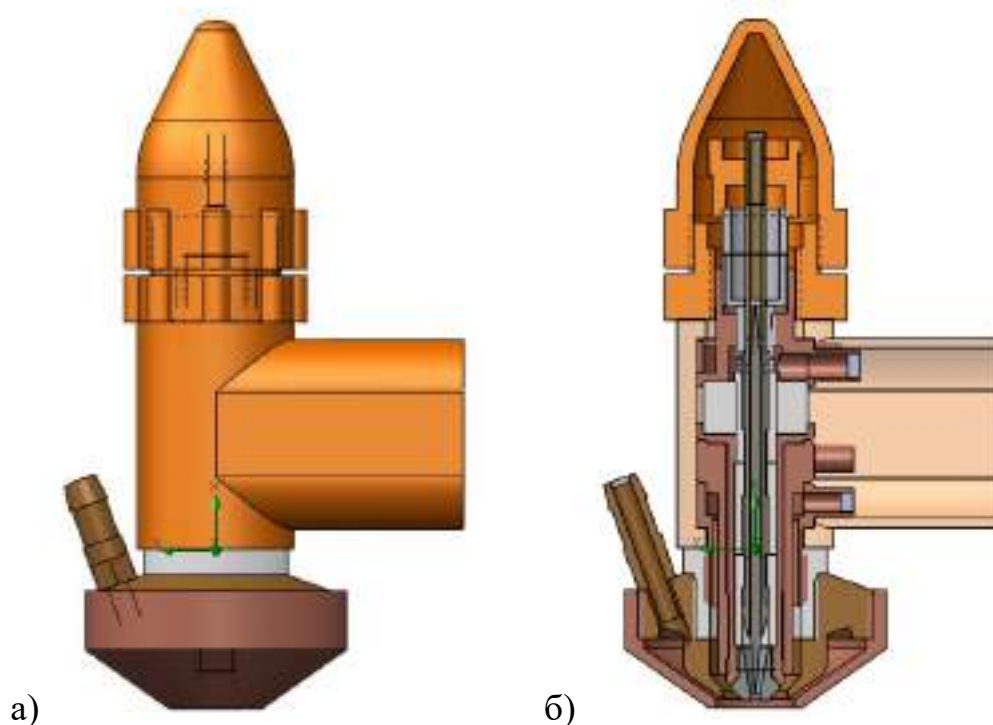


Рис. 3.6. Загальний вигляд (а) і поперечний переріз (б) плазмотрона МПУ-4 з вузлом для порошкового наплавлення.

У табл. 3.2 наведено технологічні параметри процесу наплавлення, використані при моделюванні роботи плазмотрона МПУ-4 з вузлом для порошкового наплавлення.

Моделювання газодинаміки показує задовільні результати для потоку плазмоутворюючого газу. На рис. 3.7 показані лінії потоку плазмоутворюючого газу. У зоні плазмоутворюючого каналу і на виході з плазмотрона потік ламінарний, максимальна швидкість потоку зафіксована в зоні стовпа плазми, що відповідає дійсності.

Таблиця 3.2. Технологічні параметри процесу наплавлення, використані при моделюванні роботи плазмотрона МПУ-4 з вузлом для порошкового наплавлення.

№	Назва параметра	Величина
1	Витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{пл}$), л/хв.	1
2	Витрати захисного газу (Q_3), л/хв.	10
3	Витрати транспортуючого газу ($Q_{пл}$), л/хв.	12
4	Витрати порошку ($Q_{пор}$), г/хв.	2,4
5	Витрати охолоджуючої рідини (на кожний контур) (Q_3), л/хв.	1,5
6	Теплова потужність, що виділяється стисненою дугою, Ватт	650
7	Розмір частинок порошку, мкм	100

Подальший аналіз моделі показав, що потік захисного газу нерівномірно охоплює стовп плазми (рис. 3.8). Причиною цього є нерівномірний розподіл у камері вирівнювання і вихід основного потоку транспортуючого газу з боку ввідного штуцера, а не рівномірно по всьому кільцевому зазору як передбачалося. Характер поширення потоків та швидкість транспортуючого газу показані на рис. 3.9.

На рис. 3.10 зображено вплив нерівномірного розподілу транспортуючого газу на потоки захисного та плазмоутворюючого газів. Нерівномірність виходу транспортуючого газу призводить до відхилення основної маси порошку від стовпа плазми, завдяки чому значна частина порошку не потрапляє у передбачувану зону плавлення, що знижує коефіцієнт його використання КВП (рис. 3.11).

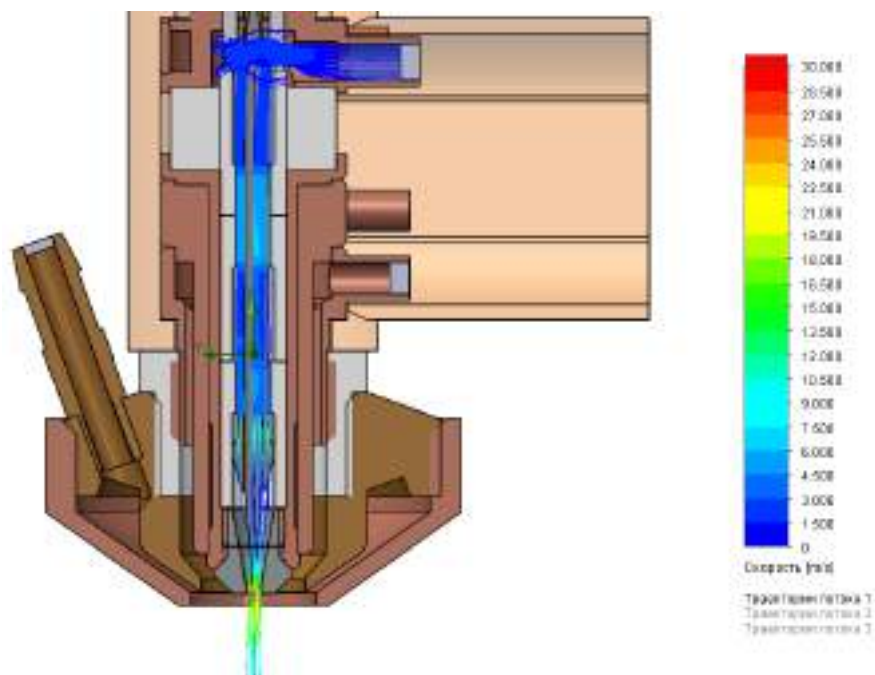
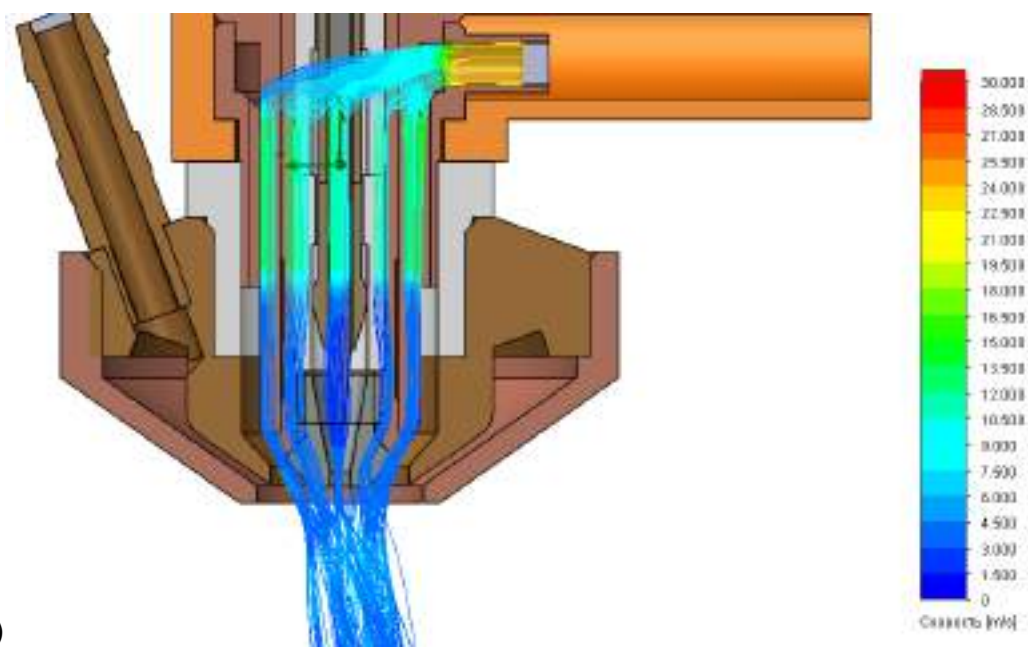


Рис. 3.7. Швидкість і напрямок потоку плазмоутворюючого газу.



a)

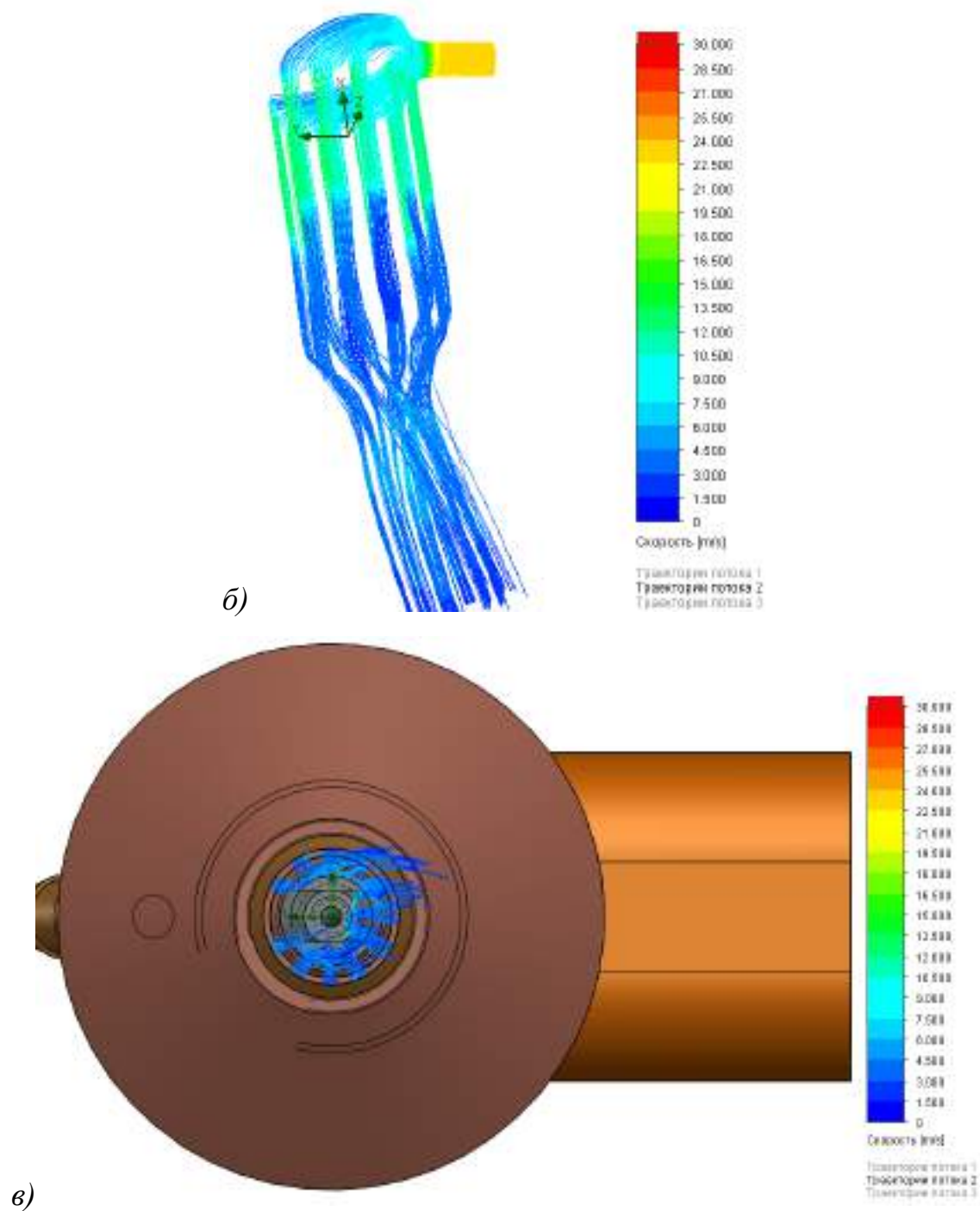
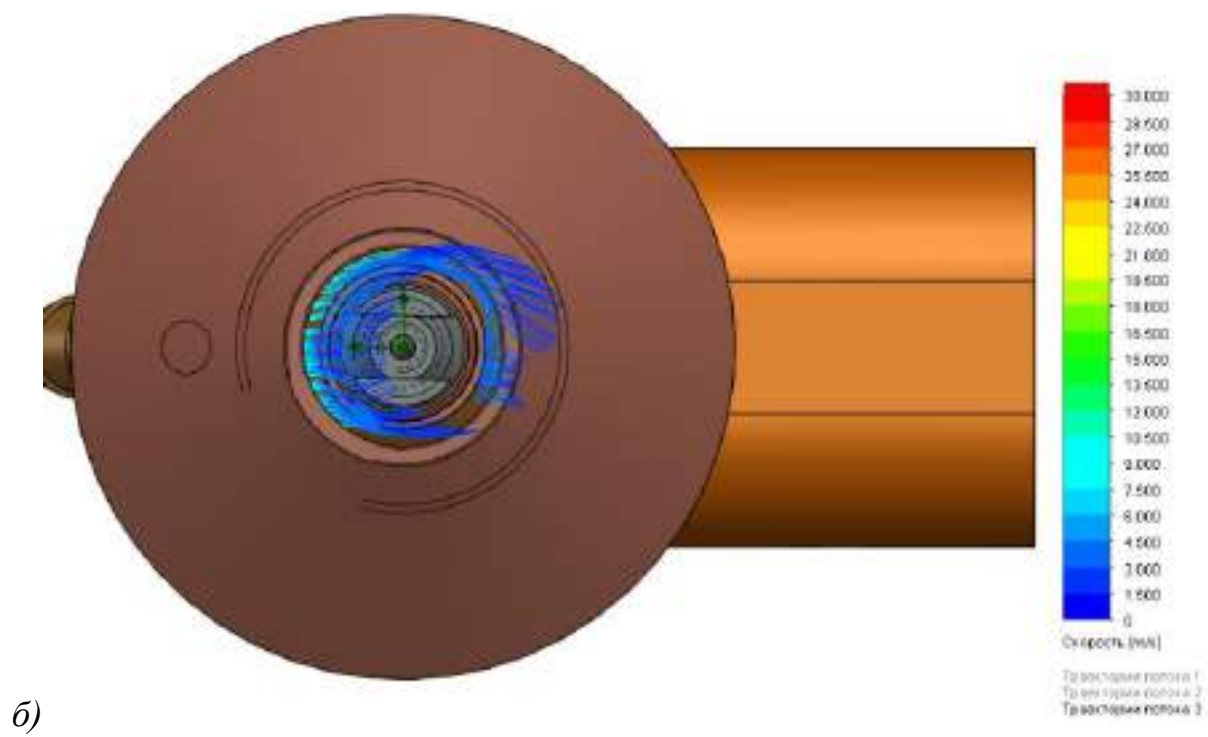
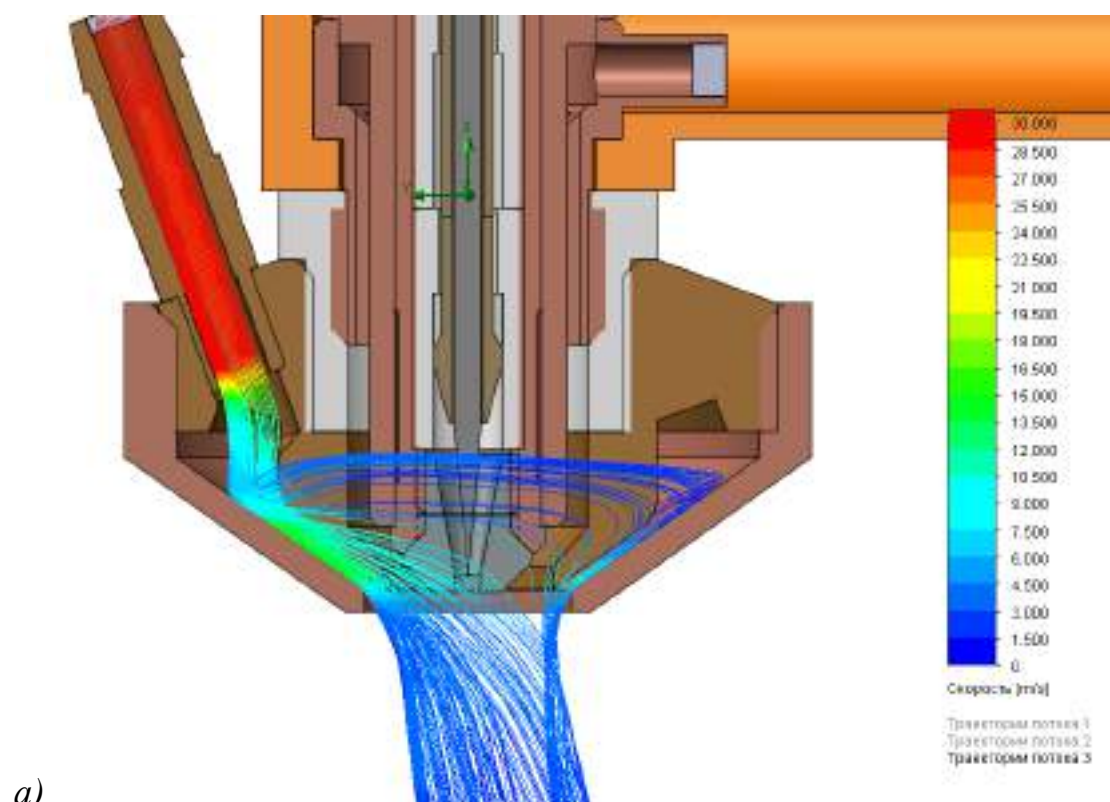


Рис. 3.8. Швидкість і напрямок потоку захисного газу.



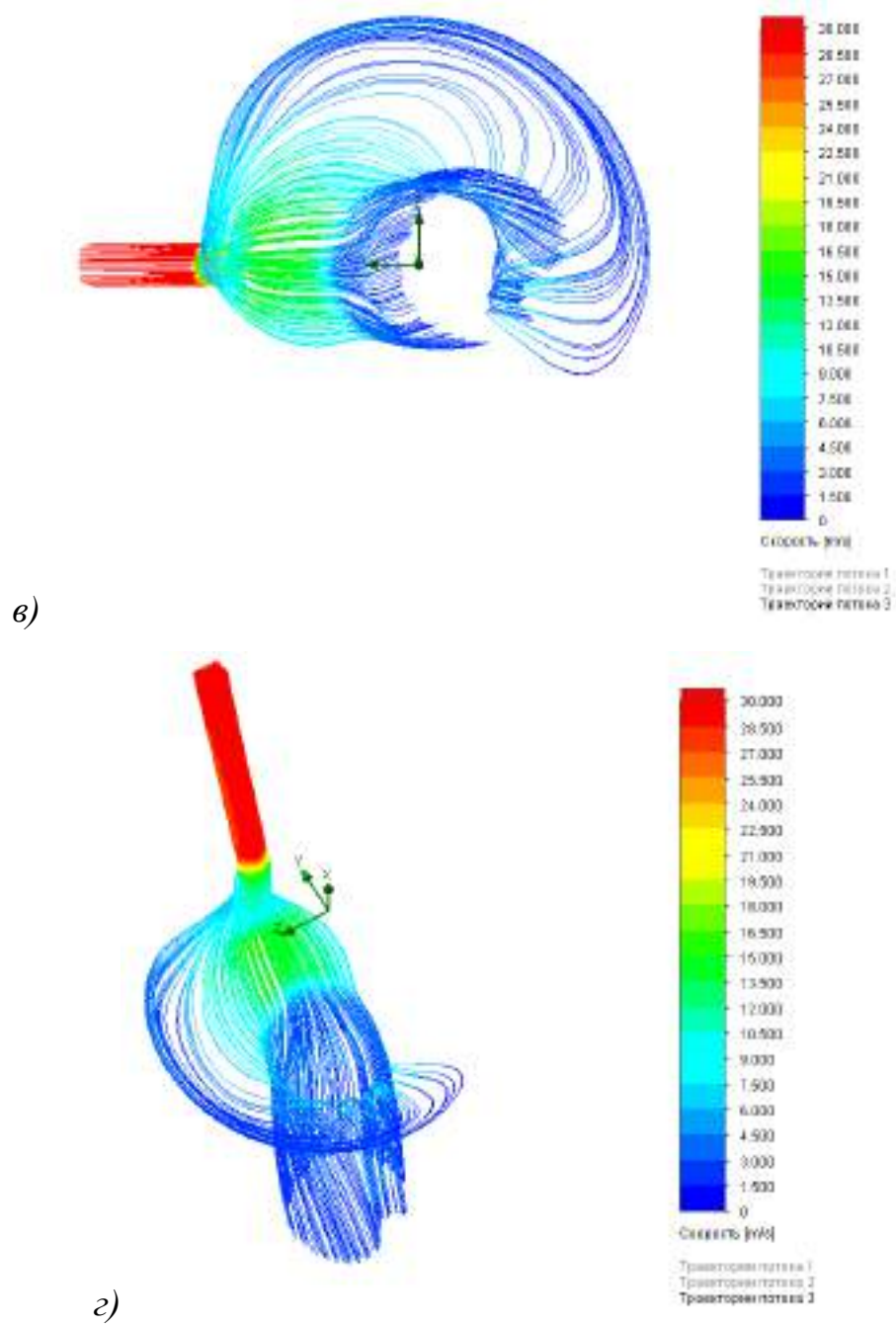


Рис. 3.9. Швидкість та напрямок потоку транспортуєчого газу.

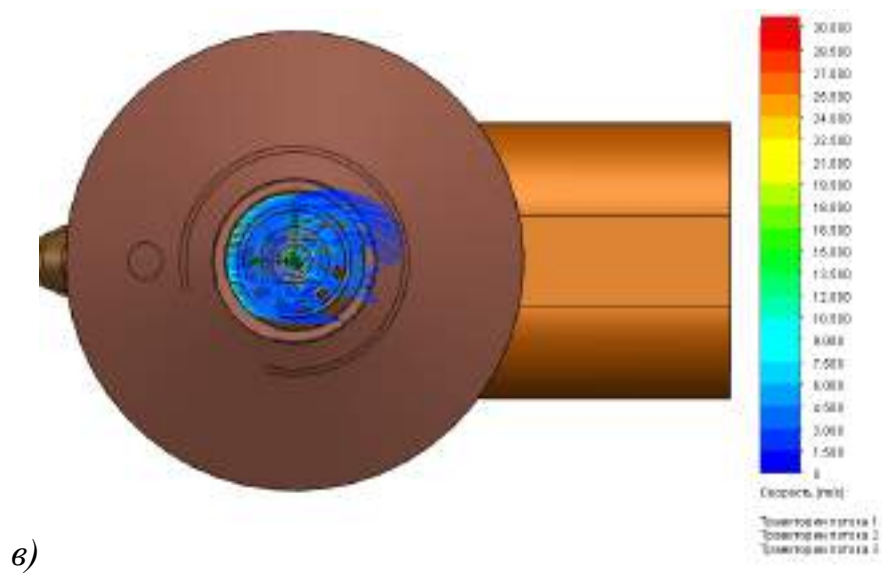
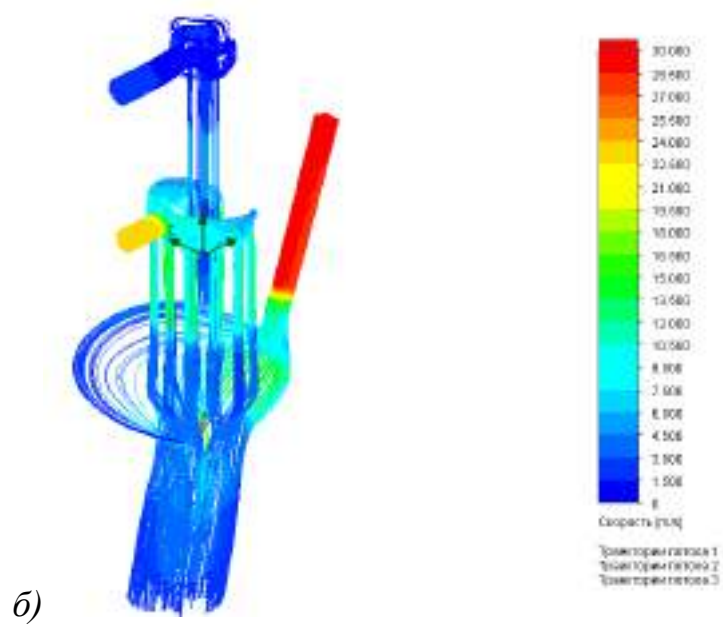
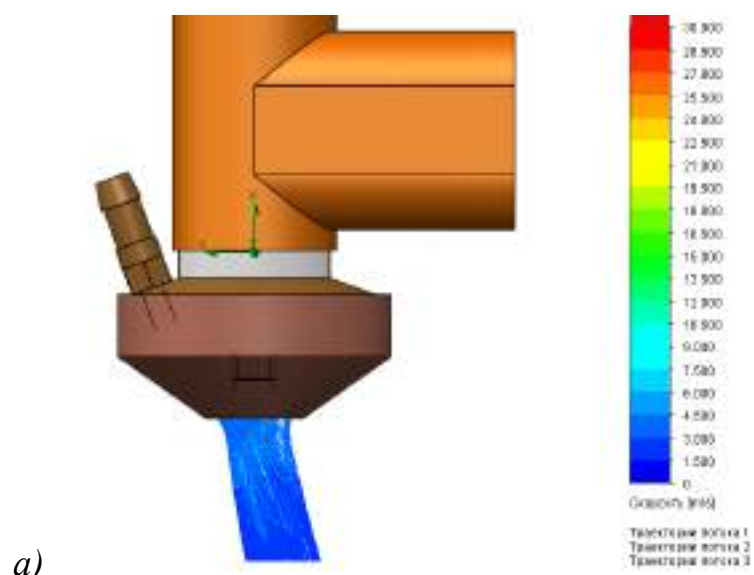


Рис. 3.10. Швидкість і напрямки трьох газових потоків.

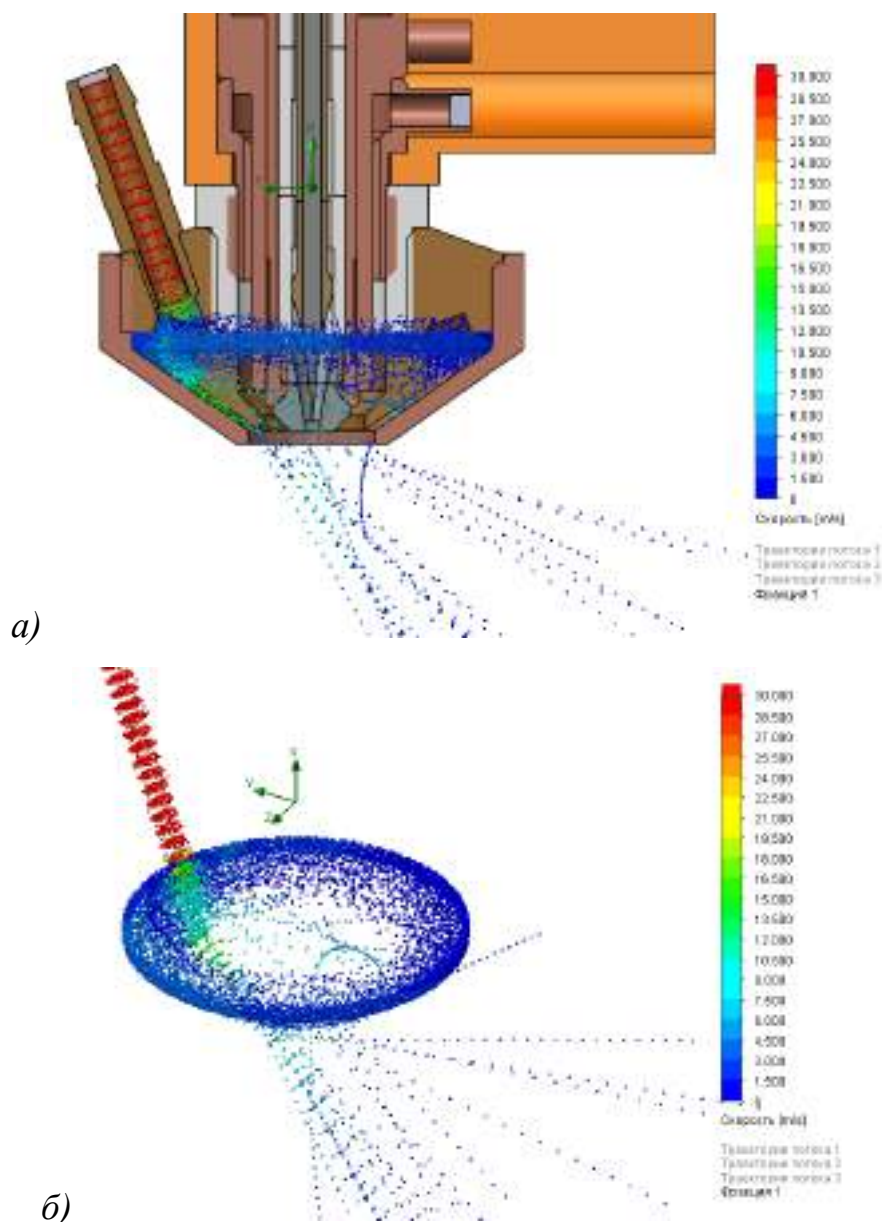


Рис. 3.11. Швидкість і напрямок руху частинок присаджувального порошку.

Моделювання впливу випромінювання дуги на нагрівання деталей плазмотрона показує помірний розігрів плазмоутворюючого сопла при проєктному струмовому навантаженні (рис. 3.12), що свідчить про ефективність роботи системи рідинного охолодження плазмотрона.

За результатами аналізу моделювання газодинаміки плазмотрона було прийнято рішення ввести зміни до конструкції вузла введення порошку. Доробка включає додавання другого каналу введення транспортуючого газу, розташування каналів введення під кутом до осі виходу газу з метою

рівномірного розподілу в камері вирівнювання, а також зменшення її поперечного перерізу, для повного заповнення газом.

У табл. 3.3 наведено технологічні параметри процесу наплавлення, використані при моделюванні роботи допрацьованого плазмотрона МПУ-4 з вузлом для порошкового наплавлення (друга ітерація).

Таблиця 3.3. Технологічні параметри процесу наплавлення, використані при моделюванні роботи допрацьованого плазмотрона МПУ-4 з вузлом для порошкового наплавлення.

№	Назва параметра	Величина
1	Витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{пл}$), л/хв.	1,5
2	Витрати захисного газу (Q_3), л/хв.	10
3	Витрати транспортуючого газу ($Q_{пл}$), л/хв.	12
4	Витрати порошку ($Q_{пор}$), г/хв.	2,4
5	Витрати охолоджуючої речовини (на кожний контур) (Q_3), л/хв.	1,5
6	Теплова потужність, що виділяється стисненою дугою, Ватт	650
7	Розмір частинок порошку, мкм	100

Зміни, внесені в конструкцію вузла введення порошку, позитивно позначилися на характері протікання потоків захисного та транспортуючого газів (рис. 3.13 та 3.14). Транспортуючий газ рівномірно розподіляється по камері вирівнювання і виходить з плазмотрона ламінарним злегка закрученим потоком.

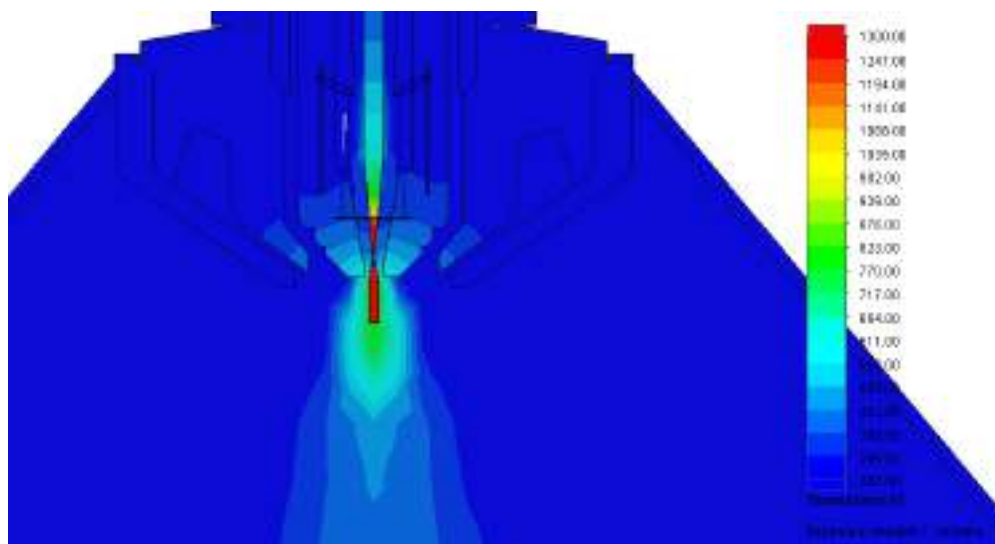
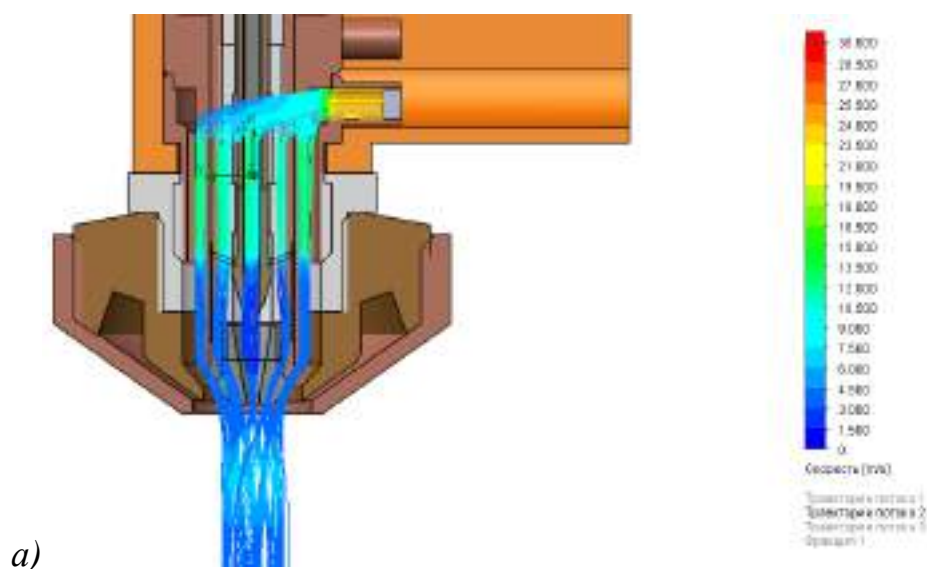
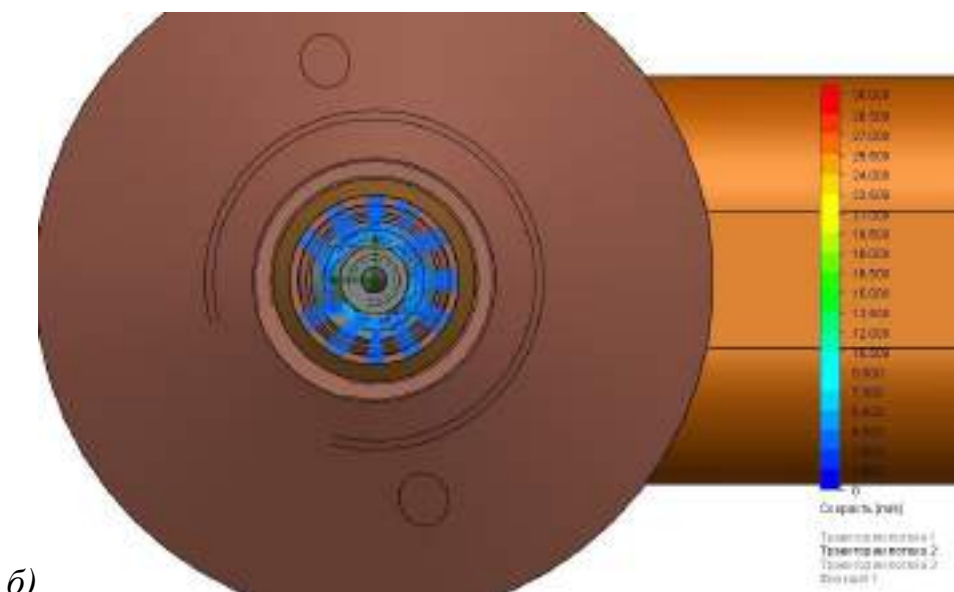


Рис. 3.12. Розподіл температури за тривалої роботи плазматрона.



а)



б)

Рис. 3.13. Швидкість і напрямлення потоку захисного газу.

