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 дротових 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 дротів, 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 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 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 порівняні 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 мікроплазмового 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 мікроплазмовому наплавленні порошкових і дротових 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 мікроплазмового 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 300×200×200 до 1000×900×900 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, РТА). 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 якість/вартість доцільно використовувати адитивне мікроплазмове (робочий струм до 50 А) наплавлення з використанням порошкових і дротових присаджувальних матеріалів. Для цього необхідно застосовувати розширену систему моніторингу і керування праметрами 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 урахуванням наявного технологічного обладнання обрано необхідні присаджувальні (наплавочні) дротові 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 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. 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 (НV 1626…1705 МПа) до вільної поверхні (НV 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 моніторінгу 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=500×400×400 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 300×200×200 to 1000×900×900 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**, thebasic 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 = 500×400×400 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 – Р. 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. – Р. 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 нержавеющих 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. – C. 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. – Р. 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. – Р. 57-60.

16. Nano-scale non-metallic microstructure modifier in materials for aluminum welding and 3D printing / Korzhyk V. M., Shcheretskyi V. O., Demianov O. I., Crynyuk 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. – Р.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 І // 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. – Р. 77-79.