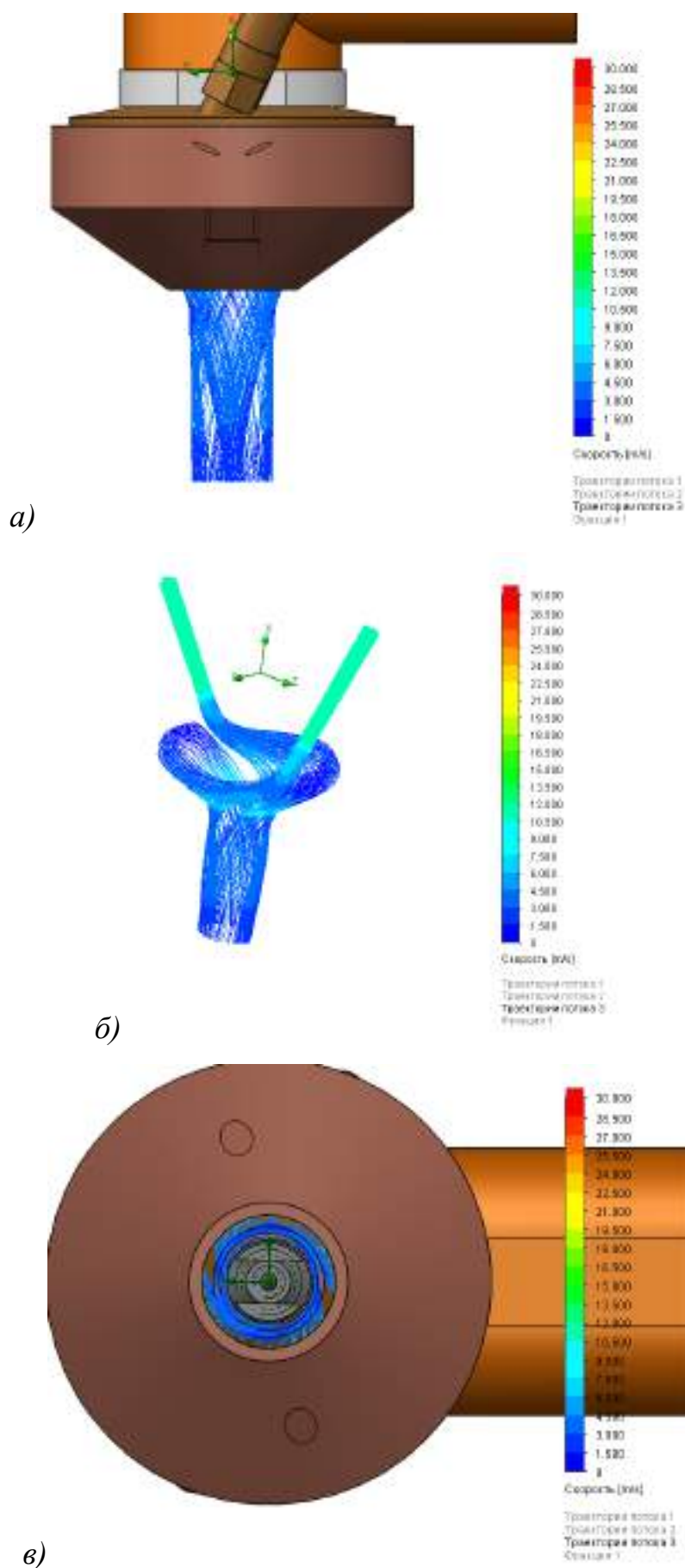


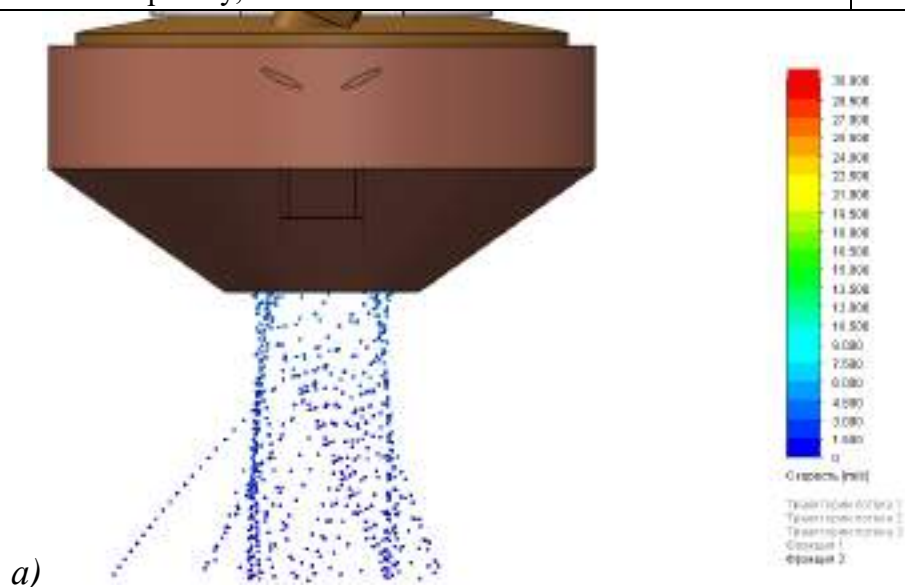
Рис. 3.14. Швидкість і напрямлення потоку транспортуючого газу.

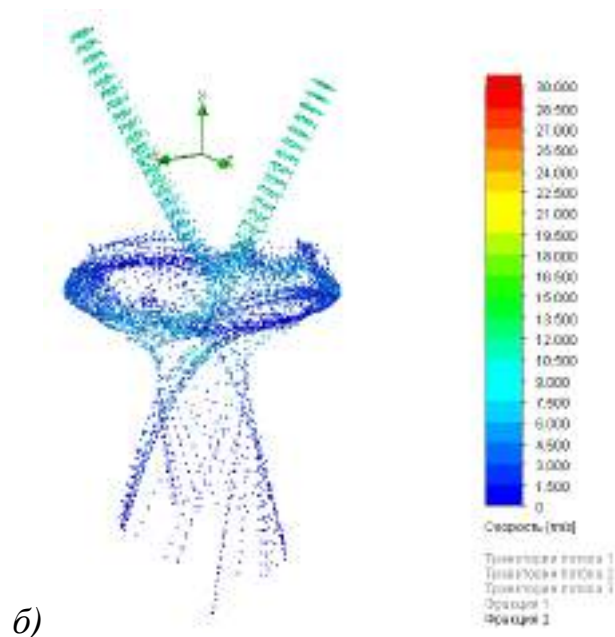
Потік частинок порошку став більш рівномірним (рис. 3.15). Але виявилася інша проблема – частинки порошку після виходу із сопла почали відхилятися від початкової траєкторії потоком захисного газу (не дивлячись на менші значення його витрат порівняно з транспортуючим) і частково не досягати зони плавлення.

З метою вирішення цієї проблеми, провели наступну ітерацію моделювання газодинаміки зі збільшенням витрат транспортуючого газу. Технологічні параметри процесу наплавлення, використані при моделюванні третьої ітерації, наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Технологічні параметри процесу наплавлення, використані при моделюванні роботи допрацьованого плазмотрона МПУ-4 з вузлом для порошкового наплавлення.

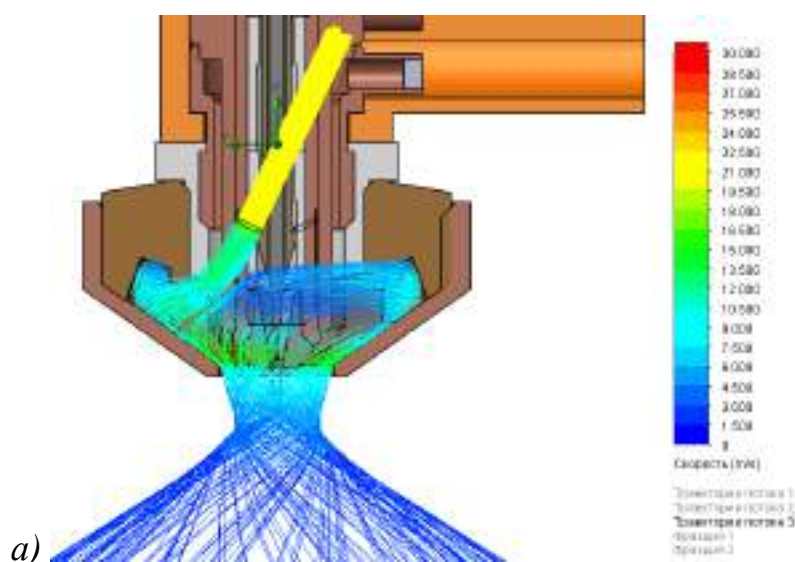
№	Назва параметра	Величина
1	Витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{пл}$), л/хв.	1,5
2	Витрати захисного газу (Q_3), л/хв.	10
3	Витрати транспортуючого газу ($Q_{пл}$), л/хв.	18
4	Витрати порошку ($Q_{пор}$), г/хв.	2,4
5	Витрати охолоджуючої речовини (на кожний контур) (Q_3), л/хв.	1,5
6	Теплова потужність, що виділяється стисненою дугою, Ватт	650
7	Розмір частинок порошку, мкм	100



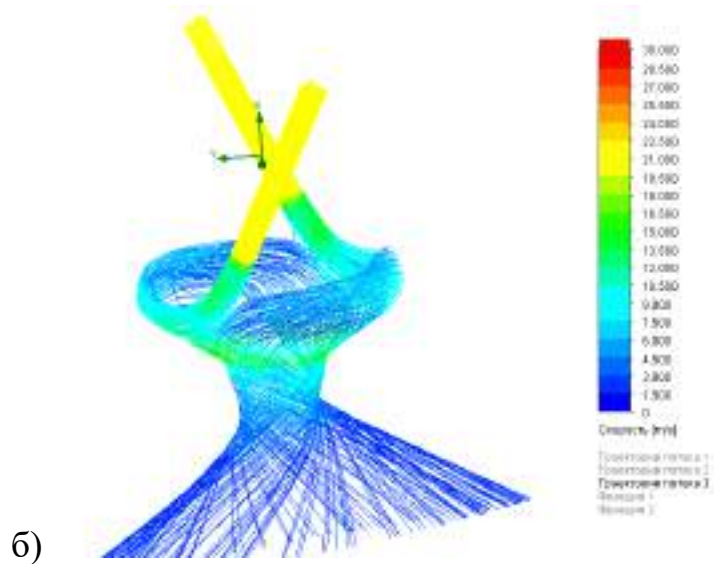


б)

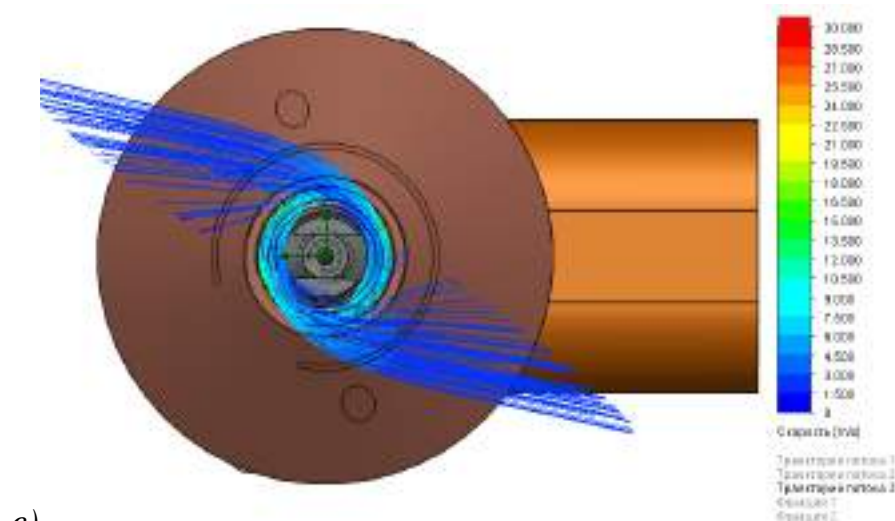
Рис. 3.15. Швидкість і направлення потоку частинок порошку.



а)



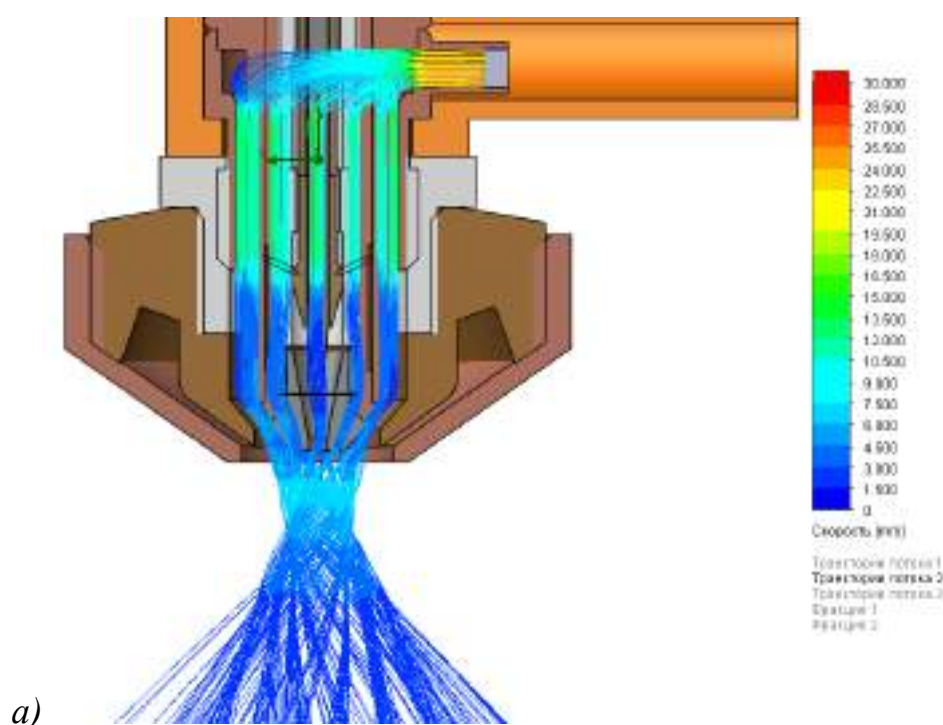
б)



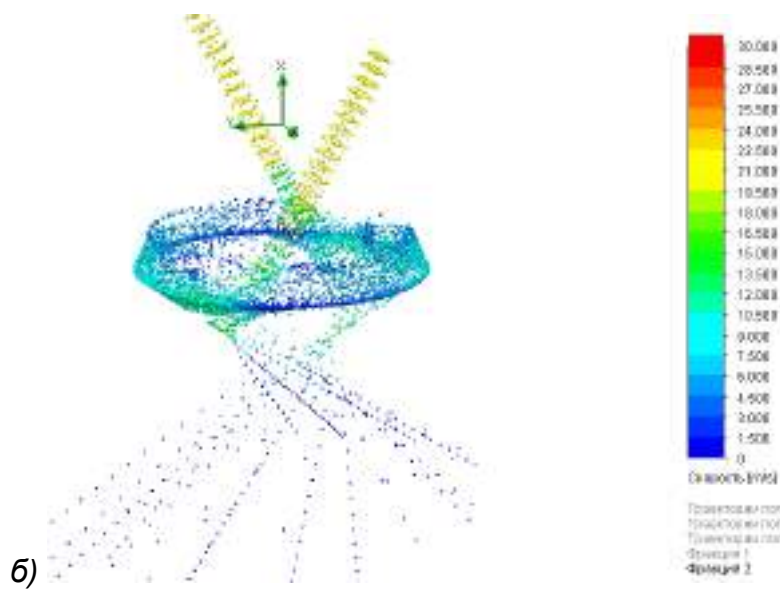
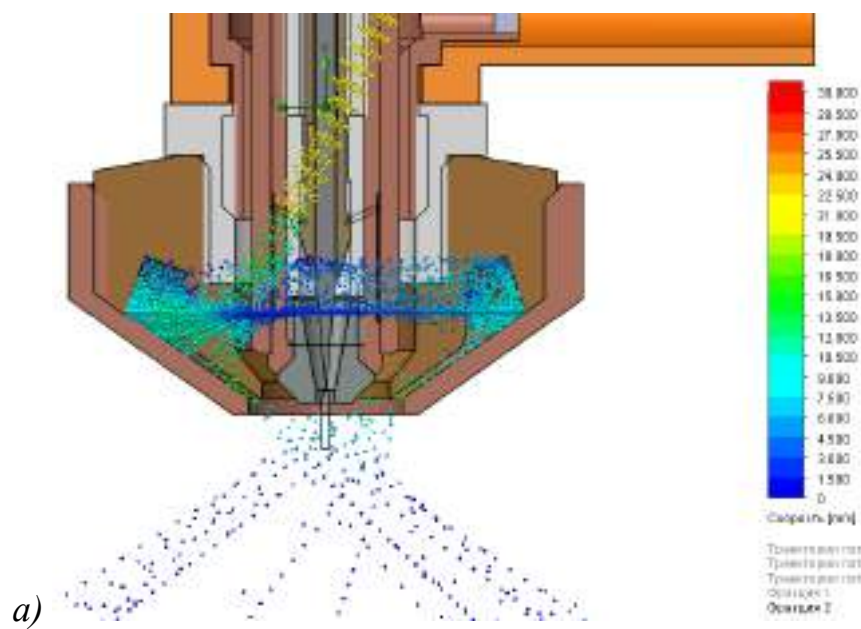
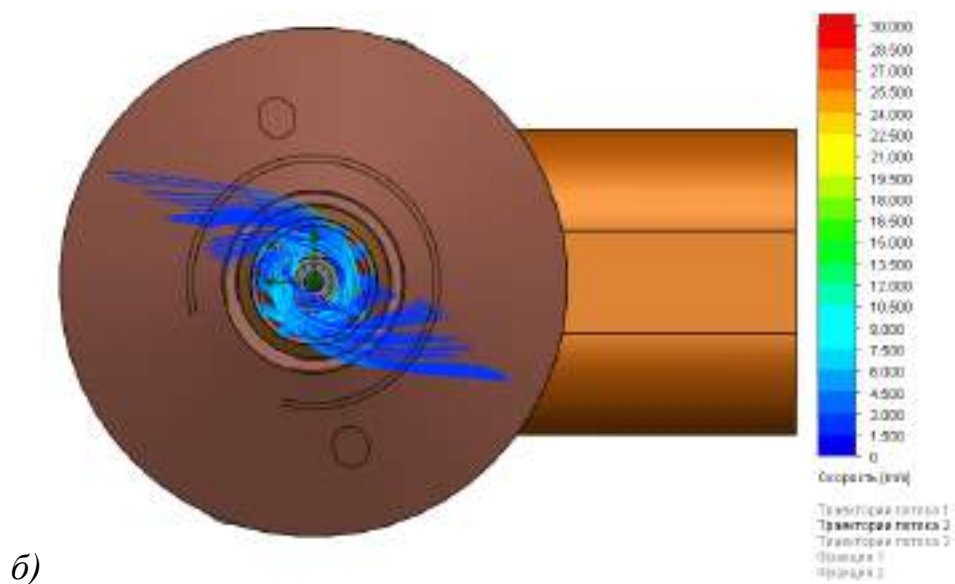
в)

Рис. 3.16. Швидкість і напрямлення потоку транспортуючого газу.

Результати моделювання показали, що збільшення витрат транспортуючого газу не сприяло напрямку частинок порошку в зону плавлення (рис. 3.16, 3.17), збільшення швидкості потоку транспортуючого газу призвело до посилення його закручування і до зростання відцентрових сил, що діють на газ і частинки порошку, що переносяться ним. Ці сили стимулювали різке розкриття потоку відразу після виходу із сопла і, відповідно, значного розльоту частинок порошку у напрямку перпендикулярному до осі стовпа дуги (рис. 3.18).



а)



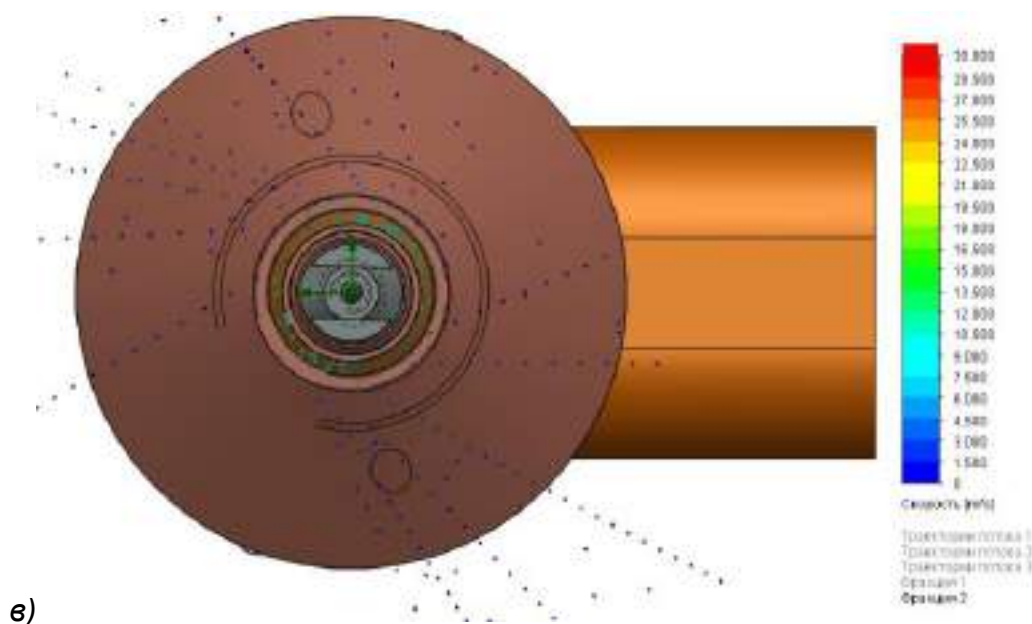


Рис. 3.18. Швидкість і направлення потоку частинок присаджувального матеріалу.

Після обробки результатів моделювання було вирішено змінити спосіб введення порошку в зону плавлення.

3.3. Комп'ютерне моделювання газодинаміки нового плазмотрона для плазмової адитивної технології, закономірностей розподілу та траєкторій руху частинок присаджувального порошку.

За результатами наведених вище досліджень було прийнято рішення спроектувати та виготовити новий плазмотрон для плазмового адитивного наплавлення (як із застосуванням порошку, так і присаджувального дроту). В якості прототипу використали конструкцію плазмотрона МПУ-4. На відміну від прототипу новий плазмотрон отримав продуктивнішу систему охолодження та можливість встановлення електродів більшого діаметру, що дозволило підвищити максимальне навантаження струму на 50%, тобто до 75 А. Також підвищено технологічність обслуговування плазмотрона.

Розрахунок контуру плазмоутворюючого газу нового плазмотрона для плазмової адитивної технології. Графічне зображення результатів моделювання

газодинаміки в контурі плазмоутворюючого газу плазмотрону для плазмової адитивної технології проілюстровано на рис. 3.19, 3.20. Отриманий розподіл швидкості показує, що плазмоутворюючий газ рухається ламінарно як у каналі сопла, так і на виході з нього, швидкість витікання газу дозволяє отримати стійкий і стабільний стовп плазми.

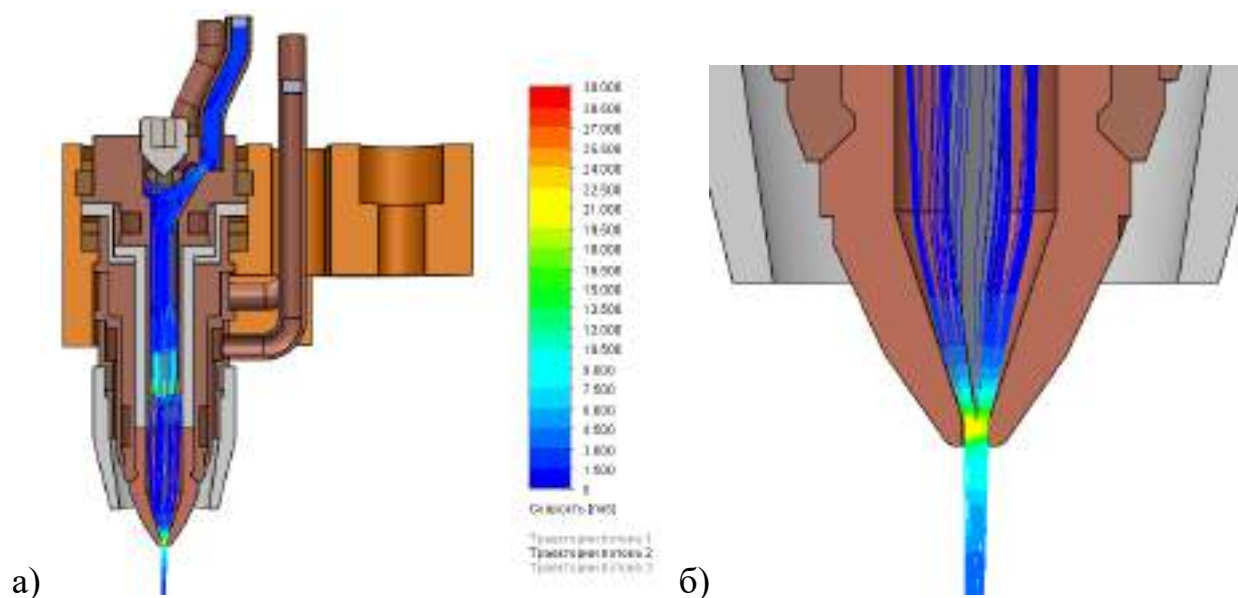


Рис. 3.19. Швидкість та траєкторія проходження газів в плазмоутворюючому контурі плазмотрона для адитивного плазмового наплавлення: *а)* – загальний вигляд; *б)* – розподілення в соплі.

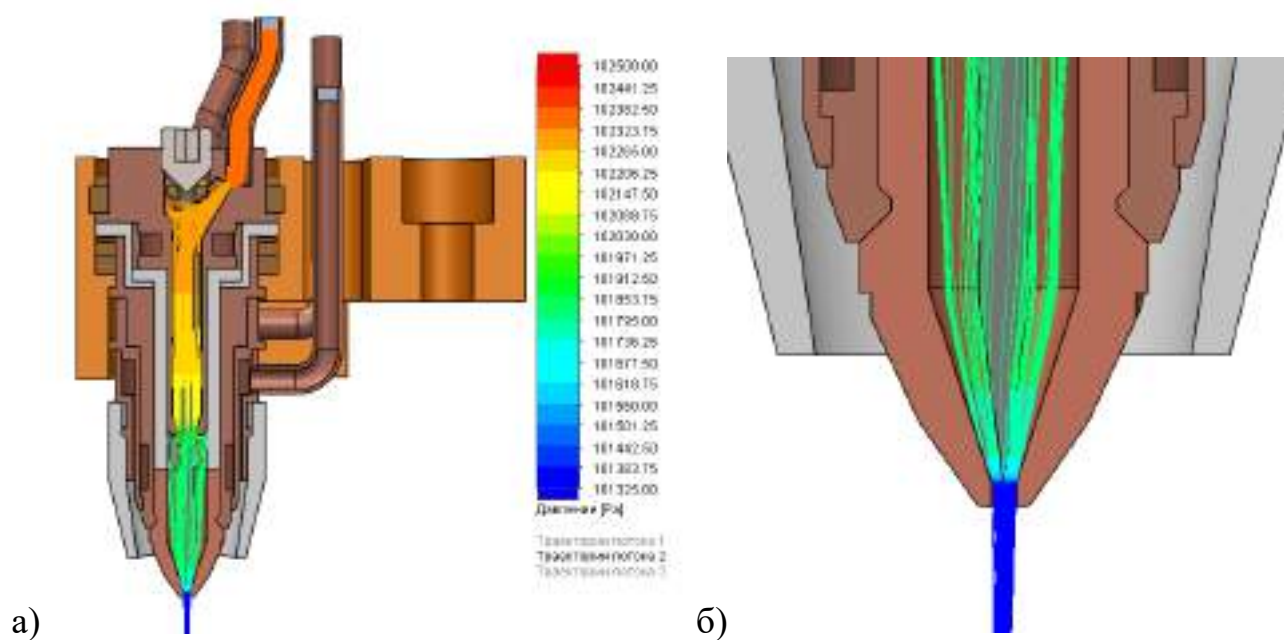
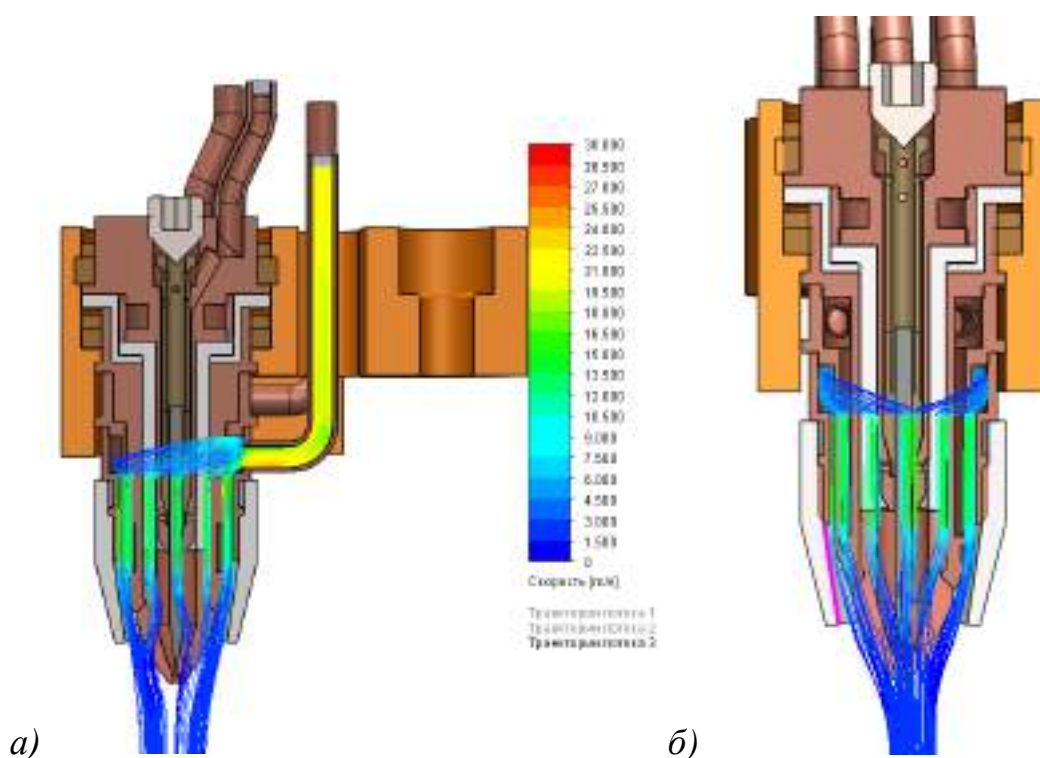


Рис. 3.20. Тиск і траєкторія проходження газів в плазмоутворюючому контурі плазмотрона для адитивного плазмового наплавлення: *а* – загальний вигляд; *б* – розподіл в соплі.

Розрахунок контуру захисного газу плазмотрона для адитивної плазмової технології. На відміну від контуру плазмоутворюючого газу, для контуру захисного газу ставиться протилежна умова – швидкість руху газу за зрізом сопла має бути мінімальною, щоб запобігти інжекції атмосферних газів у зону розплавлених металів. Проведене моделювання (рис. 3.21) підтверджує достовірність вибраних конструктивних параметрів. Моделювання тиску свідчить про наявність у зоні наплавлення об'ємної зони з надлишковим тиском, що також є необхідною умовою надійного захисту наплавленого металу.



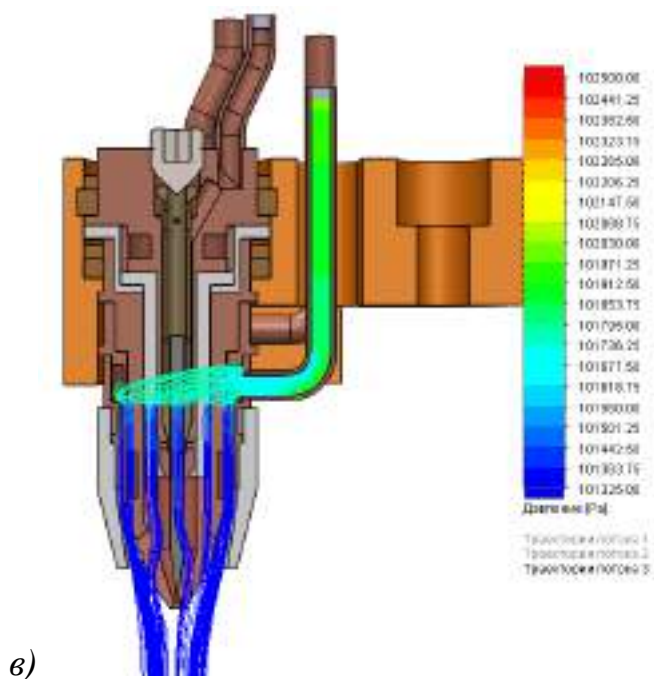


Рис. 3.21. Швидкість і траєкторія (а, б) та тиск і траєкторія (в) проходження газів в контурі захисного газу плазмотрона: а), в) – поздовжній розподіл; б) – поперечний розподіл в соплі.

З метою виключення або зменшення впливу цих негативних факторів опрацьовано ще одну схему введення порошку з використанням додаткового транспортуючого сопла, розташованого після плазмоутворюючого. Поперечний переріз плазмотрона з транспортуючим соплом показано на рис.3.22.

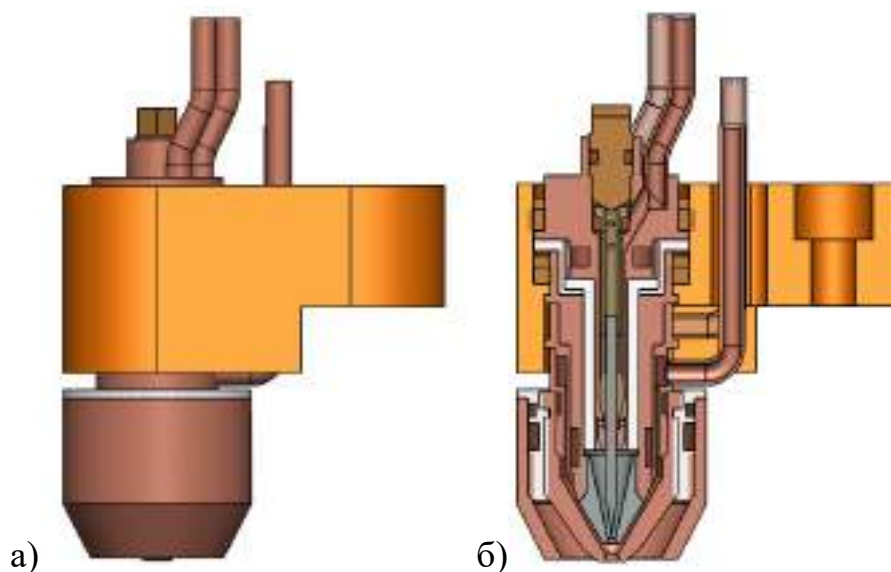


Рис. 3.22. Загальний вигляд (а) та поперечний переріз (б) плазмотрона для адитивного плазмового порошкового наплавлення з транспортуючим соплом.

Для даної конструкції плазмотрона була промодельована газодинаміка потоків плазмоутворюючого, транспортуючого та захисного газів, траєкторії руху частинок порошку в транспортуючому газі. Також промодельоване нагрівання деталей плазмотрону випромінюванням дуги при тривалій роботі з урахуванням рідинного охолодження. Технологічні параметри процесу, використані при моделюванні, наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6. Технологічні параметри процесу наплавлення використані при моделюванні роботи нового плазмотрону для плазмового порошкового наплавлення з додатковим транспортуючим соплом.

№	Назва параметра	Величина
1	Витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{пл}$), л/хв.	0,8
2	Витрати захисного газу ($Q_з$), л/хв.	8
3	Витрати транспортуючого газу (рівномірно розподілений по трьох каналах ($Q_{пл}$), л/хв.	1
4	Витрати порошку ($Q_{пор}$), г/хв.	3
5	Витрати охолоджуючої речовини (на кожний контур) ($Q_з$), л/хв.	2,0
6	Теплова потужність стисненої дуги, Ватт	800
7	Розмір частинок порошку, мкм	100

На рис. 3.23 показано відображення результатів моделювання газодинаміки потоку газів та наведено напрямок потоку частинок присаджувального порошку. При заданій витраті плазмоутворюючого газу потік ламінарний і спрямований по осі плазмотрона, що дозволить отримати стабільний стовп плазми під час роботи (рис. 3.23, а).

Потік транспортуючого газу у каналі транспортуючого сопла і на виході з нього ламінарний і розташовується концентрично навколо потоку плазмоутворюючого газу, що допоможе додатково сфокусувати і стабілізувати стовп плазми під час роботи (рис. 3.23, б).

Як видно, потік захисного газу (рис. 3.23, в) також ламінарний і рівномірно розподілений по всьому периметру захисного сопла, що свідчить про надійний захист зони наплавлення від впливу атмосферного повітря.

Розрахунок числа Рейнольдса. Число Рейнольдса розраховується за залежністю: $Re = \rho \cdot v \cdot D / \eta$, де ρ – густина, v – швидкість потоку аргонної плазми, D – гідравлічний діаметр сопла, η – динамічна в'язкість потоку аргонної плазми.

Для аргону: густина $\rho = 1,7839 \text{ кг/м}^3$; динамічна в'язкість при температурі 27°C (300 K) рахується $\eta = 22,7 \cdot 10^{-6}$ або $0,0000227 \text{ Па}\cdot\text{с}$; при температурі 1000°C (1273 K) $\eta = 61,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$, при температурі 2200 K $\eta = 85,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

В нашому випадку гідравлічний діаметр плазмоутворюючого сопла становив $D = 1,8 \text{ мм} = 0,0018 \text{ м}$. Швидкість потоку плазми при виході з сопла становила $v = 10\text{--}15 \text{ м/с}$. Тоді:

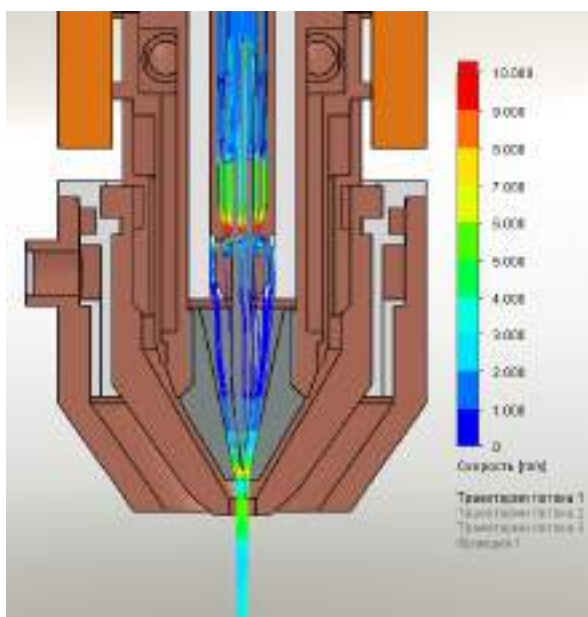
$$Re = \rho \cdot v \cdot D / \eta = 1,7839 \cdot (10 \dots 15) \cdot 0,0018 / 85,1 \cdot 10^{-6} = 377 \dots 566.$$

Критичне значення числа Рейнольдса $Re_{кр} = 2100 \dots 2300$. Оскільки в нашому випадку виконується умова $Re < Re_{кр}$, струмінь потоку аргонної плазми в нашому випадку є ламінарним.

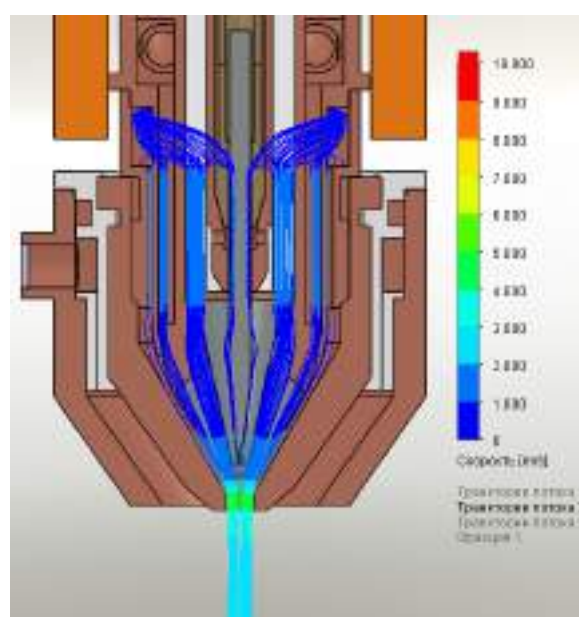
Розрахунок числа Рейнольдса являється додатковим теоретично-розрахунковим свідченням ламінарності газових потоків покращеної конструкції мікроплазмотрону.

За результати моделювання порошок рівномірно розподіляється по всьому зазору між транспортуючим і плазмоутворюючим соплами, в результаті чого з усіх боків потрапляє в струмінь плазми ще до виходу з каналу транспортуючого сопла і залишається в його межах після виходу на відстані до п'яти міліметрів від зрізу (рис. 3.23, д, е). На відстані понад п'ять міліметрів розкриття потоку порошку перевищує діаметр плазмового струменя.

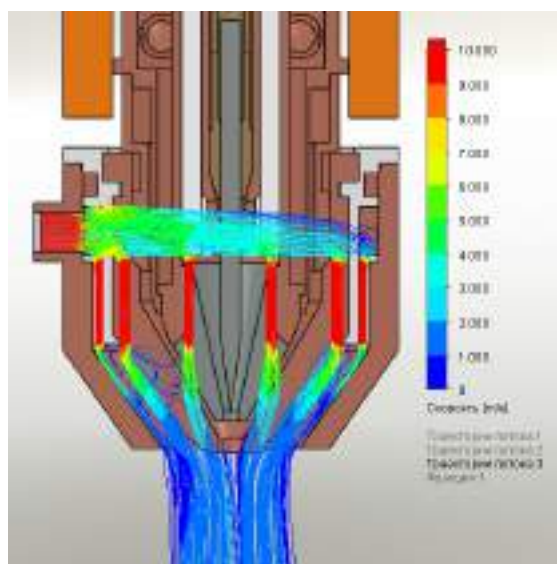
Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що для досягнення максимального коефіцієнта використання порошку відстань від зрізу сопла транспортуючого до поверхні виробу для зазначених у таблиці технологічних параметрів не повинна перевищувати 5 міліметрів.



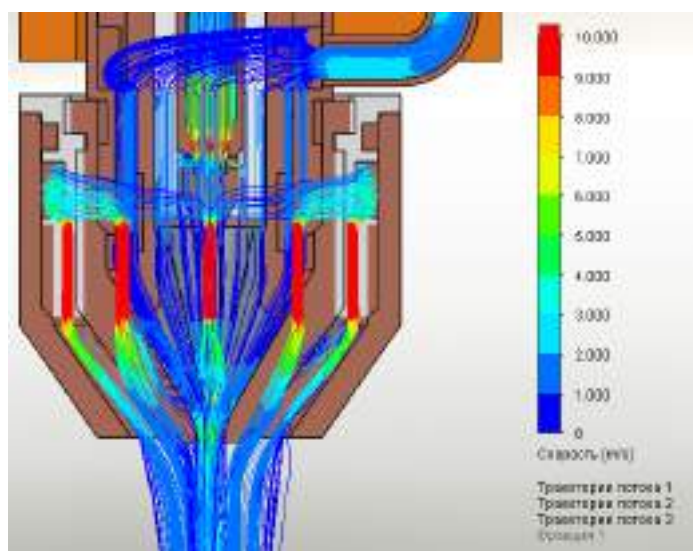
а)



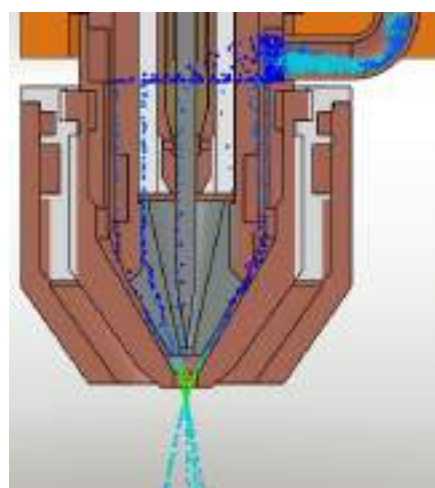
б)



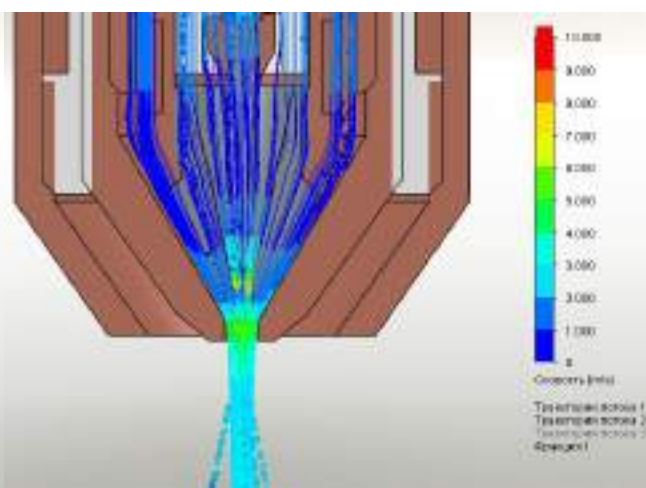
в)



г)



д)



е)

Рис. 3.23. Швидкість і напрямки потоків газу: *а)* – плазмоутворюючого; *б)* – транспортуючого; *в)* – захисного; *г)* – трьох газів. Швидкість і напрямки руху частинок присаджувального порошку (*д*) разом з транспортуючим газом (*е*).

Результати моделювання нагріву вузлів плазмотрона дугою при тривалій роботі показують допустимий рівень розігріву деталей при такому охолодженні та можливість безперебійної роботи плазмотрона протягом тривалого часу.

В результаті проведених досліджень для подальшого практичного відпрацювання технології плазмового адитивного порошкового наплавлення обрана конструкція плазмотрона з транспортуючим соплом відразу після плазмоутворюючого.

3.4. Технологічні дослідження формування просторових примітивів за допомогою процесів адитивного наплавлення.

Технологічні дослідження процесу адитивного наплавлення 3D об'єктів виконували мікроплазмовим і дуговим (MAG) методами. При цьому здійснювали пошарове (адитивне) наплавлення валиків металу на сталеву підкладку (перший валик) і один на одній (наступні валики) за допомогою відповідних джерел нагрівання – мікроплазмової дуги та дуги з плавким електродом (рис. 3.24). У разі застосування мікроплазмового методу адитивного наплавлення в якості присаджувального матеріалу використовували дріт або порошок.

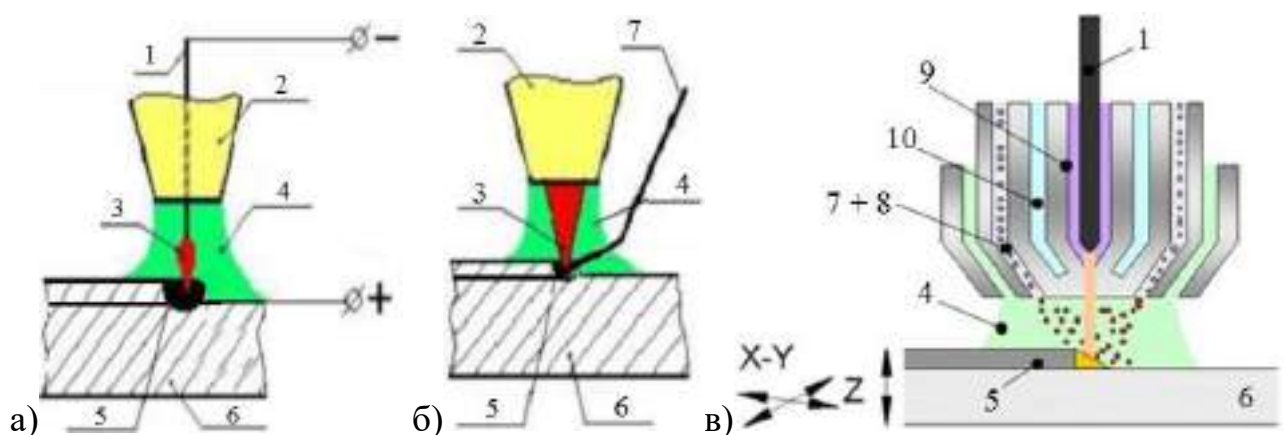


Рис. 3.24. Схеми процесів адитивного наплавлення: а) – MAG методом; б) – мікроплазмовим методом з використанням дроту; в) – мікроплазмовим методом з використанням порошку; 1 – електрод; 2 – пальник; 3 – дуга; 4 – захисний газ; 5 – наплавлений метал; 6 – підкладка; 7 – присаджувальний матеріал; 8 – транспортуючий газ; 9 – плазмоутворюючий газ; 10 – водоохолодження.

Адитивну електродугову технологію реалізували за допомогою MAG пальника (рис. 3.24,а), розрахованого на значне теплове навантаження з дротами малого діаметра (0,8 -1,2 мм), що дає можливість безперервного ведення процесу впродовж тривалого часу, необхідного для вирощування об'ємних виробів.

Механізм роботи мікроплазмової дуги полягає в наступному: між електродом і платформою у середовищі стисненого потоку плазмоутворюючого газу (аргону), що проходить крізь плазмоутворююче сопло, горить стиснена електрична дуга, завдяки чому утворюється потік іонізованої плазми, яка є концентрованим джерелом енергії для розплавлення металеві платформи і наплавлення порошку. Присаджувальний порошок подається окремим каналом (транспортувальне сопло) за допомогою транспортувального газу, завдяки чому на великій швидкості, направлений в зону горіння плазмової дуги, подається на розігріту платформу (або попередній наплавлений шар) і сплавляється з нею (рис. 3.24,в). У разі подачі присаджувального дроту він подається окремо від пальника спеціальним механізмом подачі (рис. 3.24,б). Для захисту зони сплавлення використовується додаткова подача захисного, інертного середовища (аргон), що підвищує якість наплавлення та знижує ризики неметалевих включень у наплавленому металі. Таким чином, шар за шаром відбувається 3D друк готового тривимірного виробу.

Оптимізовані технологічні режими адитивного електродугового (MAG) і мікроплазмового адитивного наплавлення, при яких формувалася «тонка стінка» та інші просторові примітиви, наведені у табл. 3.7. В якості критеріїв оптимізації використовували утворення якісного металургійного з'єднання шарів з підкладкою і одне з одним, а також утворення рівновісної структури

наплавлених шарів. При наплавленні пальник розташовували сторч до площини підкладки, тобто під кутом 90° . На обраних режимах за допомогою MAG процесу отримували стінку із середньою товщиною від 4,0...4,3 мм до 5,0 мм практично необмеженої висоти, за допомогою мікроплазмових процесів – стінки товщиною порядку 3,0 мм.

Для проведення порівняльних досліджень адитивної мікроплазмової та електродугової технології наплавлення застосовано стіл-маніпулятор, який забезпечує пошарове наплавлення зі швидкістю від 50 мм/хв до 60000 мм/хв, модернізовано зварювальний плазмотрон, який повинен забезпечувати: стабільне горіння чергової та основної дуги в робочому діапазоні струмів.

Таблиця 3.7. Параметри MAG-електродугового наплавлення при адитивному вирощуванні тривимірного виробу типу «тонка стінка».

Процес	Склад та витрати плазмоутворюючого / захисного газу, л/хв	Струм, А	Напруга, В	Швидкість переміщення пальника відносно поверхні наплавлення, м/хв	Присаджувальний матеріал	Діаметр дроту, мм / швидкість подачі, м/хв
MAG	82%Ar+18% CO ₂ , 20-30	140	16	0,5-0,6	Св-08Г2С (ER-70S-6)	1,2 / 1,5-2,0
Мікроплазма – дріт	Ar / Ar, 0,8-1,5 / 5-12	35	33	0,1-0,2	Св-08Г2С (ER-70S-6)	0,8 / 1,0-1,5
Мікроплазма – порошок	Ar / Ar, 0,8-1,5 / 5-12	25	30	0,5-0,6	Порошок HYF-103	- / витрати 2,0 г/с

Для проведення металографічного аналізу з вирощених зразків вирізали темплети та виготовляли мікрошліфи. Для визначення межі міцності, тимчасового опору руйнуванню, відносного подовження наплавленого металу при одновісному розтягуванні пошаровим адитивним нарощуванням виготовляли зразки типу стінка (пластина). Відповідні випробування проводити

на зразках, які вирізали з одержаної адитивним наплавленням пластини за схемою, представленою на рис.3.25.

Міцність наплавленого металу оцінювали за результатами випробування за умов одновісного розтягування трьох зразків. Випробування проводили за допомогою універсальної розривної сервогидравлічної системи MTS 810 з використанням стандартних зразків (табл. 3.8).

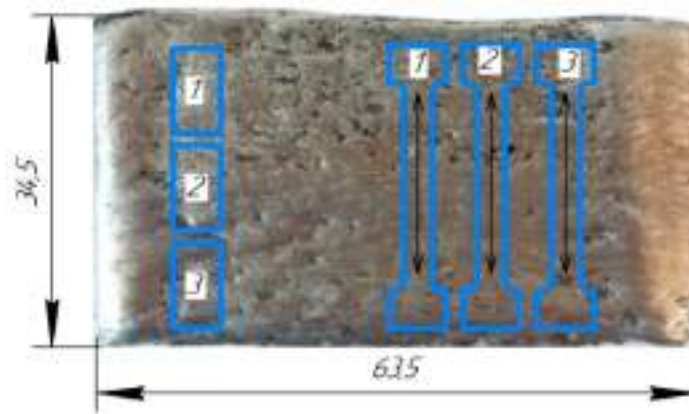


Рис. 3.25. Зовнішній вигляд пластини та схема вирізання зразків для механічних випробувань металу, отриманого пошаровим наплавленням порошку HYF-103 з використанням адитивної мікроплазмової технології.

Таблиця 3.8. Результати випробування зразків адитивного наплавлення стінок з порошку аустенітної нержавіючої сталі HYF-103 на статичне розтягування.

	Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3	Усереднене значення
Міцність на розрив, МПа	606	627	618	617

У ході експериментів за вимірюванням на макрошліфах площин переплавленого металу було виявлено, що для розплавлення дроту потрібна потужність мікроплазми від 500 до 900 Вт. Крім того, ще 50-150 Вт потрібно для розплавлення підкладки (або попереднього наплавленого шару) під час мікроплазмового наплавлення дроту. Це необхідно для створення міцного зв'язку між послідовними шарами. Стала безперервна форма наплавленого валика обривалася, коли швидкість переміщення робочого столу перевищувала

150 мм/хв навіть за максимально допустимої швидкості подачі дроту 1700 мм/хв. Присаджувальний порошок подавали з витратами від 2 до 7 г/хв. Для отримання найбільших значень КВП при наплавленні порошками експериментально підібрали відстань від торця плазмотрона до поверхні наплавлення. Вона становила 5-7 мм, що добре співпадає з розрахунковим значенням 5 мм. Аналогічна відстань потрібна при наплавленні дротом. Зменшення цієї відстані ускладнює подачу дроту через малий простір, у той час, як збільшення цього параметра спричиняє зниження щільності потужності мікроплазми, погіршення плавлення дроту і збільшення ЗТВ. Також при збільшенні даної дистанції погіршується газовий захист мікроплазмового струменя, що призводить до появи дефектів в наплавлених шарах.

Виявлено, що при витратах потоку плазмового газу 0,2-0,4 л/хв спостерегається стабільна дія мікроплазмової дуги (при менших витратах дуга пропадає, а при більших спостерігається розбризкування рідкої ванни). Для потоку захисного газу діапазон витрат обрано у межах 5-6 л/хв. При менших витратах відбувається окислення розплавленого металу зварювальної ванни, а при більших можливі турбулентності, що створюють підсмоктування повітря атмосфери. Відзначено, що значення витрат захисного газу нижче 5,0 л/хв дозволяють атмосферним газам вступати в реакцію з ванною розплавів, що призводить до нерегулярного осадження та розбризкування розплаву під час наплавлення, тоді як вищі за 6,0 л/хв значення призводять розширення ванни розплаву і до утворення нерегулярності наплавленої поверхні у вигляді поглиблень.

Встановлено, що використання більшої потужності мікроплазми та нижчої швидкості подачі дроту спричиняло надмірне плавлення підкладки та дроту й навіть їх часткове випаровування, викликаючи порушення форми та безперервності наплавленого валика й утворення порожнин (рис.3.26,а). Одночасне використання меншої потужності мікроплазмового струменя і вищої швидкості подачі дроту призводило до відсутності необхідного металургійного зв'язку між сталеною підкладкою і матеріалом дроту наплавлення.

Важливим параметром є розміщення дроту, яке визначається дистанцією подачі дроту, тобто відстанню між місцем торкання дротом наплавлюваної поверхні і віссю плазмотрона. Надто близьке розміщення дроту, при якому він потрапляє у плазмову дугу до контакту з наплавлюваною поверхнею, призводило до формування нелінійності валика наплавлення (рис.3.26,б).

Також існує баланс потужності мікроплазми та швидкості подачі дроту, необхідний для формування рівномірної форми валика наплавлення з гладкою поверхнею. Так, співвідношення струму 40-50 А і швидкості подачі дроту 0,5-1,5 м/хв забезпечує стабільність процесу пошарового вирощування об'ємних виробів з шириною стінки від 3 мм (рис.3.26,в).

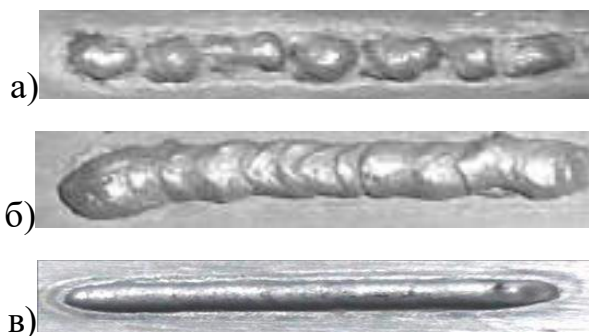


Рис. 3.26. Приклади формування різних типів валиків наплавлення, залежно від параметрів режиму мікроплазмової адитивної технології із застосуванням сталевих присаджувального дроту: а) – недостатня потужність мікроплазми та/або надмірна швидкість подачі дроту; б) – невірне розміщення дроту; в) – оптимізовані параметри режиму.

Залежно від діаметра присаджувального наплавочного дроту, змінюються розміри наплавочного валика. Так при вибраних технологічних параметрах мікроплазмового наплавлення дротом $\varnothing 1,2$ мм ширина цього валика й, відповідно, ширина тонкої стінки, становить в середньому 3,2...3,8 мм, а при застосуванні дроту $\varnothing 0,8$ мм – 2,7...3,1 мм. Продуктивність наплавлення при поведінці аналізованих експериментів знаходилась в інтервалі 0,04...0,2 кг/год.

На рис.3.27 показано, що багатошарове нарощування забезпечує гладку поверхню верхнього валика. Це також означає повне плавлення дроту під час наплавлення і міцне зчеплення між проміжними шарами. Зразки були випробувані за допомогою проникнення барвника, і було підтверджено відсутність в них таких дефектів, як тріщини, пори і включення на поверхні.



Рис. 3.27. Візуалізація адитивного процесу виготовлення тривимірної стінки товщиною 3 мм мікроплазмовим наплавленням присаджувальним сталевим дротом марки Св-08Г2С.

Для встановлення можливостей процесів адитивного мікроплазмового наплавлення порошками і дротами, а також порівняння їх з можливостями наплавлення WAAM з плавким дротом, провели низку досліджень із друку примітиву типу «тонка стінка». Окрім просторового примітиву типу «тонка стінка» (або «паралелепіпед») було виготовлено низку інших об'єктів, зокрема кільце, квадрат, трикутник, звичайний та зворотній конуси тощо. Крім того було виготовлено більш складні об'єкти, зокрема S-подібну стінку (рис. 3.28,а). Для порівняння методом адитивного MAG наплавлення було надруковано стакан (рис. 3.28,б). Останній проточили на токарному верстаті для визначення розміру припуску на чистову механічну обробку та перевірки суцільності наплавленого металу. Було встановлено, що наплавлений мікроплазмовим способом метал є суцільним, у той час, як у напвленому MAG способом металі наявні окремі

пори. Припуск обробки на сторону у випадку MAG наплавлення становить до 1,0 мм.



Рис. 3.28. Виготовлена адитивним мікроплазмовим наплавленням S-подібна стінка (а) із застосуванням порошку HYF-103 і виготовлений адитивним MAG наплавленням стакан (б) із застосуванням дроту Св-08Г2С з подальшою токарною обробкою.

В ході проведення порівняльних технологічних досліджень з мікроплазмового і MAG наплавлення у тому числі вивчали особливості зміни напружено-деформованого стану наплавленого виробу. Результати цього дослідження для випадку виготовлення об'єкту типу «стакан» було виявлено наступні явища:

- 1) Пластина, на яку наплавляється виріб, значно деформується по вертикальній осі. Для уникнення такого ефекту було прийнято рішення використовувати наплавлюване оснащення, яке втримуватиме і зберігатиме плоску геометрію пластини.
- 2) Виріб циліндричної форми схильний до радіального зміщення, за 20 наплавлених шарів виріб зменшився в діаметрі майже на 1 мм. Для запобігання

такої деформації було зроблено висновок, що потрібно компенсувати деформацію поступовим збільшенням діаметру в процесі наплавлення деталі.

На підставі дослідження особливостей формування вказаних примітивів було визначено характерні недоліки формування металевих об'єктів адитивним наплавленням. Зокрема, при формуванні кутів швидкість наплавлення є нерівномірною, що призводить до збільшення в цій зоні кількості наплавленого металу і перегріву матеріалу об'єкту, що формується. Усунення цього недоліку потребує створення відповідної керуючої програми і системи моніторингу. Крім того, в кутах і на перетинах стінок виникають збурення у плазмоутворюючому і захисному газових потоках. Для розв'язання такої проблеми необхідно дослідити особливості газодинаміки мікроплазмотрону і запропонувати нову конструкцію, оптимізовану за критерієм ламінарної течії газових потоків.

3.5. Металографічні дослідження результатів виготовлення металевих просторових примітивів методом адитивного наплавлення.

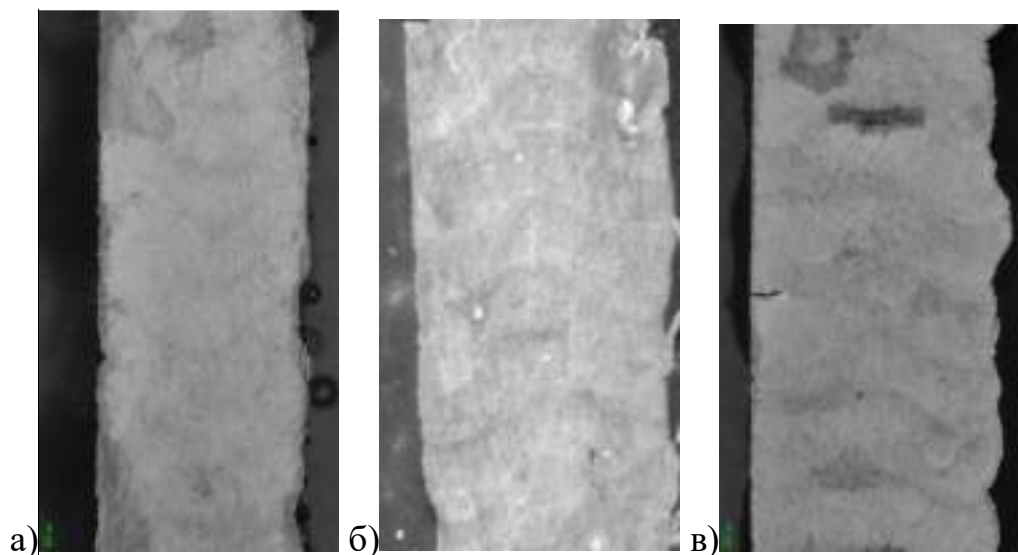
За результатами проведення технологічних досліджень встановили, що послідовне наплавлення металу проявляється в утворенні рельєфу на бічній поверхні зразка. Спостерігаються напливи металу, які є чергуванням виступів і впадин, викликані очевидно частковим стіканням рідкого металу по бічній поверхні. У разі застосування дроту напливи металу є дещо більшими порівняно із застосуванням порошку. Для аналізу структурних особливостей багат шарового наплавлення застосували основні методи металографічного аналізу, в першу чергу оптичну і електронну мікроскопію та вимірювання мікротвердості. У тому числі вимірювали розміри зерен (дендритів), за якими визначали коефіцієнт α форми зерна, як відношення його довжини до ширини $\alpha = l/h$.

Метод мікроплазмового наплавлення присаджувальним порошком.

Для проведення досліджень макро та мікроструктури наплавлених виробів наплавляли примітиви типу «тонка стінка».

При адитивній технології відбувалося повне розплавлення порошку. Структура металу характеризувалася явно вираженою шаруватістю, товщина наплавленого шару становила 650 мкм. Наплавлення здійснювалося в кілька проходів із послідовним нанесенням шарів металу – по одному за кожний прохід. Зони сплавлення між шарами мали однорідну структуру.

З отриманих стінок робили поперечні макрошліфи, за якими досліджували схильність до утворення таких дефектів, як тріщини і внутрішні пори (рис. 3.29). В усіх досліджених випадках, виключаючи наплавлення порошком EuTroLoy16316, структури одержаних зразків мали суцільний регулярний характер. Схильності до утворення внутрішніх пор і тріщин виявлено не було. У разі друку стінки порошком EuTroLoy16316 було виявлено окремі внутрішні та зовнішні несплавлення, які розташовувалися між шарами, що наплавляли (рис. 3.29,в). З урахуванням того, що режим наплавлення було обрано однаковим в усіх випадках, можна зробити висновок про вплив матеріалу на одержуваний результат. Вірогідно, що через більшу температуру плавлення і меншу теплопровідність сплав EuTroLoy16316 потребує підвищення потужності теплового джерела наплавлення.



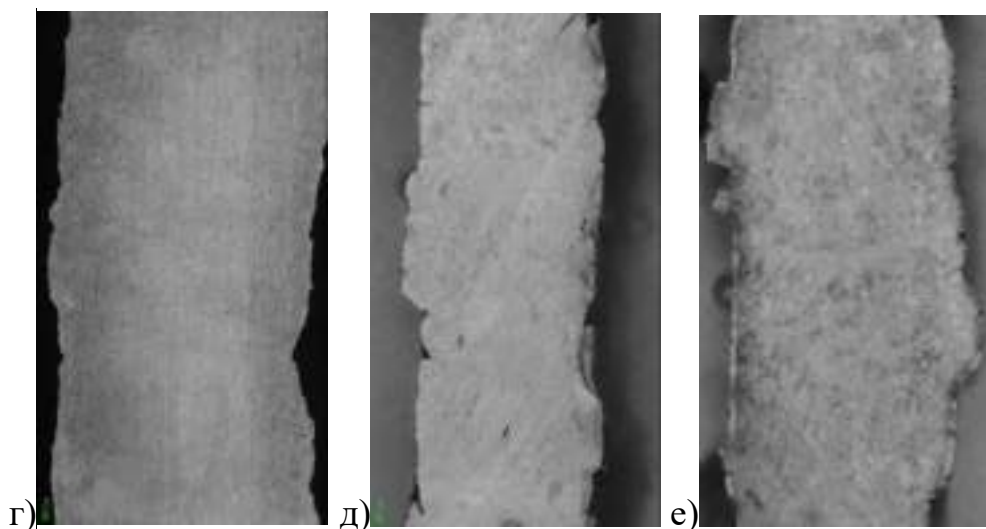


Рис. 3.29. Структури примітиву типу «тонка стінка», надруковані адитивним мікроплазмовим наплавленням порошками: а) – сталі 316L (верх стінки); б) – сталі 316L (низ стінки); в) – EuTroLoy16316; г) – HYF-103; д) – ПЖ-1 (верх стінки); е) – ПЖ-1 (низ стінки).

Методами електронної мікроскопії встановлено, що структура металу зразка є дендритною, містить як відносно великі зерна, так і дрібні. Великі та дрібні дендрити утворюють колонії, розорієнтовані одна відносно одної (рис.3.30).

Формування кристалів при послідовному наплавленні шарів металу у верхній та нижній частинах зразка було різним та визначалося нерівновісними умовами кристалізації. У нижній частині наплавленого металу тепловідведення здійснювалося через підкладку основи, тоді як у верхній частині зразка – переважно внаслідок теплового випромінювання і тепловідведення у нижні наплавлені шари. Це зумовило повільне охолодження металу у верхній частині зразка і, отже, призвело до значного росту зерен.

У поздовжньому напрямку дендрити утворюють протяжні гілки кристалів, орієнтовані переважно у напрямку тепловідведення та об'єднані в колонії. Аналіз мікроструктури зразка, вирізаного в нижній частині, показав, що ріст кристалів відбувається в одному напрямку (рис.3.30,а). Дендрити складаються з блоків зерен з подібною кристалічною орієнтацією, межі яких проявилися в результаті

травлення. Порівняння структури металу зразків, вирізаних у поздовжньому напрямку у верхній та нижній частинах зразка, вказує на різний характер кристалізації у міру формування деталі знизу вгору (рис.3.30).

Мікроаналіз на різних окремих ділянках структури показав, що наплавлений метал має склад, близький до складу порошку, що наплавляється.

Проведені дослідження механічних властивостей (табл. 3.8, 3.9) дозволили зробити висновок, що наплавлений адитивною технологією метал забезпечує високу міцність, що досягає понад 600 МПа.

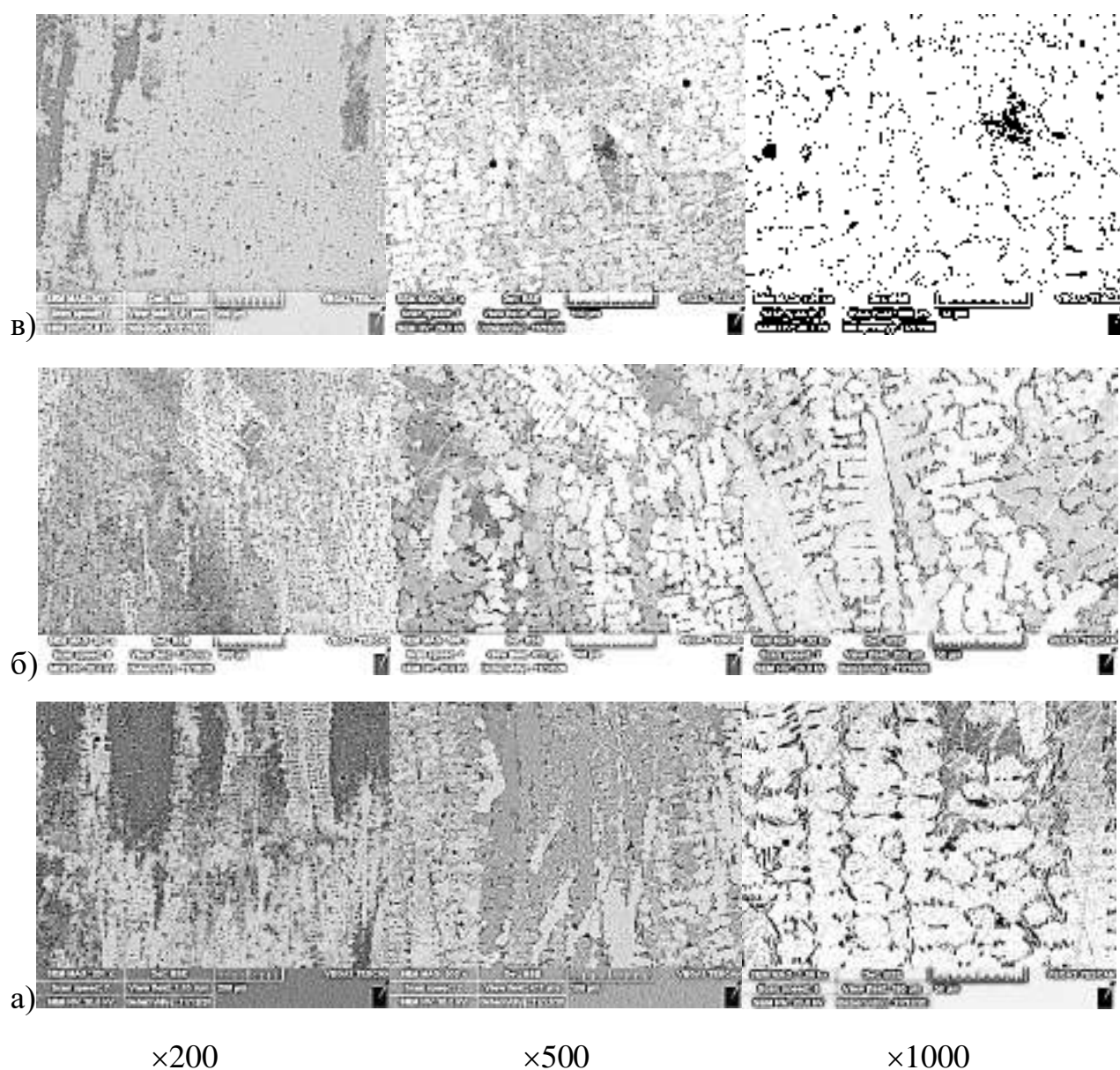


Рис. 3.30. Мікроструктура металу, отриманого пошаровим наплавленням порошку HYF-103 з використанням адитивної технології: а) – низ наплавленого зразка; б) – середина наплавленого зразка; в) – верх наплавленого зразка.

Таблиця 3.9. Властивості наплавленого металу HYF-103, отриманого пошаровим адитивним нарощуванням.

Номер зразка	F_o	L_o	L_k	σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ , %
1	7,15	20,02	20,49	606	474	3,164856
2	7,16	19,78	20,78	627	510	5,055612
3	7,15	22,14	22,94	618	462	3,613369

де F_o – площа поперечного перерізу зразка, L_o і L_k – початкова і кінцева довжина зразка, δ – відносне видовження.

У порівнянні з Ст3 межа міцності отриманого металу приблизно на 30 відсотків вище, а тимчасовий опір руйнуванню збільшується вдвічі.

Метод електродугового MAG наплавлення присаджувальним струмопровідним дротом.

У результаті металографічних досліджень встановлено, що макроструктура зразків металу, наплавленого MAG способом дротом Св-08Г2С Ø1,2 мм, подібна до структури тривимірних зразків, отриманих за адитивною мікроплазмовою технологією (рис. 3.31). Пори і тріщини не виявлені, структура досить однорідна.



Рис. 3.31. Макроструктура поперечного перетину стінки, отриманої за допомогою MAG-наплавлення сталевго дроту Св-08Г2С.

У разі MAG-технології мікроструктура наплавленого металу представлена зернами фериту та перліту (рис. 3.32). Відмінністю такої структури від аналогів, одержаних мікроплазмовим наплавленням з присаджуваним дротом, є більший розмір зерен, а також наявність первинних кристалів у формі дендритів та евтектики. Дендрити виявляються у вигляді деревоподібних утворень з чіткими осями окремих гілок. Між первинними кристалами виявляються прошарки іншої фази, що входить до евтектики. Можна сказати, що евтектика структурно вироджується, вона у невеликій кількості з'являється внаслідок нерівноважної кристалізації. Її утворенню сприяє повільне охолодження. Відстань між гілками дендритів основної феритної фази при такому охолодженні досить велика, тому евтектика має грубу будову. Представлена наплавлена поверхня гладка, немає утворення оксидів, проте можна відзначити великі розміри хвилюподібних валиків на поверхні.

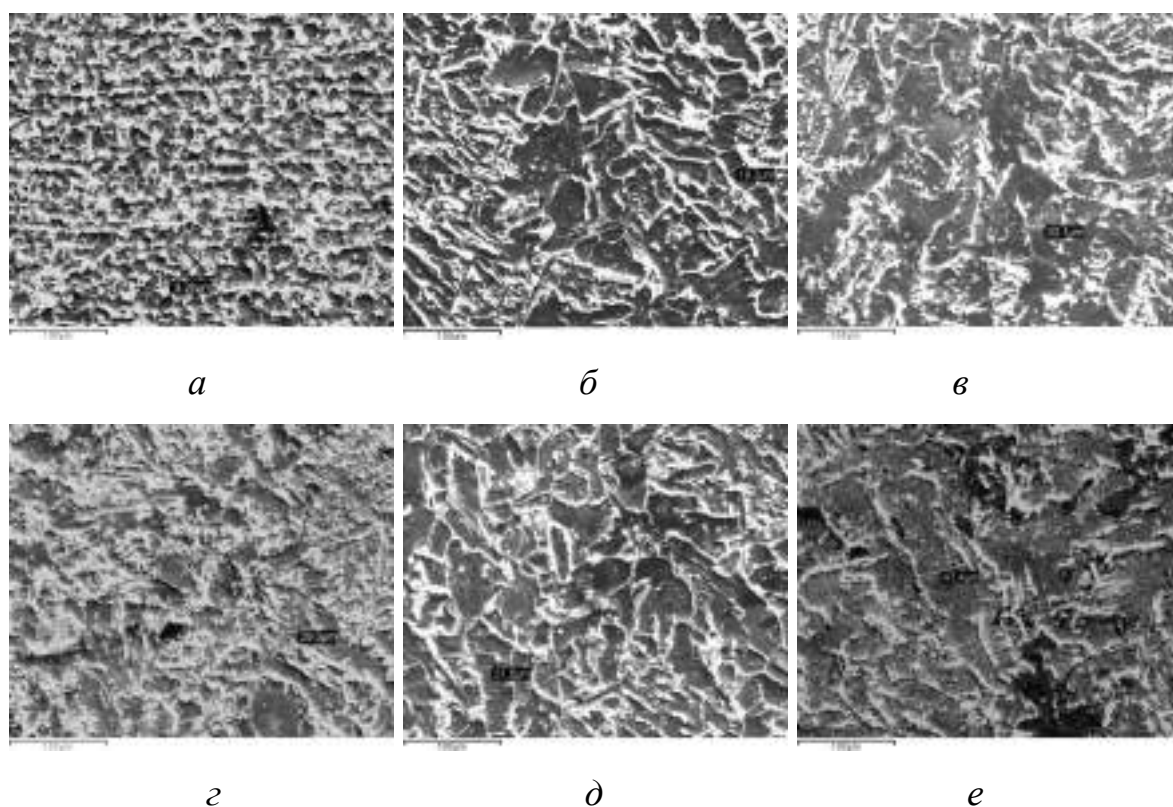


Рис. 3.32. Мікроструктура фрагментів тривимірних виробів типу «тонка стінка», отриманих MAG наплавленням дроту типу Св-08Г2С (електронно-зондовий аналіз на аналізаторі CamScan-4): *а* – базовий основний метал підкладки; *б* – зона термічного впливу; *в* – лінія сплавлення з підкладкою; *г* – низ стінки звернений до сталевій підкладки; *д* – середина стінки; *е* – верх стінки.

Як видно їх представлених результатів на рис. 3.33, на відміну від подібних зразків, отриманих за мікроплазмовою технологією з присаджувальним порошком, в наплавленому металі отриманих стінок присутні дрібні неметалеві включення, що знаходяться у вигляді окремих фаз, специфічної округлої форми. У неметалевих включеннях наявна фаза SiO_2 (табл. 3.10).

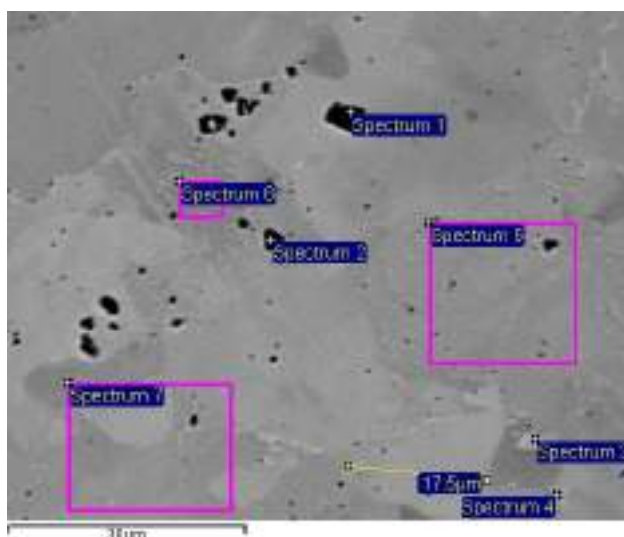


Рис. 3.33. Зовнішній вигляд включень у тривимірних виробих типу «тонка стінка», отриманих МАГ наплавленням дроту Св08Г2С.

Таблиця 3.10. Вміст елементів неметалевих включень у локальних ділянках дротом тривимірного зразка типу «тонка стінка» отриманих МАГ наплавленням (рис. 3.33).

Спектр	Хімічний склад, мас. %						
	C	O	Si	Mn	Fe	Cu	Total
1	5,81	15,76	7,75	0,93	69,19	0,56	100
2	4,54	13,63	8,52	0,86	72,2	0,26	100
3	3,54	–	0,94	1,37	93,89	0,26	100
4	3,12	–	0,93	1,34	91,91	2,7	100
5	2,61	–	0,91	1,4	94,37	0,71	100
6	3,19	–	0,82	1,49	93,47	1,02	100
7	2,66	–	0,9	1,26	95,08	0,1	100

Відмінність зразків, одержаних МАГ наплавленням, від зразків, отриманих за мікроплазмовою технологією з присаджувальним порошком, в першу чергу міститься у тенденції збільшення зернистості та розмірів ЗТВ при практично незмінному вмісті кремнію та марганцю. Це можна пояснити більшими погонними енергіями і, відповідно, більшою інтенсивністю нагрівання нарощуваних шарів при електродуговому наплавленні струмопровідним дротом в порівнянні з мікроплазмовою технологією, що відрізняється меншим тепловкладенням в нижче розміщені шари.

Метод мікроплазмового наплавлення присаджувальним дротом.

Аналіз макроструктури поперечного перерізу зразка, наплавленого мікроплазмовим способом з присаджувальним дротом Св-08Г2С (рис. 3.34) на предмет схильності до утворення дефектів показав відсутність тріщин та пор, зразки мають досить однорідну, рівномірну структуру, яка подібна до структури зразків наплавлених мікроплазмовим способом з присаджувальним порошком.

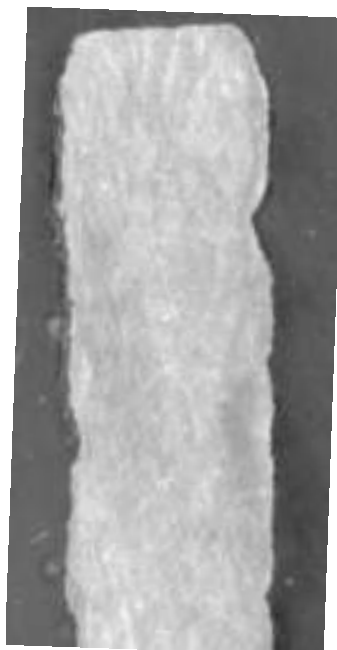


Рис. 3.34. Макроструктура поперечного перетину стінки, отриманої за допомогою мікроплазмового наплавлення сталевго дроту Св-08Г2С.

Металографічні дослідження мікрошліфів вирощених «тонких стінок» показали, що вони характеризуються щільністю, що відповідає литій структурі, із зернами невеликих розмірів, без дендритів. Також відсутня пористість, включення та мікротріщини.

При розгляді зони сплавлення між наплавленими шарами у виготовлених зразках (рис. 3.35) несучільність між дотичними шарами по лінії сплавлення відсутня. Розмір зони термічного впливу шару нарощування становить 2 мм.

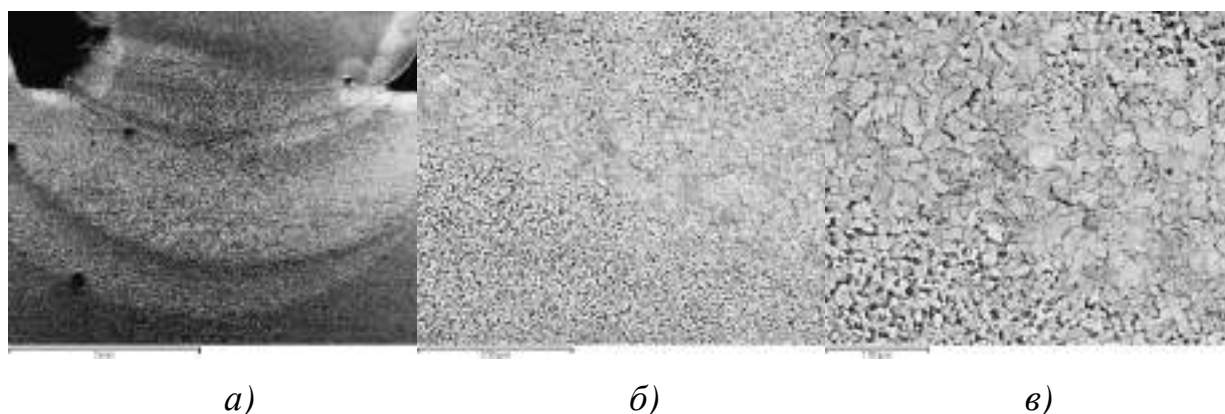


Рис. 3.35. Мікроструктура зони сплавлення першого наплавленого шару та сталевій підкладки: *а)* – лінія сплавлення і зона термічного впливу, $\times 35$; *б)* – зона сплавлення, $\times 200$; *в)* – зона сплавлення, $\times 300$.

Усі наплавлені шари добре з'єднані між собою. Мікроструктура наплавленого матеріалу рівновісна, в якій зерно має приблизно однакові розміри у всіх напрямках. Багат шарова структура наплавленого об'ємного зразка не проявляється, перемішування наплавлених шарів надзвичайно низьке. Наплавлена поверхня зразків гладка, не спостерігається утворення оксидів.

Кількісний мікрорентгеноспектральний аналіз, проведений на електронно-зондовому аналізаторі CamScan-4, показав, що вміст основних легуючих елементів у тривимірних наплавлених зразках повністю відповідає хімічному складу вихідного сталевих дроту марки Св-08Г2С (рис. 3.36, табл. 3.11).

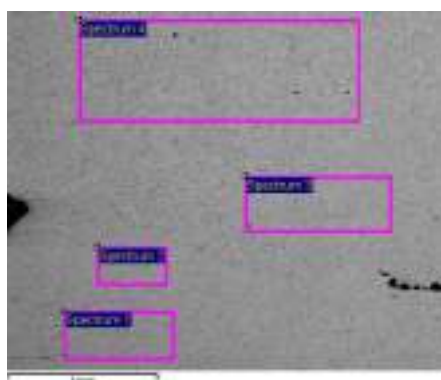


Рис. 3.36. Локальні ділянки вмісту елементів у зонах сплавлення тривимірного зразка типу «тонка стінка» товщиною 3 мм, виготовленого за адитивною мікроплазмовою технологією з присаджувальним сталевим дротом Св-08Г2С.

Таблиця 3.11. Вміст елементів у локальних ділянках зон сплавлення тривимірного зразка типу «тонка стінка» товщиною 3 мм, наплавленого сталевим дротом (рис. 3.36)

Спектр	Хімічний склад, мас. %			
	Si	Mn	Fe	Total
1	0,57	0,9	98,53	100
2	0,49	0,7	98,81	100
3	0,86	1,31	97,83	100

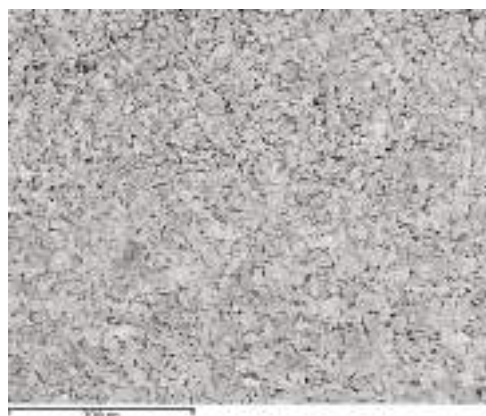
Мікроструктура адитивного мікроплазмового наплавлення зразка типу «тонка стінка» з використанням дроту Св-08Г2С має вигляд округлих рівновісних зерен, розмірами 15...20 мкм, з добре помітними межами та евтектичною складовою між ними (рис. 3.37). Це є зерна фериту (світлі зерна) та перліту (темні ділянки), що є двофазною структурною складовою, що складається з фериту та цементиту.

У поверхневому шарі, на відстані від верхнього торця наплавленої стінки до 50...100 мкм, структура відрізняється від серцевини. Слабо проглядаються межі зерен фериту, що може бути пов'язано з особливостями перетворень при впливі плазмовою дугою на кінцевих етапах нарощування наплавлених шарів. Розмір зерен зростає від 150 мкм до 200 мкм, коефіцієнт форми $\varphi = 1,0-1,6$. Форма перліту і цементиту змінюються: цементит стає округлим, структура перліту формується дисперсна у вигляді темних ділянок. Ділянки ферит + зернистий перліт – це круглі включення цементиту всередині феритних зерен.

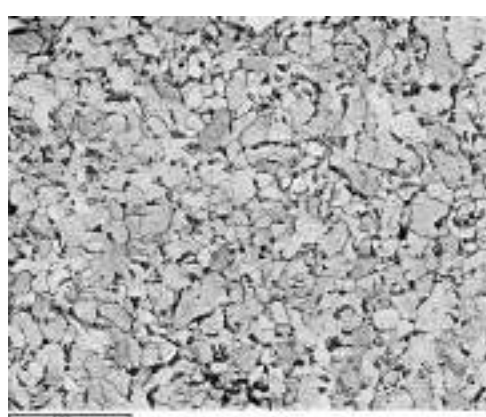
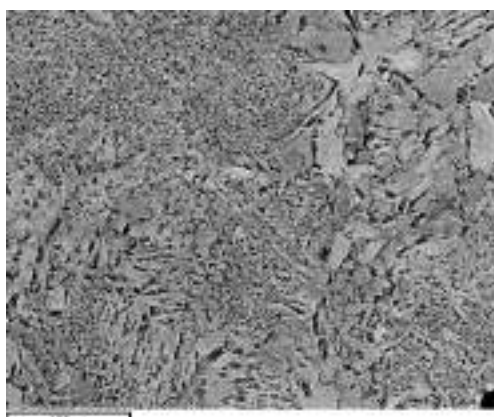
Верхній шар



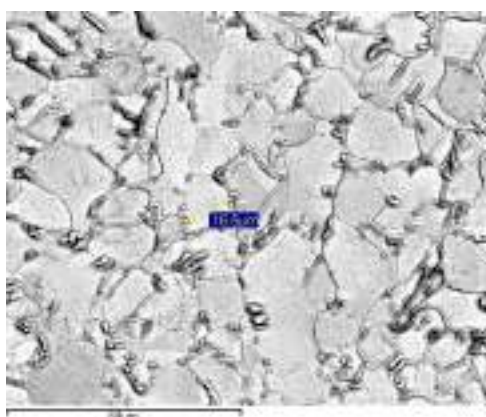
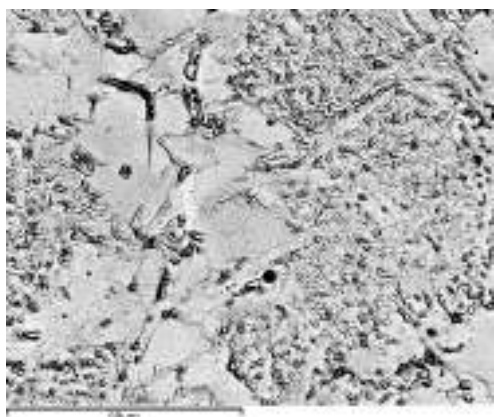
Серцевина



×200



×350



×400

Рис. 3.37. Мікроструктура адитивного мікроплазмового наплавлення зразка типу «тонка стінка» з використанням дроту Св-08Г2С при різних збільшеннях.

Розподіл твердості по висоті наплавленого матеріалу підтверджується результатом розподілу по висоті шліфа хімічних елементів. На відміну від MAG наплавлення із застосуванням дротів вуглецевої сталі Св-08Г2С, при

застосуванні мікроплазмового наплавлення аналогічного дроту спостерігається тенденція незначного підвищення твердості в напрямку від нижніх наплавлених шарів (HV 1626...1705 МПа) до вільної поверхні (HV 1893...1936 МПа) (табл. 3.12). Це можна пояснити структурними перетвореннями через збільшення питомого об'єму перлітної складової в міру підвищення висоти тонкої стінки.

Таблиця 3.12. Значення мікротвердості (МПа) в різних зонах зразка, отриманого мікроплазмовим наплавленням сталевого дроту.

Основний метал	Зона термічного впливу	Лінія сплавлення	Нижня частина наплавленої стінки	Середня частина наплавленої стінки	Верхня частина наплавленої стінки
1666	1626	1818	1808	1733	1893
1782	1686	1688	1735	1811	1914
1811	1721	1889	1735	1803	1936
1755	1751	1559	1831	1784	1828
1718	1634	1714	1741	1872	1893
1725	1715	1765	–	1742	1914
–	1705	–	–	1711	1936
Середня величина					
1742	1691	1739	1746	1718	1902

3.6. Аналіз впливу основних параметрів мікроплазмової дуги та двофазного потоку «мікроплазма-присаджувальний порошок» на розміри шару, що наплавляється.

У процесі виготовлення об'ємних виробів адитивним нарощуванням шарів шляхом послідовного наплавлення, дуже важливим параметром є розмір нарощуваного шару (наплавленого валика металу), так як він визначає характеристики форми і поверхні, а також точність виробу. В цьому аспекті потрібно вирішення задачі визначення оптимального співвідношення між коефіцієнтами зосередженості питомих потоків присаджувального порошку і тепла мікроплазмової дуги, а також співвідношення між ефективними діаметрами плями введення порошку і плями нагрівання.

Другим важливим завданням є зниження витрат порошку у процесі адитивного вирощування деталі. Основною причиною витрат порошкової

присадки є рух її дисперсних частинок по периферії стовпа плазмової дуги і надалі – пружне відбивання від поверхні виробу, що наплавляється поза зоною сформованої ванни металу наплавлення [108].

Отже, у разі реалізації адитивної технології вирощування тонкостінних металевих виробів з товщиною стінки від 2,5 мм важливо керувати розмірами і характеристиками, у тому числі зосередженістю мікроплазмової дуги з введенням порошкової присадки. Зокрема, для оптимізації траєкторій руху присаджувального матеріалу в плазмовій дузі рекомендується присаджувальні порошки вводити в дугу зі швидкістю менше 2 м/с під кутом до осі плазмотрона до 40–45° [109].

Тому для визначення найкращих умов фокусування двофазних потоків мікроплазма-присаджувальний порошок, які забезпечують транспортування присаджувального матеріалу через високотемпературну область мікроплазмової дуги в наплавну ванну при формуванні шару наплавлення шириною від 2,5 мм, необхідно проаналізувати технологічні особливості адитивного мікроплазмового наплавлення, досліджені в даному розділі.

В ході технологічних досліджень використовували описаний у розділі 2 мікроплазмотрон діаметрами d_t каналів транспортуючого сопла 2,5 мм, 3,5 мм і 4,5 мм. При цих розмірах забезпечується його стабільна робота на струмі основної дуги до 20–40 А. Зосередженість підведення присаджувального порошку через мікроплазмову дугу до площини анода оцінювали шляхом визначення маси порошку, що потрапив у ванну наплавлення, при послідовному збільшенні її розмірів. Ширина ванни розплавленого металу (або валика, що наплавляють) змінювалася зі збільшенням сили струму наплавлення при постійній швидкості переміщення мікроплазмової дуги в межах від 2,5 мм до ~10 мм (табл. 3.13). В ході експерименту при послідовному збільшенні ширини зварювальної ванни в 4 рази були отримані залежності зміни питомої маси наплавленого валика M_n і коефіцієнту витрат порошку (КВП), що характеризуються ефективним діаметром плями введення порошку.

У дослідах використовували присаджувальний порошок з нержавіючих сталей НУФ-103 і 316L та порошку залізу ПЖ-1 з розміром фракцій 40–60 мкм і <50 мкм, відповідно (див. розділ 2). Продуктивність подачі присаджувального порошку становила до $G_0=6,5$ г/хв. Експериментально M_n визначали зважуванням вирощених пластинчастих зразків з точністю 0,02 г до і після наплавлення тривалістю 1 хв. Коефіцієнт використання порошку (КВП) визначали, як відношення M_n до продуктивності подачі порошку G_0 .

Таблиця 3.13. Питома маса наплавленого металу M_n і ширина валика B при адитивному мікроплазмовому наплавленні в залежності від діаметра каналу транспортуючого сопла плазмотрона d_t .

d_t , мм	I , А	B , мм	M_n , г/хв
4,5	25	2,5	1,2
	30	4,0	1,8
	35	5,0	2,2
3,5	25	2,5	1,6
	30	3,5	2,6
	35	4,5	3,0
2,5	25	2,5	1,8
	30	3,0	2,8
	35	3,5	3,4

Отримані результати демонструють перевагу застосування транспортуючих сопел малого діаметру ($d_t=2,5$ мм) при адитивному мікроплазмовому наплавленні валиків один на одній плазмотронами з діаметрами каналів транспортуючого сопла $d_t \leq 4,5$ мм з точки зору ефективності використання присаджувального порошку [110].

Наближення форми зварювальної ванни при типових режимах мікроплазмового порошкового наплавлення до кола дає змогу припустити відповідність радіального розподілу присаджувального матеріалу в

мікроплазмовій дузі на рівні поверхні анода (зварювальної ванни) нормальному закону. Перевірку виконували за методикою роботи [111] на підставі експериментальних даних, отриманих із застосуванням секційного уловлювача порошку для визначення інтенсивності потоку порошку у плямі його введення. Це дало змогу визначити ефективний діаметр $d_{\text{еф}}$ плями введення порошку (табл. 3.14).

Таблиця 3.14. Експериментальні параметри ефективності порошкового адитивного мікроплазмового наплавлення.

$d_{\text{т}}$, мм	$d_{\text{еф}}$, мм	$S_{\text{еф}}$, мм ²	r_0 , мм	B , мм	КВП
4,5	10,5	86,55	3,10	6,2	0,84
3,5	6,0	28,26	1,75	3,5	0,86
2,5	5,0	19,63	1,25	2,5	0,88

Встановлено, що зменшення діаметра каналу транспортуючого сопла мікроплазмотрону від 4,5 мм до 2,5 мм забезпечує зміну площі $S_{\text{еф}}$ ефективної плями введення порошку від 86,55 мм до 19,63 мм², тобто в 4,4 рази. Аналіз експериментальних даних (табл. 3.14) показує, що зменшенню еквівалентного радіусу плями введення порошку r_0 відповідає збільшення значення КВП в діапазоні від 0,84 до 0,88.

Таким чином, для забезпечення високої ефективності використання присаджувального порошку при певних конструктивних параметрах мікроплазмотрона, що в основному задаються величиною $d_{\text{т}}$, необхідне виконання умови $B \geq 2r_0$ [112, 113]. Виявлені закономірності також дозволили спрогнозувати параметри зосередженості введення порошку на площину анода (табл. 3.14), необхідні для мікроплазмового порошкового наплавлення з низькими витратами порошку при ширині зварювальної ванни від 2,5 мм.

Коефіцієнт зосередженості k питомого теплового потоку мікроплазмової дуги без подачі порошку визначали за методикою роботи [110] калориметруванням на двосекційному проточному калориметрі. Для мікроплазмової дуги в діапазоні струмів 20–40 А з еквівалентним діаметром

плями нагріву 5–10 мм залежно від стиснення плазмоутворюючим $d_{пл} = 1,6–3,0$ мм та транспортуючим $d_t = 2,5–4,5$ мм соплами плазмотрону експериментальні значення k становлять $3,5–10,5 \text{ см}^{-2}$. Для плазових дуг для обраної конструкції мікроплазмотрону при плазово-порошковому наплавленні в межах струму 20–40 А відповідні значення k становлять від 40 до 150 см^{-2} [4, 77, 111, 114].

Порівняння експериментальних даних ефективного діаметра введення порошку (табл. 3.14) і питомого теплового потоку на поверхні виробу [110] показує, що при адитивному нарощуванні шарів з подачею порошку в мікроплазовий струмінь співвідношення між відповідними коефіцієнтами знаходиться в межах 1–4.

При мікроплазовому порошковому наплавленні стінки товщиною від 2,5 мм витрати присадки можна знизити за рахунок не лише зменшення d_t в мікроплазмотроні, а й оптимізації зосередженості мікроплазово-порошкового потоку шляхом раціонального вибору відстані від зрізу транспортуючого сопла до виробу. Аналіз зосередженості потоку порошку виконували в режимі перевірки його подачі з витратами 2,0–7,0 г/хв. Встановили, що такий потік зберігає свою зосередженість, задану діаметром каналу транспортуючого сопла на відстані до 5...7 мм від його зрізу, а потім значно розширюється.

Таким чином, до технологічних рекомендацій відносяться: застосування транспортуючого сопла з діаметром каналу, наближеним до 2,5 мм; стабілізація відстані від мікроплазмотрона до виробу на рівні 5 мм (5–7 мм) з точністю $\pm 0,5$ мм; доставку присаджувального матеріалу до зварювальної ванни через високотемпературну область дуги; адитивне порошкове мікроплазове наплавлення валиків шириною від 2,5 мм. Дані рекомендації можуть бути використані для подальшої оптимізації конструктивних параметрів промислових мікроплазмотронів з високою зосередженістю подачі дисперсної присадки, за допомогою яких при виготовленні тривимірних металевих виробів досягаються мінімально можливі розміри нарощуваних шарів, а також максимальна точність і шорсткість виробів.

3.7. Аналіз умов багат шарової адитивної мікроплазмово-порошкової технології за критеріями маси наплавленого металу та погонної енергії.

В адитивному виробництві тривимірних металевих виробів із застосуванням зварювальних технологій дуже важливим є завдання встановлення взаємозв'язку між параметрами наплавлення, розмірами та якістю наплавлення. У ряді випадків при нестационарних режимах горіння мікроплазмової дуги їхня технологічна корекція ускладнена. Для об'єктивного аналізу та оптимізації таких режимів потрібен вибір критеріїв їхньої оцінки. У цьому розділі розглянуто методику оцінки параметрів режиму нестационарного процесу мікроплазмового наплавлення, засновану на використанні систем збору даних. Для цих цілей найбільш прийнятною є методика реєстрації та аналізу параметрів режимів мікроплазмового порошкового наплавлення за допомогою системи збору даних, розробленої в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [115–117]. Така методика дозволяє співвідносити здатність до утворення мікро і макротріщин, що виявляється в зварному з'єднанні основний наплавлений метал капілярним і металографічним контролем, з кількістю введенного у виріб тепла в процесі наплавлення.

У системі вимірювання та збору даних використовувалися:

- АЦП, що дозволяє виконувати реєстрацію сигналів із частотою 1–10 кГц/канал;
- датчики струму фірми LEM, розраховані на вимірювання струму до 100А;
- датчик напруги LV-25Р для запису сигналу U_{c2} з робочого механізму дозатора, що забезпечує подачу дисперсної присадки у процесі наплавлення;
- програма PowerGraph 3.3 для цифрової обробки та аналізу даних.

У результаті первинної обробки осцилограм сигналів, виміряних та записаних у контурі в процесі наплавлення виробу, визначалася форма часової залежності струму основної дуги $I(t)$, а також час горіння мікроплазмової дуги на виробі t_d та час подачі дисперсної присадки $t_{п}$.

Похибка, що вноситься у сигнал даним видом цифрової обробки, не перевищує 0,2% [23, 118]. На середньоквадратичне значення струму основної

дуги у процесі цифрової обробки сигналу струму наплавлення згладжуванням накладається суттєвіша похибка – до 15%. Її усунення можливе шляхом лінійної кореляції. Слід зазначити, що через невідповідність умов горіння мікроплазмової дуги на водоохолоджуваному мідному аноді і при реальному наплавленні з утворенням зварювальної ванни, визначення величини кількості тепла Q_{Σ} , що вводиться у виріб, матиме певну систематичну похибку. Її значення згідно з даними роботи [119] приблизно оцінюється як +7%.

Таким чином, через значення певного інтеграла величини струму основної дуги можна враховувати нестационарні процеси його зміни за час горіння дуги, у тому числі й для імпульсних режимів із різними принципами їх реалізації. Такий підхід дозволяє оцінювати кількість тепла не тільки при вирощуванні об'ємного виробу, але і на будь-якій його локальній ділянці (аж до розмірів зварювальної ванни). У поєднанні з визначенням маси наплавленого металу зважуванням та вимірюванням глибини проплавлення попередніх наплавлених шарів металу цей підхід дозволяє при порційній подачі присадки оцінити розміри зварювальної ванни [120, 121].

Зважаючи на залежність тривалості перебування металу зварювальної ванни в розплавленому стані від величини погонної енергії [118] для режимів мікроплазмового порошкового наплавлення може знадобитися оптимізація їх параметрів за критерієм обсягу зварювальної ванни (маси наплавленого металу). Такий підхід був застосований для аналізу режимів багат шарового мікроплазмового порошкового наплавлення, що моделює процес вирощування складнопрофільних елементів. Він може бути зручним інструментом для оптимізації тепловкладення у виріб при середньому струмі наплавлення 10–40 А за рахунок обмеження розмірів зварювальної ванни, маси наплавленого металу та тривалості наплавлення шару за критерієм середньої погонної енергії $Q_{\Sigma}/L < 100$ Дж/мм.

На прикладі аналізу режимів мікроплазмового наплавлення шарів шириною 2,5 мм встановлено, що, починаючи з певної величини ефективної потужності мікроплазмової дуги, трохи більшої мінімально можливого значення

для початку стабільного процесу, об'єм зварювальної ванни без істотного збільшення потужності дуги може зростати в 5–6 разів за рахунок збільшення кількості дисперсної присадки, що вводиться. Так як загальне тепловкладення у виріб пропорційне розмірам зварювальної ванни та продуктивності наплавлення, може знадобитися оптимізація режимів плазмового наплавлення за критеріями маси наплавленого металу та погонної енергії. Оцінка кількості тепла, введенного у виріб, дозволила на стадії відпрацювання технології усунути утворення мікротріщин у наплавленому металі при багат шаровому наплавленні складнопрофільних елементів.



Рис. 3.38. Схема взаємодії програмного забезпечення автоматичної системи моніторингу з пакетом прикладних програм щодо оцінки характеристик технологічного процесу адитивного мікроплазмового наплавлення.

На основі проведеного аналізу запропоновано схему (рис. 3.38) взаємодії програмного забезпечення автоматичної системи моніторингу з пакетом прикладних програм і системою датчиків та елементів керування, за допомогою яких можна оцінювати, контролювати і регулювати характеристики технологічного процесу адитивного наплавлення. Така схема може бути рекомендованою як базова система організації автоматичного моніторингу при

розробці промислового мікроплазмового обладнання для адитивного наплавлення металевих об'ємних виробів.

Висновки по розділу 3.

1. Проведені розрахункові дослідження процесів газодинаміки в контурах стандартного плазмотрону показали його недоліки, що виявляються при подачі присаджувальних порошкових матеріалів. Для усунення цих недоліків проведено моделювання оптимальної динаміки газових потоків за критеріями ламінарності, повноти введення матеріалів у плазму, фокусування газових потоків в робочій зоні та стабілізації режиму нагріву/охолодження сопел. Також, було проведено розрахунок числа Рейнольдса, який додатково підтвердив ламінарність газових потоків. На підставі такого моделювання спроектовано покращену конструкцію плазмотрона, в якому додано другий канал введення транспортуючого газу, обидва канали введення розташовані під кутом до осі виходу газу з метою рівномірного розподілу матеріалу в камері вирівнювання, а також зменшено її поперечний переріз для покращення заповнення газом.
2. З використанням мікроплазмотрону покращеної конструкції проведено порівняльні експерименти з адитивного наплавлення металевих просторових примітивів трьома адитивними методами: електродугове MAG наплавлення електродним струмопровідним дротом, мікроплазмове наплавлення присаджувальним дротом і порошком. Визначено базові особливості процесів, їх взаємні недоліки та переваги. Обрано оптимальні параметри режимів адитивного наплавлення за критеріями якісного з'єднання і утворення рівновісної структури наплавлених шарів.
3. Встановлено, що в результаті адитивного мікроплазмового наплавлення порошку нержавіючої сталі (розмір частинок 40-60 мкм) формується шарувата структура металу з висотою наплавленого шару порядку 650 мкм і товщиною стінки близько 3 мм. Розподіл металу за висотою зразка рівномірний. Внаслідок адитивного формування зразка шляхом наплавлення порошку утворюються колонії великих і дрібних дендритів. Аналіз структури металу в різних ділянках виробу показав, що колонії дендритів мають різні розміри й орієнтацію залежно від висоти ділянки, на якій проводилося дослідження. Розмір субзерен становить

15...25 мкм, а їхній склад близький до складу вихідного порошку. Наплавлений метал забезпечує високу міцність, що становить понад 600 МПа.

4. При адитивному мікроплазмовому наплавленні з використанням присаджувального дроту низьковуглецевої сталі діаметром 1,2 мм на обраному режимі формуються просторові зразки з товщиною стінки порядку 2,7-3,0 мм з гладкою поверхнею близькою до литої. Металографічний аналіз перетину сформованої стінки показав утворення достатньо щільної дендритної мікроструктури металу без пор і несплавлень.

5. При мікроплазмовому наплавленні дротом низьковуглецевої сталі діаметром 0,8-1,2 мм виявлено відсутність міжшарової або трансшарової пористості у зразках. Наплавлені шари мають якісне з'єднання та характеризуються рівновісною структурою. Розмір зерен поблизу підкладки становить 15...20 мкм, ближче до вільної поверхні зростає до 150...200 мкм. Встановлено, що тенденція незначного підвищення твердості в напрямку від нижніх наплавлених шарів (HV 1626...1705 МПа) до вільної поверхні (HV 1893...1936 МПа) пов'язана зі структурними перетвореннями через більший питомий об'єм перлітної складової в міру підвищення висоти тонкої стінки.

6. При адитивному наплавленні просторових зразків електродуговим МАГ способом дротом низьковуглецевої сталі діаметром 1,2 мм спостерігається дендритна мікроструктура металу (розмір дендритів до 200 мкм), наявність неметалевих включень і певна пористості у верхніх шарах вирощеної стінки. При цьому товщина стінки одержуваних зразків становить не менше 4 мм.

7. Отримано базові закономірності, які можуть бути використані для подальшої оптимізації конструктивних параметрів промислових мікроплазмотронів з високою зосередженістю подачі дисперсної присадки, за допомогою яких при виготовленні тривимірних металевих виробів досягаються мінімально можливі розміри нарощуваних шарів, що підвищує точність і знижує шорсткість виробів.

Розділ 4. Прогнозування напружено-деформованого стану одержуваних металевих тривимірних об'єктів.

4.1. Методика скінчено-елементного моделювання напружено-деформованого стану прототипів виробів, одержаних адитивним наплавленням.

Для прогнозного моделювання напружено-деформованого стану просторових примітивів тривимірних виробів застосовували метод скінченних елементів (МСЕ) [127]. Даний метод передбачає, що будь-яке тіло можна представити у вигляді нескінченної сукупності точок, що в загальному випадку ускладнює його скінченну дискретизацію, але якщо цю кількість точок обмежити та відповідним чином з'єднати, то можна отримати скінченне дискретне представлення цього тіла. При цьому його точки будуть називатися вузлами, які після з'єднання ліній формують елементи, що взаємодіють в цих вузлах.

В загальному вигляді при визначенні напружено-деформованого стану методом скінченних елементів математичне формулювання задачі тривимірного напружено-деформованого стану можна представити у векторній формі, що включає рівняння руху і рівноваги, геометричне рівняння для тензору малих деформацій та фізичне рівняння у вигляді узагальненого закону Гука:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \sigma + f = 0 \\ \varepsilon = \frac{1}{2} \times (\nabla u + u \nabla) \\ \sigma = C : \varepsilon \end{cases} \quad (4.1)$$

де $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_i}$, ($i=1,2,3$) – оператор Гамільтона, m^{-1} ; x_1, x_2, x_3 – Декартові координати, м; \cdot – оператор скалярного добутку вектору на тензор; σ – симетричний тензор напружень 2-го рангу, Па; f – вектор об'ємних сил, Па; ε – симетричний тензор 2-го рангу пружних деформацій Коші; $u=(u_1, u_2, u_3)$ – вектор переміщень, м; $\nabla u, u \nabla, C_{ijkl} = \mu \times (\delta_{ik} \times \delta_{jl} + \delta_{il} \times \delta_{jk}) + \lambda \times \delta_{ij} \times \delta_{kl}$ – компоненти тензора 4-го рангу пружних властивостей ізотропного матеріалу, Па; $C:$ – оператор

подвійного скалярного добутку; $\mu = \frac{E}{2 \times (1+\nu)}$ і $\lambda = \frac{E \times \nu}{(1+\nu) \times (1-2 \times \nu)}$ – коефіцієнти Ламе, Па; E – модуль пружності під час розтягу, Па; ν – коефіцієнт Пуасона;
 $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases}$ – символ Кронекера.

У разі термопружної задачі для ізотропного середовища узагальнений закон Гука набуває дещо іншого вигляду:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \times (\varepsilon_{ij}^e - \varepsilon_{ij}^T) \quad (4.2)$$

де ε_{ij}^e – компоненти тензора малих пружних деформацій Коші; $\varepsilon_{ij}^T = \beta \times (T - T_0) \times \delta_{ij}$ – компоненти тензора температурних деформацій; β – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу, K^{-1} ; T і T_0 – початкова і поточна температура тіла, відповідно, К; δ_{ij} – символ Кронекера.

Для однозначності системи диференціальних рівнянь (4.1) треба лише записати граничні умови. Оскільки задача стаціонарна, то початкові умови не використовуються. Винятком є температура при врахуванні температурного навантаження у формулюванні задачі (4.2), яка може бути задана як різниця $(T - T_0)$ для визначення тензора температурної деформації $\varepsilon_{ij}^T = \beta \times (T - T_0) \times \delta_{ij}$.

Граничні умови для системи рівнянь (4.1):

– переміщення або защемлення (хоча б в одній точці на поверхні тіла)

$$u|_{S_u} = 0 \quad (4.3)$$

де S_u – поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення;

– симетрії

$$n \times u|_{S_{su}} = 0 \quad (4.4)$$

де $n=n_i$ – вектор нормалі до поверхні; S_{su} – поверхня симетрії тіла;

– від дії зовнішнього зусилля

$$\sigma \times n|_{S_p} = p \quad (4.5)$$

де $p=p_i$ – вектор зовнішньої сили, що діє на поверхні S_p ;

– від дії зовнішнього тиску

$$(\sigma \times n) \times n|_{S_p} = p \quad (4.6)$$

де p – зовнішній тиск, який задано на поверхні S_p , Па [128].

Напружено-деформований стан у зварювально-наплавлених виробах залежить від термодформаційних процесів, що відбуваються під час наплавлення. У науково-дослідній практиці для аналізу теплових процесів дугового наплавлення найчастіше використовується об'ємне джерело нагріву за J.Goldak з нормальним (Гаусовим) розподілом питомої теплової потужності вздовж всіх координатних осей в обсязі тіла, що має форму еліпсоїда (рис. 4.1).

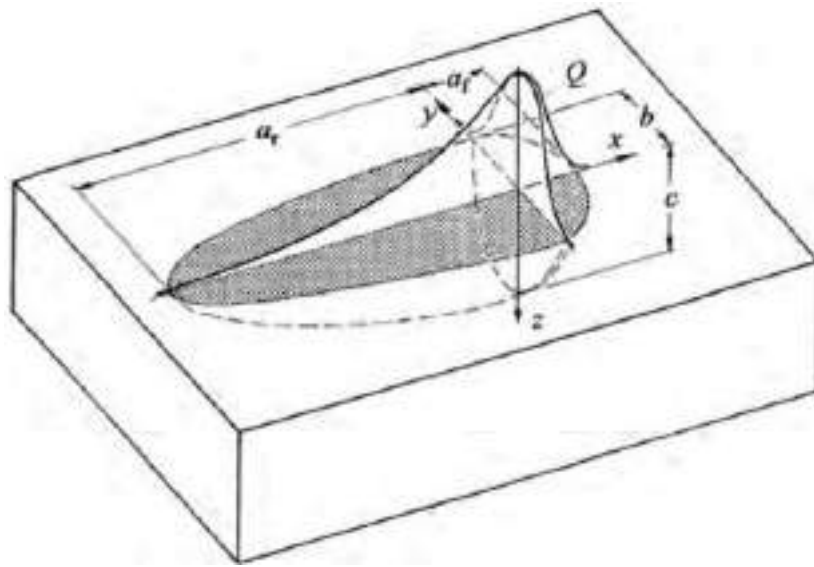


Рис. 4.1. Модель джерела нагріву за J.Goldak [129].

Особливістю моделі є незалежне задавання розподілу питомої теплової потужності q_v у фронтальній (індекс f) і хвостовій (індекс r) частинах еліпсоїда:

$$q_{vf} = f_f \frac{6 \times \sqrt{3 \times q}}{a_f \times b \times c \times \pi^{3/2}} \exp \left\{ -3 \left[\left(\frac{x + v \times (t - \tau)}{a_f} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.7)$$

$$q_{vr} = f_r \frac{6 \times \sqrt{3 \times q}}{a_r \times b \times c \times \pi^{3/2}} \exp \left\{ -3 \times \left[\left(\frac{x + v \times (t - \tau)}{a_r} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.8)$$

$$q = \eta \times I \times U \quad (4.9)$$

де q – ефективна тепла потужність джерела нагріву; η – ККД дуги наплавлення; I – струм наплавлення; U – напруга наплавлення; τ – час затримки, відраховується від початку дії джерела; t – поточний час; v – швидкість переміщення джерела (швидкість наплавлення); x, y, z – піввісі еліпсоїда в

напрямку координатних осей ОХ, ОУ, ОZ; f_f і f_r – коефіцієнти, що визначають співвідношення тепла, внесеного у фронтальну і хвостову частини еліпсоїда; a_f , a_r , b , c – відповідні радіуси нормального розподілу.

Коефіцієнти f_f і f_r співвідносяться наступним чином:

$$f_f = \frac{2 \times a_f}{a_f + a_r}; f_r = \frac{2 \times a_r}{a_f + a_r}; f_f + f_r = 2 \quad (4.10)$$

Для загальних випадків дугового наплавлення рекомендовано приймати: $f_f = 0,4$; $f_r = 1,6$. Слід зазначити, що параметри a_f , a_r , b і c в (4.7) і (4.8) – незалежні і можуть приймати різні значення в кожному з цих рівнянь. Це дозволяє оптимізувати модель для конкретних випадків наплавлення змінюючи її форму від майже сферичної до сильно витягнутої уздовж осі ОХ.

Разом з тим, калібрування моделі за J.Goldak залишається найбільш складним питанням її безпосереднього застосування для суто теоретичного аналізу теплових процесів наплавлення. Лінійні розміри реальної зварювальної ванни перевищують відповідні розміри заданого еліпсоїда, необхідних для розрахунку за рівняннями (4.7) і (4.8) значення геометричних параметрів моделі a_f , a_r , b і c , пов'язані з дисперсією функції нормального розподілу, яка, в свою чергу, залежить від параметрів режиму наплавлення. У зв'язку з цим аналітичні рішення задачі теплопровідності з використанням моделі за J.Goldak, поки не можуть розглядатися в якості універсальних методів розрахунку теплових процесів дугового наплавлення і вимагають уточнень. Найчастіше модель подвійного еліпсоїдного джерела тепла використовується для числових розв'язків задачі теплопровідності при наплавленні, в тому числі і в комерційних програмних комплексах для скінченно-елементного моделювання термомеханічних процесів наплавлення (ANSYS, SYSWELD, Simufact та ін.) [129].

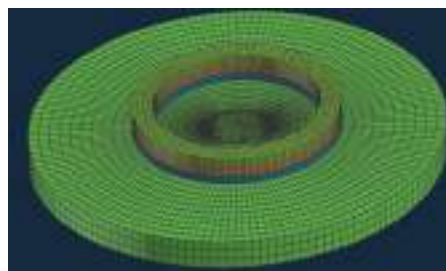
4.2. Розробка скінчено-елементних 3D моделей.

Побудова тривимірних моделей відбувається в середовищі CAE – програмного забезпечення, що призначене для скінченно-елементного аналізу. Для дослідження формування залишкового НДС у наплавлених тривимірних прототипах виробів різної форми в цій роботі у модулі «Visual Mesh» програмного комплексу «Visual-Environment 10.7» створено п'ять CAE моделей різної форми, показаних у табл. 4.1.

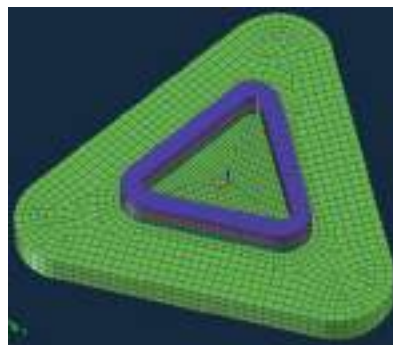
Таблиця 4.1. Геометричні параметри наплавлених тривимірних прототипів.

Робоча назва	Kiltsevoj	Trukutnij	Kvadrat	KonusR	KonusS
Модельний зразок					
Характерний розмір	\varnothing	Довжина сторони	Довжина сторони	$\varnothing_{\text{низ}}/\varnothing_{\text{верх}}$	$\varnothing_{\text{низ}}/\varnothing_{\text{верх}}$
Значення, мм	40	50	50	60/64	60/56

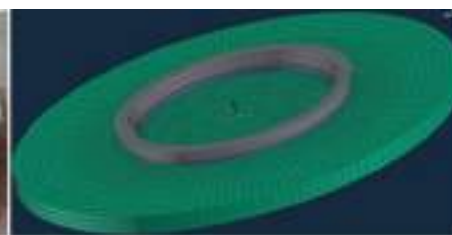
Програмним комплексом «Visual Mesh» було розроблено п'ять скінчено-елементних моделей наплавлених тривимірних прототипів зразків (рис 4.2), моделювання процесів друку яких виконано в «Simufact welding 6.0». Алгоритм побудови моделі на прикладі циліндричного зразка (рис. 4.2,а) відбувався за схемою, наведеною на рис.4.3. Подальше моделювання процесів мікроплазмового наплавлення в «Simufact Welding» відбувалося за алгоритмом, наведеним на рис. 4.4.



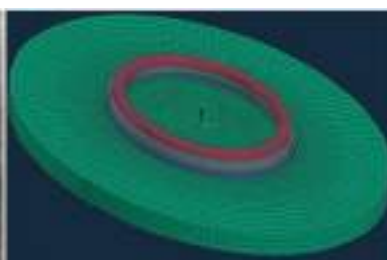
a)



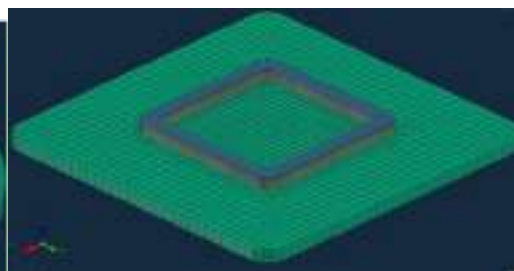
б)



в)



г)



д)

Рис. 4.2. Створення скінчено-елементних моделей наплавлених порошком НУФ-103 тривимірних прототипів зразків: *a)* – циліндричний; *б)* – пустотіла трикутна призма; *в)* – розширений конус; *г)* – звужений конус; *д)* – пустотіла квадратна призма.

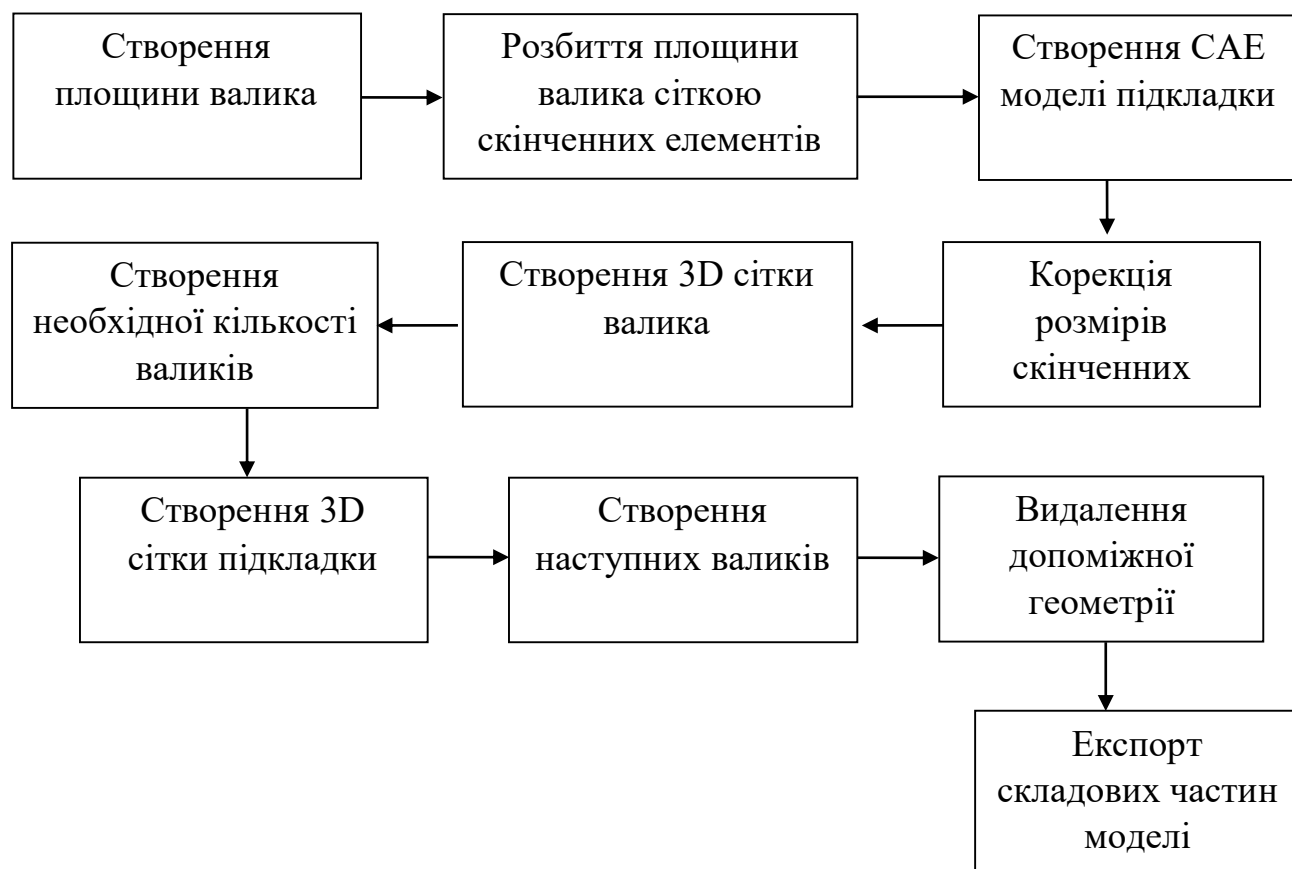


Рис. 4.3. Схема алгоритму побудови САЕ моделі.

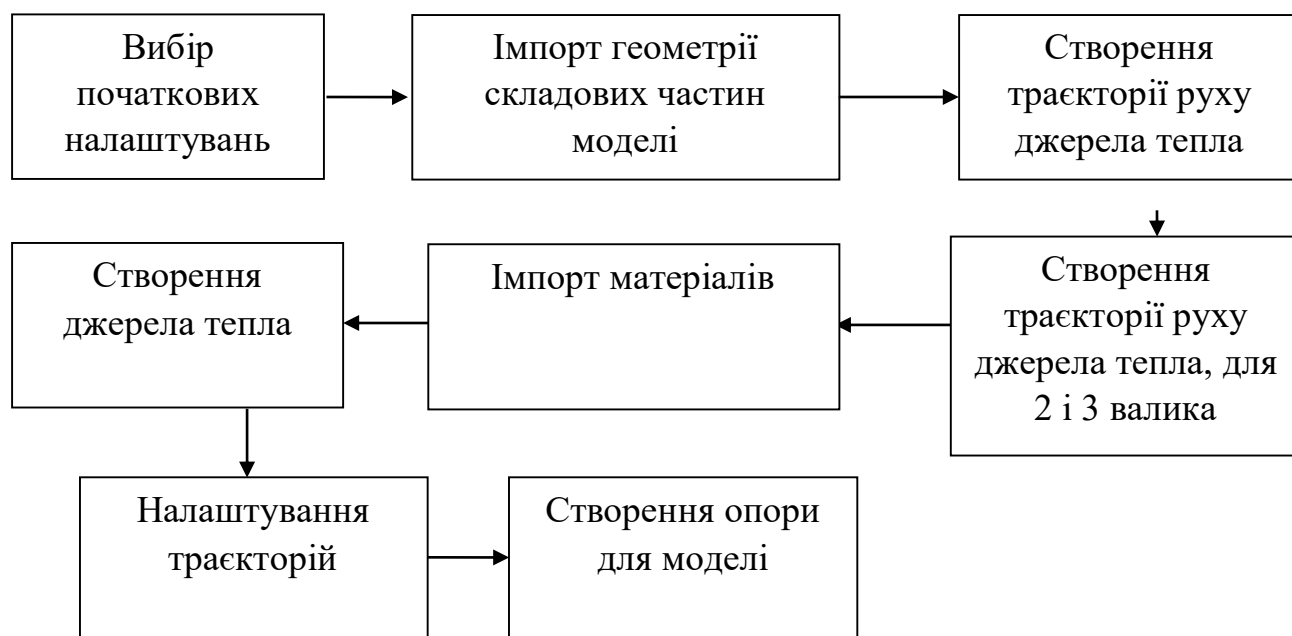


Рис. 4.4. Алгоритм моделювання наплавлення в «Simufact Welding».

4.3. Аналіз параметрів залишкового НДС тривимірних виробів.

4.3.1. Граничне значення напруженого стану в точці тіла.

Під граничним значенням напруженого стану в точці тіла треба розуміти такий напружений стан у точці, який можна в цілому характеризувати значення, інтенсивності напружень в точці, перебільшення якої призводить до утворення в точці пластичних деформацій. Інакше кажучи, йдеться про умову пластичності у точці тіла, тобто напружений стан в точці при якому починається утворення пластичних деформацій.

На сьогодні є значна кількість умов пластичності у точці тіла, що зумовлено великим переліком різних конструкційних матеріалів і різними постулатами (твердженнями) про настання такого стану в тих чи інших матеріалах або навіть в одному й тому ж матеріалі. Умови пластичності не виводять з якихось рівнянь, а постулюють виходячи з певних міркувань, а потім перевіряють експериментальним шляхом.

Для конструкційних матеріалів, використовуваних для виготовлення зварювально-наплавлених конструкцій, як показала практика, найбільшою мірою виконується умова пластичності Мізеса-Генкі, відповідно до якої пластична деформація у точці тіла починається з моменту часу, коли інтенсивність напружень в точці досягає значення нормальної межі текучості матеріалу.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} - \sigma_S = 0 \quad (4.11)$$

У просторі головних нормальних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ залежність (4.11) являє собою нескінченну розімкнену циліндричну поверхню, вісь якої рівно нахилена до осей координат і яка перпендикулярна до октаедричних площин і перетинає їх по колу (рис. 4.5). Координатні площини циліндр перетинає по відповідних еліпсах [130].

Процес утворення залишкових деформацій і напружень характеризується пружно-пластичною поведінкою металу, нестаціонарними температурними умовами, високим рівнем температури за різко нерівномірного його розділу. У

більшості випадків ще не має можливості досить повно врахувати термомеханічні процеси, що відбуваються в металі під час наплавлення. Утворення тимчасових і залишкових деформацій та напружень у наплавлених шарах зумовлено об'ємними змінами тепла. З поширенням теплоти і вирівнюванням температури відбувається безперервна зміна і перерозподіл об'єму металу. Зміну об'єму металу спричинено його розширенням під час нагрівання і фазовим перетворенням, а перерозподіл об'єму металу є результатом пластичних деформацій і охоплює ділянку, що прилягає до валика наплавлення з обох боків.

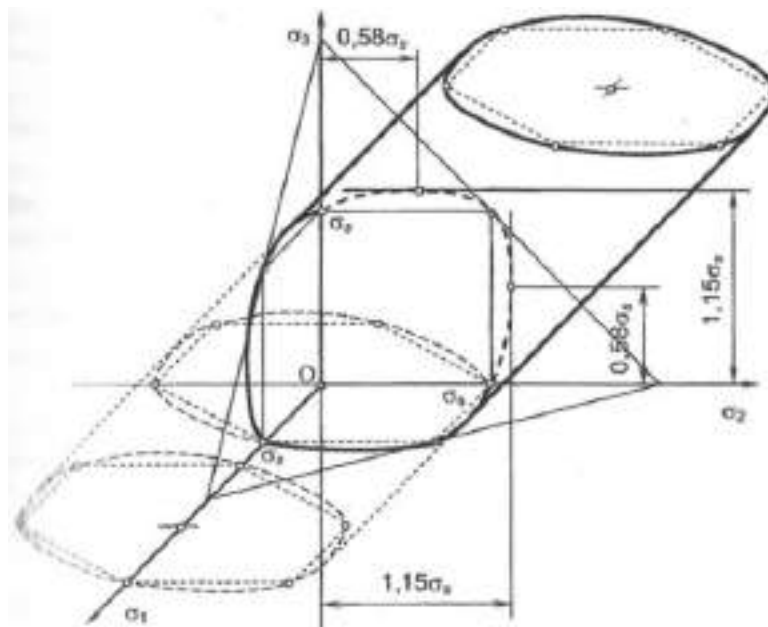


Рис. 4.5. Геометричний образ умови пластичності Мізеса-Генкі у точці тіла у формі нескінченної циліндричної поверхні.

Пластичні деформації у повздовжньому і поперечному відносно осі шва напрямках залежать від теплових характеристик процесу наплавлення і властивостей металу. Тому перерозподіл об'єму металу з обох боків швів майже однаковий як у складних конструкціях, так і в найпростіших елементах [130].

Термодеформаційні процеси, що відбуваються при наплавленні спричиняють об'ємний напружений (головні нормальні напруження відмінні від нуля) стан наплавлених виробів, який відповідно до четвертої теорії міцності,

можна оцінити шляхом порівняння еквівалентних напружень з гранично допустимими для даного матеріалу.

Висококонцентроване внесення тепла до наплавленого виробу спричиняє утворення нерівномірно розподілених пластичних деформацій, а отже, і відповідних усадкових сил, які спричиняють переміщення точок тіла.

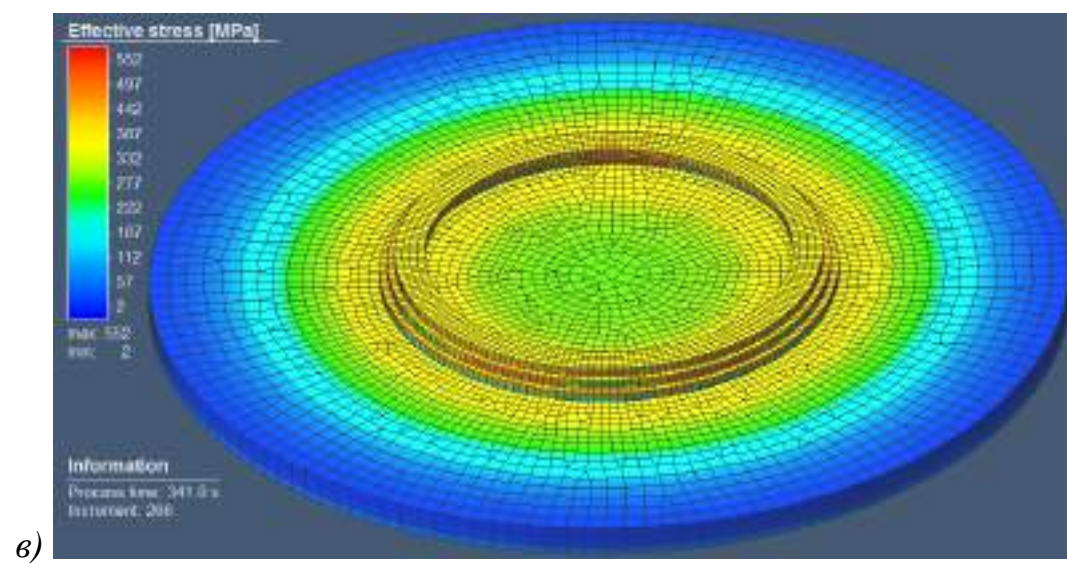
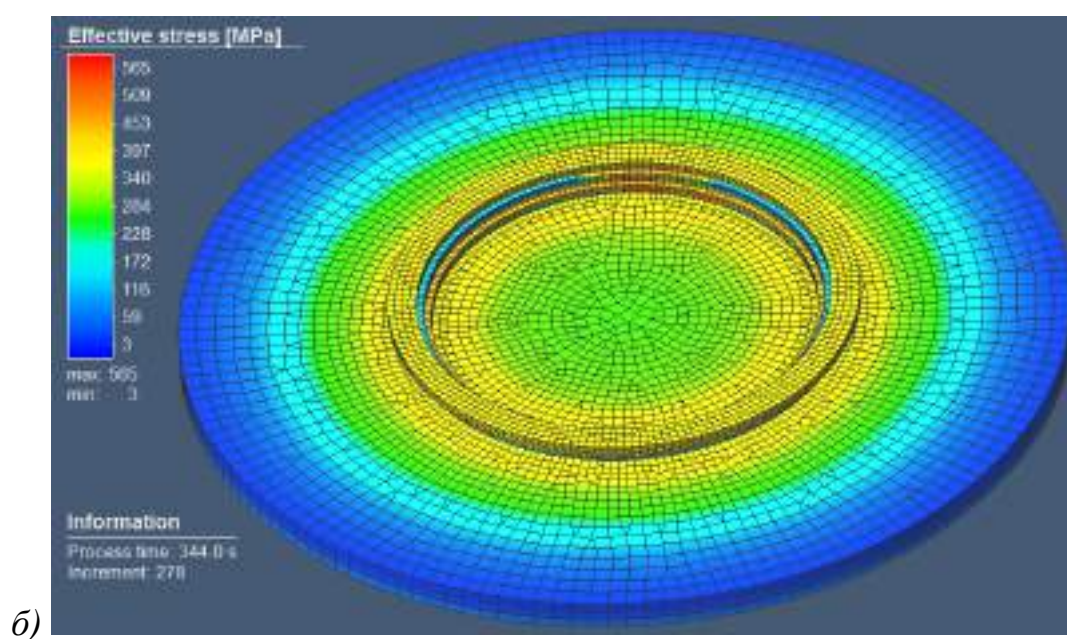
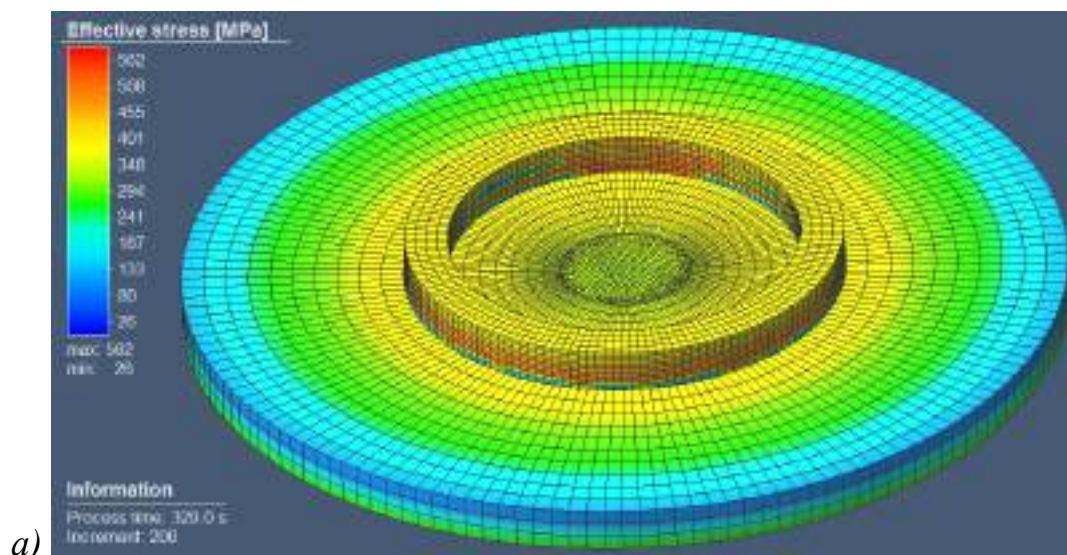
Таким чином доцільно проаналізувати зміни НДС тривимірних прототипів в процесі безперервного наплавлення заданої кількості валиків і в залишковому стані, а також визначити величину переміщень, які утворились після наплавлення.

4.3.2. Поля еквівалентних напружень у модельних прототипах.

Еквівалентні напруження показані на рис. 4.6 дозволяють простежити особливості НДС характерні для всіх змодельованих зразків.

Як видно з рис. 4.6 максимальні значення еквівалентних напружень утворились у місцях контакту першого валика з підкладкою ~ 520 МПа, що зумовлено великою жорсткістю підкладки, яка перешкоджає вільній усадці металу першого валика.

Найменші значення припадають на місце різкої зміни траєкторії валика ~ 9 МПа, що зумовлено геометричною формою зразка (наявність кутів) і перерозподілом напружень у процесі охолодження. В цілому, рівень напружень у залишковому стані у прототипах після наплавлення трьох валиків відповідає 400–440 МПа.



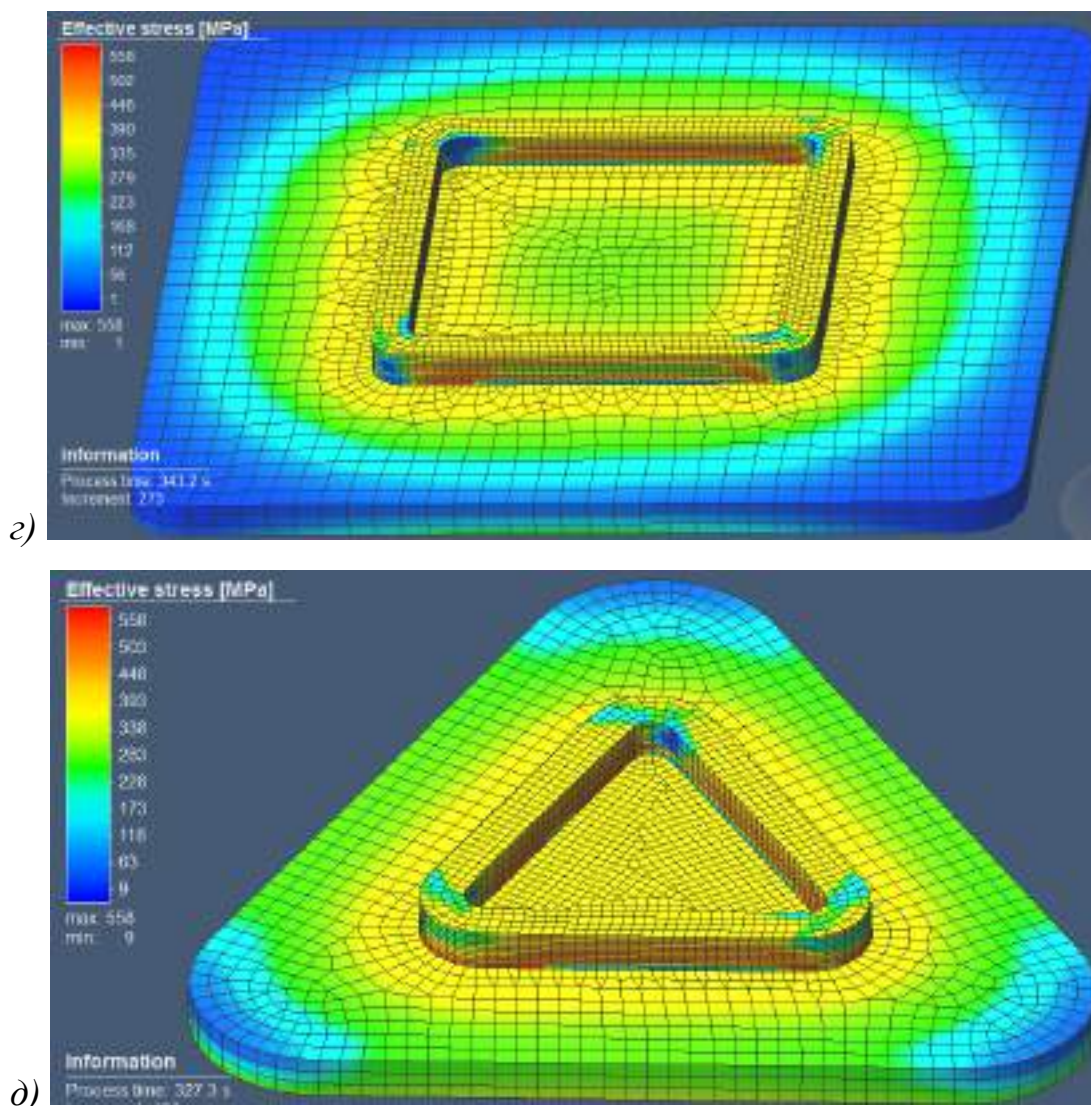
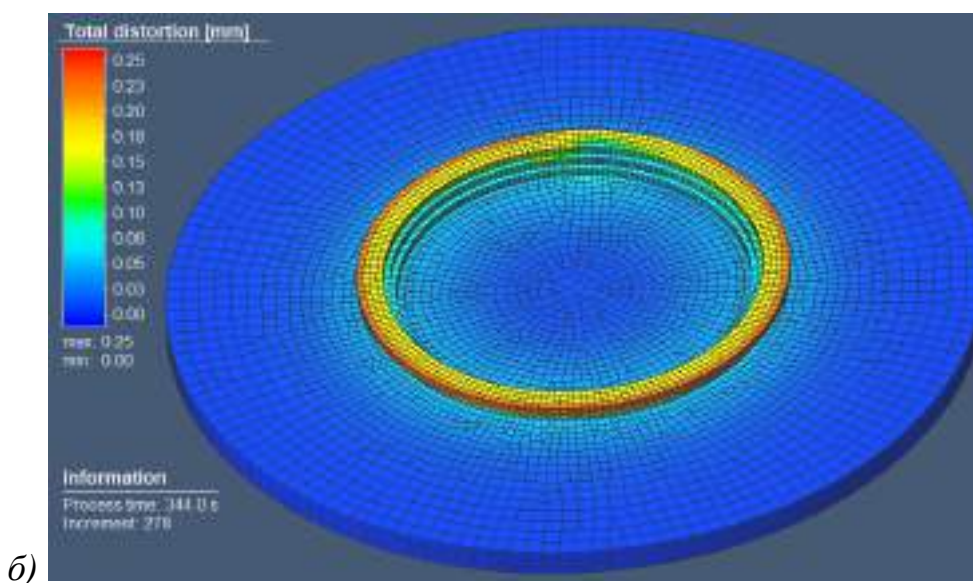
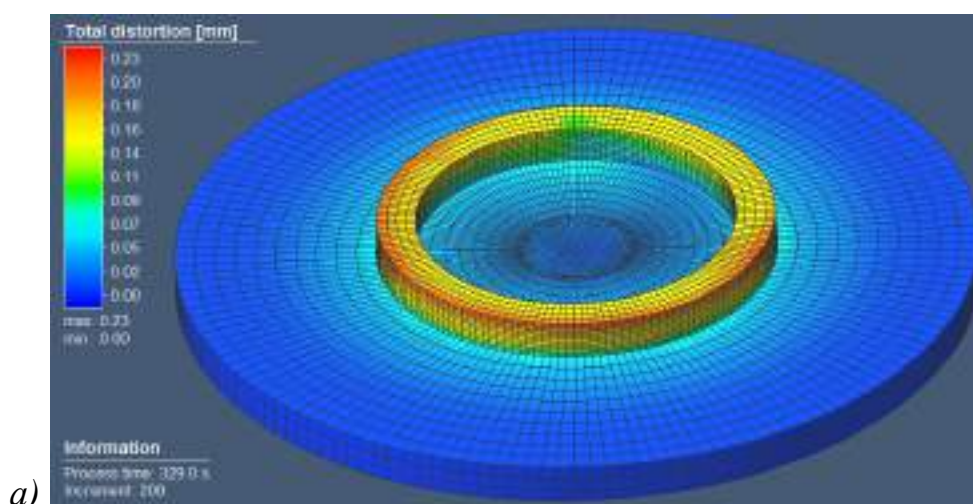


Рис. 4.6. Залишкові еквівалентні напруження у прототипах: а) – циліндричному; б) – розширеному конусі; в) – звуженому конусі; г) – пустотілій квадратній призмі; д) – пустотілій трикутній призмі.

Рівень напружень у підкладці коливається у діапазоні $\sim 120\text{--}350$ МПа. Залишкові напруження у поперечних перерізах валиків нержавіючої сталі НУФ-103 нерівномірно розподілені по висоті друкованих прототипів: найбільші напруження порядку 500 МПа утворились на поверхні першого валику, а найменші 390 МПа – на поверхні третього.

4.3.3. Переміщення в моделях прототипів.

Як видно з рис. 4.7 величина переміщень у наплавлених порошком НУФ-103 тривимірних прототипах не перевищує 0,28 мм, що дозволить забезпечити належний рівень точності геометричних розмірів у друкованих деталях та мінімізувати потребу у їх подальшій механічній обробці.



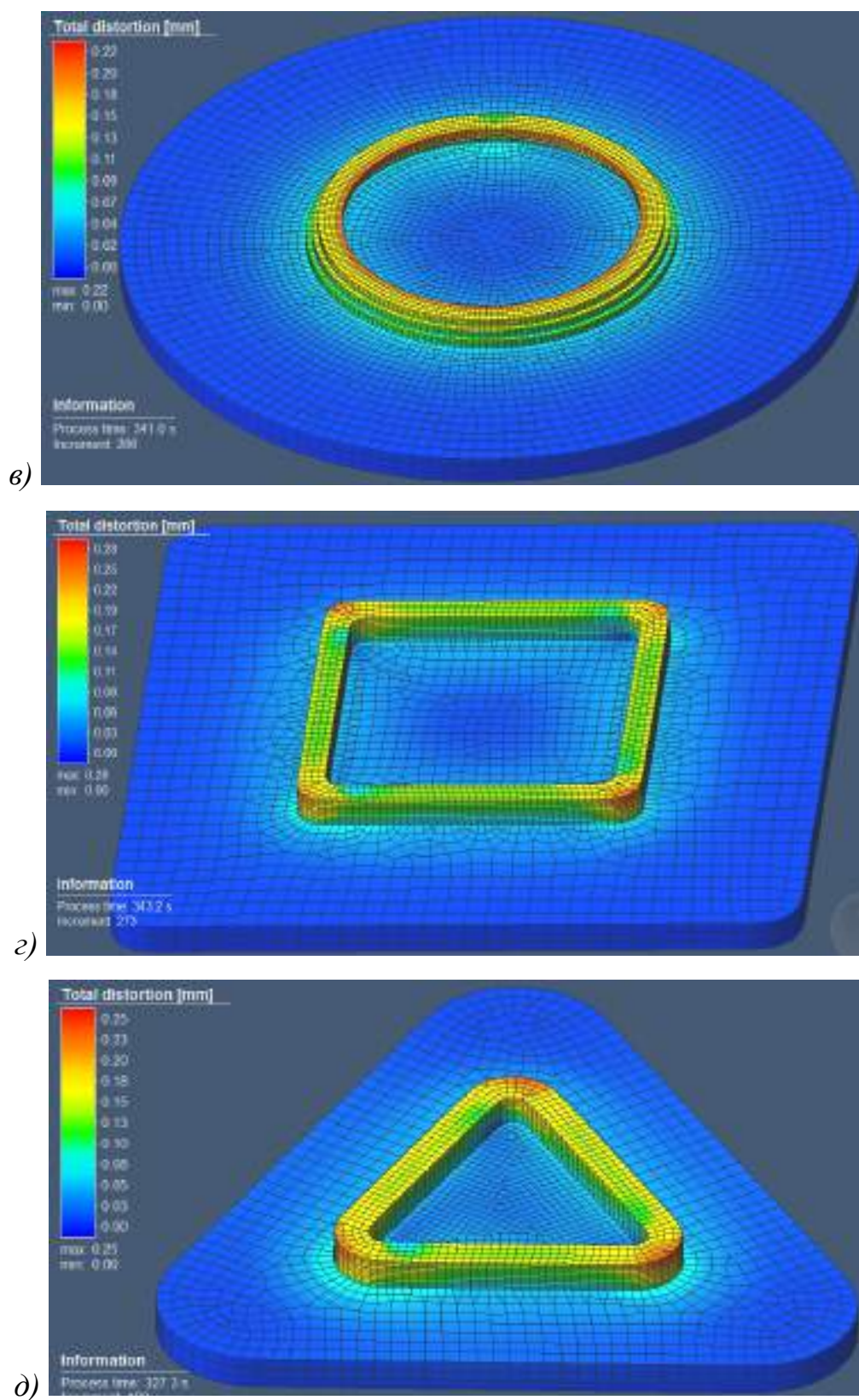







Рис. 4.7. Переміщення у прототипах: а) – циліндричному; б) – розширеного конусу; в) – звуженого конусу; г) – пустотілої квадратної призми; д) – пустотілої трикутної призми.

Загалом, аналіз результатів моделювання переміщень у наплавлених порошком HYF-103 тривимірних прототипах показав, що підкладка не зазнає деформацій і переміщень у процесі наплавлення валиків, про що свідчать розрахункові дані на рис. 4.7.

Еквівалентні пластичні деформації, максимальні та мінімальні значення еквівалентних напружень, а також переміщення для всіх моделей наведені у вигляді табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Порівняльна таблиця параметрів залишкового НДС у наплавлених порошком HYF-103 тривимірних прототипах.

Модельні й зразок										
Залишкові еквівалентні напруження, МПа										
Валик №	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
1	520	400	500	170	510	50	500	400	500	400
2	490	190	480	50	500	50	400	280	500	280
3	400	390	390	40	400	30	400	390	400	390
Модель	562	26	558	9	558	1	565	3	552	2
Залишкові еквівалентні пластичні деформації, *10 ⁻²										
Модель	17,4	0	15,6	0	16,4	0	17,4	0	14,6	0
Переміщення, мм										
Сумарні	0,23		0,25		0,28		0,25		0,22	

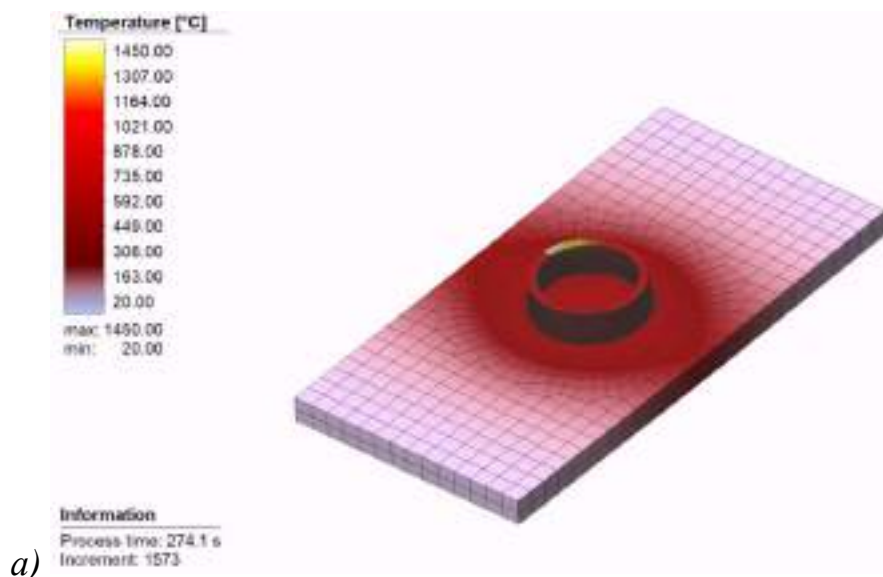
Аналіз осьових переміщень для змодельованих зразків показав, що складові мають однаковий порядок значущості (0,10–0,25 мм) і знаходяться в діапазонах:

- Циліндричний прототип(X;Y;Z): -0,22–0,22; -0,17–0,21;-0,17–0,13.
- Прототип розширеного конусу(X;Y;Z): -0,25–0,25; -0,23–0,25; -0,12–0,12.
- Прототип звуженого конусу(X;Y;Z): -0,12–0,13; -0,11–0,13; -0,20–0,13.

- Прототип пустотілої квадратної призми (X;Y;Z): -0,24–0,25; -0,23–0,23; -0,14–0,10.
- Прототип пустотілої трикутної призми (X;Y;Z): -0,24–0,20; -0,25–0,2; -0,14–0,12.

4.4. Дослідна перевірка методики моделювання НДС виробів, одержаних адитивним наплавленням.

Із застосуванням створеного технологічного комплексу обладнання виконувалася апробація комп'ютерної моделі термодинамічних процесів та напружено-деформованого стану (НДС) тривимірного металевого виробу. В якості такого виробу використовували прототип у вигляді пустотілого циліндра розміром порядку $\varnothing 32,5 \times 40$ мм з товщиною стінки 3,5 мм. Для цього за описаними у підрозділі 4.1 моделями методом скінченних елементів розраховували розподіли температур (рис. 4.8, а) і залишкових деформацій (рис. 4.8, б) у виробі при його пошаровому наплавленні. В результаті прогнозування НДС методом скінченних елементів, та відповідного внесення корекцій в алгоритм виготовлення друкованої деталі, було досягнуто зменшення впливу залишкових деформацій на відхилення форми циліндру, який друкували адитивним наплавленням, від цифрового прототипу.



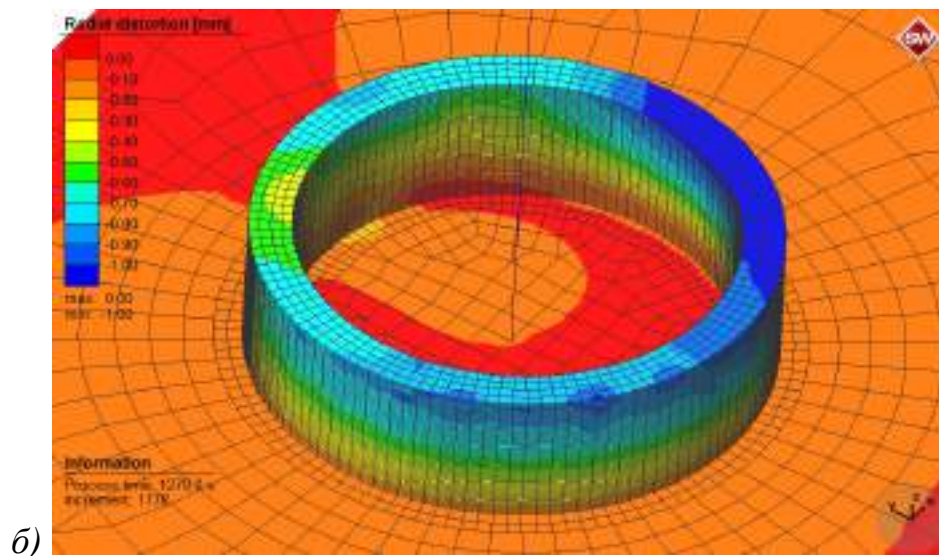


Рис. 4.8. Результати моделювання розподілу температур (а) і залишкових деформацій (б).

Для перевірки ефекту радіального зміщення стінки об'єкту при проведенні його адитивного наплавлення після кожного наплавленого шару виконувалося вимірювання геометричних параметрів. Спостерігався певний ефект радіального зміщення (рис. 4.8, б), який в подальшому був усунений за допомогою кількох ітерацій моделювання та експериментальної перевірки параметрів режиму наплавлення. Порівняння динаміки змодельованого і реального зміщення представлено на графіках рис. 4.9. Дослідження показали, що наплавлені вироби мають відхилення не більше 20% від змодельованого, що говорить про достатню ефективність моделювання.

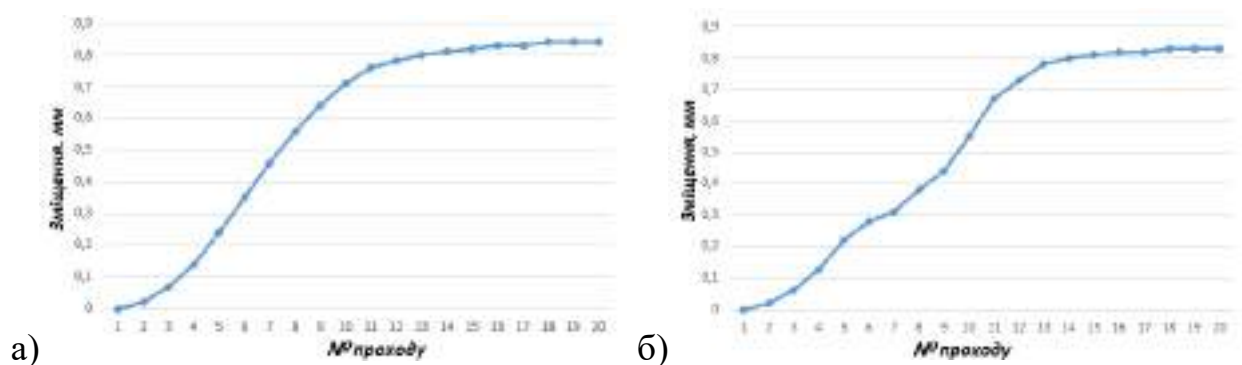


Рис. 4.9. Змодельовані (а) і виміряні (б) радіальні зміщення стінки циліндру, що наплавляли адитивним мікроплазмовим способом.

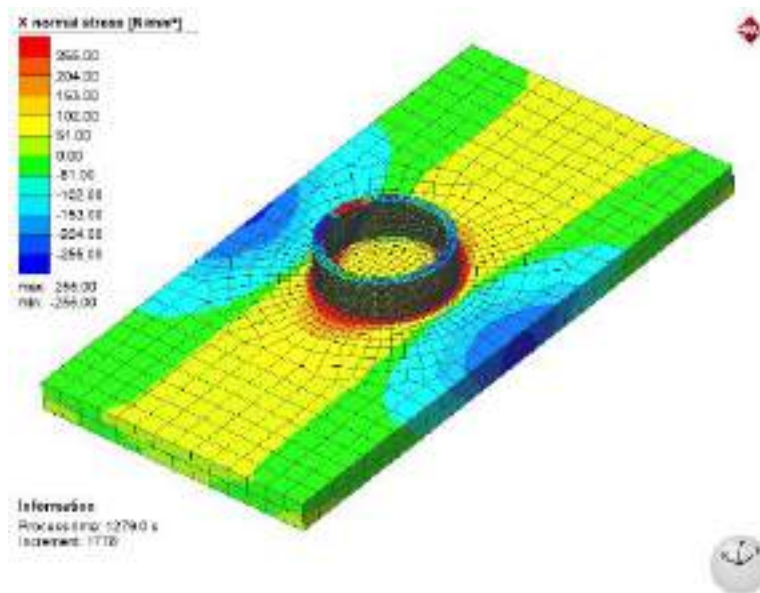
Було виконано моделювання процесів наплавлення порядку 50-ти просторових виробів з різними геометричними параметрами. Також було проведено реальне наплавлення порядку 50-ти тривимірних виробів різної форми, при різних параметрах режимів, та сформовано базу статистичних даних.

В результаті було отримано статистичну модель. Така модель дозволила прогнозувати залишкові деформації та напруження при наплавленні відповідних тривимірних об'єктів (рис. 4.10) за допомогою програмного забезпечення, яке на основі поєднання змодельованих та реально виміряних статистичних даних (змодельований напружено-деформований стан, а також виміряний стан залишкових деформацій після наплавлення) дозволяло підбирати параметри процесу мікроплазмового адитивного наплавлення відповідних просторових виробів. Таке програмне забезпечення додатково покращило результати виготовлення об'єктів адитивним наплавленням (рис. 4.11).

Розроблене програмне забезпечення (рис. 4.12) дозволяло обирати спосіб наплавлення (мікроплазмове з присаджувальним порошком, або мікроплазмове з присаджувальним дротом), матеріал наплавлення (табл. 2.1), одну із примітивних об'ємних фігур, а також задавати їх основні розміри (габаритні розміри, товщина стінок, висота наплавлення). В результаті аналізу статистичних даних, отриманих методом вимірювання реально наплавлених виробів та виконаного моделювання напружено-деформованого стану наплавлених деталей програма дозволяла підібрати параметри наплавлення (швидкість наплавлення, струм наплавлення, витрати газів, витрати присаджувального матеріалу, довжину дуги), а також генерувати програмний код (G-код) для керування переміщенням мікроплазмотрону (траєкторією і швидкістю переміщення) та основними параметрами технологічного процесу. Довжина дуги підтримувалась за допомогою зворотного зв'язку системи АРНД (автоматичне регулювання напруги на дузі), яка в режимі реального часу вимірювала напругу та регулювала положення мікроплазмотрону по висоті таким чином, щоб підтримувати стабільну напругу, що дозволяло підтримувати задану довжину дуги. Система АРНД застосовувалась в якості допоміжної

системи на початковому етапі дослідження, в міру відсутності достатнього об'єму статистичних даних, в тих випадках, коли важко було з достатньою точністю спрогнозувати висоту шарів об'ємних деталей, що наплавлялись.

Таким чином можна вважати доведеним, що застосування прогнозування напружено-деформованого стану в поєднанні зі збором статистичних даних реально наплавлених деталей та створення програмного забезпечення для їх аналізу і підбору параметрів адитивного мікроплазмового наплавлення тривимірних металевих виробів додаткового підвищує ефективність роботи комплексу в цілому. Створений апаратно-програмний комплекс мікроплазмового наплавлення здатний істотно розширити можливості звичайного процесу наплавлення та вивести даний процес на принципово новий рівень із можливістю прогнозованого виявлення відхилень від точності друку та оптимізувати параметри технологічного процесу виготовлення просторових об'єктів за допомогою аналізу модельовано-накопичених даних.



a)

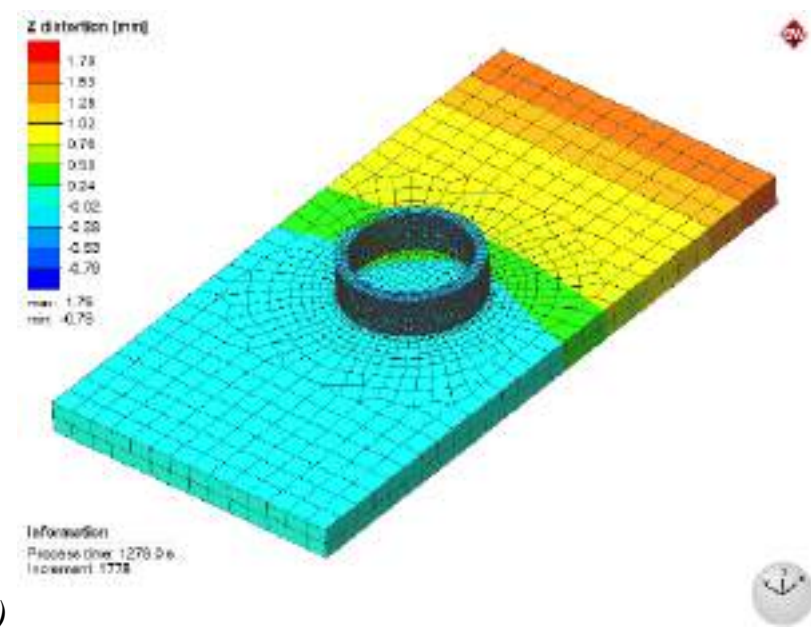
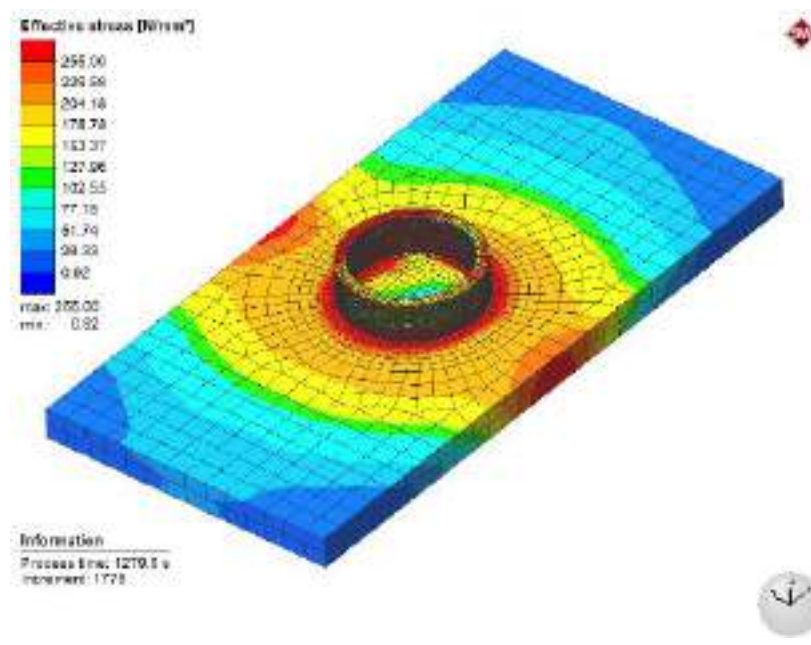
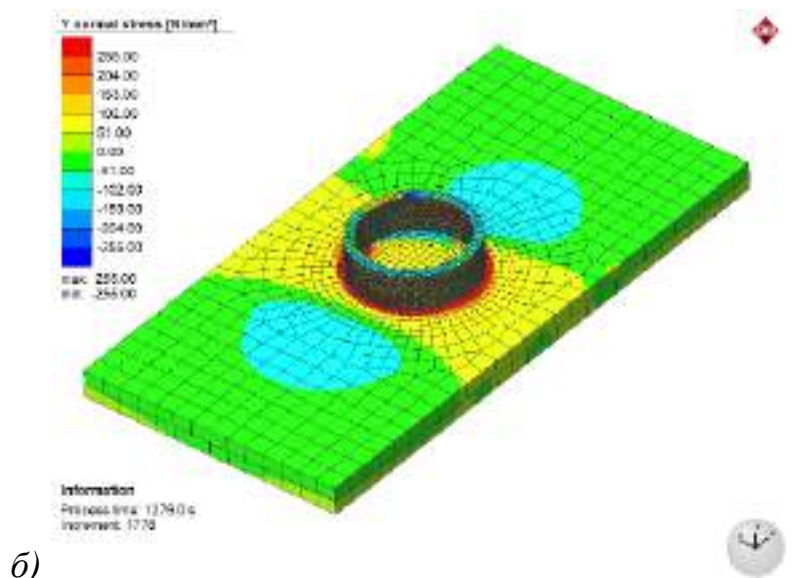


Рис. 4.10. Приклад моделювання залишкового НДС при пошаровому мікроплазмовому наплавленні об'єкту типу циліндр на оптимальному режимі:

- а) – напруження нормальні до X ; б) – напруження нормальні до Y ; в) – еквівалентні напруження; г) – залишкові деформації вздовж Z .



Рис. 4.11. Приклад мікроплазмового адитивного наплавлення виробу типу «циліндр»: зліва – застосування модельованого напружено-деформованого стану; справа – поєднання модельованого напружено-деформованого стану із додатковим аналізом накопичених статистичних даних.

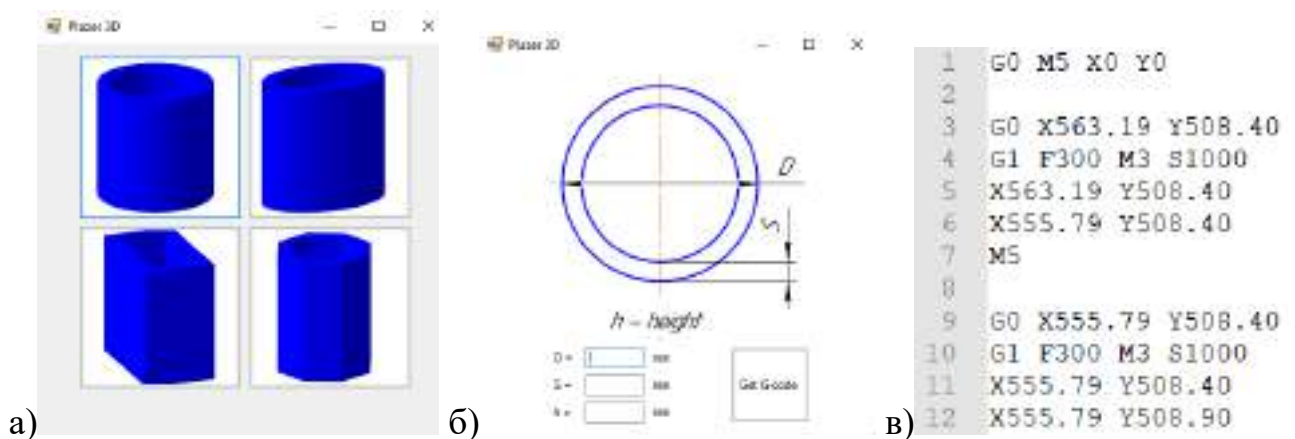


Рис. 4.12. Вікна програмного забезпечення для підбору параметрів наплавлення об'ємних примітивів мікроплазмовим адитивним способом: (а) – вікно вибору типу деталі; (б) – вікно вибору геометричних параметрів деталі, що наплавляється; (в) – приклад згенерованої керуючої програми.

Висновки по розділу 4.

1. Розроблено п'ять скінчено-елементних моделей складної просторової форми («циліндр», «трикутна призма», «квадратна призма», «розширений конус», «звужений конус») для визначення залишкових напружень і деформацій (переміщень), які враховують технологічну послідовність виконання наплавлених валиків на підкладці з урахуванням хімічного складу і механічних властивостей матеріалів підкладки і присаджувального дроту.
2. Методом скінченних елементів отримано розв'язок термомеханічної задачі для п'яти просторових прототипів складної геометричної форми («циліндр», «трикутна призма», «квадратна призма», «розширений конус», «звужений конус») під час безперервного наплавлення формуючих об'єктів.
3. Встановлено, що для всіх змодельованих зразків високий рівень залишкових еквівалентних напружень у 1-му валику зумовлений жорсткістю між підкладкою і валиком і при цьому напруження не перевищують границі міцності матеріалу наплавленого металу із підкладкою.
4. Встановлено, що залишкові еквівалентні напруження зменшуються у кожному наступному наплавленому порошком HYF-103 валику на 7–20% для всіх змодельованих просторових прототипів, що виготовляються адитивним наплавленням.
5. При мікроплазмовому наплавленні порошком HYF-103 найбільші (565 МПа) за величиною еквівалентні напруження утворюються у модельному зразку типу «розширений конус», а найменші (552 МПа) у зразку типу «звужений конус». Для всіх моделей максимальні значення радіальних переміщень відповідають діапазону 0,22–0,28 мм.
6. Експериментальні дослідження показали, що наплавлені вироби мають залишкові деформації з відхиленнями не більше 20% від змодельованих, що свідчить про достатню ефективність моделювання для подальшого застосування розробленої методики для розрахункового врахування НДС у системі автоматичного моніторингу якості наплавлення просторових об'єктів.

7. Запропоновано підхід до підбору параметрів технологічного процесу наплавлення, який базується на поєднанні даних процесу моделювання напружено-деформованого стану наплавлених виробів із аналізом статистичних даних, сформованих в результаті вимірювання деформацій наплавлених деталей. Створено програмне забезпечення, яке дозволяє задавати спосіб наплавлення (мікроплазмове з присаджувальним порошком, або мікроплазмове з присаджувальним дротом), матеріал наплавлення, одну із примітивних об'ємних фігур, а також задавати їх основні розміри. На основі заданих даних програмне забезпечення дозволяє підібрати параметри наплавлення (швидкість наплавлення, струм наплавлення, витрати газів, витрати присаджувального матеріалу, довжину дуги), а також генерувати програмний код (G-код) для керування переміщенням мікроплазмотрону та основними параметрами технологічного процесу.

Розділ 5. Створення технологічних прийомів, обладнання та системи автоматичного моніторингу і керування процесами адитивного мікроплазмового наплавлення.

5.1. Розробка базових технологічних прийомів адитивного мікроплазмового наплавлення.

Розробку технологічних прийомів адитивного мікроплазмового наплавлення проводили на прикладі виготовлення просторового примітиву «циліндр». Такий циліндр з порошку нержавіючої сталі НУФ-103 повинен був мати наступні розміри: висота – 32,5 мм; товщина стінки – 3,5 мм; діаметр – 40 мм. Для виготовлення циліндру планувалося виконати 20 проходів, тобто адитивно наплавити 20 кільцевих валиків. Розміри підкладки з нержавіючої сталі, на яку повинен наплавлятися циліндр, становили 200x100x10 мм.





Після проведення кількох ітерацій розрахунків режиму з мінімальними залишковими деформаціями і напруженнями було отримано наступні оптимальні параметри режиму наплавлення: значення сили струму основної (мікроплазмової) дуги $I_{од} = 25$ А, при напрузі $U = 30$ В і швидкості наплавлення $V = 550$ мм/хв. При цьому були отримані наступні геометричні параметри ванни: глибина – 0,7...1 мм; ширина – 3,5 мм; довжина – 8 мм.


Проведені розрахунки не дали чіткого визначення витрат присаджувального порошку $Q_{пр}$ і потоків робочих газів (плазмоутворюючого $Q_{пл}$, захисного $Q_з$ і транспортуючого $Q_{тг}$). Тому для уточнення зазначених параметрів було проведено низку технологічних експериментів, результати яких наведені в табл.5.1. Для кожного режиму визначали погону енергію E [Дж/мм] з урахуванням ККД процесу мікроплазмового наплавлення (згідно літературним джерелам він становить порядку 0,8).

Виконані технологічні дослідження дозволили встановити найкращій режим, за якого формується заздалегідь заданий виріб (в даному випадку – циліндр) – режим №5, табл.5.1. Встановлено, що для досягнення позитивного результату необхідно мінімізувати витрати порошку, а також дещо підвищити

погону енергію. При цьому для того, щоб розпочати процес наплавлення стартували на дещо більших струмах (на 10 А), а після утворення сталого процесу (що відбувалося протягом 2-3 секунд) струм основної дуги зменшували (на ті ж 10 А).

Таблиця 5.1. Параметри режимів адитивного мікроплазмового наплавлення просторового примітиву «циліндр» порошком нержавіючої сталі Castline eutectic EuTroLoy 16316 зі швидкістю 550 мм/хв при застосуванні аргону в якості плазмоутворюючого (сопло Ø1,0 мм) і транспортуючого (сопло Ø4,0 мм) газу.

№ ре жи му	Параметри технологічного режиму								Пого на енер гія E, Дж/м	Фото результату
	I _{чд} , А	Q _{чд} , л/хв	I _{од} , А	Q _{пл} , л/хв	Q _з , л/хв	U, В	Q _{пр} , г/хв	Q _{тг} , г/хв		
1.	25	2,5	30	0,3	25	27	6,5	3	71	
2.	25	2,5	30	0,3	25	33	9	3	86	
3.	25	2,5	30	0,3	25	33	9	3	86	
4.	20	4	25	0,2	25	42	6	4	92	

5.	30 підпа л., 20 робоч.	4	35 підпа л., 25 робо ч.	0,2	25	40	6	4	87	
----	---------------------------------	---	-------------------------------------	-----	----	----	---	---	----	---

Примітка: «ЧД» – чергова дуга.

Окрім прикладу циліндру також було підібрано режими наплавлення низки базових просторових прототипів і довільних об'єктів (рис. 5.1). Все це дало змогу створити базу даних оптимальних параметрів режимів адитивного мікроплазмового порошкового наплавлення, які надалі застосовувалися для створення керуючої програми і системи автоматичного моніторингу. Критерієм оптимізації було зменшення відхилень від заданих розмірів в межах до 1 мм.



Рис. 5.1. Приклади адитивного мікроплазмового порошкового наплавлення базових просторових прототипів і довільних об'єктів з порошку ПЖ1 (а) та НУФ-103 (б)

Проведення адитивного мікроплазмового наплавлення із застосуванням оптимальних параметрів режимів для отримання відповідних зразків довело

необхідність додаткової розробки системи автоматичного моніторингу процесу для подальшого підвищення якості результатів.

5.2. Створення технологічного комплексу адитивного мікроплазмового наплавлення та апробація системи автоматичного моніторингу.



Рис. 5.2. Зовнішній вигляд створеного технологічного комплексу обладнання для адитивного мікроплазмового наплавлення.

Для підвищення якості виготовлення металевих виробів адитивним мікроплазмовим наплавленням було спроектовано та виготовлено технологічний комплекс обладнання, який включав (рис. 5.2): тривимірний маніпулятор з робочим полем $X:Y:Z = 100 \times 900 \times 900$ мм із столом для базування тривимірних об'єктів, що виготовляють, мікроплазмотрон запропонованої покращеної конструкції, систему електричного живлення мікроплазмотрону, порошковий дозатор-живильник, системи газопідготовки і охолодження, систему керування комплексом. До даного комплексу було додано окремо розроблену систему автоматичного моніторингу, яка взаємодіяла із системою керування. Для процесу моніторингу якості виготовлення виробу і створення керуючої програми

було задіяно нейронні мережі, які показали високу ефективність застосування при вирішенні поточних завдань.

Створений технологічний комплекс обладнання було оснащено порошковим дозатором-живильником і мікроплазмотроном оригінальної розробки (рис. 5.3, 5.4). Це дало змогу вести наплавлення на підібраних оптимальних режимах і, в результаті, покращити одержувані результати.

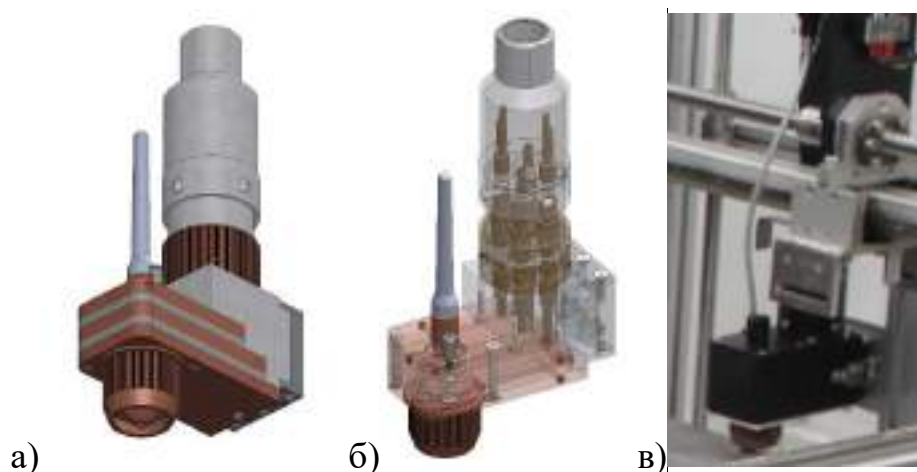


Рис. 5.3. Комп'ютерна 3D-модель і готовий зразок мікроплазмотрону з оптимізованою течєю газових потоків.

З використанням створеного технологічного комплексу обладнання було проведено низку експериментів з виготовлення тривимірних металевих об'єктів для перевірки дії системи автоматичного моніторингу і всього комплексу в цілому. Дана система здійснювала моніторинг основних параметрів процесу наплавлення, для чого використовувалися наступні датчики: напруги на дузі, струму дуги, температури дуги, витрат газів, енкодери (датчики положення і швидкості переміщення плазмотрону), і вимірювання розмірів та фізико-механічних характеристик виробу після процесу друку. Система має можливість навчатись і накопичувати дані, працює шляхом пошуку кореляцій між вимірюваними сигналами та їх впливом на геометричні властивості та візуальну оцінку наплавлених виробів. Завдяки наявності зворотних зв'язків, система

автоматичного моніторингу проводить оцінку якості поточного процесу та має можливість автоматично коригувати параметри процесу наплавлення.

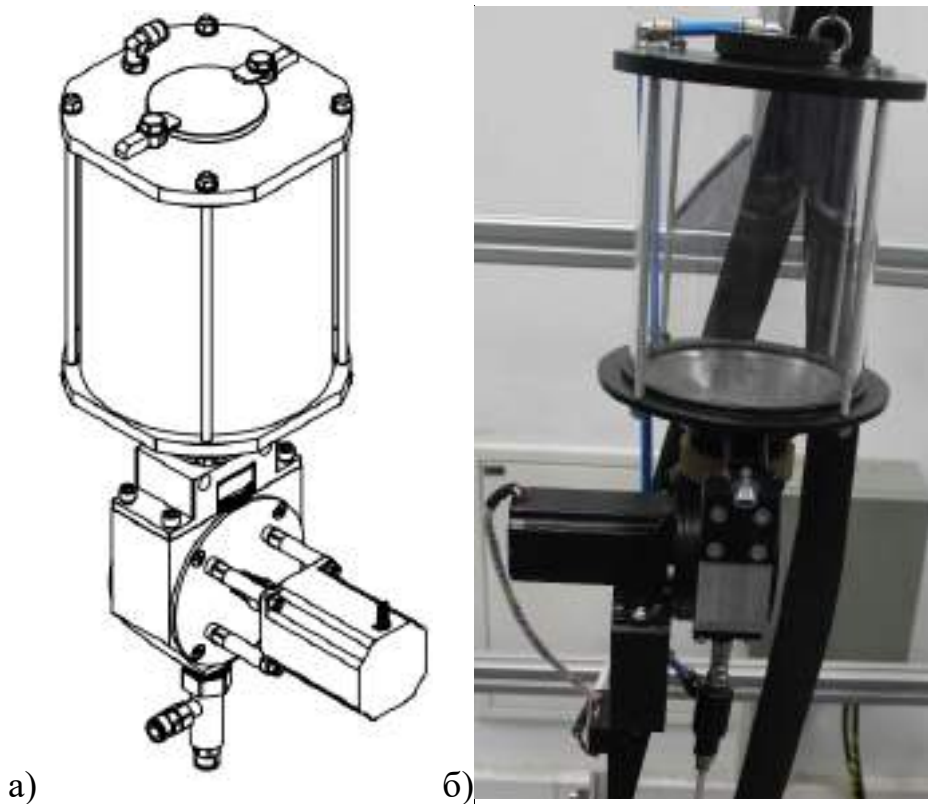


Рис. 5.4. Схема і зовнішній вигляд порошкового дозатора-живильника.



Рис. 5.5. Процес пошарового адитивного мікроплазмового наплавлення на створеному технологічному комплексі.

При наплавленні використовувалися попередньо визначені оптимальні параметри режимів (рис. 5.5). Для стабілізації довжини дуги при цьому застосовували систему АРНД (автоматичного регулювання напруги дуги).

Дослідження показали, що починаючи вже з 75 ітерації система автоматичного моніторингу має досить високу точність (ймовірність отримання розбіжностей розмірів більше 1 мм між змодельованими та виготовленими виробами складала менше 10%) прогнозування та слідкування за якістю друкованих виробів (рис. 5.6).

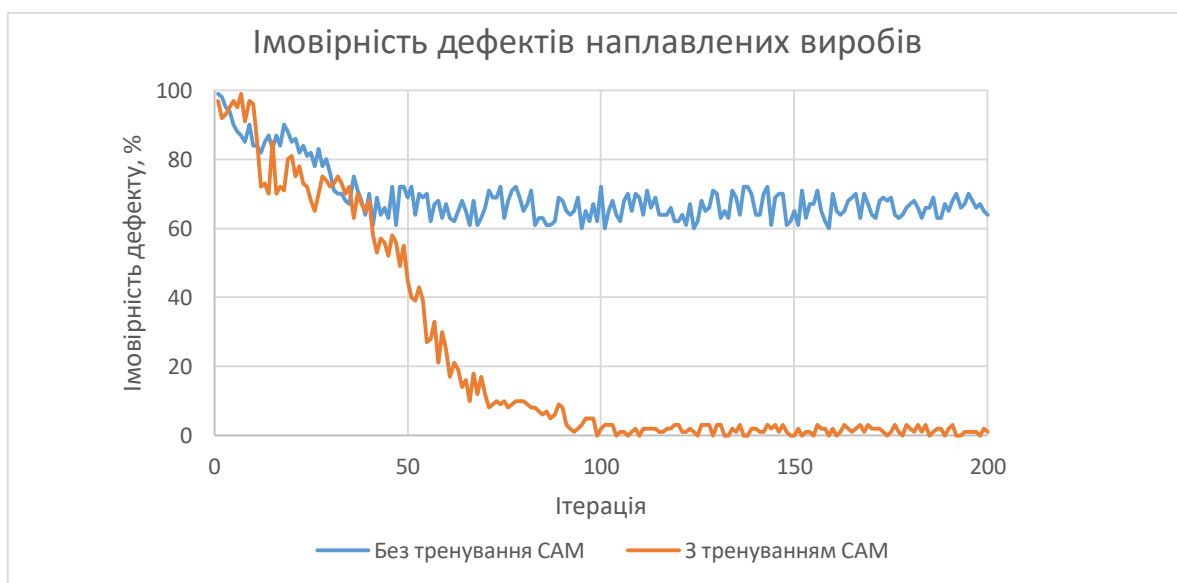


Рис. 5.6. Порівняння імовірності отримання дефектів наплавленої деталі тренованої (помаранчевий колір) і нетренованої (синій колір) системи автоматичного моніторингу.

5.3. Автоматичний моніторинг якості процесу адитивного мікроплазмового наплавлення.

У процесі підготовки до наплавлення тривимірних об'єктів використовували два програмні рівня: CAD (Computer Aided Design) – система автоматичного проектування і CAM (Computer Aided Manufacturing) – система автоматичного виробництва. Дані системи використовували для створення цифрових моделей і їх трансляції в програмні інструкції для 3D принтера.

Для коригування системи автоматичного, адитивного виробництва необхідно мати зворотній зв'язок між існуючими параметрами (законами), за якими система створює програмні інструкції і їх необхідними корекціями.

Досягнення рішення такої задачі можливе шляхом застосування систем автоматичного моніторингу якості та регулювання параметрів технології мікроплазмового пошарового наплавлення у адитивному виробництві (рис. 5.7).

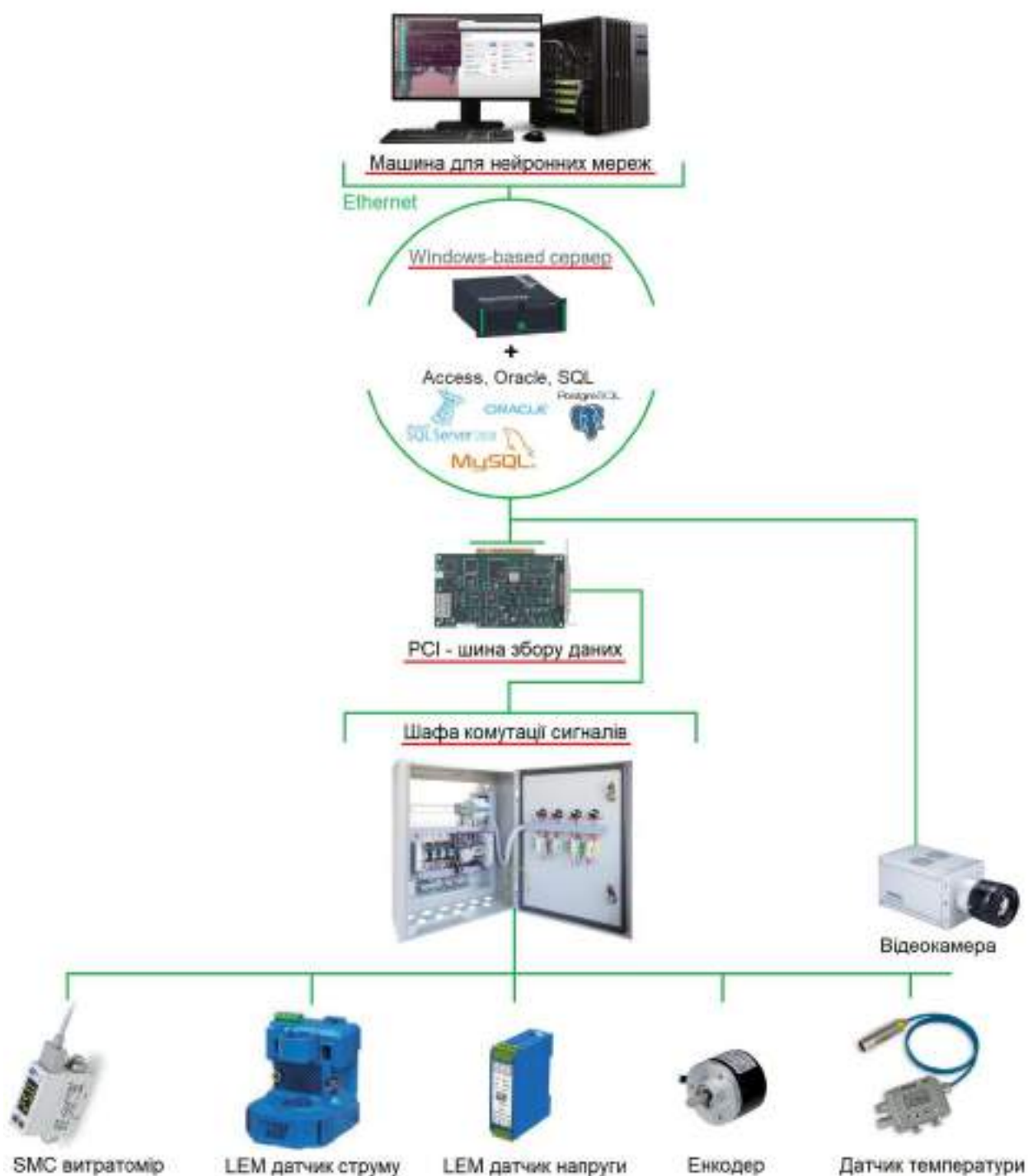


Рис. 5.7. Структурна схема системи автоматичного моніторингу.

У процесі адитивного мікроплазмового наплавлення присаджувальним дротом чи порошком пропонується застосування принципово нового комплексного підходу, побудованого на принципі вимірювання множини параметрів наплавлення та їх аналізу штучною нейронною мережею. До таких факторів відносяться, в першу чергу: напруга на дузі, струм дуги, витрати присаджувального порошку і газів, температура зварювальної ванни, геометричні параметри виробу, що друкують. Нейронна мережа виступає інструментом для виявлення збурень, відхилень і встановлення закономірностей між параметрами процесу наплавлення та їх впливу на геометричні параметри наплавленого виробу. Нейронна мережа оснащена зворотнім зв'язком із системою керування для автоматичного регулювання параметрів наплавлення в режимі реального часу.

Система автоматичного моніторингу працює наступним чином. Датчик струму знімає показники та осцилограму струму. Між потенціалами джерела живлення дуги під'єднаний канал вимірювання напруги, вимірювання відбувається постійно в режимі реального часу. Канал вимірювання напруги через дільник підключений до аналого-цифрового перетворювача контролера. Датчики подачі газів збирають дані про подачу захисного, плазмоутворюючого і транспортуючого газів в зону наплавлення. Кодувальники (encoder) передають дані про поточний стан плазмотрону, а також швидкість переміщення плазмотрону. Датчик контролю наявності присаджувального дроту чи порошку передає дані про наявності дроту чи порошку в зоні наплавлення. Датчик температури реєструє температуру наплавлення. Усі сигнали з датчиків проходять через аналого-цифровий перетворювач де перетворюються у цифровий сигнал і передаються на сервер. А пізніше із сервера експортуються у нейронну мережу. У нейронних модулях проходить обробка отриманої інформації та обчислення з метою прийняття рішення для оптимізації процесу тривимірного адитивного наплавлення. Вхідними параметрами для системи є наступні дані:

- дані про величину і форму струму;

- дані про величину і форму напруги;
- дані про надходження захисного газу в зону наплавлення;
- поточний стан плазмотрону по висоті Z;
- інформація про поточну швидкість переміщення друкуючої головки;
- температура мікроплазми;

Вихідними параметрами системи при оптимізації режимів адитивного мікроплазмового наплавлення є:

- задання величини та форми струму наплавлення;
- коригування швидкості переміщення по координатах X, Y;
- коригування підйому по висоті Z;
- коригування швидкості подачі присаджувального дроту чи порошку;
- коригування витрат газів.

Система автоматичного моніторингу якості наплавлення об'ємних металевих виробів виконує роль пошуку кореляцій (взаємозв'язків) між вхідними та виміряними параметрами технологічного процесу. На основі встановлених кореляцій система автоматичного моніторингу оцінює поточний стан процесу та виконує задачу класифікації (якщо їй наперед задані критерії оцінки), або кластеризацію (без заданих критеріїв оцінки). В результаті чого, шляхом зворотних зв'язків вносить коригування в задані параметри технологічного процесу. Більшість параметрів технологічного процесу відслідковувались в режимі реального часу, окрім вимірювання геометричних характеристик наплавлених деталей. Навчання нейронної мережі відбувалось шляхом штучного внесення змін окремо в кожен з параметрів технологічного процесу, за умови стабільності усіх інших параметрів. В результаті навчання нейронної мережі, наприклад, були отримані наступні кореляції:

- За умови сталої довжини дуги, швидкості переміщення, витрат газів та присаджувального матеріалу, в результаті зміни ширини наплавлених стінок, навчання нейронної мережі призводило до кластеризації процесу за критерієм регулювання струму наплавлення.

- Також, за критерієм регулювання струму наплавлення нейронна мережа кластеризувала якість процесу у випадку зміни температури мікроплазми, при умові сталої довжини дуги, швидкості переміщення, витрат газів та присаджувального матеріалу.

- При одночасній зміні висоти та ширини наплавленого валика та заданні умови сталої швидкості переміщення, довжини дуги, струму наплавлення та витрат газів система автоматичного моніторингу в результаті тренування навчилася оцінювати якість наплавлення по критерію подачі присаджувального матеріалу.

- Також навпаки, при заданні умови сталої подачі присаджувального матеріалу, швидкості переміщення, довжини дуги, сталому струмі, витратам газу та одночасній зміні висоти та ширини наплавленого валика система автоматичного моніторингу якості наплавлення навчилася оцінювати процес по критерію швидкості переміщення мікроплазмотрону.

- Також, при збільшенні ширини наплавленого валика за умови стабільної швидкості переміщення, подачі присаджувального матеріалу та потужності мікроплазми – система автоматичного моніторингу навчилася знаходити кореляцію за витратами плазмоутворюючого газу (при збільшенні витрат плазмоутворюючого газу відбувалось збільшення ширини наплавленого валика).

В якості одного з прикладів результатів роботи системи автоматичного моніторингу, на рис. 5.10 (а) наведено кластеризацію «якісного» та «неякісного» наплавлення на основі аналізу величини та масштабованої форми струму наплавлення.

Всі вихідні параметри апаратно-програмного комплексу безпосередньо пов'язані з системою ЧПУ маніпулятора (мережева взаємодія). Виходячи з отриманих даних, нейронні модулі можуть віддавати команди системі ЧПУ на підйом, або опускання плазмотрону до зони наплавлення, збільшення або зменшення швидкості подачі дроту чи порошку і швидкості переміщення друкуючої головки уздовж формованого шару, коригувати величину струму наплавлення, тим самим домагаючись заздалегідь заданих режимів 3D друку зі

стабільними розмірами формованої заготовки і структури металу, регулювати витрати захисних, плазмоутворюючих та транспортуючих газів. При цьому якщо в апаратно-програмному комплексі закінчився захисний газ або дріт (порошок), що наплавляється, чи випадково відбулось гасіння основної дуги, то система на підставі інформації від датчиків дасть команду на зупинку друку з виведенням повідомлення про вимогу заміни газових балонів або установки нової котушки з дротом чи потреби у заповненні бункеру дозатора-живильника.

Реєстрацію параметрів процесу проводили за допомогою обладнання створеного технологічного комплексу, яке складалось з набору датчиків вимірювання даних, персонального комп'ютера з платою для цифро-аналогових входів та налаштованої бази даних для зберігання та структуризації даних (рис. 5.8). Також дана система поєднувала в собі інструмент для моделювання процесів адитивного та зварювального виробництва Simufact Weldind [131]. В якості бази даних використовувався інструмент PostgreSQL [132].

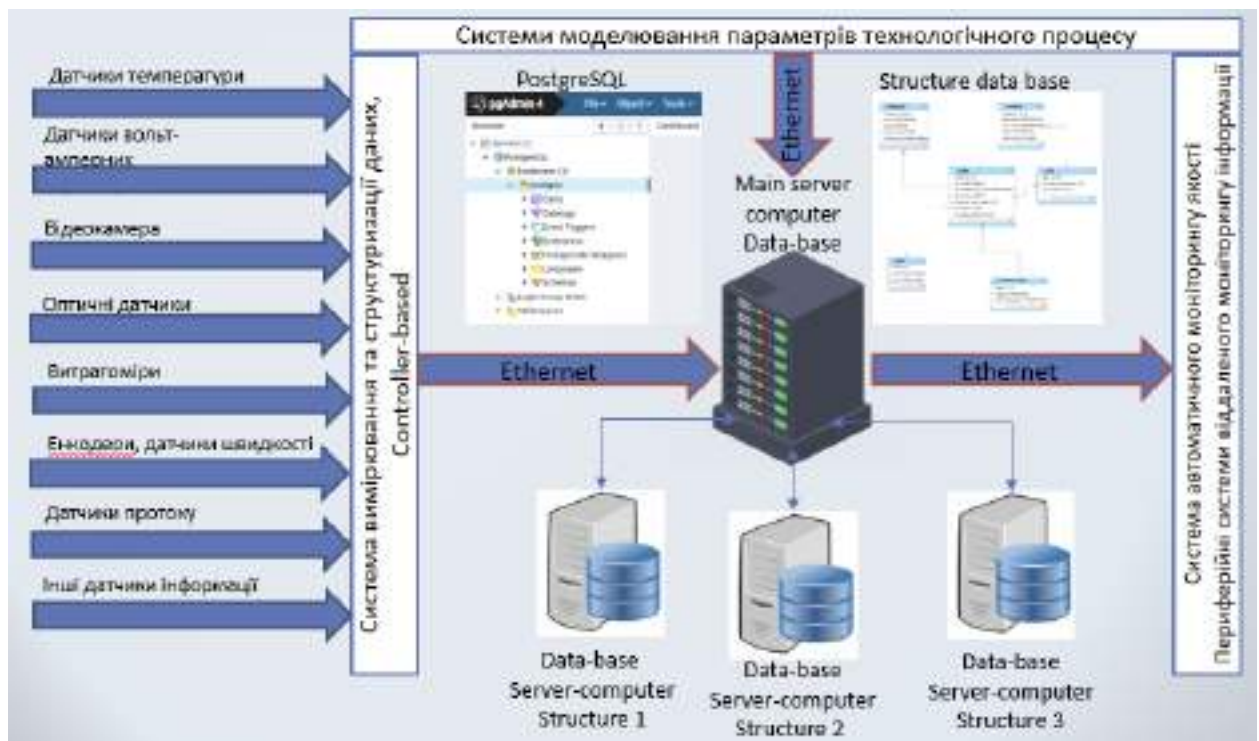


Рис. 5.8. Схема отримання і обробки інформації системою автоматичного моніторингу якості.

В результаті для обробки отриманих цифрових даних застосовано математичний пакет програм *Matlab R2013b*, основною перевагою якого є те, що до його складу входить пакет прикладного програмного забезпечення *Neural Network Toolbox*, який є потужним інструментом для проектування штучних нейронних мереж [133]. Для кластеризації даних використовували нейронні мережі: карту Коханена з упорядкованим розташуванням нейронів [134] та мережу LVQ (Learning Vector Quantization) [135]. Кластеризація здійснювалась шляхом розбиття даних на два кластери, по признаку якісних і неякісних результатів наплавленого шару.

Перевірку нейронної мережі для визначення точності виявлення дефектів здійснювали шляхом подачі на вхід навчених нейронних мереж всієї послідовності даних, записаних для кожного експерименту. Загальна принципова схема роботи системи автоматичного моніторингу наведена на рис. 5.9. Із системи збору даних, що зображена на рис. 5.8., зокрема із сервера, дані імпортуються на вхід нейронної мережі у вигляді матриці даних, що відображають показники вимірюваних параметрів режиму в певний момент часу. Далі задавались нейрони та зв'язки між ними. Для обох типів використовуваних мереж використовували одну й ту саму навчальну послідовність. Карта Коханена мала два нейрони, мережа LVQ – десять нейронів у першому шарі та два у другому. Кількість нейронів першого шару відповідає довжині вектору входу, другого – кількості класів, на які поділяється вектор входу. Після обчислення на виході нейронної мережі з'являлись результати виконання задачі кластеризації, тобто розбиття на кластери, які відображали наявність тих чи інших відхилень від процесу.

Результати роботи нейронної мережі по оцінці дослідних зразків адитивного мікроплазмового наплавлення показано на рис. 5.10. Стовпці діаграми відображають дефектні та бездефектні наплавлені валики (рис. 5.10, а).

Дослідження показало, що починаючи вже з 75 ітерації система автоматичного моніторингу набуває властивості самостійно кластеризувати та отримувати достовірні рішення в процесі відслідковування якості друкованих

виробів, що в свою чергу призводило до помітного зменшення нерівностей стінок друкованих виробів і відхилень розмірів цих стінок від відповідних розмірів цифрових прототипів (рис. 5.10, б, в).

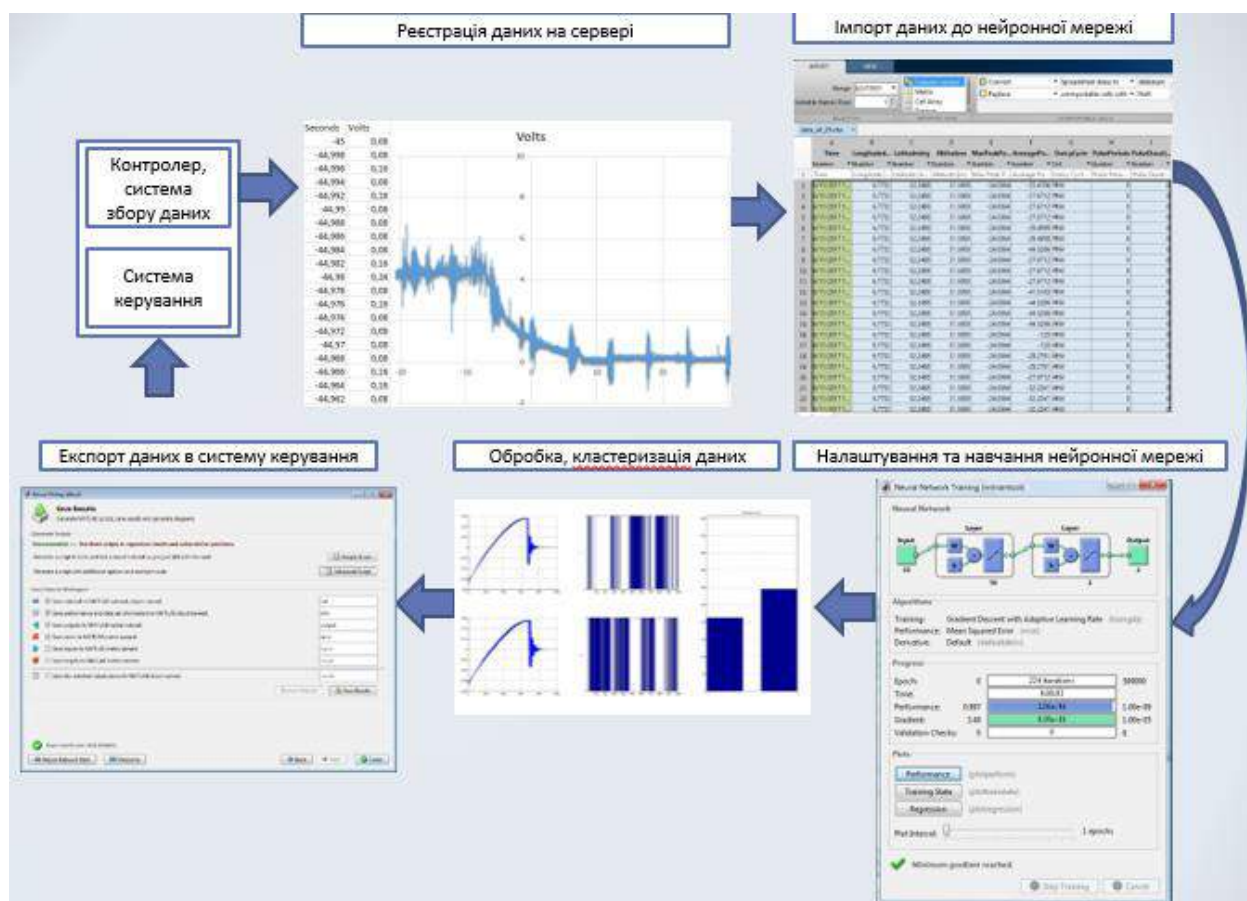


Рис. 5.9. Принципова схема роботи системи автоматичного моніторингу.

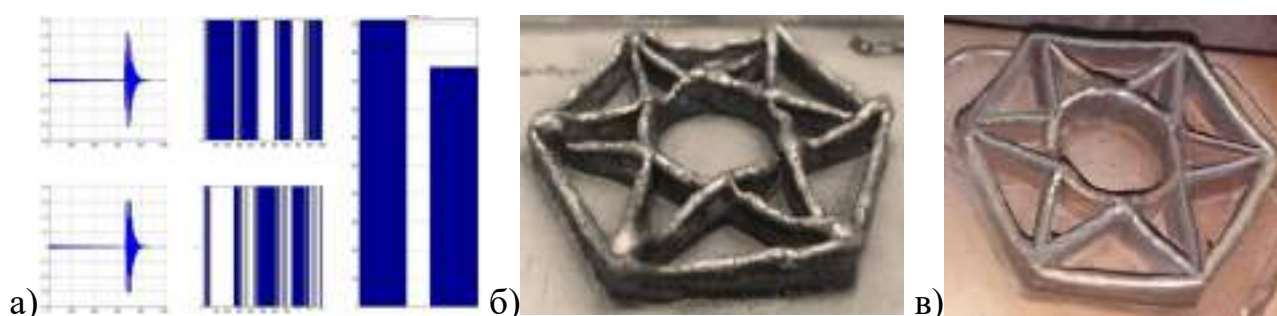


Рис. 5.10. Результати роботи нейронної мережі (а) результати оцінки сигналу (розбиття на кластери) дефектних та відносно бездефектних виробів (б) зразок наплавленого виробу із застосуванням нетренованої нейронної мережі (в) зразок наплавленого виробу із застосуванням тренуваної нейронної мережі.

У розділі 4 описано прогнозування температурних розподілів та напружено-деформованого стану (НДС) об'єктів, що виготовляються, методом скінченних елементів в програмному комплексі Simufact welding. Поєднання системи автоматично моніторингу процесу адитивного мікроплазмового наплавлення із прогнозуванням температурних розподілів і НДС покращує ефект автоматичного контролю та підвищення точності геометричних параметрів тривимірних деталей, що наплавляють.

При моделюванні процесу адитивного мікроплазмового наплавлення просторових конструкцій було виготовлено порядку 50-ти тривимірних сталевих виробів з різними геометричними параметрами. В результаті було сформовано статистичну базу даних для аналітичної моделі розрахунку загальної швидкості деформування (рис. 5.11).

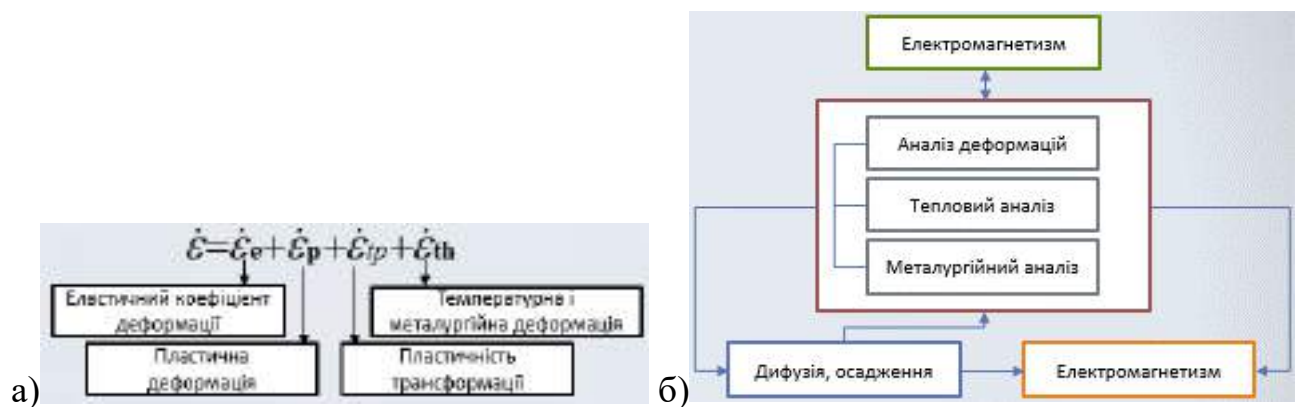


Рис. 5.11. Аналітична модель прогнозування температурних розподілів та НДС:

а) – рівняння загальної швидкості деформування; б) – принципова схема математичної моделі розрахунків термодинаміки і НДС.

Поєднання таких двох інструментів автоматизації контролю якості, як контроль в реальному часі за допомогою нейронних мереж (рис. 5.10) і розрахункове прогнозування температури та НДС (рис. 5.11), було отримано систему автоматичного моніторингу процесу мікроплазмового наплавлення. Випробування такої системи принципово довело можливість та ефективність її застосування для прогнозування та оцінки якості об'ємних виробів, що

наплавляють. Такий підхід дозволяє виявляти кореляції між виміряними параметрами мікроплазмового наплавлення та їх впливом на якість об'єктів, що виготовляють наплавленням, без втручання людського фактору. Це дозволяє набагато ефективніше досліджувати процес адитивного мікроплазмового наплавлення та дає можливість отримання автоматичного контролю якості. Поєднання описаної системи контролю з керуючою програмою дало можливість додатково покращити результати роботи створеного комплексу обладнання (див. п. 5.2). Запропонована розробка відкриває можливість широкого промислового застосування та універсальності технології адитивного мікроплазмового наплавлення. Основною перевагою запропонованого методу являється можливість створення системи реального часу та можливість її автоматичної роботи, а також здатність до самоорганізації, самонавчання, накопичення та узагальнення результатів.

5.4. Впровадження апаратно-програмних комплексів адитивного мікроплазмового наплавлення 3D виробів.

Описані вище розробки автоматичної системи моніторингу, покращеної конструкції мікроплазмотрону із оптимізованими параметрами течії газових потоків, а також інших апаратно-програмних розробок і науково-практичних результатів даної роботи, були використані при виробництві і введення в експлуатацію наступного обладнання для адитивного виробництва:

1) Технологічного комплексу (3D принтер) для адитивного мікроплазмового порошкового наплавлення металевих виробів PLAZER 3D SYSTEM, який було поставлено і введено в експлуатацію в 2018 році в Південно-китайському технологічному університеті (м. Гуанчжоу, КНР) – Додаток А.

2) Роботизована технологічна дільниця для 3D друку крупногабаритних металевих виробів із використанням зварювальних плазмово-дугових технологій і Науково-дослідному Інституті зварювальних технологій в провінції Чжецзян, м. Ханчжоу, КНР (2022 рік). – Додаток А.

3) Комплекс обладнання для автоматичного 3D друку металевих об'єктів розміром до $500 \times 400 \times 400$ мм на базі 3D маніпулятора (впроваджено в ТОВ «Науково-виробничий центр ПЛАЗЕР Україна, 2020 р.). –Додаток Б.

4) Роботизований комплекс обладнання для автоматичного 3D друку металевих об'єктів невеликих і середніх розмірів, лімітованих вильотом руки робота до 1400 мм (впроваджено в ТОВ «Науково-виробничий центр ПЛАЗЕР, Україна, 2021 р.). –Додаток Б.

Однією з важливих особливостей впровадженого обладнання є просторово-розмірна орієнтація в залежності від розмірів і конфігурації 3D об'єктів, що виготовляють. Так, у разі наявності сферичних елементів більш прийнятним є роботизований комплекс, а у разі переважаючої кількості кутових елементів доцільно використовувати комплекси на основі Декартових принтерів. Крім того, для 3D друку об'єктів в робочому полі до $1000 \times 1000 \times 1000$ мм більш доцільно застосовувати принтери, а для 3D друку об'єктів із більшими габаритами краще застосовувати роботи.

Приклади створеного обладнання для 3D друку металевих об'єктів порошковим мікроплазмовим наплавленням наведені на рис. 5.12-5.16. Таке обладнання має різні розміри робочого простору друку і відрізняється застосуванням авторської системи автоматичного моніторингу процесу.

На рис. 5.12-5.16 наведено низку комплексів обладнання, яке містить наступні однотипні вузли: 1 – інтелектуальна система керування з інтегрованою системою автоматичного моніторингу; 2 – механізм переміщення (трьохкоординатний маніпулятор, або робот); 3 – мікроплазмотрон; 4 – плазмовий модуль; 5 – джерело живлення; 6 – порошковий дозатор-живильник; 7 – блок керування порошковим живильником; 8 – блок автономного охолодження; 9 – складально-наплавлювальне пристосування, стіл для наплавлення.



Рис. 5.12. Комплекс обладнання для автоматичного 3D друку металевих об'єктів розміром до $500 \times 400 \times 400$ мм на базі 3D маніпулятора (впроваджено в ТОВ «Науково-виробничий центр ПЛАЗЕР Україна, 2020 р.).



Рис. 5.13. Комплекс обладнання для автоматичного 3D друку металевих об'єктів розміром до $1000 \times 900 \times 900$ мм на базі 3D принтера (введено в експлуатації в 2018 році в Південно-китайському технологічному університеті, м. Гуанчжоу, КНР).



Рис. 5.14. Роботизований комплекс обладнання для автоматичного 3D друку металевих об'єктів невеликих і середніх розмірів, лімітованих вильотом руки робота до 1400 мм (впроваджено в ТОВ «Науково-виробничий центр ПЛАЗЕР, Україна, 2021 р.).



Рис. 5.15. Роботизований комплекс обладнання для 3D друку крупногабаритних металевих об'єктів із вильотом руки робота до 1800 мм і системою переміщення робота до 3000 мм (Науково-дослідний Інститут зварювальних технологій в провінції Чжецзян, м. Ханчжоу, КНР, 2022 рік).



Рис. 5.16. Стійка із джерелами живлення робота, мікроплазмотрона, шафою адаптації команд для робота і інтелектуальною автоматичною системою моніторингу роботизованого комплексу, представленого на рис 5.15.

Перелічене обладнання має наступні функції:

1) Інтелектуальна система керування з інтегрованою системою автоматичного моніторингу. Являє собою:

- Інтелектуальну систему збору даних, яка слугує хабом для під'єднання до датчиків та розумних пристроїв в системі (таких як джерело живлення, плазмовий модуль, маніпулятор (робот), система керування порошковим живильником, тощо) по спеціальних інтерфейсах зв'язку. Система збору даних дозволяє поєднати всі потоки даних в єдине ціле та відправляти їх на сервер для зберігання даних.
- Хмарний сервер (який підключений по інтерфейсу Ethernet) для запису та зберігання статистичних даних з датчиків та розумних пристроїв, апаратно являє собою спеціалізований комп'ютер, для збору даних, а програмно являє собою систему управління базою даних.
- Дистанційно підключений по каналу Ethernet спеціалізований, потужний комп'ютер, який виконує роль обчислювального пристрою системи автоматичного моніторингу, та за допомогою нейронних мереж виконує

процес кластеризації та класифікації даних, порівняння, постобробку, після чого передає обчислені дані на ПЛК (Програмований логічний контролер).

- ПЛК, виконує роль виконавчого обчислювального пристрою, який на основі отриманих даних від системи моніторингу відпрацьовує коригування параметрів процесу наплавлення та коригує алгоритм роботи обладнання, змінюючи силу струму наплавлення, витрат газів, витрат присаджувального порошку, швидкості переміщення, тощо.
- Керуюча периферія (реле, транзисторні модулі, перетворювачі, тощо).

2) Маніпулятор (або робот) – механізм переміщення робочого інструменту. Виконує роль переміщення плазмотрону по заздалегідь запрограмованій траєкторії мовою G-код у випадку трикоординатного маніпулятора, або в режимі реального часу у випадку робота, якщо керування відбувається зі зворотнім зв'язком та коригується обчислювальною системою в режимі реального часу.

3) Мікропалазмотрон. Виконує роль робочого інструменту для наплавлення металу на робочу поверхню.

4) Плазмовий модуль. Виконує роль пристрою для керування технологічними параметрами дуги наплавлення, такими як задання витрат плазмоутворюючого і захисного газу та струму чергової дуги.

5) Джерело живлення. Виконує роль електричного джерела нагріву матеріалу, а також керує основним струмом наплавлення.

6) Порошковий живильник. Пристрій для транспортування порошку в зону наплавлення.

7) Блок керування порошковим живильником. Пристрій для керування параметрами подачі порошку в зону наплавлення, такими як витрати присаджувального порошку та витрати транспортуючого газу.

8) Блок автономного охолодження. Застосовується в якості системи охолодження мікроплазмотрону.

9) Складально-наплавлювальне пристосування, стіл для наплавлення. Застосовуються для закріплення підкладки, на якій вирощують 3D об'єкт.

До комплекту обладнання роботизованого комплексу входять як безпосередньо робот із місцем друку 3D об'єктів (наприклад, стандартним зварювальним столом із стандартними складально-зварювальним пристосуванням) (рис. 5.14, 5.15), так і стійка із джерелами живлення робота, мікроплазмотрона, шафою адаптації команд для робота та автоматичною системою моніторингу (рис. 5.16).

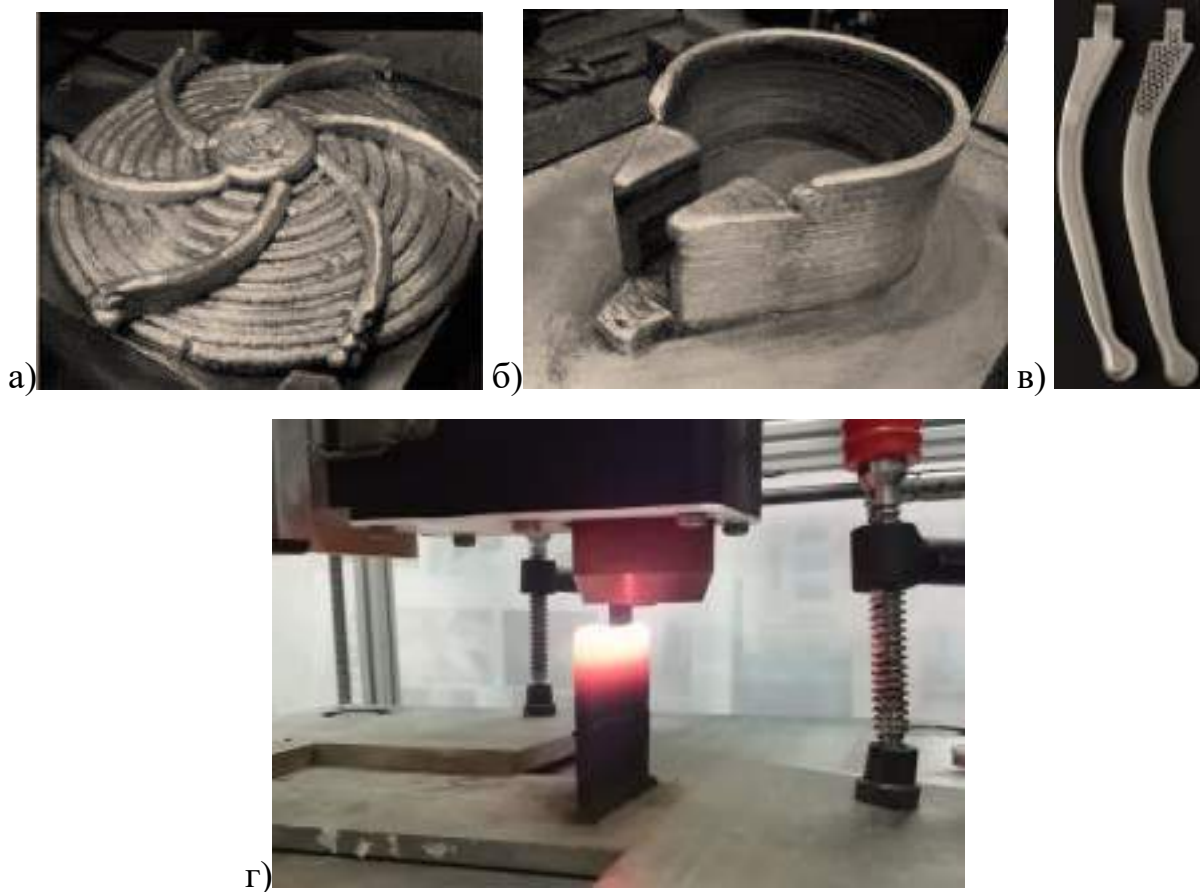


Рис. 5.17. Приклади деталей, які виготовляли 3D друком: а) – крильчатка водяного насосу; б) – елемент кріплення мачти яхти; в) – заготовки ендопротезу після механічної обробки; г) – виготовлення ребра жорсткості.

Розроблене обладнання застосовували для друку просторових металевих деталей і конструкцій, які застосовуються у досить невеликій кількості. Це можуть бути як деталі, що потрібні для ремонту обладнання (наприклад, крильчатка водяного насосу, рис. 5.17,а), так і ексклюзивні вироби індивідуального застосування (наприклад, кріплення мачти яхти, рис. 5.17,б). 3D друком із наступною механічною обробкою виготовляли обмежені партії

інструменту і заготовок для ендопротезів (рис. 5.17,в), друкували ребра жорсткості (рис. 5.17,г).

5.5. Перспектива розробки гібридного процесу "лазер-мікроплазма" для адитивного наплавлення і обладнання для його реалізації.

В останні роки спостерігається активний розвиток процесів гібридного лазерно-дугового і лазерно-плазмового зварювання і наплавлення сталей і сплавів. Інтерес до цих процесів викликаний, в першу чергу, новими технологічними можливостями, що відкриваються за рахунок їх застосування. Це пов'язано з проявом синергетичного ефекту (іноді його називають гібридним ефектом), який виражається в порушенні адитивності теплового впливу випромінювання і дуги на рідкий метал, інтенсифікації динамічного впливу струму електричної дуги на ванну розплаву, а також в зміні гідродинаміки самої ванни. В результаті підвищується ефективний ККД процесу наплавлення (зварювання) і енергія, використовувана на плавлення металу, може більш ніж в два рази перевищувати суму відповідних енергій, що виділяються в металі при використанні кожного окремо взятого джерела тепла.

Як показує ряд досліджень, прояв синергетичного ефекту, прив'язка дугової плазми до зони дії лазерного випромінювання і стабільність процесу на високих швидкостях, більшою мірою залежать від ступеня фокусування лазерного випромінювання, ніж від його довжини хвилі. При гібридному плавленні нержавіючих сталей на глибину ванни розплаву впливають розташування (по ходу наплавлення) складових джерел енергії і відстань між ними, а також величина струму плазмової складової. Це робить актуальним вивчення питання результативності синергетичного ефекту та стабільності його впливу на процес лазерно-мікроплазмового наплавлення.

Процеси лазерно-мікроплазмового наплавлення можуть бути реалізовані щонайменше двома способами з позицій взаємного розташування лазерного випромінювання і дугової мікроплазми: коаксіальний і параксіальний процеси.

В першому випадку лазерне випромінювання розташоване по осі гібридного плазмотрону, а один чи більше неплавких електродів розташовані збоку під певним кутом (рис. 5.18,а). У другому випадку лазерне випромінювання і один чи більше неплавких електродів розташовані збоку під певними кутами. Крім того, у другому випадку може бути реалізована комбінована схема процесу. На відміну від гібридної, така схема передбачає окрему дію обох джерел (лазерного і мікроплазмового) із спільною дією безпосередньо у ванні розплаву (рис. 5.18,б). За такою схемою процес наплавлення може виконуватися із застосуванням мікроплазми непрямої дії.

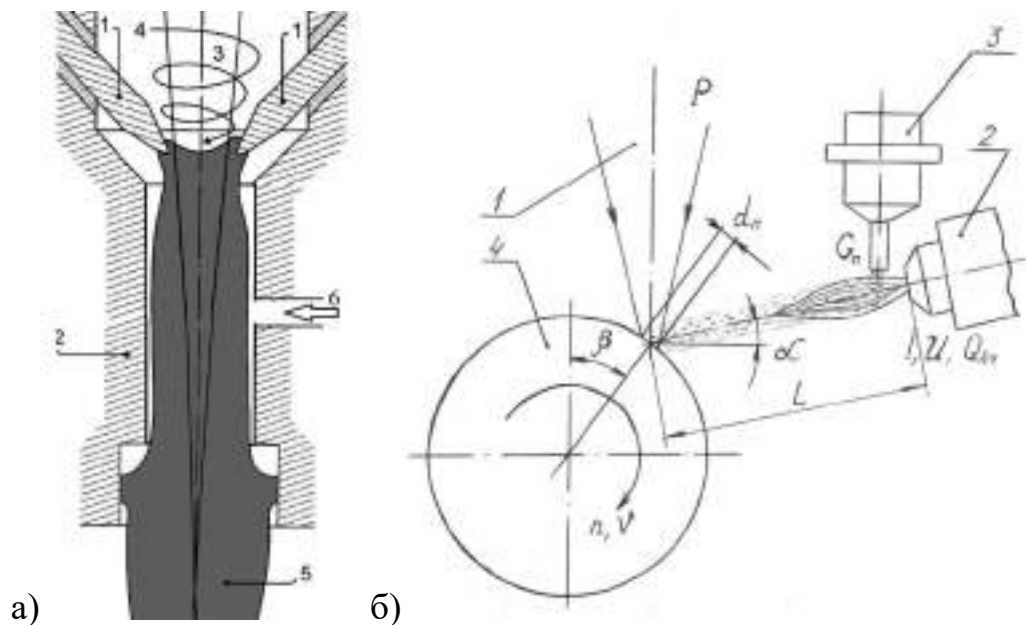


Рис. 5.18. Схема (а) лазерно-мікроплазмового нанесення покриттів за допомогою гібридного двокатодного плазмотрона непрямої дії (1 – катоди; 2 – загальний анод; 3 – лазерне випромінювання; 4 – плазмоутворюючий газ; 5 – плазмовий струмінь; 6 – подача присаджувального порошку) і схема (б) комбінованого лазерно-мікроплазмового наплавлення (1 – лазерне випромінювання; 2 – мікроплазмотрон; 3 – дозатор порошкового матеріалу; 4 – зразок; L – довжина мікроплазмового струменя; α та β – кути, що визначають точку суміщення струменя мікроплазми з прямою лазерного нагріву).

В усіх випадках лазерна складова забезпечує локальність плавлення, зменшення розмірів ванни і товщини стінки, що нарощується. Мікроплазмова складова забезпечує усунення жорсткості термічного циклу лазерного наплавлення, покращує формування валика наплавлення і знижує небезпеку тріщиноутворення через зниження залишкових напружень. Дослідження показують, що гібридне лазерно-мікроплазмове наплавлення дозволяє значно (до 10 разів) подрібнювати зернистість шарів (рис. 5.19).

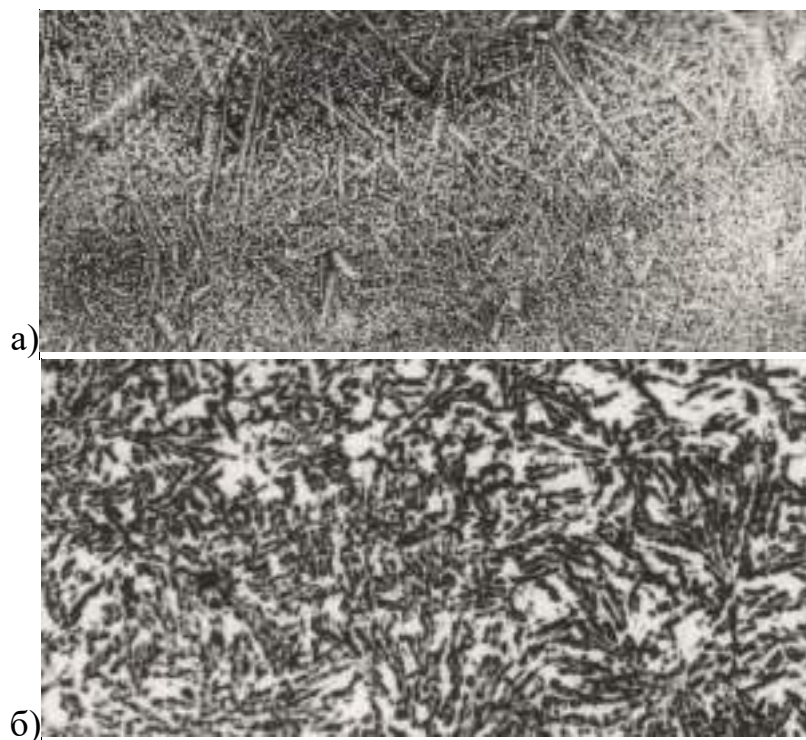


Рис. 5.19. Мікроструктури ($\times 100$) лазерно-плазмового (а) і плазмового (б) наплавлення порошків системи Ni-Cr-B-Si на вуглецеву сталь.

Висновки по розділу 5

1. Розроблено базові технологічні прийоми адитивного порошкового мікроплазмового наплавлення, до яких відносяться: старт процесу на підвищеному струмі (~ 35 А) із швидким (~ 1 с) переходом до сталого режиму (~ 25 А); зменшення витрат присаджувального порошку (до 6 г/хв); зниження витрат плазмоутворюючого газу з 0,4 до 0,2 л/хв; стабілізація погонної енергії

процесу на рівні 85-90 Дж/мм; мінімізація довжини дуги (до 8 мм). Для стабілізації погонної енергії і довжини дуги застосовано систему АРНД (автоматичного регулювання напруги дуги).

2. Створено технологічний комплекс обладнання, який дозволяє виконувати адитивне мікроплазмове наплавлення об'єктів довільної форми у просторі $X:Y:Z=500\times400\times400$ мм із продуктивністю до 0,8 кг/год. Комплекс оснащений автоматичною системою моніторингу і керування власної розробки, які базуються на одержанні за допомогою системи датчиків інформації про процес наплавлення, обробки одержаних даних і співставленні їх із накопиченими у базі і розрахунковими даними за допомогою нейронних мереж, автоматичній генерації відповідних керуючих команд і їх відпрацювання завдяки наявним зворотним зв'язкам.

3. Для автоматизації контролю якості об'єкта, що наплавляється, розроблено відповідну систему автоматичного моніторингу, яка поєднує контроль в реальному часі за допомогою нейронних мереж і розрахункове прогнозування температури та НДС. Випробування даної системи довело можливість та ефективність її застосування для прогнозування та оцінки якості об'ємних виробів, що наплавляють.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасного стану 3D-технологій виготовлення об'ємних металевих виробів показав, що для виготовлення точних деталей малих розмірів є доцільним застосування лазерних технологій (наприклад, SLM), для великогабаритних деталей – застосування зварювальних технологій (наприклад, WAAM, РТА). Серед адитивних зварювальних технологій найперспективнішими є плазмово-дугові. У таких технологіях висока (1–20 кг/год і більше) продуктивність поєднується з можливістю отримання досить тонких (1,5 – 5,0 мм) стінок при порівняно помірному перегріві. Застосування адитивного плазмово-дугового друку дозволяє підвищувати точність виготовлення та якість поверхні об'ємних металевих виробів у порівнянні з іншими електродуговими способами наплавлення.

2. Розроблено базові технологічні прийоми процесу адитивного мікроплазмового наплавлення і підходи до автоматичного моніторингу та керування цим процесом, що дозволило зменшити до 0,22–0,28 мм залишкові радіальні зміщення і до 400-500 МПа напруження шарів, які наплавляються з нержавіючої сталі, досягти відхилення від лінійних розмірів до 1 мм стінок наплавлених тривимірних об'єктів (як припуск під фінішну механічну обробку) і продуктивності 0,3-0,6 кг/год їх створення.

3. Встановлено, що в результаті адитивного мікроплазмового наплавлення порошку нержавіючої сталі (розмір частинок 40-60 мкм) формується шарувата структура металу з висотою наплавленого шару порядку 650 мкм і товщиною стінки 3 мм. Розподіл металу за висотою зразка рівномірний. Внаслідок адитивного формування зразка шляхом наплавлення порошку утворюються колонії великих і дрібних дендритів з різними розмірами й орієнтацією залежно від висоти ділянки, на якій проводилося дослідження. Розмір субзерен становить 15...25 мкм, а їхній склад близький до складу вихідного порошку. Наплавлений метал забезпечує високу міцність, що становить понад 600 МПа.

4. При мікроплазмовому наплавленні дротом низьковуглецевої сталі діаметром 0,8-1,2 мм формуються просторові зразки з товщиною стінки порядку 2,7-3,0 мм з гладкою поверхнею близькою до литої. Міжшарова або трансшарова пористість у зразках не виявлена. Наплавлені шари мають якісне з'єднання та характеризуються рівновісною дендритною структурою металу достатньої щільності без пор і несплавень. Розмір зерен поблизу підкладки становить 15...20 мкм, ближче до вільної поверхні зростає до 150...200 мкм. Встановлено, що тенденція незначного підвищення твердості в напрямку від нижніх наплавлених шарів (HV 1626...1705 МПа) до вільної поверхні (HV 1893...1936 МПа) пов'язана зі структурними перетвореннями через більший питомий об'єм перлітної складової в міру підвищення висоти тонкої стінки.

5. При адитивному наплавленні просторових зразків електродуговим MAG способом дротом низьковуглецевої сталі діаметром 1,2 мм спостерігається дендритна мікроструктура металу (розмір дендритів до 200 мкм), наявність неметалевих включень і певна пористості у верхніх шарах вирощеної стінки. При цьому товщина стінки одержуваних зразків становить не менше 4 мм.

6. Проведені розрахункові дослідження процесів газодинаміки в контурах стандартного плазмотрону показали його недоліки, що виявляються при подачі присаджувальних порошкових матеріалів. Для усунення цих недоліків проведено моделювання оптимальної динаміки газових потоків за критеріями ламінарності, повноти введення матеріалів у плазму, фокусування газових потоків в робочій зоні та стабілізації режиму нагріву/охолодження сопел. Також, було проведено розрахунок числа Рейнольдса, який додатково підтвердив ламінарність газових потоків. На підставі такого моделювання спроектовано покращену конструкцію плазмотрона, в якому додано другий канал введення транспортуючого газу, обидва канали введення розташовані під кутом до осі виходу газу з метою рівномірного розподілу матеріалу в камері вирівнювання, а також зменшено її поперечний переріз для покращення заповнення газом.

7. Методом скінченних елементів отримано розв'язок термомеханічної задачі для п'яти просторових прототипів складної геометричної форми («циліндр»,

«трикутна призма», «квадратна призма», «розширений конус», «звужений конус») під час безперервного адитивного наплавлення формуючих об'єктів. Встановлено, що залишкові еквівалентні напруження зменшуються у кожному наступному наплавленому порошком валику на 7–20% для всіх змодельованих просторових прототипів. При мікроплазмовому наплавленні порошком НУФ-103 найбільші (565 МПа) за величиною еквівалентні напруження утворюються у зразку типу «розширений конус», а найменші (552 МПа) у зразку типу «звужений конус». Для всіх прототипів максимальні значення переміщень відповідають діапазону 0,22–0,28 мм.

8. Експериментально встановлено, що наплавлені вироби мають залишкові деформації з відхиленнями не більше 20% від змодельованих, що свідчить про достатню ефективність виконаного моделювання НДС.

9. Розроблено базові технологічні прийоми адитивного порошкового мікроплазмового наплавлення, до яких відносяться: старт процесу на підвищеному струмі (~35 А) із швидким (~1 с) переходом до сталого режиму (~25 А); зменшення витрат присаджувального порошку (до 6 г/хв); зниження витрат плазмоутворюючого газу з 0,4 до 0,2 л/хв; стабілізація погонної енергії процесу на рівні 85-90 Дж/мм; мінімізація довжини дуги до 8 мм. Для стабілізації погонної енергії і довжини дуги застосовано систему АРНД (автоматичного регулювання напруги дуги).

10. Створено технологічний комплекс обладнання, який дозволяє виконувати адитивне мікроплазмове наплавлення об'єктів довільної форми у просторі $X:Y:Z=500\times400\times400$ мм із продуктивністю до 0,8 кг/год. Комплекс оснащений автоматичною системою моніторингу і керування власної розробки, які базуються на одержанні за допомогою системи датчиків інформації про процес наплавлення, обробки одержаних даних і співставленні їх із накопиченими у базі і розрахунковими даними за допомогою нейронних мереж, автоматичній генерації відповідних керуючих команд і їх відпрацювання завдяки наявним зворотним зв'язкам.

Список літератури.

1. Kruth, J. P. Progress In Additive Manufacturing And Rapid Prototyping / J. P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa // CIRP Annals-Manufacturing Technology, №47 (2), 1998. – P. 525-540.
2. Measurement And Simulation Of Titanium Alloy Deposit Temperature In Electron Beam Additive Manufacturing / M. R. Bruce, S. F. Riley, M. J. Cola, V. R. Dave, J. E. Talkington // Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference, Chicago, Illinois, USA, June 4-8, 2012, 1100 p. – P. 963-969.
3. Kruth, J. P. Selective laser melting of iron-based powder / J. P. Kruth // J. Mater. Process. Technol, V. 149, 2004. – P. 616-622.
4. Killander, L. A. Future Direct Manufacturing Of Metal Parts With Free-Form Fabrication / L. A. Killander, G. Sohlenius // CIRP Annals – Manufacturing Technology, V.44(1), 1995. – P. 451-454.
5. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Монография под ред. В.Я.Панченко, раздел «Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрикации трехмерных объектов». – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
6. Слюсар, В. И. Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования / В. И. Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2003. – №5. – С. 54-60.
7. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы / Е.Н. Каблов // Интеллект&Технологии. - №2 (11). – 2015. – С. 52-55.
8. Bruse M. R. Measurement and simulation of titanium alloy deposit temperature in electron beam additive manufacturing / Bruse M. R., Riley S. F., Cola M. J. [et al.] // Trends in welding research 2012: Proceedings of the 9th International Conference, Chicago, Illinois, USA, June 4-8, 2012. – P. 963-969.
9. Kruth, J. P. Progress In Additive Manufacturing And Rapid Prototyping / J. P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa // Elsevier, V.47(2), 1998. – P. 525-540.
10. Low Cost Integration Of Additive And Subtractive Processes For Hybrid Layered

Manufacturing / K. P. Karunakaran, S. Suryakumar, P. Vishal, A. Sreenathbabu // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, V.26(5), October, 2010. – P. 490-499.

11. Patent №EP0340939A1 (US4857694): Cooling workpieces being manufactured by shape melting / T. E. Doyle, P. M. Ryan // The Babcock & Wilcox Company, B23K9/04, B23K37/003, B23K37/00F, 8.11.1989.

12. Martina, F. Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale Wire+Arc Additive Manufacturing / F. Martina // School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, UK, 2014. – 178 p.

13. Kovacevic, R. Development of MultiFab Machine For Rapid Manufacturing/Repair / R. Kovacevic // The 2003 CTMA Symposium, March 31 – April 3, Salt Lake City, USA, 2003. – Режим доступа: URL: www.engr.smu.edu/rcam.

14. Alhuzaim, A. F. Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture / A. F. Alhuzaim // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science General Engineering, Montana Tech of the University of Montana, 2014. – 228 p.

15. Baufeld, B. Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and Mechanical Properties / B. Baufeld, O. Van der Biest, R. S. Gault // Materials & Design, V.31, 2010. – P. S106-S111.

16. Clark, D. Shaped Metal Deposition of a Nickel Alloy for Aero Engine Applications / D. Clark, M. R. Bache, M. T. Whittaker // Journal of Materials Processing Technology, V.203, 2008. – P. 439-448.

17. Chad H. Metallic Additive Manufacturing / Henry Chad // Comprehensive Overview and Findings on 3D Printing for Construction, CMIC 2014, Sept 2014. – Электронный ресурс: <https://docplayer.net/39209026-Csiro-metallic-additive-manufacturing-high-performance-metal-program.html>.

18. Искусство Григория Дочкина // CWELD – оборудование и материалы для сварки и резки, новости, 1.08.2015. – Режим доступа: URL:

<http://adiosgroup.ru/?p=242>

19. Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology / S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // Materials Science and Technology, V.32 (7), 2016. – P. 641-647.
20. Colegrove, P. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology / P. Colegrove, S. Williams // Cranfield University, 2013. – Режим доступа: URL: <https://www.xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf>
21. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V / F. Wang, S. W. Williams, P. Colegrove, A. A. Antonysamy // Metallurgical and Materials Transactions, V.44(2), 2012. – P. 968-977.
22. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy / J. Gu, J. Ding, S. Williams, H. Gu, J. Bai, Y. Zhai, P. Ma // Materials Science and Engineering: Structural Materials: Properties, Microstructures and Processing, V.651, 2016. – P. 18-26.
23. Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture / J. Ding, P. Colegrove, F. Martina, S. Williams, R. Wiktorowicz, M. Palt // Journal of Materials Processing Technology, V. 226, 2015. – P. 99-105.
24. The effectiveness of combining rolling deformation with wire-arc additive manufacture on β -Grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V / J. Donoghue, A. A. Antonymy, F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, P. B. Prangnell // Materials Characterization, V.114 (April), 2016. – P. 103-114.
25. Crack path selection at the interface of wrought and wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V / J. Zhang, X. Zhang, X. Wang, J. Ding, Y. Traoré, S. Paddea, S. Williams // Materials and Design, V.104 (August), 2016. – P. 365-375.
26. Microstructure of interpass rolled wire + arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components / F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, J. Meyer // Metallurgical and Materials Transactions A – Physical Metallurgy and Materials Science, V. 46 (12), 2015. – P. 6103-6118.

27. High pressure interpass rolling of Wire + Arc additively manufactured titanium components / P. A. Colegrove, F. Martina, M. J. Roy, B. A. Szost, S. Terzi, S. W. Williams, P. J. Withers, D. // *Jarvis Advanced Materials Research*, V. 996, 2014. – P. 694-700.
28. Sefene E. M., Hailu Y. M., Tsegaw A. A. Metal hybrid additive manufacturing: state-of-the-art // *Progress in Additive Manufacturing*, V. 7, 2022. – P. 737–749.
29. Sasahara Hiroyuki. Новый металлический 3D-принтер с функцией дуговой сварки от Mutoh Industries Ltd. – Режим доступа: URL: <http://www.n3d.biz/3d-printery/novyj-metallicheskiy-3d-printer-s-funkciej-dugovoj-svarki-ot-mutoh-industries-ltd.html>.
30. 3D-сварка от MX3D распечатает мост над водой // 17/06/2015. – Режим доступа: URL: <http://weldworld.ru/news/razrabotki/5583-3d-svarka-ot-mx3d-raspechataet-most-nad-vodoy.html>.
31. Zhen-Hong Shen, Ning Dai, Da-Wei Li and Chang-You Wu. Bridge support structure generation for 3D printing // *Conference: 2015 International Workshop on Materials, Manufacturing Technology, Electronics and Information Science*, 2016. – P. 141-149.
32. Karayela E., Bozkurt Y. Additive manufacturing method and different welding applications // *Journal of Materials Research and Technology*, V. 9, Issue 5, 2020. – P. 11424-11438.
33. Nilsiam Y., Sanders P. G., Pearce J. M. Applications of open source GMAW-based metal 3-D printing // *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2018, V. 2(1): 18.
34. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, V. 34, 2015. – P. 8-19.
35. Pan Z., Ding D., Wu B., Cuiuri D., Li H., Norrish J. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review // In: Chen, S., Zhang, Y., Feng, Z. (eds) *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. Springer, Singapore, 2018. – P. 3–24.

36. Alberti E.A., Bueno B.M.P., D'Oliveira A.S.C.M. Additive manufacturing using plasma transferred arc // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, V. 83, 2016. – P. 1861–1871.
37. Butt J. Exploring the Interrelationship between Additive Manufacturing and Industry 4.0. *Designs*. 2020; 4(2):13. DOI: <https://doi.org/10.3390/designs4020013>
38. Landryová L., Sikora J., Wagnerová R. The Learning Path to Neural Network Industrial Application in Distributed Environments // *Processes*, 2021, V. 9(12), 2247. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9122247>
39. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview // *Neural Networks*, V. 61, 2015. – P. 85-117.
40. Avram O., Fellows C., Menerini M., Valente A. Automated platform for consistent part realization with regenerative hybrid additive manufacturing workflow // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, V. 119, 2022. – P. 1737–1755.
41. Jiang J., Newman S. T., Zhong R. Y. A review of multiple degrees of freedom for additive manufacturing machines, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021, V. 34:2. – P. 195-211.
42. Montoya-Zapata D., Creus C., Ortiz I., Alvarez P., Moreno A., Posada J., Ruiz-Salguero O. Generation of 2.5D Deposition Strategies for LMD-based Additive Manufacturing // *Procedia Computer Science*, V. 180, 2021. – P. 280-289.
43. Posada J., Toro C., Barandiaran I., Oyarzun D., Stricker D. et al. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet // *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 35, No. 2, 2015. – P. 26-40.
44. Ford S., Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges // *Journal of Cleaner Production*, Vol. 137, 2016. – P. 1573-1587.
45. Biegler M. Wang J., Graf B., Rethmeier M. Automated tool-path generation for rapid manufacturing and numerical simulation of additive manufacturing LMD geometries // *ESTAD*, 2020. – P. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202000017>

46. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Atool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, V. 73, 2014. – P. 173-183.
47. Liu H.H., Zhao T., Li L.Y., Liu W.J., Wang T.Q., Yue J.F. Apath planning and sharp corner correction strategy for wire and arc additive manufacturing of solid components with polygonal cross-sections // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, V. 106, 2020. – P. 4879-4889.
48. Mchel F., Lockett H., Ding J., Martina F., Marinelli G., Williams S. A modular path planning solution for wire + arc additive manufacturing // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, V. 60, 2019. – P. 1-11.
49. Eisenbarth D., Wirth F., Spieldiener K., Wegener K. Enhanced toolpath generation for direct metal deposition by using distinctive CAD data // *Industrializing Additive Manufacturing – Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications – AMPA2017*, Springer International Publishing, 2017. – P. 152-161.
50. Fernandez-Vicente M., Calle W., Ferrandiz S., Conejero A. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing // *3D Print. Addit. Manuf.*, V. 3, 2016. – P. 183–192.
51. Li Y., Han Q., Zhang G., Horváth I. A layers-overlapping strategy for robotic wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead components with homogeneous layers // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, V. 96, 2018. – P. 3331–3344.
52. Jin G. Q., Li W. D., Gao L. An adaptive process planning approach of rapid prototyping // *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, V. 29, 2013. – P. 23–38.
53. Xiong Y., Park S.-I., Padmanathan S., Dharmawan A. G., Foong S., Rosen D. W., Soh G. S. Process planning for adaptive contour parallel toolpath in additive manufacturing with variable bead width // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, V. 105, 2019. – P. 4159–4170.
54. Ding Y., Akbari M., Kovacevic R. Process planning for laser wire-feed metal additive manufacturing system // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, T. 95, №1, 2018. – P. 355-365.

55. Flores J., Garmendia I., Pujana J. Toolpath generation for the manufacture of metallic components by means of the laser metal deposition technique // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, T. 101, №5, 2019. – P. 2111-2120.
56. Yili D., Shengfu Y., Yusheng S., Tianying H., Lichao Z. Wire and arc additive manufacture of high-building multi-directional pipe joint // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, T. 96, №5, 2018. – P. 2389-2396.
57. Patalas-Maliszewska J., Topczak M. A new management approach based on Additive Manufacturing technologies and Industry 4.0 requirements // Advances in Production Engineering & Management, V. 16, N. 1, 2021. – P. 125–135.
58. Tian X., Wu L., Gu D. et al. Roadmap for Additive Manufacturing: Toward Intellectualization and Industrialization // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, Vol. 1, Is. 1, 2022, 100014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2022.100014>
59. Almeida J. F., Amaral D. C., Coelho R. T. Innovative Framework to manage New Product Development (NPD) Integrating Additive Manufacturing (AM) and Agile Management // Procedia CIRP, V. 103, 2021. – P. 128-133.
60. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorsani M. Additive Manufacturing Technologies. Textbook. – Springer Nature Switzerland AG 2021. – 675 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
61. Lu Y., Witherell P., Donmez M. A. A Collaborative Data Management System for Additive Manufacturing // Conference: ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2017-68457, V001T02A036, 2017. – 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2017-68457>
62. Mies D., Marsden W., Warde S. Overview of Additive Manufacturing Informatics: “A Digital Thread” // Integrating Materials and Manufacturing Innovation, Vol. 5, 2016. – P.114–142.

63. Öberg C., Shams T., Asnafi N. Additive Manufacturing and Business Models: Current Knowledge and Missing Perspectives // Technology Innovation Management Review, Vol. 8, Is. 6, 2018. – P. 15-33.
64. Liuab G., Zhanga X., Chen X. et al. Additive manufacturing of structural materials // Materials Science and Engineering: R: Reports, Vol. 145, 2021, 100596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>
65. Plessis A., Razavi S. M. Benedetti J., M. et al. Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review // Progress in Materials Science, Vol. 125, 2022, 100918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100918>
66. Kulkarni P., Kumar A., Chate G., Dandannavar P. Elements of additive manufacturing technology adoption in small- and medium-sized companies // Innovation & Management Review, Vol. 18 Is. 4, 2021. – P. 400-416.
67. Valizadeh M., Wolff S. J. Convolutional Neural Network applications in additive manufacturing: A review // Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, Vol. 4, 2022, 100072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100072>
68. Oh Y., Sharp M., Sprock T., Kwon S. Neural network-based build time estimation for additive manufacturing: a performance comparison // Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 8, Is. 5, 2021. – P. 1243–1256.
69. Qi X., Chen G., Li Y. Cheng X., Li C. Applying Neural-Network-Based Machine Learning to Additive Manufacturing: Current Applications, Challenges, and Future Perspectives // Engineering, Vol. 5, Is. 4, 2019. – P. 721-729.
70. Wacker C., Köhler M., David M. et al. Geometry and Distortion Prediction of Multiple Layers for Wire Arc Additive Manufacturing with Artificial Neural Networks // Appl. Sci. 2021, 11(10), 4694; DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104694>
71. Tercan H., Meisen T. Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review // Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 33, 2022. – P. 1879–1905.
72. Mahmood M. A., Visan A. I., Ristoscu C., Mihailescu I. N. Artificial Neural Network Algorithms for 3D Printing // Materials 2021, 14(1), 163; DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14010163>

73. Jafari D., T. Vaneker H. J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts // Materials & Design, Vol. 202, 2021, 109471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>
74. Lee, G., Kim, H., Jeon, J. et al. Development of Plasma Arc Spot Welding Process and Finite Element Method Analysis Model for Predicting Fracture Strength: Part 1—Development of Plasma Arc Spot Welding Process. Int. J. Precis. Eng. Manuf. (2022). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00707-1>
75. Galván E. A., Meléndez I. M., Mora C. A., Soriano E. M. P., Neubauer E., Kitzmantel M. Plasma Metal Deposition for Metallic Materials // In: Advanced Additive Manufacturing, ed. I. V. Shishkovsky, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.101448>
76. Schäfer J., Quade A., Abrams K. J., Sigeneger F., Becker M. M., Majewski C., Rodenburg C. HelixJet: An innovative plasma source for next-generation additive manufacturing (3D printing) // Plasma Processes and Polymers, Vol. 17, Is. 1, 2020, 1900099. – 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.201900099>
77. Микроплазменная сварка / Б.Е. Патон, В.С. Гвоздецкий, Д.А. Дудко и др. Киев: Наук. думка, 1979. – 248 с.
78. Yushchenko K.A., Yarovitsyn A.V., Chervyakov N.O. Effect of energy parameters of microplasma powder surfacing modes on susceptibility of nickel alloy ZhS32 to crack formation // The Paton Welding Journal, #2, 2017. – P. 2-6.
79. Sawanta M. S., Jainb N. K., Nikam S. H. Theoretical modeling and finite element simulation of dilution in micro-plasma transferred arc additive manufacturing of metallic materials // International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 164, 2019, 105166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105166>
80. Wang F., Williams S.W., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 44(2), 2013. – P. 968–977.
81. Gu J., Ding J., Williams S., Gu H., Bai J., Zhai Y., Ma P. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively

- manufactured Al-6.3Cu alloy, *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructures and Processing*, Vol. 651, 2016. – P. 18-26.
82. Гладкий, П.В. Плазменная наплавка / П.В. Гладкий, Е.Ф. Переpletчиков, И.А. Рябцев. – Киев: Экотехнология, 2007. – 292 с.
83. 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review) / V. N. Korzhyk, V. Yu. Khaskin, A. A. Grinyuk, V. I. Tkachuk, S. I. Peleshenko, V. V. Korotenko, A. A. Babich // *The Paton Welding Journal*, №5-6, 2016. – P. 117-123.
84. Рябцев, И. А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования / И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев // Киев: Экотехнология, 1999. – 62 с.
85. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М., «Машиностроение», 1974. – 768 с.
86. Peleshenko S., Korzhyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review) // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, V. 3/1(87), 2017. – P. 42–52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99666>
87. Korzhyk V., Khaskin V., Voitenko O., Sydorets V., Dolianovskaia O. Welding technology in additive manufacturing processes of 3D objects // *Materials Science Forum Submitted*, 2017, V. 906. – P. 121-130.
88. Zhang G. Q., Mondesir W., Martinez C. et al. Robotic additive manufacturing along curved surface — A step towards free-form fabrication // *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2015, 15806835. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2015.7418854>
89. Urhal P., Weightman A., Diver C., Bartolo P. Robot assisted additive manufacturing: A review // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 59, 2019. – P. 335-345.
90. Pat. US 6,680,456 B2, Robbie Adams, ION FUSION FORMATION, Jan. 20, 2004.

91. Яровицын А. В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки // Автоматическая сварка. – №5-6. – 2015. – С. 18–25.
92. Features of joint formation in hybrid plasma-arc welding of aluminum alloys / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grinyuk, O. Babych // American Scientific Journal, №5, 2016. – P. 36-43.
93. Tascioglu E., Kaynak Y., Poyraz Ö., Orhangül A., Ören S. The Effect of Finish-Milling Operation on Surface Quality and Wear Resistance of Inconel 625 Produced by Selective Laser Melting Additive Manufacturing // International Conference on Advanced Surface Enhancement, INCASE 2019: Advanced Surface Enhancement. – P. 263–272. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_27
94. Mamat, S.B., Tashiro, S., Masri, M.N. et al. Application of pulse plasma MIG welding process to Al/steel dissimilar joining // Welding in the World, V. 64, 2020. – P. 857–871.
95. Atabaki M. M., Nikodinovski M., Chenier P., Ma J., Harooni M., Kovacevic R. Welding of Aluminum Alloys to Steels: An Overview // Journal for Manufacturing Science and Production, Vol. 14, No. 2, 2014 – P. 59-78. DOI: <https://doi.org/10.1515/jmsp-2014-0007>
96. Исследование технологических особенностей гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов / В. М. Коржик, В. Ю. Хаскин, А. А. Гринюк, А. А. Бабич, А. Д. Сутковой, Т. В. Олейниченко // Sciences of Europe, №6(6), 2016. – С. 45-51.
97. Parenti P., Cataldo S., Grigis A., Covelli M., Annoni M. Implementation of hybrid additive manufacturing based on extrusion of feedstock and milling // Procedia Manufacturing, Vol. 34, 2019. – P. 738-746.
98. Laue R., Colditz P., Möckel M., Awiszus B. Study on the Milling of Additive Manufactured Components // Metals, Vol. 12, 2022, 1167. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12071167>
99. Унифицированный плазмотрон для сварки сжатой дугой неплавящимся электродом / А. А. Гринюк, В. Н. Коржик, А. А. Бабич, В. И. Ткачук, С. И.

Пелешенко // Збірник доповідей Міжнародної конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні – PoliWeld-2016 (26-27 мая 2016). – Національний технічний університет України «КПІ». – С. 43-49.

100. Nemchinsky V. A mechanism that triggers double arcing during plasma arc cutting // Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 42, No. 20, 2009, 205209. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/20/205209>

101. Гладкий П. В. Плазменная наплавка / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев. – К.: «Экотехнология», 2007. – 292 с.

102. Фролов В. М. Теория сварочных процессов. М., «Высшая школа» 1988. – 59 с.

103. Laue R., Colditz P., Möckel M., Awiszus B. Study on the Milling of Additive Manufactured Components // Metals, Vol. 12, 2022, 1167. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12071167>

104. Ющенко К. А., Яровицын А. В. Опыт применения микроплазменной порошковой наплавки // Матеріали IV Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених та спеца- лювл «Зварювання та суміжні технології», 23-25 травн. 2007 р. — Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 2007. — 323 с.

105. Yushchenko K.A., Yarovitsyn A.V., Khrushchov G.D., Fomakin A.A., Olejnik Yu.V. Analysis of process of bead shaping in cladding on narrow substrate // The Paton Welding Journal, #9, 2015. – P. 20-27.

106. Petrov S., Korzhyk V. Installation Plazer 80-PL for a plasma spraying. Welder, 2011, № 3. – P. 22-26.

107. Анисович А.Г., Румянцева И.Н. Практика металлографического исследования материалов. – Монография. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 221 с.

108. Борисов Ю.С., Бушма А.И., Кривцун И.В. Моделирование движения и нагрева частиц порошка при лазерном, плазменном и гибридном напылении // Доповіди Національної академії наук України, № 1, 2005. – С. 86-94.

109. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. // Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
110. Яровицин О.В. Мікроплазмове порошкове наплавлення жароміцних нікелевих сплавів з вмістом γ' -фази 45-65 %. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ, 2009. – 190 с.
111. Демьянцевич В. П. Михайлов Н. П. Взаимодействие микроплазменной дуги с нагреваемым телом // Свароч. пр-во, № 8, 1973. — С. 2–4.
112. Gladky P.V., Pereplyotchikov E.F., Ryabtsev I.A. Plasma surfacing. – Kiev: Ecotechnology, 2007. – 292 p.
113. Сом А. И. Новые плазмотроны для плазменно-порошковой наплавки // Автомат.сварка, № 7, 1999. — С. 44–48.
114. Dovbysh V. M., Zabednov P. V., Zlenko M. A. Additive technologies and metal products. - Electronic resource: <https://yandex.ua/search/?lr=143&msid=1491134974.25031.20933.22538&text>
115. Критерии оценки стабильности процесса дуговой сварки на постоянном токе / И.К. Походня, И.И. Заруба, В.Е. Пономарев, Н.В. Илюшенко, Т.А. Гвенетрадзе и др. // Автомат.сварка, № 8, 1989. – С. 1–4.
116. Патон Б.Е., Коротынский А.Е., Скопюк М.И. Система оперативного контроля качества сварочного оборудования в процессе его промышленного производства // Автоматическая сварка, № 5, 2002. – С. 29–31.
117. Ланкин Ю.Н., Рябцев И.А., Соловьев В.Г. Влияние электрических параметров дуговой наплавки порошковой проволокой на стабильность процесса и проплавление основного металла // Автоматическая сварка, № 9, 2014. – С. 27–31.
118. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов [с основами физической химии]. – М.: Высш. шк., 1967. – 508 с.

119. Яровицын А.В., Новиков С.В. Методическое обеспечение погружного калориметрирования малоамперных дуг // Зб. тезисів до V Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології», ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 27–29 травня 2009 р. – Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2009. – 124 с.
120. Kravchenko I. N., Kolomeychenko A. V., Pupavtsev I. E., Solovev R. Yu., Baranov Yu. N. Thermal efficiency of plasma-jet deposition of powder materials, *Welding International*, Vol. 32:1, 2018. – P. 54-61. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1382075>
121. DuPont J. N., Marder A. R. Thermal efficiency of arc welding processes // *Welding Journal* (American Welding Society), Vol. 74, Iss. 12, 1995. 170250.
122. Tolos A.I., Garciandia F., Zubiri F. et al. Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by “selective laser melting” follow in different manufacturing strategies // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51(5-8), 2010. – P. 639-647.
123. Попов А.Ю. Компьютерное моделирование гидродинамических эффектов // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*, №3, 2017. – С. 35-38.
124. Моделирование распределения воздушного потока в программном комплексе solidworks / *Flow Simulation Dassault Systems SolidWorks Corporation*. SolidWorks Flow Simulations 2009. – Электронный ресурс <http://mexalib.com/view/48303>.
125. Ошовский В.В. Компьютерное моделирование гидродинамических эффектов, возникающих в сужающем устройстве // *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія*, №2(21), 2013. – С. 168-168.
126. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений // *Лекции по математическим моделям и численным методам в динамике газа и жидкости*. – М.: Научный Мир, 2007. – 350 с.
127. Dhatt G., Touzot G., Lefrançois E. *Finite Element Method*. – ISTE Ltd 2012. – 600 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118569764>
128. Карвацький А. Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 391 с.

129. Сливинский А.А., Препияло А.А., Бондаренко В.Л., Слюта В.П. Расчетно-экспериментальный анализ тепловых процессов сварки // Технологические системы, №1, 2014. – С. 76-83.
130. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях [Текст]: навч. посіб. / В.М. Прохоренко, О. В. Прохоренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 268 с. – Бібліогр.: с. 267. – 200 пр.
131. Hu M. Research on Teaching of Arc Welding Robot based on Simufact Welding Simulation // Advances in Social Science, Education and Humanities Research, Vol. 176, 2nd International Conference on Management, Education and Social Science (ICMESS 2018), 2018. – P. 1836-1839. DOI: <https://doi.org/10.2991/icmess-18.2018.411>
132. Buchatskiy R.A., Sharygin E.Y., Skvortsov L.V. et al. Dynamic compilation of SQL queries for PostgreSQL // Proceedings of the Institute for System Programming of RAS, V. 28(6), 2016. – P. 37-48. DOI: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28\(6\)-3](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28(6)-3)
133. Математичний пакет програм *Matlab R2013b*. Електроний ресурс: https://www.academia.edu/2530900/Neural_Networks_MATLAB_Toolbox_Manual
134. Kohonen T. The Self-Organizing Map // Proceedings of the IEEE, V. 78, 1990. – P. 1464-1480. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/5.58325>
135. Kohonen T. Learning Vector Quantization // Self-Organizing Maps, Springer Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. – P. 245-261. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-56927-2_6

Додаток А



**Товариство із обмеженою відповідальністю
«Зовнішньоекономічне представництво китайсько-українського
інституту зварювання ім. Є.О.Патона»**

03680, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 6.11, п/р UA153223130000026009010055634,
Код ЄДРПОУ 37723911, індивідуальний податковий номер 377239126500, Свідоцтво ПДВ № 200023717,
тел. +38-(044)-353-40-86; +38-(044)-353-39-98; факс +38-(044)-247-44-57;

№151 від 10 жовтня 2022 р.

**ДОВІДКА
про впровадження результатів науково-дослідної роботи**

ТОВ «Зовнішньоекономічне представництво Китайсько-українського Інституту зварювання ім. Є.О.Патона (ТОВ «ЗЕП КУІЗ») інформує, про впровадження наукових і практичних результатів дисертаційної роботи Войтенка О.М. «Мікроплазмове адитивне наплавлення просторових виробів з металевих матеріалів» при виробництві і введення в експлуатацію наступного обладнання для адитивного виробництва:

1) Технологічний комплекс (3D принтер) для адитивного мікроплазмового порошкового наплавлення металевих виробів PLAZER 3D SYSTEM, який було поставлено і введено в експлуатацію в 2018 році в Південно-китайському технологічному університеті (м. Гуанчжоу, КНР).



Зовнішній вигляд 3D принтера PLAZER 3D SYSTEM для отримання об'ємних металевих виробів адитивним мікроплазмовим порошковим наплавленням в процесі введення в експлуатацію

Вказане обладнання крім плазмової системи, включає тривимірний позиціонер (маніпулятор) з робочим полем X:Y:Z-500×400×400 мм із столом для базування тривимірних об'єктів. Програмне забезпечення комплексу PLAZER 3D SYSTEM забезпечує генерування коду програми з цифрових моделей об'ємних виробів для

подальшого виготовлення просторових, металевих виробів шляхом маніпулювання просторовим положенням робочого інструменту (плазмотроном), що впливає високотемпературним потоком плазми на металевий порошок. Обладнання дозволяє виготовляти те саме виробу з різним металевим складом, шляхом комбінування металевих порошків, а також вивчати вплив режимів наплавлення та термообробки на будову металу (розмір зерна, виділення фазових складових) та його фізико-механічні характеристики.

2) Роботизована технологічна дільниця для 3D друку крупногабаритних металевих виробів із використанням зварювальних плазмово-дугових технологій і Науково-дослідному Інституті зварювальних технологій в провінції Чжецзян, м. Ханчжоу, КНР (2022 рік).



Фрагмент роботизованої технологічної дільниці для 3D друку крупногабаритних металевих виробів в Науково-дослідному Інституті зварювальних технологій в провінції Чжецзян

До комплексу обладнання роботизованого комплексу входять як безпосередньо робот із вильотом руки робота (до 1800 мм) і системою переміщення (до 3000 мм), із місцем друку 3D об'єктів (наприклад, стандартним зварювальним столом із стандартними складально-зварювальними пристроями), так і стойка із джерелами живлення робота, мікроплазмотрона, шафою адаптації команд для робота та автоматизованою системою моніторингу, так і інтелектуальна система керування з інтегрованою системою автоматичного моніторингу.

Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи Войтенка О.М., які були впроваджені при виготовленні двох вказаних типів обладнання наступні:

- Рекомендації по оптимальним конструктивним параметрам плазмотрона для мікроплазмового адитивного наплавлення
- Рекомендації по створенні інтелектуальної системи збору даних, яка слугує хабом для під'єднання до датчиків та розумних пристроїв в системі (такі як джерело

живлення, плазмовий модуль, маніпулятор (робот), система керування порошковим живильником, тощо) по спеціальних інтерфейсах зв'язку

- Рекомендації по вибору програмного забезпечення для програмування руху плазмотрону по заздалегідь запрограмованій траєкторії мовою G-код у випадку трикоординатного маніпулятора, або в режимі реального часу у випадку робота, якщо керування відбувається зі зворотнім зв'язком та коригується обчислювальною системою в режимі реального часу.

- Рекомендації по закономірностям впливу технологічних параметрів на особливості формування та структуроутворення наплавлених шарів при адитивному мікроплазмовому наплавленні порошкових і дротових сталевих присаджувальних матеріалів

- Рекомендації по оформленню інструкції по експлуатації даного обладнання.

Директор



А.О.Альошин

Додаток Б



Товариство з обмеженою відповідальністю
НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР «ПЛАЗЕР»



Україна, 01011, м. Київ, вул. Мирного Панаса, 6.11, оф.1/28, код ЄДРПОУ 38388946,
IBAN UA343223130000026002010060574,
Індивідуальний податковий номер 383889426557, свідоцтво платника ПДВ № 200119889,
Тел.: +38-044-353 39-98, факс: +38-044-247-44-57
www.plazer.com.ua E-mail: vukorzhuk@gmail.com; plazer@ukr.net; plazer2010@meta.ua

№25-37 від 5 жовтня 2022 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи Войтенка О.М.

Протягом 2018-2020 р.р. на технологічній дільниці ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР» був виконаний комплекс робіт по розробці та виготовленні інтелектуального обладнання для 3D друку із використанням плазмових адитивних технологій, в процесі яких впроваджено рекомендації і практичні результати дисертації Войтенка О.М. «Мікроплазмове адитивне наплавлення просторових виробів з металевих матеріалів», а саме:



Комплекс обладнання для автоматизованого 3D друку металевих об'єктів розміром до 500×400×400 мм на базі 3D маніпулятора



Роботизований комплекс обладнання для автоматизованого 3D друку металевих об'єктів невеликих і середніх розмірів з вильотом руки робота до 1400 мм

Вказані роботи по створенню даного обладнання проводились в рамках науково-технічної кооперації в рамках діяльності «Спільної навчально-наукової

лабораторії зварювання і споріднених процесів», яка утворена згідно Угоди про співробітництво №2500/17-0 від 13.06.2019 між Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР», Зовнішньо-економічним представництвом Китайсько-українського інституту зварювання ім. Є.О. Патона та Корпорацією «Укрспецтехнології».

В процесі розробки та виготовлення вказаного обладнання були впроваджені такі науково-практичні результати дисертаційної роботи Войтенка О.М.:

-
- Новий підхід по побудові системи автоматичного моніторингу процесу мікроплазмового наплавлення, що включає поєднання таких двох інструментів автоматизації контролю якості, як контроль в реальному часі за допомогою нейронних мереж і розрахункове прогнозування температури та напружено-деформованого стану. Така система виявляє кореляції між вимірними параметрами мікроплазмового наплавлення та їх впливом на якість об'єктів, що виготовляють наплавленням, без втручання людського фактору.
- Рекомендації по побудові системи автоматичного моніторингу якості та регулювання параметрів технології мікроплазмового пошарового наплавлення, яка здійснює зворотній зв'язок між існуючими параметрами (законами), за якими система створює програмні інструкції і їх необхідними корекціями.
- Рекомендації по застосуванню контролю фізичних параметрів наплавлення та їх аналізу штучною нейронною мережею, яка оснащена зворотнім зв'язком із системою керування для автоматичного урегулювання параметрів наплавлення в режимі реального часу.
- Рекомендації щодо поєднання системи автоматично моніторингу процесу адитивного мікроплазмового наплавлення із прогнозуванням температурних розподілів та напружено-деформованого стану об'єктів, що виготовляються, методом скінченних елементів в програмному комплексі Simufact welding.

Директор



М.Ф. Короб